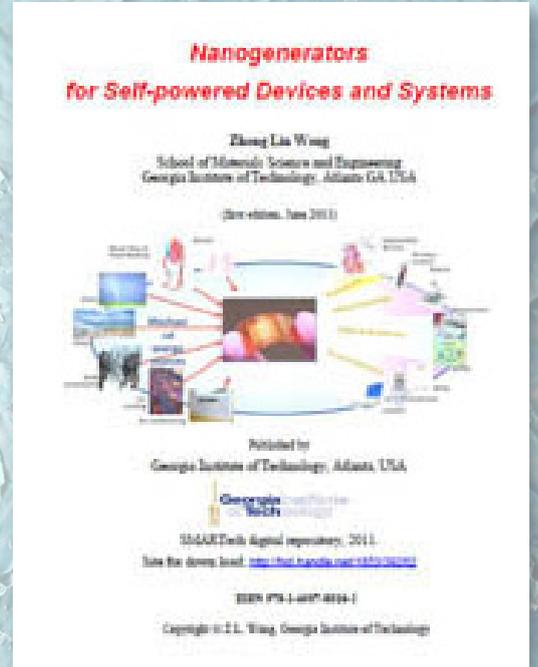




المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم

المولدات النانوية للأجهزة والأنظمة ذاتية التغذية



Nanogenerators for Self-powered Devices and Systems

نوفمبر 2016

أصدرته إدارة العلوم والبحث العلمي

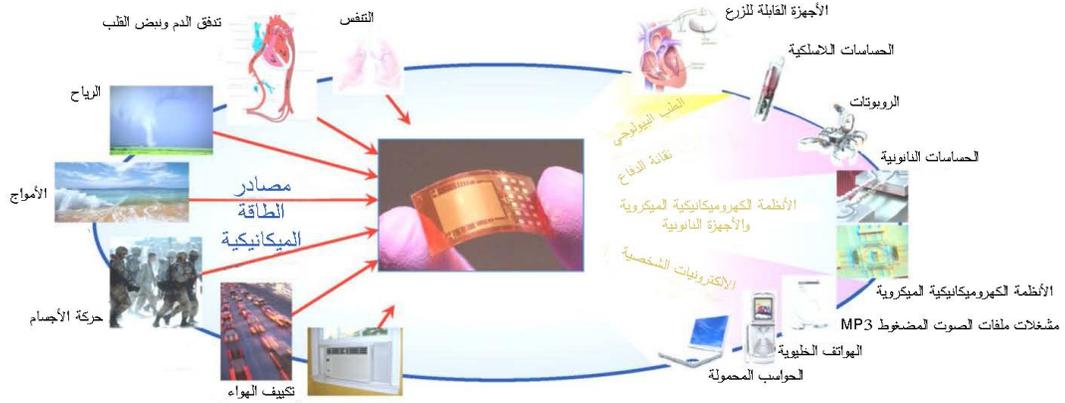
تمت الترجمة في المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر



المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم

المولدات النانوية للأجهزة والأنظمة ذاتية التغذية

تأليف زونغلين وانغ
مدرسة علم المواد وهندستها
معهد جورجيا التقني، أتلانطا، ولاية جورجيا، الولايات المتحدة الأمريكية
(الإصدار الأول، حزيران 2011)



نُشِرَ من قبل

معهد جورجيا التقني، أتلانطا، الولايات المتحدة الأمريكية



نوفمبر 2016

أصدرته إدارة العلوم والبحث العلمي

تمت الترجمة في المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر

زونغ لين وانغ

المولدات النانوية للأجهزة والأنظمة ذاتية التغذية / زونغ لين وانغ؛ ترجمة المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر. - تونس: المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، إدارة العلوم والبحث العلمي، 2016. - 192 ص.

العنوان الأصلي: Nanogenerators for Self-powered Devices and Systems

ISBN : 978-9973-15-372-2

ع/001/11/2016



المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم

ترجمة

أ.د. هاشم ورقوزق

المراجعة العلمية

أ.د. محمد علي سلامة

التدقيق اللغوي

د. شوقي معري

تصميم غلاف

أ. طارق الدريدي

شكر وتقدير

تتقدّم المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم إلى المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر بخالص التقدير والشكر على ترجمة الكتاب الصادر في شهر يونيو 2011، عن معهد جورجيا التقاني، اتلاندا-الولايات المتحدة الأمريكية تحت عنوان: Nanogenerators for Self-powred Devices and Systems. والشكر موصول إلى كافة فريق العمل الذي أشرف على الترجمة والتدقيق اللغوي والعلمي للمادة وعلى تعاونهم الجدي في إنجاز هذا العمل المتميز.

والمنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم إذ تقوم بنشر وتوزيع النسخة العربية من هذا الكتاب القيم لإثراء المكتبات والتشجيع منها على تدريس ودراسة العلوم باللغة العربية، فإنّها تلتزم بتوزيعها مجاناً، وبعدم استثمارها لأغراض تجارية.

لمن يرغب من القراء في الاطلاع على النسخة الأصلية باللغة الإنجليزية، يمكنهم استخدام الرّابط التالي:

<http://hdl.handle.net/1853/39262>

ويمكن للراغبين في الاتصال بالمنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم التواصل عبر البيانات التالية:

الهاتف: +216 70 013 900 / الفاكس: +216 71 948 668

البريد الإلكتروني: alecso@alecso.org.tn

العنوان البريدي: شارع محمّد علي عقيد-المركز العمراني الشمالي-تونس

الجمهورية التونسية

تقديم المدير العام

مواصلة لجهودها الزامية في تعزيز دور العلوم والتقانات الحديثة في تنمية مجتمعاتنا العربية والنهوض بها، وتعزيزاً لمساعيها المستمرة لإثراء المكتبات العربية بأهم وأبرز المؤلفات التربوية والثقافية والعلمية، يسرّ المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم أن تقدّم للقراء والباحثين والمهتمين العرب، النسخة العربية من الكتاب الصادر في شهر يونيو 2011، لمؤلفه الدكتور زونغ لين وانغ من معهد جورجيا التقاني، أتلانتا-الولايات المتحدة الأمريكية، بعنوان "المولدات النانوية للأجهزة والأنظمة ذاتية التغذية".

وتأتي أهمية هذا الكتاب في الوقت الذي يتزايد فيه الإهتمام والبحث في مختلف مجالات المعرفة لتطوير أنواع جديدة ومحسّنة لتقنيات إنتاج الطاقة التي قد تؤدي إلى القدرة على تحسين واقع الحياة، حيث يسعى الباحثون والعلماء في المجالات والتخصّصات العلمية وبشكل متواصل للولوج إلى التقانات المتطورة والحديثة من خلال تطوير وتصميم تطبيقات النانو "النانو تكنولوجي"، ومواعمتها لإيجاد طرق جديدة للحصول على الطاقة وتخزينها ونقلها، والعمل على إستدامتها وتطويرها لمجابهة التحدّيات التي يواجهها العالم أمام نقص موارد الطاقة.

والمنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، إذ تقدّم للقراء والمهتمين والباحثين العرب هذا الكتاب، فإنّها تدعو وتشجع الاستفادة من التوضيحات العلمية والتطبيقات العملية التي يسردها، والمتمثلة في كيفية صنع وإستغلال مختلف أنواع المولدات النانوية ذاتية التغذية، والتي من شأنها أن تساهم في خلق صناعات جديدة ربحية وغير مكلفة، وقد تكون من العوامل الرئيسية الأكثر إستجابة لتنمية مجتمعاتنا العربية في المجالات الاقتصادية والصناعية والاجتماعية.

والسلام عليكم ورحمة الله وبركاته،،،

الأستاذ الدكتور عبد الله حمد محارب

المدير العام

تقديم إدارة العلوم والبحث العلمي

“المولدات النانوية للأجهزة والأنظمة ذاتية التغذية”، كتاب صدر عن معهد جورجيا التقاني، أتلانتا-الولايات المتحدة الأمريكية، وتستند مادته العلمية على نتائج الأبحاث العلمية الهندسية المنشورة منذ العام 2006 في مجال تكنولوجيا النانو “النانو تكنولوجي”، وقد جاء ليسلط الضوء على “التقانة النانوية ذاتية التغذية” الهادفة إلى تغذية الأجهزة والأنظمة النانوية وطرق تصنيعها وتطبيقاتها التكنولوجية في مجال الطاقة.

وتقدّم إدارة العلوم والبحث العلمي، بالمنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، للقراء والمهتمين في الوطن العربي هذا الكتاب القيم باللغة العربية في ظلّ الاهتمام الواسع الذي تحظى به تقانات النانو من قبل العلماء والباحثين في مختلف المجالات والتخصّصات العلمية في كلّ أنحاء العالم، وخاصّة بالدول المتقدّمة التي تسعى وبشكل جدّي إلى توسيع نطاق التوظيف المناسب لهذه التقانة. ويعدّ تصنيع وتطوير الأجهزة النانوية وأساليب توظيفها في مجال الطاقة من أهمّ المساعي العلمية والبحثية والهندسية في العالم لتطوير طرق جديدة للحصول على الطاقة وتخزينها ونقلها بشكل فعّال ومستدام.

يضمّ الكتاب أحد عشر فصلاً، تضمّن كلّ منها العديد من المبادئ العلمية النظرية والتطبيقات الهندسية التي تتيح للباحثين، والأكاديميين، وطلّاب الدراسات العليا، ومهندسي تقانات النانو تكنولوجي تطوير معارفهم ومهاراتهم العلمية والهندسية في الاستخدام الأمثل للمواد النانوية وتوظيفاتها التقنية، كما تتيح للعاملين في مجال الصناعات التعلّفة على أساليب جديدة لتصنيع وتطوير مختلف أنواع المولدات النانوية (ذات الخرج الكبير، عالية الخرج، وذات الأساس الليفي)، وأساليب تجميع مختلف أنواع الطاقة (الجوفية، العضوية، النووية، الرياح، الهيدروجين، ...) باستخدام الخلايا الهجينة والحساسات ذاتية التغذية والأنظمة التابعة لها، وكيفية تصميم بنيتها ومبادئ تشغيلها، لهدف تغذية الأجهزة والأنظمة النانوية. ويتطرّق الكتاب إلى سبل توظيف الأسلاك النانوية الكهروضغطية لغرض تحويل الطاقة الشمسية والميكانيكية إلى طاقة كهربائية، والبحث في سبل استقلالية وديمومة الأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية والأجهزة الإلكترونية، لتكون قادرة على التحسّس والتأقلم مع البيئة المحيطة بها وتستجيب لمعالجة الأشياء واتخاذ الإجراءات وإنجاز الوظائف المعقّدة.

والله ولي التوفيق،،،

الأستاذ الدكتور أبو القاسم حسن البديري

مدير إدارة العلوم والبحث العلمي

المحتويات

11	مقدمة
12	تعريف بالمؤلف
13	الفصل الأول: مقدمة
13	1.1. تغذية الأجهزة النانوية
14	1.2. شبكة حساس ذاتي التغذية وأنظمتها
16	1.3. تجميع الطاقة الميكانيكية
18	1.4. المولد النانوي
19	1.5. المراجع
20	الفصل الثاني: المواد النانوية للمولدات النانوية
20	1.2. البنية البلورية لأكسيد الزنك ZnO
22	2.2. السلك النانوي/ الحزام النانوي المنمى بعملية بخار – صلب – صلب
23	2.3. مصفوفات السلك النانوي المنمى بعملية بخار – سائل – صلب
26	2.4. مصفوفات السلك النانوي المنمى بواسطة الترسيب بالليزر النبضي
28	2.5. مصفوفات السلك النانوي المنمى بالطريقة الكيميائية
28	2.5.1. الطرائق الأساسية
31	2.5.2. النمو المنمذج لمصفوفة سلك نانوي متراص شاقولياً
33	2.5.3. النمو على ركائز مرنة
35	2.5.4. نمو مصفوفات السلك النانوي على ألياف ميكروية
35	2.5.5. النمو المنمذج لمصفوفة سلك نانوي متراص جانبياً
37	2.6. نمو مصفوفات سلك نانوي في مستوى الرقاقة بالنمذجة الليزرية
39	2.7. فيلم أكسيد الزنك المنسوج
40	2.8. المراجع
41	الفصل الثالث: الكهرياء الضغطية والكمون الضغطي
41	3.1. المعادلات الناظمة
42	3.2. نظرية المراتب الثلاثة الأولى للاضطراب
44	3.3. الحل التحليلي للسلك النانوي الشاقولي
47	3.4. كمون الضغط لسلك نانوي منحرف عرضياً
48	3.5. سبر الكمون الضغطي لسلك نانوي ينحني عرضياً
48	3.6. الكمون الضغطي لسلك نانوي مُجهَد محورياً
51	3.7. الكمون الضغطي المتوازن في سلك نانوي نصف ناقل مشاب
52	3.7.1. الإطار النظري

53	3.7.2. الكمون الضغطي المحسوب مع اعتبار الإشابة.....
58	3.7.3. تأثير تركيز الإشابة.....
60	3.7.4. تأثير نوع الحامل.....
61	3.8. المراجع.....
62	الفصل الرابع: مبادئ المولدات النانوية.....
62	4.1. المولدات النانوية باستخدام أسلاك نانوية متراسة شاقولياً.....
62	4.1.1. مفهوم المولدات النانوية الكهروضغطية.....
63	4.1.2. حاجز شونكي عند السطح البيني إلكترود – سلك نانوي.....
65	4.1.3. توليد الشحنة وعمليات الخرج.....
68	4.1.4. مبدأ المولد النانوي للمواد من النمط n (n-type).....
70	4.2. المولد النانوي للمواد من النمط p (p-type).....
70	4.2.1. ميزات إشارات الخرج.....
72	4.2.2. المعيار للتمييز بين أسلاك نانوية من النمط n- ومن النمط p-.....
75	4.3. المولد النانوي المبني على أنواع أخرى من الأسلاك النانوية المتمتعة ببنية فورترزيت (Wurtzite).....
76	4.4. مولد نانوي مبني على أسلاك نانوية مُحزّمة جانبياً.....
76	4.4.1. التصميم الأساس.....
78	4.4.2. قياسات الخرج.....
81	4.4.3. مبدأ المولد النانوي.....
83	4.4.4. التوصيلات الخطية.....
85	4.4.5. مردود تحويل الاستطاعة.....
86	4.4.6. تجميع الطاقات الميكانيكية الحيوية.....
88	4.5. المراجع.....
89	الفصل الخامس: توصيف خروج المولد النانوي.....
89	5.1. تيار الخرج.....
90	5.2. توتر الخرج.....
92	5.3. الملخص.....
92	5.4. المراجع.....
93	الفصل السادس: المولدات النانوية ذات الخرج الكبير – مصفوفات السلك النانوي الشاقولي.....
93	6.1. المولد النانوي المقاد بالأمواف فوق الصوتية.....
93	6.1.1. لماذا المأخذ (الالكترود) على شكل متعرج (زكزاك)؟.....
94	6.1.2. آلية العمل.....
95	6.1.3. الخرج عندما يكون التردد 50 كيلو هرتز.....

96	6.2 عملية التكامل بين الطرفين النانوي – إلى – السلك النانوي
97	6.2.1 طريقة التصنيع
98	6.2.2 آلية التشغيل
101	6.2.3 الأداء المُحسَّن
103	6.3 المولدات النانوية المدمجة (المتكاملة) بنهايات موصلة جيداً
104	6.3.1 تصميم البنية
105	6.3.2 مبدأ العمل
105	6.3.3 الخرج المحسن
106	6.3.4 حساس نانوي ذاتي التغذية
107	6.4 المراجع
108	الفصل السابع: المولدات النانوية عالية الخرج – مصفوفات السلك النانوي الجانبية
109	7.1 المولد النانوي المدمج (المتكامل) جانبياً (LING) [5]
109	7.1.1 تصنيع الجهاز
111	7.1.2 قياسات الخرج
113	7.2 المولد النانوي المرن عالي الخرج [12]
113	7.2.1 المبدأ والتصنيع
116	7.2.2 قياسات الخرج
117	7.2.3 تخزين الطاقة المؤددة
119	7.3 تغذية صمام ثنائي (ديود) باعث للضوء
120	7.4 المراجع
121	الفصل الثامن: المولدات النانوية عالية الخرج – الأسلاك النانوية اللاتماسية
121	8.1 التصميم الأساس
122	8.2 آلية العمل
128	8.3 الخرج العام
128	8.4 قيادة جهاز إلكتروني تقليدي
129	8.5 ملخص
130	8.6 المراجع
131	الفصل التاسع: المولدات النانوية ذات الأساس الليفي
131	9.1 البنية الهجينة من ليف ميكروي وسلك نانوي
131	9.1.1 تصنيع البنية
133	9.1.2 تصنيع المولد الليفي
134	9.1.3 آلية العمل

136	9.1.4 قياسات الخرج.....
137	9.1.5 تحسين الأداء.....
138	9.1.6 الملخص.....
139	9.2 المولدات النانوية الليفية المرنة المقادة بالضغط.....
140	9.2.1 نمو الفيلم الرقيق المنسوج قطرياً من أكسيد الزنك على الألياف.....
141	9.2.2 مبدأ عمل المولد النانوي الليفي.....
143	9.2.3 مولد نانوي ليفي مقاد بضغط الهواء.....
143	9.2.4 مولد نانوي ليفي / حساس مقاد بالزفير.....
143	9.2.5 المولد النانوي المقاد بنبض المعصم كحساس ضغط.....
144	9.2.6 الملخص.....
145	9.3 المراجع.....
146	الفصل العاشر: الخلايا الهجينة لتجميع أنواع متعددة من الطاقات.....
146	10.1 الخلية الهجينة لتجميع الطاقة الشمسية والميكانيكية.....
147	10.1.1 تصميم البنية.....
149	10.1.2 مبدأ العمل.....
149	10.1.3 توصيف الخرج.....
152	10.2 الخلية الهجينة لتحقيق التجميع المتزامن لكل من الطاقة الكيمياحيوية والميكاحيوية.....
153	10.2.1 مولد نانوي مبني على البولي فينيل ديغلورايد (PVDF).....
155	10.2.2 تجميع الطاقة الكيمياحيوية بواسطة خلية وقود حيوي.....
156	10.2.3 المولدات النانوية الكيمياحيوية والميكاحيوية الهجينة.....
158	10.2.4 تغذية الحساس النانوي بخلية هجينة.....
159	10.3 المراجع.....
160	الفصل الحادي عشر: الأنظمة والحساسات ذاتية التغذية.....
160	11.1 مفهوم النظام ذاتي التغذية.....
162	11.2 تصميم المولد النانوي.....
165	11.3 تخزين الشحنة بواسطة مكثف فائق التخزين.....
166	11.4 حساس فوتوني ذاتي التغذية ونظامه.....
168	11.5 نظام تحسس بيئي ذاتي التغذية.....
171	11.6 المراجع.....
172	المراجع.....
179	ترجمة المصطلحات.....

المقدمة

منذ أن عرضنا أولى المولدات النانوية عن طريق استخدام الأسلاك النانوية الكهروضغطية لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية ((Wang & Song, Science, 312, 242–246 (2006))، ظهر اهتمام كبير أثار العالم ودفعه نحو تطوير طرائق مختلفة لتجميع الطاقة. إن الفكرة الأساس، التي جرى عرضها في الورقة العلمية المنشورة في عام 2006 بعنوان: "التقانة النانوية ذاتية التغذية"، تهدف إلى تغذية الأجهزة النانوية، والأنظمة النانوية، وذلك من خلال استخدام الطاقة المستمدة من بيئة عمل هذه الأجهزة. لقد قمنا بنشر سلسلة أوراق علمية خلال ستة أعوام غطت كلاً من النظرية الأساسية للمولدات النانوية وآلية عملها وتطورها الهندسي والتطبيقات الممكنة لها (انظر الملحق). ويهدف تقديم عرض شامل ومنسّق حول تطوير المولدات النانوية، قُمت بإعداد هذا الكتاب معتمداً على أبحاثنا المنشورة. ونشجع القارئ بالعودة إلى الأوراق الأصلية المنشورة من قبلنا للبحث في التفاصيل والإسنادات.

خلال تأليف هذا الكتاب، قررت استعمال أسلوب جديد للتوزيع والنشر، إذ بدلاً من بيع نسخ مطبوعة، أحببت توزيع هذا الكتاب مجاناً من خلال شبكة الإنترنت، وبذلك تستفيد منه شريحة أوسع من القراء. كما يمكن للقراء تنزيل النسخة الرقمية من الكتاب مجاناً واستخدامه لأغراض غير تجارية. نحن نملك حقوق النشر والتأليف للكتاب، ونحتفظ بحقنا في إجراء أي مراجعة أو تغيير. ويُعد معهد جورجيا التقاني الناشر الرسمي للكتاب.

الرجاء استخدام المقطع التالي إذا ذكر هذا الكتاب في المنشورات الرسمية:

Zhong Lin Wang, Nanogenerators for self-powered devices and systems, Georgia Institute of Technology, SMARTech digital repository, 2011 (<http://hdl.handle.net/1853/39262>).

ختاماً، أود أن أشكر جميع أعضاء مجموعة العمل والمساعدين، الذين أسهموا في تطوير المولدات النانوية، ودون ترتيب خاص:

Jinhui Song, Xudong Wang, Rusen Yang, Yong Qin, Jun Zhou, Youfan Hu, Sheng Xu, Yaguang Wei, Yong Ding, Puxian Gao, Jr-Hau He, Peng Fei, Yan Zhang, Jin Liu, Will Hughes, Zhou Li, Yifan Gao, Wenzhuo Wu, Qing Yang, Guang Zhu, Zetang Li, Changshi Lao, Ming-Pei Lu, Cheng Li, Chen Xu, Ben Hansen, Yi-Feng Lin, Giulia Mantini, Shisheng Lin, Joon Ho Bae, Minbaek Lee, Chi-Te Huang, Sihong Wang, Ying Liu, Zhiyuan Gao, Yudong Gu, Jung-il Hong, Yolande Berta, Yue Zhang, Robert Snyder, Lih-J. Chen, S.-Y. Lu, Li-Jen Chou, Aurelia Wang and many others.

ونقر بالدمع المالي الكبير المقدم من:

DARPA, NSF, DOE, NASA, Airforce, NIH, Samsung, MANA NIMS, Chinese Academy of Sciences and Chinese Scholars Council.

أود أن أشكر كلاً من معهد جورجيا التقاني ومركز توصيف البنية النانوية (CNC) للدمع المقدم من قبلهما في التسهيلات والبنية التحتية للبحث. أخيراً والأكثر أهمية، أود شكر زوجتي وبناتي لسنوات دعمهم وتفهمهم، إذ من غير الممكن إنجاز مثل هذه الأبحاث دون دعمهم.

Zhong Lin (Z.L.) Wang

Georgia Institute of Technology, USA

e-mail: zlwang@gatech.edu

Personal website: <http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/>

تعريف بالمؤلف

يشغل الدكتور زونغ لين وانغ أعلى مرتبة في علم المواد وهندستها، وهو بمرتبة أستاذ، وأستاذ متميز في الهندسة ومدير مركز توصيف البنية النانوية في معهد جورجيا التقاني. ويُعد الدكتور وانغ عضواً زائراً للأكاديمية الصينية للعلوم وزميلًا في الأكاديمية الأوروبية للعلوم وزميلًا للجمعية الأمريكية للفيزياء وزميلًا في الجمعية الأمريكية لتقدم العلوم (AAAS) وزميلًا لجمعية الأمريكية للفحص المجهرية وزميلًا لجمعية بحوث المواد. استحق عام 2001 جائزة S.T.L. لمساهمته المتميزة في علم النانو وتقانة وتسلم في عام 1999 وسام BURTON من الجمعية الأمريكية للفحص المجهرية. ونال في عام 2009 جائزة PURDY من الجمعية الأمريكية للسيراميك.

قدم الدكتور وانغ مساهمات أصيلة ومبتكرة في كل من تجميع الروابط النانوية لحزم الأكسيد النانوية والأسلاك النانوية واكتشافها وتوصيفها وفهم الخواص الفيزيائية الأساسية لها، إضافة إلى مساهمته في التطبيقات المجرأة على الأسلاك النانوية في كل من علوم الطاقة وعلم الإلكترونيات وعلم الإلكترونيات الضوئية وعلم الأحياء (البيولوجيا). ولقد شكلت الابتكارات والاختراعات، التي أحدثتها في تطوير المولدات النانوية، شكلت الأساس لخارطة الطريق المبدئية والتقانية في تجميع الطاقة الميكانيكية الناجمة عن كل من الأنظمة البيئية والحيوية وتسخيرها في تغذية الأجهزة الإلكترونية الشخصية. ولقد حرصت أبحاثه في مجال الأنظمة النانوية ذاتية التغذية الهمة على المستوى الدولي للبحث الأكاديمي والصناعة بغية دراسة الطاقة الناتجة في الأنظمة الميكرو-نانوية، إذ يساعد ذلك حالياً الناظم المميز لكل من بحوث الطاقة وشبكات الاستشعار عن بعد في المستقبل.

لقد صاغ وكان رائداً في حقل الإلكترونيات الضغطية والإلكترونيات الضوئية الضغطية، وذلك من خلال إدخاله للكمون الكهروضغطي، الذي فتح الأبواب واسعة أمام عملية نقل الشحنة بهدف تصنيع الأجهزة الإلكترونية ومثيلاتها الإلكترونية الضوئية الجديدة. ويتمتع هذا الإنجاز الخارق بتطبيقات مهمة في كل من الأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية الذكية والأنظمة الكهروميكانيكية النانوية الذكية Smart NEMS/MEMS والروبوتات النانوية ووصل الإلكترونيات والحساسات مع الجسم الحي. ولقد اخترع وانغ تقنية الموقع (in-situ)، وكان رائداً له بهدف إجراء القياس لكل من الخواص الكهربائية والميكانيكية لأنبوب نانوي أحادي/أو سلك نانوي أحادي داخل المجهر الإلكتروني النافذ (TEM) ذكرت منشورات وانغ أكثر من 000,43 مرة حتى شهر تموز عام 2011. وبلغ مؤشر H، لمدى الاستفادة من أبحاثه، بلغ المئة. ويمكن الحصول على التفاصيل من خلال الموقع:

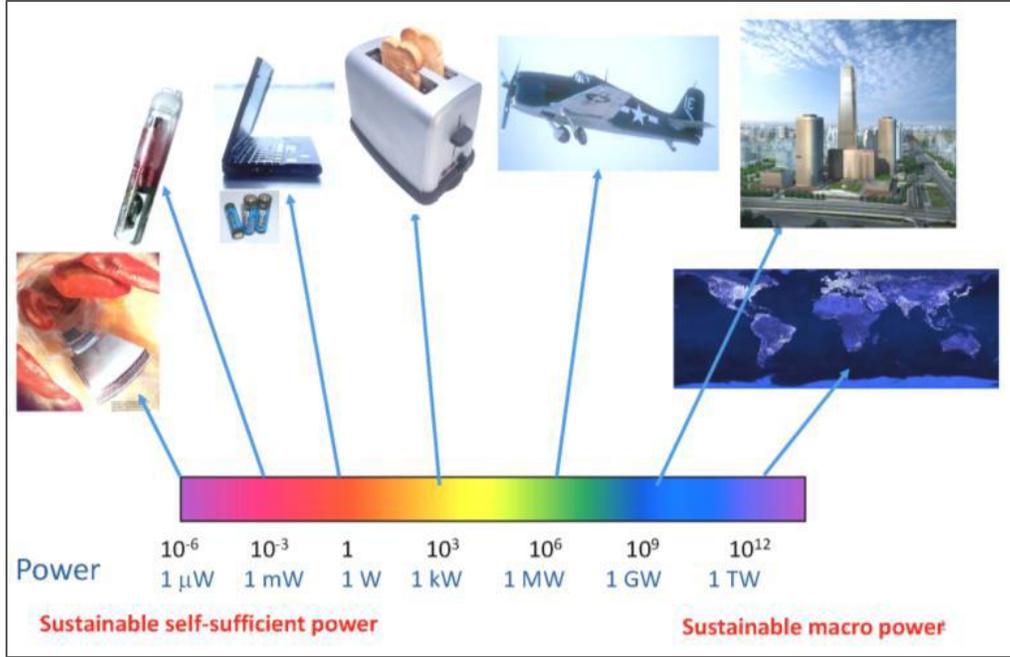
<http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang>

الفصل الأول: مقدمة

1.1. تغذية الأجهزة النانوية

مع ازدياد الضرر الناجم عن ارتفاع حرارة الكون وأزمات الطاقة، يُعدّ البحث عن مصادر للطاقة البديلة والخضراء من أكثر التحديات أهميةً بغية الوصول إلى تطور مستدام للحضارة الإنسانية [1,2]. وعلى الرغم من الانتشار الواسع لمصادر الطاقة المعروفة، التي تغذي عالم اليوم، مثل البترول والفحم والطاقة المائية والغاز الطبيعي والوقود النووي، لا يزال البحث والتطوير جارياً لاكتشاف مصادر طاقة بديلة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الحرارة الجوفية والعضوية والنووية وطاقة الرياح والهيدروجين. أما على النطاق المحدود، فإن كلاً من الطاقة وتقاناتها بحاجة ماسة إلى كل من الاستقلالية والديمومة وانعدام الصيانة والتشغيل المستمر لكل من الحساسات الحيوية المزروعة ومثيلاتها الحيوية الجزيئية والكيميائية فائقة الحساسية والروبوت النانوي والأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية وحساسات الوسط ذات التحكم عن بعد والمنتقلة وحساسات الأمان الوطني والأجهزة الإلكترونية الشخصية المحمولة أو التي يمكن ارتداؤها. فمثلاً، يفترض أن يكون الروبوت النانوي آلة ذكية ربما تكون قادرة على التحسس والتأقلم مع البيئة المحيطة ومعالجة الأجسام (أو الأشياء) واتخاذ الإجراءات وإنجاز وظائف معقدة. ولكن التحدي الرئيس يكمن في إيجاد مصدر للطاقة قادر على قيادة الروبوت النانوي دون إضافة وزن كبير. فعلى سبيل المثال، يتطلب زرع حساس حيوي لاسلكي منبع تغذية يقدم الطاقة بشكل مباشر أو غير مباشر من خلال شحن مدخرة. وعموماً، يكون حجم المدخرة أكبر بكثير من الجهاز النانوي، وهو ما يحدد حجم النظام الداخلي بكامله.

يكمن البحث في المستقبل القريب في إجراء عملية تكامل للأجهزة النانوية متعددة التطبيقات في نظام نانوي، بحيث يستطيع هذا الأخير أن يعمل ككائن حي يتمتع بإمكانات كل من التحسس والتحكم والاتصال والتفعيل / والاستجابة. لا يتكون النظام النانوي من أجهزة نانوية فحسب، وإنما من منبع طاقة نانوي (أو مدخرة نانوية) أيضاً. ولكن الحجم الصغير لهذه المدخرة النانوية يحد، وبشكل كبير، من عمر خدمتها. ويُفضل أن تكون الأجهزة اللاسلكية ذاتية التغذية ودون مدخرة، أما مثيلاتها الطبية الحيوية المزروعة، فالتغذية الذاتية لا بد منها في هذه الحالة، مما يؤدي إلى تحسين تأقلم هذه الأجهزة مع الوسط المحيط من جهة، وخفض كبير لكل من حجم النظام المستخدم ووزنه من جهة أخرى. لهذا، لا بد من تطوير التقانة النانوية القادرة على استخلاص الطاقة من الوسط المحيط بغية تأمين التغذية الذاتية للأجهزة النانوية [3]. ويكمن دور التقانة النانوية في بناء أنظمة نانوية ذاتية التغذية تتمتع بحجم صغير جداً وذات حساسية فائقة ومتعددة الوظائف وقليلة الاستهلاك للطاقة. وبالنتيجة يجب أن تكون الطاقة، المستخلصة من الوسط المحيط، كافية لتشغيل النظام.



الشكل 1.1: مقياس استطاعة التشغيل. كمية الاستطاعة اللازمة لتلبية عملية محددة اعتماداً على القياس ونوع التطبيقات بشكلٍ رئيس. نحتاج على الصعيد العالمي إلى كمية من الاستطاعة من مرتبة التتراوات، أما لقيادة أجهزة صغيرة، فنحتاج إلى استطاعة من مرتبة الميكرووات، إذ إن مجموع الاستطاعة اللازمة لتشغيل مثل هذه الأنظمة ضرورية، حتى إنها لا تقدر بثمن. ولابد من تطوير مناهج مختلفة لحل مشكلة الطاقة العالمية على جميع المستويات.

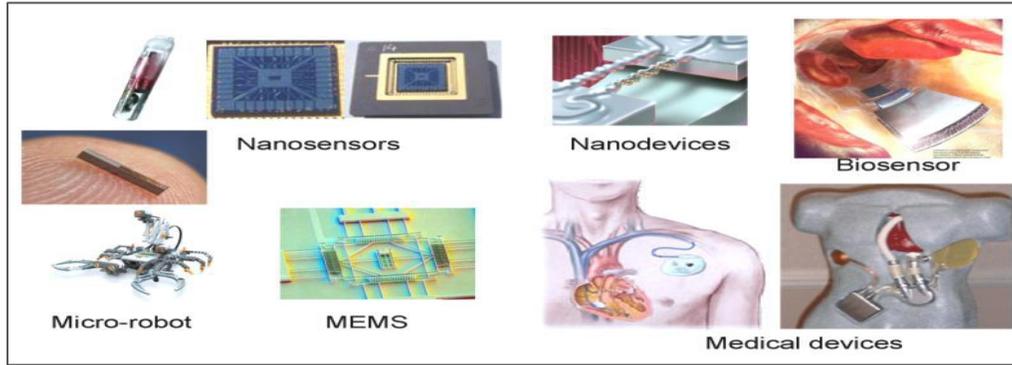
الاستطاعة الماكروية المستدامة - استطاعة الاكتفاء الذاتي المستدامة - الاستطاعة

1.2. شبكة حساس ذاتي التغذية وأنظمتها

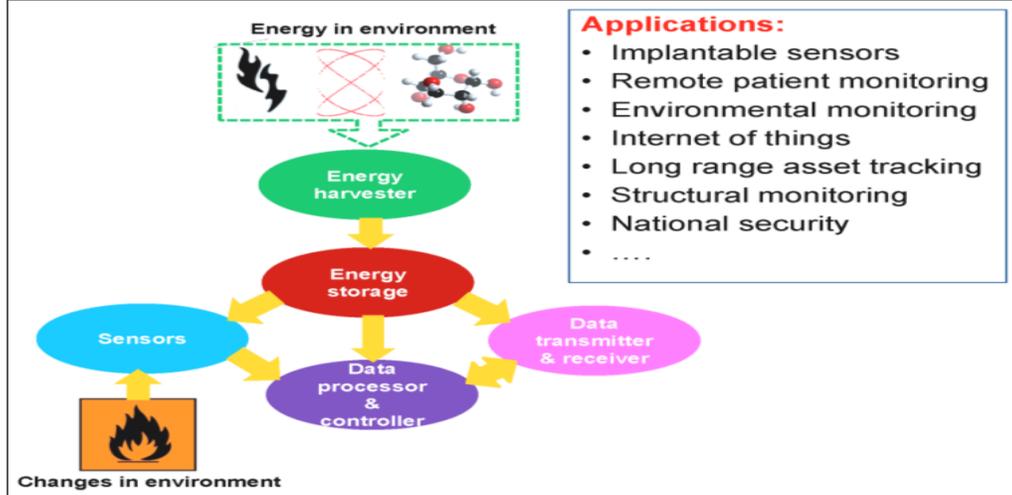
النظام النانوي هو عبارة عن تكامل مجموعة من الأجهزة النانوية متعددة الوظائف، وتتمتع بكل من إمكانية التحسس والتحكم والاتصال والتفعيل/والاستجابة. ويعني استهلاك هذه الأجهزة المنخفض للطاقة أنه يمكن استخدام الطاقة المجمعة من الوسط المحيط لتغذية مثل هذه الأنظمة. وعادةً ما تكون من مرتبة الميكرووات تلك الاستطاعة اللازمة للتشغيل المستقل والدائم ومنعدم الصيانة لكل من الحساسات الحيوية المزروعة ومثيلاتها التي تعمل بالتحكم عن بعد للوسط المحيط المتحرك والروبوتات النانوية والأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية، إضافةً إلى الأجهزة الإلكترونية الشخصية المحمولة/والتي يمكن ارتداؤها. فمثلاً، يستطيع الروبوت النانوي أن ينحسس ويتأقلم مع الوسط المحيط، وأن يُحرّك الأجسام (الأشياء) وأن يتلقى أفعالاً وأن يُنفذ عمليات معقدة. ولكن التحدي الرئيس يكمن في إيجاد منبع استطاعة يكون قادراً على تدوير الروبوت النانوي دون وجود وزن زائد. وتستخدم الحساسات ذاتية التغذية حالياً في مراقبة خطوط نقل النفط/والغاز ولمسافات طويلة.

تُعد الحساسات ذاتية التغذية المكوّن الرئيس لشبكات حساس التسامح في الخطأ (defect tolerant sensor networks)، التي تستخدم جهاز استشعار المعلومات مثل كشف هوية الترددات الراديوية (RFID) والحساسات وأنظمة تحديد المواقع العالمية (GPS)، والمساحات الليزرية المستخدمة في وصل الأجهزة بشبكة الانترنت بهدف تأمين الاتصال مع هذه الأجهزة وكشف هويتها وتحديد موقعها وملاحقتها ومراقبتها وإدارتها. ويمكن عن طريق استبدال عدد محدود وتقليدي من الحساسات المنفصلة بعدد كبير

من مثيلاتها المستقلة والمتحركة يجري توزيعها في حقل العمل، يمكن للتحليل الإحصائي المُجرى على الإشارات، التي يتم تجميعها من خلال الانترنت لجميع هذه الحساسات الموزعة، يمكن أن يُقدم معلومات دقيقة وموثقة. وعلى كل حال، غالباً ما تكون شبكة الحساس غير عملية ما دامت تغذية كل حساس تتم بالطاقة من مدخرة، وذلك نظراً لضخامة عدد الأخيرة والقلق من الناحيتين الصحية والبيئية. وبناءً على ذلك، تستطيع التقانات الحديثة تجميع الطاقة من الوسط المحيط، بحيث تشكل مصادر الطاقة هذه، التي تكون استطاعتها ميكروية/أو نانوية دائمة وكافية ذاتياً، تشكل الحل الممكن. ولكن الطاقة الميكانيكية، المتوافرة في وسطنا المحيط، تتمتع بطيفٍ واسعٍ من الترددات وذات مطالات مُتغيرة مع الزمن. ويطلق على مثل هذا النموذج من الطاقة بالطاقة العشوائية، التي يمكن أن تنتج من الاهتزازات غير المنتظمة والجريان الخفيف للهواء والضجيج والنشاط البشري.



الشكل 2.1: تتراوح قيم الاستطاعة، التي يحتاجها العديد من الأجهزة المصنّعة على أساس تقانة النانو، تتراوح بين الميلي وات والميكرووات. وعلى الرغم من أن الاستطاعة المطلوبة صغيرة، إلا إن توفيرها ضروريّ دون النظر إلى التكلفة. وعلى الرغم من أن المدخرة هي الخيار الأكبر في معظم الحالات، إلا أن تجميع الطاقة من الوسط المحيط يمكن أن يحل محل المدخرة أو أن يُطيل عمر هذه الأخيرة لعملية تشغيل مستدامة.

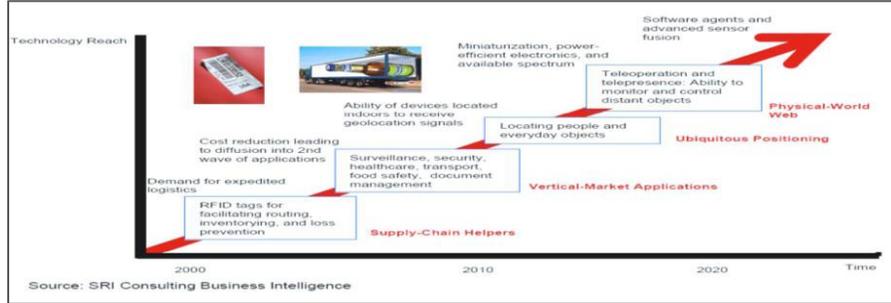


الشكل 3.1: نظام الحساس ذاتي التغذية وتطبيقاته المرتبطة

(التطبيقات: حساسات قابلة للزرع - مراقبة المرضى عن بعد - مراقبة الوسط المحيط - انترنت الأشياء - تتبع الأصول طويلة المدى - المراقبة البناءة - الأمن القومي).

{- الطاقة في الوسط المحيط - تجميع الطاقة - تخزين الطاقة - إرسال البيانات واستقبالها - معالجة البيانات والتحكم بها - الحساسات - التغييرات في الوسط المحيط}

يمكن أن يتضمن نمط العمل للحساس اللاسلكي وضعاً نشطاً، ولكن الأهم أن يتضمن وضع الاستعداد، الذي يكون خلاله الحساس في حالة سبات مع أقل استهلاك للطاقة. وقد تكون الاستطاعة، المولدة من قبل مجمع الطاقة، غير كافية لاستمرار تشغيل الحساس. لكن تراكم الشحنات، المولدة خلال فترة من الزمن، كافٍ لتشغيل الحساس لبضع ثوانٍ. وهذه هي الفائدة العملية للحساسات، التي تتمتع بوضعي الاستعداد والنشط، مثل حساسات قياس سكر الدم وضغطه أو الإلكترونيات الشخصية مثل مرسلات البلوتوث (حيث استطاعة التشغيل بحدود 5 ميلي وات، ومعدل نقل البيانات بحدود 500 Kbit في الثانية، واستهلاك للطاقة 10 نانوات لكل بت)، التي يُطلب منها أن تكون في الوضع النشط بشكل دوري. وتكون الطاقة المولدة عندما يكون الحساس في حالة السبات، كافية تقريباً لتشغيل الحساس عندما يكون هذا الحساس في الوضع النشط.



الشكل 4.1: التطبيقات الممكنة لنظام التغذية الذاتية لشبكة الحساس.

1.3. تجميع الطاقة الميكانيكية

تُعدُّ كلُّ من الكهرباء الضوئية ومثيلتها الحرارية والتحريض الكهرومغناطيسي من التقانات المعروفة جيداً لتجميع الطاقة. والسؤال المطروح هو لماذا نحن بحاجة إلى تجميع الطاقة الميكانيكية؟ سوف نأخذ بالحسبان الحالات التالية: في حالة الحساسات الفردية يصعب الحصول على هذه الطاقة (مثلاً الوجود في أرض معادية)، أو إذا احتوت شبكة الحساس عدداً كبيراً من العقد الموزعة على مساحة جغرافية واسعة، فعندئذ يكون من غير الممكن استبدال المدخرات كلما اقتضت الحاجة لذلك. لهذا يكون من المفيد جداً توافر منبع طاقة ذاتي التغذية يستمد طاقته من الوسط المحيط ولا يحتاج إلى عملية صيانة. وإذا كان أي نظام محققاً للاكتفاء الذاتي فعليه أن يجمع الطاقة من الوسط المحيط، ويقوم بتخزينها لاستخدامها لاحقاً. فمثلاً، يُفترض أن يكون الروبوت النانوي قادراً على التحسس والتأقلم مع الوسط المحيط، وأن يتعامل مع الأشياء وينتقل الأوامر ويقوم بأداء مهام معقدة. ولكن التحدي الرئيس في هذه الحالة يكمن في العثور على منبع طاقة قادر على إدارة الروبوت النانوي دون وزن إضافي.

فإذا تموضع الروبوت في جسم بغية قيامه بعمل تحسسي، أو عمل تشخيصي وعلاجي، فمن السهل على المرء إدخاله في الجسم، ولكن بالمقابل من الصعب بل من المستحيل إخراجه من الجسم لاستبدال المدخرة. وضمن مفهوم الاستشعار/أو التجسس العسكري/قد يكون من الصعب الوصول إلى المواقع بهدف تحديد نقطة أو مراقبتها، وقد نحتاج لإخفائها، وقد تكون هذه النقطة واقعة في بيئة رملية أو ممطرة أو مظلمة أو غابة عميقة. وهذا ما يحول دون استخدام تقانات الخلية الشمسية، لأن الضوء قد لا يكون متوافراً في هذه الحالة.

قد تشمل طرائق تجميع الطاقة، التي يمكن استخدامها لحل هذه المشكلة، قد تشمل استعمال أنظمة اهتزاز عشوائي (مثلاً، الاهتزازات المتوافرة بالقرب من طريق عام) أو التدرج الحراري (مثلاً، تكون درجة حرارة الأرض ثابتة تقريباً تحت سطحها)، لذا هناك رغبة جامحة لتطوير التقانة التي تؤدي لتجميع الطاقة الميكانيكية.



- More personal electronics
- More mobile electronics
- More sensors
- ...
- More tiny power sources
- More waste
- More environmental concerns
- ...



الشكل 5.1: تُعدُّ المدخرة أحد أفضل الخيارات للعديد من الإلكترونيات الشخصية ومثيلاتها الصغيرة، قد يشكل تجميع النفايات وإعادة تدويرها والتخلص منها مشكلة بيئية كبيرة.

جدول 1.1 مصادر الطاقة الميكانيكية المحيطة بنا يوميا ويمكن تجميع الكهرباء منها

الوسط المحيط	الصناعة	البنية التحتية	النقل	الجسم البشري / الحركة
الرياح وتيارات المحيطات وأمواج فوق الصوتية...	المحركات والضواغط وأجهزة التبريد والمضخات والمراوح والاهتزازات والقطع/التقطيع والضجيج	الجسور والطرق والأنفاق والمزرعة وهيكل المنزل ومفتاح التحكم وأبواب المياه/الغاز وأنظمة التيار المتناوب	الطائرات والسيارات والقطارات والإطارات وسكك القطار والدواسات والفرامل والمحركات التوربينية والاهتزاز والضجيج	التنفس وتدفق الدم/وضغطة والزفير والسير وحركة الذراع وحركة الإصبع والجري والكلام...

جدول 2.1 الطاقة الميكانيكية الناتجة من حركات الجسم العادي والكهرباء النظرية الممكن توليدها

الكهرباء المولدة لكل حركة	الطاقة الكهربائية	الطاقة الميكانيكية	النشاط
0.16 جول	0.16 وات	0.93 وات	تدفق الدم
1.02 جول	0.17 وات	1.00 وات	الزفير
0.84 جول	0.14 وات	0.83 وات	التنفس
2.25 جول	0.51 وات	3.00 وات	الأطراف العلوية
406-226 جول	3.2-1.2 ميلي وات	6.9-19 ميلي وات	نوع الإصبع
18.8 جول	39-11 وات	67 وات	السير

أي الأنواع من الطاقة الميكانيكية نرغب في تجميعها؟

يوجد كميات وفيرة وأنواع متعددة من الطاقة الميكانيكية في بيئتنا المعاشية، مثل الهواء الخفيف، والحركة وتمدد العضلات والأمواج الصوتية/وفوق الصوتية وأنواع الضجيج والاهتزازات الميكانيكية وتدفق الدم. وتتمتع منابع الطاقة الميكانيكية، التي نبحت عنها بالخواص التالية:

أولاً، قد تكون كمية مثل هذه الطاقة صغيرة وضئيلة، مما يعني أن يُستبعد استخدام تقانات تجميع الطاقة من بعض أنواعها التقليدية، وذلك لأن القوة الميكانيكية المتوفرة في هذه الحالة ليست بالقدر الكافي لإدارة المولد.

ثانياً، يمكن أن يكون مجال تردد الإشارة المتوفرة واسعاً جداً، بينما يقع الجزء الأكبر من الطاقة المجمعة في مجال تردد منخفض. وهذا يتطلب توافر تقنية قادرة على استرجار الطاقة التي ترددها منخفضاً ومن مرتبة الهرتز (\sim Hz) حتى الطاقة ذات التردد العالي نسبياً ومن مرتبة الكيلوهرتز (\sim KHz).

ختاماً، يمكن أن تتغير حالة الوسط المحيط، مما يتطلب توافر تقنية تتمتع بمقدرة عالية على التأقلم. ويُعد المولد النانوي، الذي طورناه في السنوات السبع الأخيرة، التقانة الممكنة لحل هذه المشاكل.

1.4. المولد النانوي

كنا أول من اقترح تقانة النانو ذاتي التغذية في عام 2006، ثم عملنا على تطوير المولد النانوي للنظام ذاتي التغذية. يُحوّل المولد النانوي الطاقة الميكانيكية العشوائية إلى طاقة كهربائية من خلال استخدام مصفوفات السلك النانوي الكهروضغطي المصنّع من أكسيد الزنك. تعتمد آلية المولد النانوي على الكمون الكهروضغطي المُولّد في الأسلاك النانوية نتيجة تطبيق انفعال خارجي: يسفر استمرار الانفعال الديناميكي للأسلاك النانوية إلى حدوث تدفق عابر للإلكترونات من خلال الحمل الخارجي بسبب قوة الدفع لكمون الضغط. وتكمن ميزة استخدام الأسلاك النانوية في أنه يمكن قذفها بحركات فيزيائية بالغة الصغر، إذ يتراوح تردد تحريضها بين واحد هرتز وصولاً إلى آلاف الهرتزات، مما يُعدّ مثالياً لتجميع الطاقة العشوائية من الوسط المحيط. فإذا تم دمج (تكامل) المساهمات من آلاف الأسلاك النانوية، يمكن لهذا الانفعال الناعم أن يُعطي توتر خرج مقداره 1.2 فولت، يكون قادراً على تشغيل ديودات باعثة للضوء (LED) وشاشة العرض الصغيرة ذات البلورات السائلة (LCD).

يعد اكتشاف المولدات النانوية واحداً من أهم الاكتشافات العلمية العالمية العشرة، وذلك وفقاً لاعتراف الأكاديميين في أكاديمية العلوم الصينية. واختير المولد النانوي ذو الأساس الليفي واحداً من أعلى سويات التقدم في علم الفيزياء عام 2008، وذلك وفقاً لمجلة عالم الفيزياء (Physics world) [4,5]. واختيرت المولدات النانوية على أنها أحد أهم عشر اكتشافات للخيال ومماثلة في أهميتها لاخترع الهواتف المحمولة خلال 10 إلى 30 سنة، وذلك وفقاً لمجلة العالم الجديد (New Scientist).

تُعدّ إلكترونيات الضغط النانوية إحدى أهم التقانات العشر الناشئة عام 2009 وذلك وفقاً لمجلة معهد ماساتشوستس للتقانة (MIT). وتُعدّ المولدات النانوية من بين أعلى 20 اكتشافاً في تقانات النانو غير المعروفة، وذلك وفقاً لمجلة الاكتشاف (Discovery Magazine 2010). وتُعدّ حالياً من بين ست تقانات ناشئة ومستقبلية، وذلك وفقاً لاختيار الهيئة الأوروبية للدعم للسنوات العشر القادمة [6].

تعدّ عملية تطوير المولد النانوي قصة علمية، وتكمن الغاية من هذا الكتاب في تقديم مبادئ المولدات النانوية. لقد بدأنا فيه من نمو المواد الأساسية جداً. ثم أتبعناه بتوصيف الآلية الفيزيائية والنظرية الأساس، ثم استعرضنا المناهج الهندسية بغية الوصول إلى استطاعة خرج عالية. وأخيراً، سنقدم عملية تهجين للمولدات النانوية ذاتية التغذية. وتكمن الغاية من هذا الكتاب في تقديم خدمة على شكل نص أساسي لتعليم الطلاب في المرحلة الجامعية الأولى، وطلاب الدراسات العليا والباحثين عموماً كيف قمنا بتطوير نظرية المولدات النانوية وتقانتها بشكل منهجي (منتظم).

1.5. المراجع

- [1] See the special issue on Sustainability and Energy, *Science*, Feb. 9 2007.
- [2] See special issue on Harnessing Materials for Energy, *MRS Bulletin* **33** (4), 2008.
- [3] Z.L. Wang, *Scientific American* **82**, Jan. 2008.
- [4] Top 10 future technologies by New Scientists: <http://www.newscientist.com/article/mg20126921.800-ten-scifi-devices-that-could-soon-be-in-your-hands.html?full=true>
- [5] MIT Technology Review: top 10 emerging technology in 2009: <http://www.technologyreview.com/video/?vid=257>
- [6] Digital Agenda: Commission selects six future and emerging technologies (FET) projects to compete for research funding: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/530&format=HTML&aged=0&language=en & guiLanguage =en>

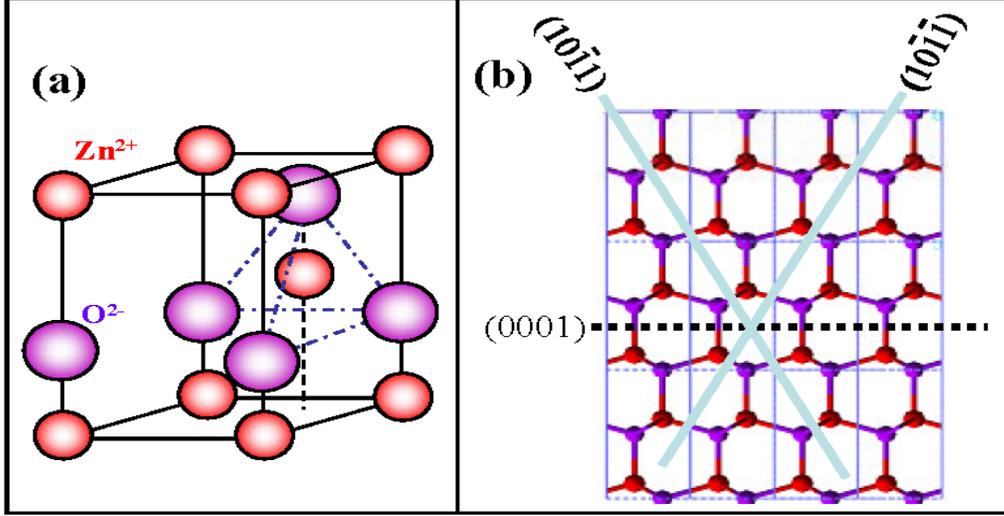
الفصل الثاني: المواد النانوية للمولدات النانوية

يُعدُّ أكسيد الزنك ZnO، مادة نصف ناقلة وذات أهمية، وتتمتع بمجالٍ واسعٍ من التطبيقات في كلِّ من علم البصريات والإلكترونيات البصرية والحساسات والورش الميكانيكية وعلم الطاقة والعلوم الطبية الحيوية والمدارات الإلكترونية [1]. ويُظهر أكسيد الزنك معظم التشكيلات المتوافرة والمبهرة للبنى النانوية التي يمكن أن تشكلها مادة واحدة. ويُعدُّ أكسيد الزنك واحداً من بضع مواد نانوية مهيمنة للتقانة النانوية. واستناداً إلى البيانات الببليومترية الواردة من مزود خدمة المعلومات تومسون رويترز (Thomson Reuters) [2]، فإن كلاً من عدد المنشورات والمواقع ذات المراجع المستندة على بنى أكسيد الزنك النانوية، هي من الكم والأهمية ما يماثل الأدبيات المنشورة في كل من الحوسبة الكمومية والأنابيب النانوية الكربونية والأغشية الرقيقة نصف الناقلة والمادة المظلمة (السوداء). وتتوافر بضعٌ من المنشورات الممتازة التي تتعلق بكلِّ من نمو الأسلاك النانوية وتوصيفها، وخاصة فيما يتعلق بأكسيد الزنك [3,4,5,6,7,8,9]. أما بالنسبة للغاية من هذا الكتاب، فتكمن في أننا سنركز بشكل رئيس على تركيب الأسلاك النانوية، وخاصة المصفوفات المتراسة، والتي تتم عملية إنمائها إما بطريقة بخار - سائل - صلب أو بطريقة بخار - صلب - صلب.

1.2. البنية البلورية لأكسيد الزنك ZnO

يتمتع أكسيد الزنك في الشروط التقليدية، ببنية فورتزيت (wurtzite structure)، والخلية الواحدية (unit cell) لهذا الأكسيد عبارة عن موشور سداسي زمرة الفضاءية $C6mc$ ، وتساوي أبعاد هذا الموشور $a = 0.3296$ ، و $c = 0.52065$ nm. وتشكل أيونات الأوكسجين السالبة وأيونات الزنك الموجبة فيما بينها خلية واحدة عبارة عن رباعي وجوه. وتنفقر البنية الكاملة للتناظر المركزي. ويمكن وصف بنية أكسيد الزنك ZnO ببساطة على أنها عدد من المستويات المتناوبة مكونة من رباعيات وجوه ومرتبطة من أيونات O^{2-} و Zn^{2+} ومكدسة بالتناوب على طول المحور C (الشكل 1.2a).

وعلى الرغم من تمتع الخلية الواحدية لأكسيد الزنك بقطبية محايدة، إلا أن توزع الأيونات الموجبة والسالبة يمكن أن يأخذ شكلاً مميزاً كما يحدده علم البلورات، لهذا يمكن لبعض السطوح أن تنتهي بشكلٍ كاملٍ إما بأيونات موجبة أو مثيلتها السالبة، منتجةً إما سطوح موجبة الشحنة أو مثيلتها السالبة، وتدعى بالسطوح القطبية. ويمكن لهذه السطوح القطبية مهيمنة الشحنة أن تعطي بعض ظواهر النمو الفريدة كما سيُعرض لاحقاً. ويُعدُّ المستوى القاعدي من أكثر السطوح القطبية شيوعاً. وتنتج الأيونات ذات الشحنة المتعكسة سطوحاً قطبية تتمتع بشحنة الزنك الموجبة (المستوى Zn-0001) ومثيلاتها المتمتعة بشحنة الأوكسجين السالبة (المستوى O-0001) منتجةً عزمًا قطبياً واستقطاباً ذاتياً على طول المحور C، إضافةً إلى حدوث تباين في طاقة السطح. وبغية الحفاظ على بنية مستقرة تتمتع السطوح القطبية عموماً بإعادة البناء لأوجه أو سطوح عدة، لكن مستويات أكسيد الزنك، وهي المستويات (0001)±، هي عبارة عن مستويات ذرية مستتناة من ذلك ومستقرة ولا تتمتع بإعادة البناء [10,11]. وبأني فهم الاستقرار الفائق للسطوح القطبية لأكسيد الزنك Zn ±(0001) في طبيعة البحوث التي تجري حالياً في مجال فيزياء السطوح [12,13,14,15].



الشكل 1.2: (a) نموذج بنية فورترزيت لأكسيد الزنك ZnO، إذ تتمتع هذه البنية بكلٍ من التناظر اللامركزي والتأثير الكهروضغطي. (b) النماذج الثلاث لسطوحات البنى النانوية لأكسيد الزنك، وهي: المستويات

$$\{01\bar{1}0\}, \{2\bar{1}\bar{1}0\} \text{ و } \pm(0001)$$

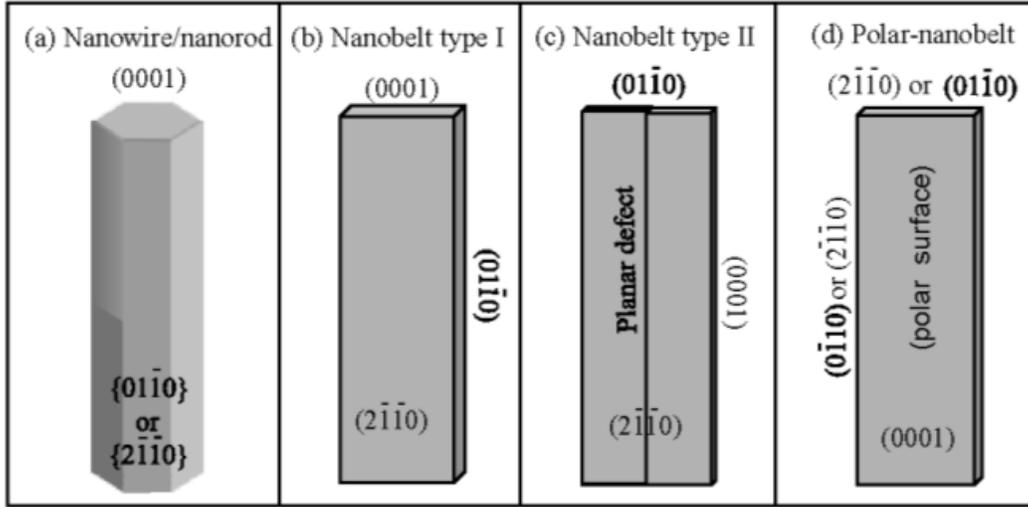
هناك سطح قطبي آخر هو السطح $\{01\bar{1}0\}$. فإذا تم إسقاط البنية على طول الاتجاه $[1\bar{2}10]$ ، كما هو موضَّح في (الشكل 1.2 b)، إضافة إلى السطوح القطبية النموذجية $(0001) \pm$ ، التي تنتهي بأيونات الزنك Zn والأوكسجين O بالترتيب، فإن كلاً من السطح $\{01\bar{1}0\} \pm$ ومثيله $\{10\bar{1}\bar{1}\} \pm$ هي سطوح قطبية أيضاً. ولا تُعدُّ السطوح من النموذج $\{10\bar{1}\bar{1}\}$ شائعة بالنسبة لأكسيد الزنك، ولكن تمت ملاحظتها من خلال دراسة البنية النانوحلزونية [16]. تكون الشحنات على السطوح القطبية عبارة عن شحن أيونية، وهي عبارة عن شحن غير قابلة للنقل أو الحركة. ولما كانت الطاقة المتبادلة بين الشحنات تعتمد على كيفية توزيعها، فإن البنية تكون مرتبة بالشكل الذي يجعل طاقة الكهرباء الساكنة في حدودها الدنيا، وهذه هي قوة الدفع الرئيسة لنمو البنية النانوية المتمتعة بسطح قطبي مهيم.

يتمتع أكسيد الزنك، من الناحية البنيوية، بثلاثة نماذج لاتجاهات النمو السريع، هي:

$$\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle (\pm[2\bar{1}\bar{1}0], \pm[1\bar{2}\bar{1}0]), \\ \pm[\bar{1}\bar{1}20]; \langle 01\bar{1}0 \rangle (\pm[01\bar{1}0], \pm[10\bar{1}0], \pm[1100]); \text{ and } \pm[0001]$$

وبالمشاركة مع السطوح القطبية، ونتيجة لتوافر نهايات ذرية، يتمتع أكسيد الزنك، بمجالٍ واسعٍ من البنى الجديدة، التي يمكنها أن تنمو من خلال توليف معدلات النمو على طول هذه الاتجاهات. إن إحدى أكثر المعاملات عمقاً، والتي تحدد ما يعرف بعلم التشكل (Morphology)، تتطوي على نشاطات السطح النسبية لمختلف أوجه النمو عند شروط معطاة مسبقاً. يبدو بالعين المجردة أن البلورة تتمتع بمعاملات مركبة مختلفة مع اختلاف مستوياتها البلورية، التي جرى التأكد منها في ظروف نمو مُتحكم بها. لهذا، وبعد الفترة الزمنية الأولية من التتوي (تشكل النوى) واحتضانها، سوف تتطور البلورة عموماً لتصبح على شكل جسم ثلاثي الأبعاد يتمتع بحدود تامة وأوجه بلورية ذات دلالة ضعيفة. وتُبين (الأشكال 2.2 a-c) بضع نماذج النمو النموذجي ببعد واحد (1D) لبلورات نانوية من أكسيد الزنك. تميل هذه البنى لأن تزيد من مجالات نمو الأوجه $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ و $\{01\bar{1}0\}$ نظراً لأن طاقتها أقل ما يمكن. أما البنية، التي يُظهرها الشكل (2.2d)، فهي المهيمنة من خلال سطوحها القطبية، التي يمكنها أن تنمو من خلال

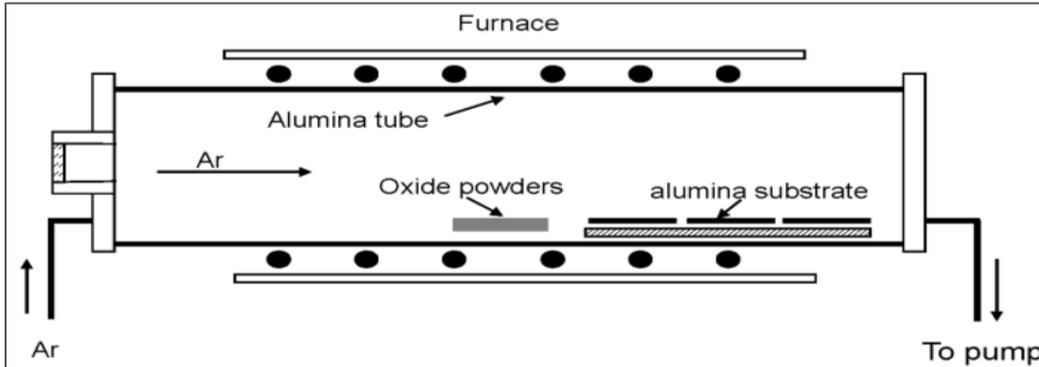
عيوب ناعمة بشكلٍ مواز لتلك السطوح [17]. وعادةً ما تلاحظ العيوب الناعمة ومستويات التوأمة موازيةً للمستوي (0001)، لكن الانخلاعات نادراً ما يمكن مشاهدتها في هذه البنى. ويمكن التعرف على تحليلٍ مفصلٍ للعيوب في البنى النانوية لأكسيد الزنك في البحث [18].



الشكل 2.2: أشكال النمو النموذجي بعيد للبنى النانوية من أكسيد الزنك تتمتع بأوجه مناسبة.

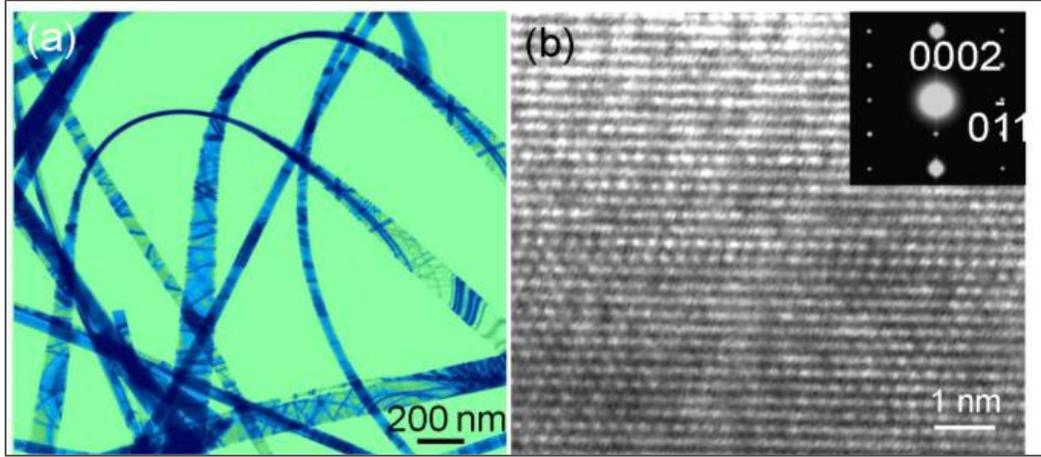
2.2. السلك النانوي/ الحزام النانوي المنمى بعملية بخار – صلب – صلب

تُعد عملية النمو بطريقة بخار – صلب بسيطة وفعالة من أجل نمو بُنى نانوية أكسيدية دون استخدام محفز [19]. ويتوافر أسلوبيان لتبخير المادة المصدر، وهما: التبخير الحراري والاستئصال (الصق) بالليزر. وتُعد تقنية التبخير الحراري عملية بسيطة، يتم من خلالها تبخير المادة/أو المواد المصدر، التي تكون على شكل مسحوق، عند درجة حرارة مرتفعة، بعدها يتم تكثيف طور (أو أطوار) البخار الناتج عند شروط محددة (مثل: درجة الحرارة والضغط والضغط الجوي وتوافر الركيزة التي يتم عليها تكثيف البخار وغيرها)، وذلك بهدف تشكيل المنتج المرغوب فيه (الشكل 3.2). ويتعلق كلٌّ من البنية الطورية وشكلها للناتج (أو النواتج) المصنعة بكلٍ من نوع المواد المصدر ودرجة الإنماء والتدرج الحراري ونوع الركيزة المستخدمة ومعدل تدفق الغاز والضغط المطبق.



الشكل 3.2: منظومة الفرن المستخدم لنمو أسلاك نانوية بطريقتي VLS (بخار – سائل – صلب) و VSS (بخار – صلب – صلب).

يجري التبخير الحراري لمسحوق أكسيد الزنك (درجة نقاوته 99.99% ودرجة حرارة انصهاره 1975°م)، يجري عند درجة حرارة 1400°م مُعطياً أحزمة نانوية طويلة جداً أو فائقة الطول (الشكل 4.2a).

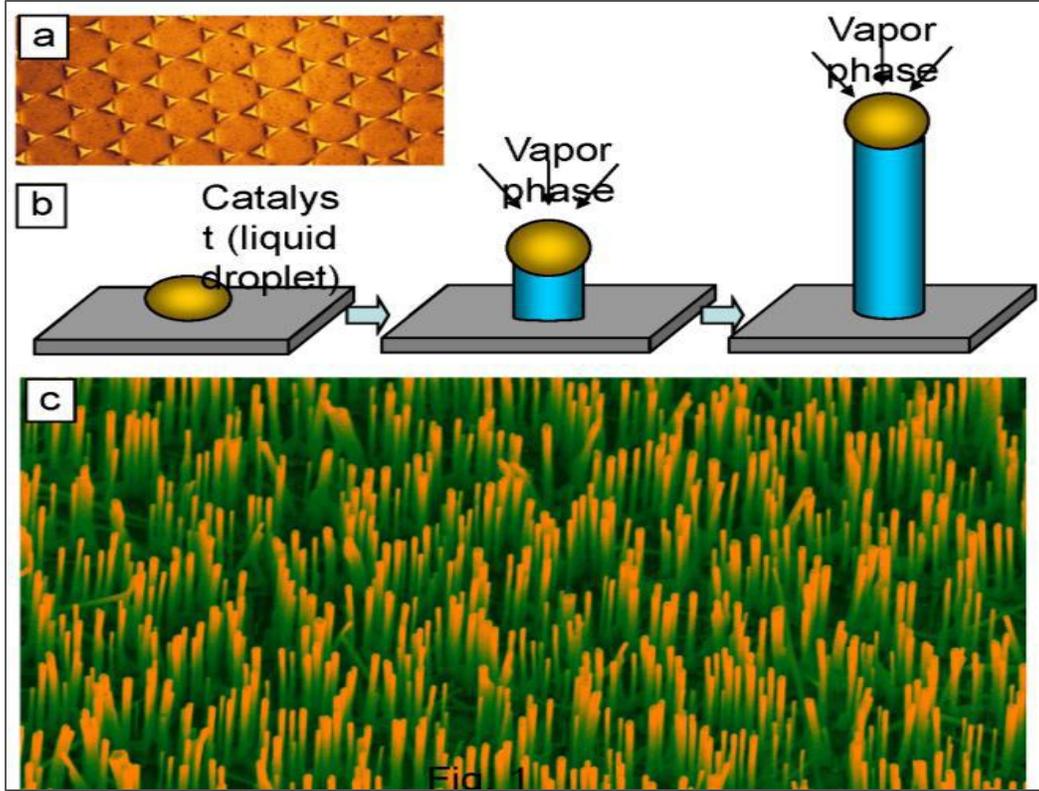


الشكل 4.2: (a) صورة لأحزمة أكسيد الزنك النانوية، جرى إنمائها بطريقة البخار - صلب دون وجود محفز، وجرى تكبير هذه الصورة تكبيراً منخفضاً باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ (TEM). (b) صورة لحزام نانوي جرى تكبيرها بدقة عالية من خلال استخدام المجهر الإلكتروني النافذ (TEM).

تُظهر صورة المجهر الإلكتروني النافذ (TEM) أن هناك تبايناً على شكل تموجات مرّده إلى الانفعال الناجم عن حني الحزام، ويمكن في بعض الأحيان مشاهدة بعض العيوب الناعمة مثل مستويات التوأمة والعيوب المتراكمة، ولكن لا يوجد عيبٌ خطي. أما العيوب النقطية الناتجة عن تشكل الثقوب في الخلية الواحدية بسبب مغادرة ذرات الأكسجين لعقد هذه الخلية، فيمكن أن تتوافر محدثة تأثيراً كبيراً في خواص النقل للحزم النانوية. وتتمتع الحزم النانوية بمقطع عرضي شبيه بالمستطيل، بحيث تتراوح أبعاد عرضه النموذجي بين 30 و300 نانومتر، وتتراوح النسبة بين العرض والتخانة بين 5 إلى 10، وتصل أطوال هذه الحزم إلى بضعة ميليمترات. وتظهر الدراسات، التي أجريت باستخدام كلٍّ من الدقة العالية لتكبير المجهر الإلكتروني النافذ (HRTEM) ودراسات الانعراج الإلكتروني، أن حزم أكسيد الزنك النانوية تتمتع بالشكل المنتظم وهي عبارة عن بلورة أحادية (الشكل 4.2 b).

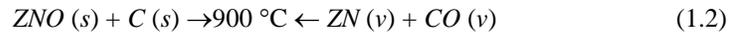
2.3. مصفوفات السلك النانوي المنمّاة بعملية بخار - سائل - صلب

يُعدُّ نمو الأسلاك النانوية المتراصة مسألة ذات أهمية لكلٍّ من المولدات النانوية والديودات الباعثة للضوء والترانزيستورات المتأثرة حقلياً. ويمكن تحقيق النمو المتراص للأسلاك النانوية من خلال استخدام ركائز وجزيئات مُحفّزة أو بذور. جرى في البداية، وبشكل واسع، استعراض أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراصة شاقولياً بشكل تام على المستوي a من السطح البلوري (0 11 2)، والموجّهة لركائز من بلورة أحادية لأكسيد الألمنيوم (الياقوت الأزرق)[20]. ولقد تم استخدام جزيئات الذهب النانوية كمحفزات (الشكل 5.2 a). يبدأ النمو ويقاد بواسطة جزيئات الذهب، مما يؤدي إلى حدوث التراص الناجم عن العلاقة الفوقية بين أكسيد الزنك وأكسيد الألمنيوم Al_2O_3 (الشكل 5.2 b).

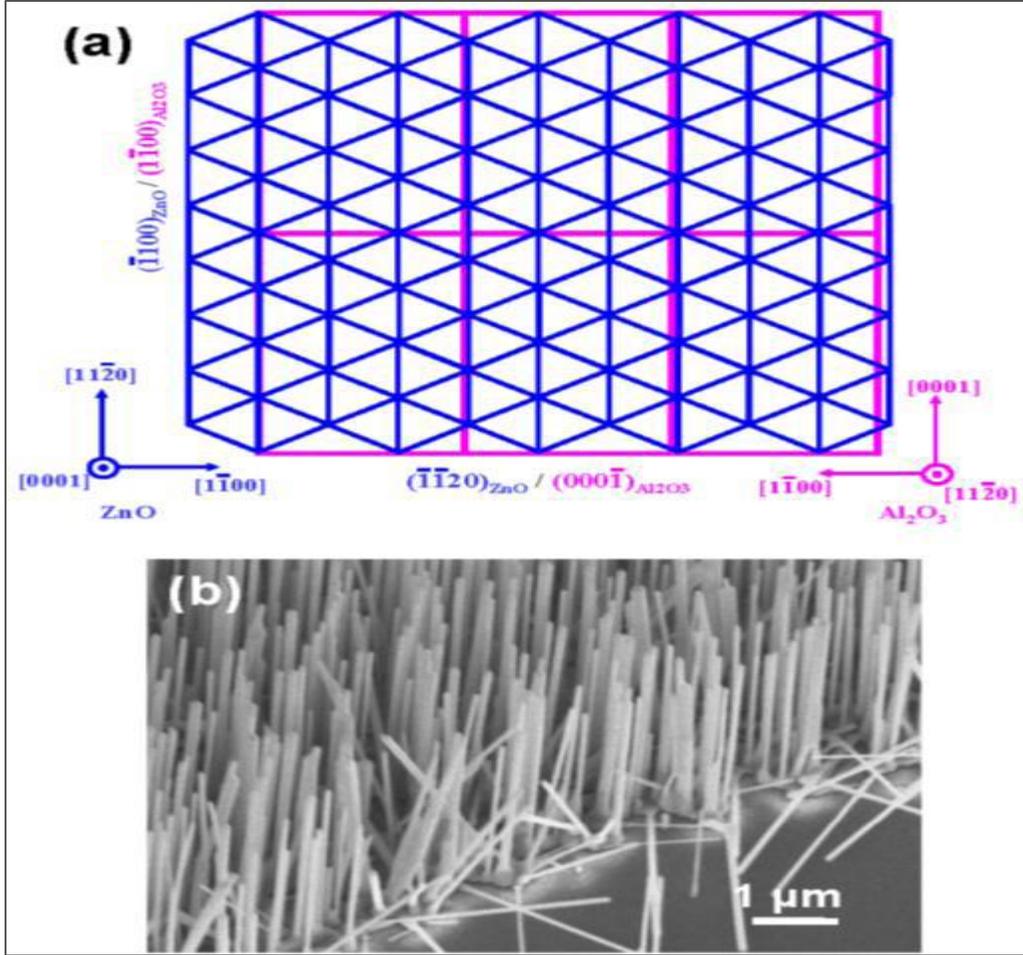


الشكل 5.2: (a) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM لأسلاك أكسيد الزنك النانوية المترصة نمت على ركيزة من الياقوت باستخدام غشاء رقيق من الذهب كمحفز. (b) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM لنماذج تحفيز ذهبية باستخدام غشاء نانوي كروي/معدن من الياقوت PS، على شكل قناع. (c) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لقضبان أكسيد الزنك النانوية، نمت وفقاً لنموذج خلية النحل.

وخلافاً لطريقة البخار - سائل - صلب (VLS) العادية، لا بد من توافر معدل نمو معتدل لإحداث التراص، لاسيما أن المحفز بحاجة إلى كل من الصهر وتشكيل الخليطة والترسب خطوة بخطوة، بغية تحقيق النمو الفوقي لأكسيد الزنك على سطح من الياقوت. لذا، يُطبق عادةً درجة حرارة نمو منخفضة نسبياً بغية خفض تركيز البخار. وإذا تم مزج أكسيد الزنك مع مسحوق الكربون، والتي تُدعى عادةً عملية التبخير الحرارية - الفحمية، يمكن خفض درجة حرارة التبخر من الدرجة 1300°م إلى 900°م.



يكون التفاعل الوارد أعلاه عكوساً عند درجة حرارة منخفضة نسبياً. لهذا، عندما يتحول كل من بخار الزنك Zn وغاز أول أكسيد الكربون CO إلى منطقة الركازة، يمكن أن يتفاعلا ويعودا أدراجهما إلى حالة أكسيد الزنك، مما يُمكن من امتصاصهما من قبل المحفز الذهبي وتشكيل أسلاك أكسيد الزنك النانوية عموماً من خلال استخدام طريقة بخار - سائل - صلب (VLS). ويمكن إيجاد تفاصيل شروط النمو هذه في منشوراتنا السابقة.



الشكل 6.2: (a) العلاقة بين شبكات (lattices) لركازة الألومينا (أكسيد الألمنيوم) وأسلاك أكسيد الزنك النانوية. (b) مصفوفات أسلاك نانوية نمت وفقاً للطريقة المذكورة في (a).

يمكن أن يكون المحفز أيضاً ذا شكل مسبق التحضير كما هي الحال في الطباعة الحجرية وتقنيات التجميع الذاتي. فمثلاً، أمكن تشكيل طبقة وحيدة مرتبة ثنائية الأبعاد من كرات من البوليميرين تفوق أبعاده الميكرون، حيث تتمتع هذه الطبقة بمساحة واسعة، ومجمعة ذاتياً، وتم تشكيلها على ركازة من الياقوت على شكل قناع، والتي أمكن من خلالها ترسيب غشاء رقيق من الذهب. وبعد إجراء عملية التتميش بعيداً عن الكرات، أمكن الحصول على غشاء رقيق من الذهب عبارة عن شبكة من المواشير السداسية (الشكل 5.2a) [21]. وعند استخدام هذا الغشاء الذهبي الرقيق كمحفز، بدأ نمو الأسلاك النانوية المتراسة متمتعاً بتوزع مشابه للتوزع نفسه عند خلية النحل (الشكل 5.2c). وتكون جميع الأسلاك النانوية عمودية على سطح الركازة، والنقطة الأكثر ظلمة، المتوضعة في كل سلك نانوي، هي عبارة عن المحفز الذهبي. وتتم في هذه العملية تحديد النقاط النامية من خلال وجود المحفز. أما إذا كان المحفز المستخدم هو بالضبط عبارة عن غشاء رقيق من الذهب، فسيكون توزع الأسلاك النانوية عشوائياً (الشكل 2.6).

تحدد علاقة التنضيد بين سطح الركازة وأسلاك أكسيد الزنك النانوية فيما إذا كان سيوجد هناك نمو متراص، وكيف سيكون هذا الترصاص تماماً (مكتملاً). ويُعزى توافر الترصاص الناجح لأسلاك أكسيد الزنك النانوية على ركائز تنريدية أو من الياقوت، يُعزى

إلى عدم التوافق (التطابق) للشبيكات بين الركائز وأكسيد الزنك. ففي حالة الياقوت، تستخدم عادة ركازة تتمتع بمستوى التوجيه (11 $\bar{2}$ 0)، وذلك لأن عدم توافق الشبيكات يتموضع على طول المحور C لشبيكة Al₂O₃ والمحور a لشبيكة ZnO (الشكل 2.6). وتكون العلاقة الفوقية بين أسلاك أكسيد الزنك النانوية والمستوي a من ركازة الياقوت هي:

$$\text{ZnO} \parallel [0001]_{\text{Al}_2\text{O}_3} [11\bar{2}0]_{\text{Al}_2\text{O}_3}, (11\bar{2}0)_{\text{ZnO}} \parallel (0001)_{\text{ZnO}}$$

يكون عدم التطابق للشبيكات بين:

$$4 [01\bar{1}0]_{\text{ZnO}} (4 \times 3.249 = 12.996A^\circ), \& [0001]_{\text{Al}_2\text{O}_3} (12.99A^\circ)$$

مساوياً للصفر في أغلب الأحيان، مما يحد من النمو الموجه لأسلاك أكسيد الزنك النانوية. ومع ذلك، ولما كان المستوي (11 $\bar{2}$ 0) لأكسيد الألمنيوم Al₂O₃ عبارة عن مستطيل لرباعي وجوه، والمستوي (0001) لأكسيد الزنك عبارة عن مستو لموشور سداسي، فإن علاقة التنضيد يمكن الحفاظ عليها فقط باتجاه واحد. لقد تم النمو بنجاح لأسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراصة على ركائز معدة من الياقوت و نتريد الغاليوم GaN و نتريد الغاليوم ألمنيوم AlGaN، و نتريد الألمنيوم AlN [22]، وذلك عن طريق استخدام طريقة بخار - سائل - صلب (VLS)، حيث تؤدي البنية البلورية للركازة دوراً حاسماً في توجيه الأسلاك النانوية. ويجري التحكم بمقدار التراص باستخدام معاملات أخرى كثيرة. لقد قمنا بإجراء بحث منهجي على شروط النمو، والتي تُعزى إلى ثلاثة عوامل رئيسية، هي: ضغط الحجرة وضغط الأكسجين الجزئي [23]. وثخانة طبقة المحفز [24].

2.4. مصفوفات السلك النانوي المنمأة بواسطة الترسيب بالليزر النبضي

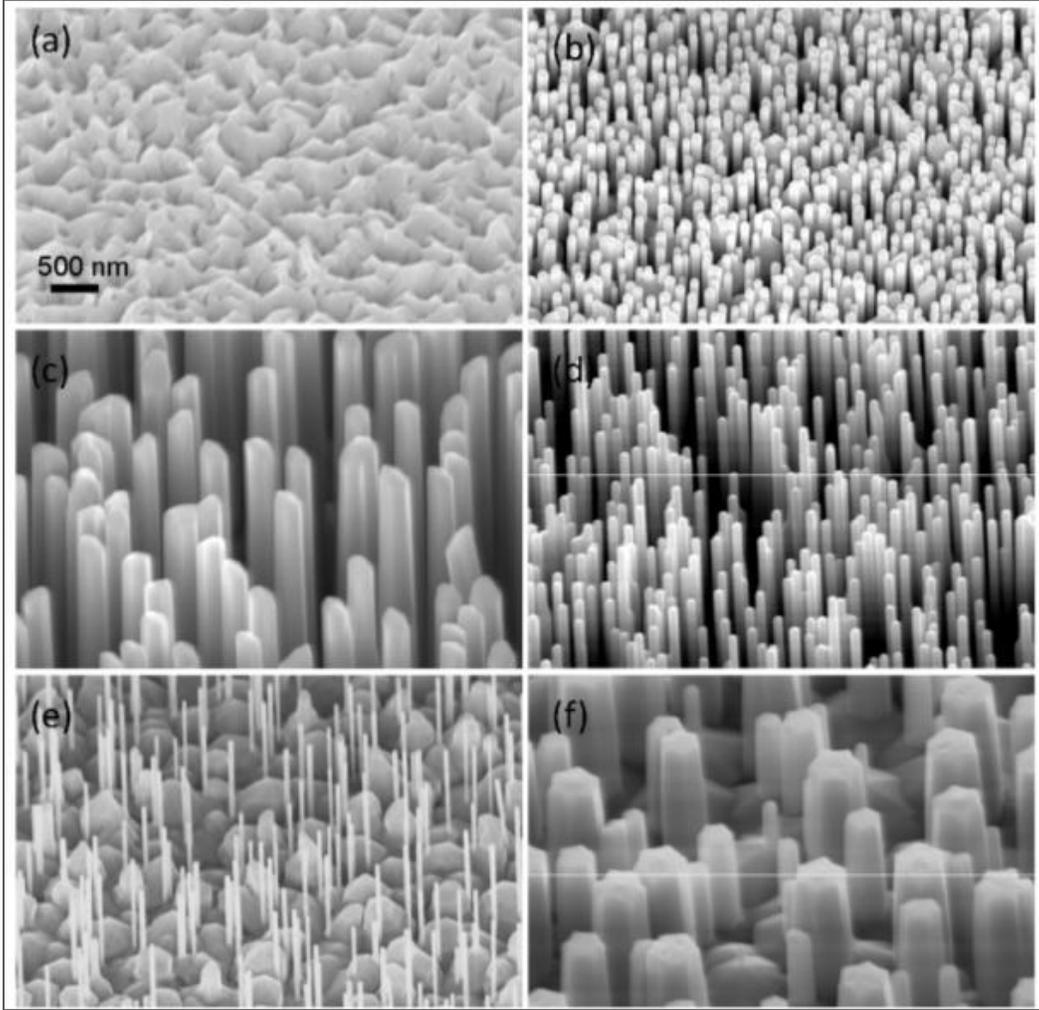
يعدُّ الترسيب بالليزر النبضي (PLD) تقنية مشهورة لترسيب الأغشية (الأفلام) الرقيقة، وذلك منذ أن جرى استعراضها كوسيلة لنمو أفلام رقيقة فائقة الناقلية وعالية الجودة. يمكن استخدام طريقة الترسيب بالليزر النبضي (PLD) في ترسيب طيف واسع من المواد مثل أكاسيد السيراميك والأفلام النتريدية والأفلام المعدنية والشبيكات الفائقة. ويهدف إنشاء أسلاك نانوية باستخدام طريقة الترسيب بالليزر النبضي، تم استخدام ليزر الكسيمير KrF (Coherent Compex 205 وطول الموجة 248 nm) كمنبع استئصال للتركيز على هدف سيراميك، والذي هو عبارة عن مسحوق أكسيد الزنك، وكان أثر الصدمة مساوياً تقريباً 3J/cm². ويمكن السر في نمو الأسلاك النانوية المتراصة شاقولياً من التموضع المناسب في الموقع الأصلي لطبقة عزل منسوجة من أكسيد الزنك على ركازة من السيلكون، وذلك قبل الانتقال إلى شروط نمو الأسلاك النانوية.

يمكن التحكم بترتيب مصفوفة الأسلاك النانوية من خلال استخدام أربعة عوامل:

درجة الحرارة T للركازة وضغط النمو ومعدل تدفق كلٍّ من الأرجون والأكسجين وتردد الليزر النبضي [25]. ويبين (الشكل d-8.2) صوراً مأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SAM) لأسلاك نانوية مولدة عند سلسلة من درجات الحرارة، حيث التردد الدوري لليزر النبضي مقداره 5 هرتز، والنسبة بين معدل تدفق مزيج الأرجون Ar والأكسجين O₂ تساوي (6:1) وضغط إجمالي يساوي 0.5 توريشللي (5,0 Torr)*. فمثلاً، عند درجة الحرارة 700°م تولد فيلم ذو سطح خشن (الشكل a8.2) وعند ازدياد درجة الحرارة إلى 750°م تولدت أسلاك نانوية تتمتع بالطول المثالي المساوي تقريباً 800 nm (الشكل b8.2)، وعند درجة الحرارة 800°م نمت أسلاك نانوية أطول من السابقة، حيث وصلت أطوال هذه الأسلاك إلى 2-3 ميكرون (الشكل c8.2). وعند الازدياد المستمر في درجة الحرارة إلى أعلى من 850°م تولدت بضع أسلاك نانوية مدمجة بعضها مع بعض (الشكل d8.2). ومن جهة

* الضغط (1 Torr): هو عبارة عن مقدار الضغط المطبق من عمود زئبقي ارتفاعه 1 مم عند درجة الحرارة صفر مئوية.

أخرى، وعند تثبيت درجة الحرارة T عند المقدار 800°C برز اعتماد نسبة الأبعاد* على ضغط النمو، فعند ازدياد ضغط النمو، ليصل إلى المقدار 6, Torr، تولدت أسلاك نانوية أكثر نحافةً (الشكل e8.2)، بينما كانت الأسلاك النانوية، عند ضغط مقداره 4 Torr، تتمتع بأكبر قطر (الشكل f8.2). ويمكن التحكم أيضاً بالنسبة الباقية من خلال ضبط مقادير كلٍ من درجة الحرارة وضغط النمو.



الشكل 8.2: لقطات لنمو الأسلاك النانوية مأخوذة بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM. (a) 700°C و (b) 750°C و (c) 800°C و (d) 850°C . ضغط النمو كان 5 Torr توريشللي. (e) نمو المصنوفة للأسلاك النانوية عند ضغط 6.0 Torr توريشللي و 4.0 Torr توريشللي وعند درجة حرارة 800°C . جميع اللقطات ذات مقياس واحد من رتبة 500 نانومتر. استخدم لدى التشكيل خليط الأرجون والأوكسجين بنسبة تدفق 6، وتردد التكرار الليزري 5 هرتز. الهدف معدن من الليثيوم المشوب للمركب $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$ مع (0.5 at % تركيز الإشابة لليثيوم Li).

* نسبة الأبعاد aspect ratio: هي نسبة الارتفاع إلى العرض على شاشة الحاسب. أما بالنسبة للسلك النانوي، فهي نسبة الثخانة إلى العرض (المراجع العلمي).

2.5. مصفوفات السلك النانوي المنمأة بالطريقة الكيميائية

2.5.1. الطرائق الأساسية

2.5.1.1. النمو البذري (نمو البذور)

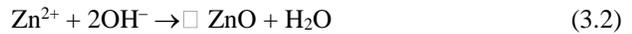
تكمّن إحدى ميزات النمو الكيميائي الرطب الرئيسية في أنه يمكن تحقيق هذا النمو بشكل مستقل عن الركازة، وذلك عن طريق استخدام بذور من أكسيد الزنك على شكل أفلام رقيقة أو جزيئات نانوية. وبهذا الأسلوب، يتم تجاوز مرحلة تشكل النوى، ويؤخذ بالحسبان فقط تلك الشروط الضرورية للنمو. ويحدث تراص بلورات أكسيد الزنك النانوية على سطوح مستوية بغض النظر عن شكلها البلوري أو كيميائياً سطحها، حيث يتضمن هذا التراص كلاً من أكسيد الزنك وأكسيد الألمنيوم Al_2O_3 وحيد البلورة والأكاسيد الشفافة الموصلة مثل أكسيد القصدير إنديوم (ITO) وأكسيد القصدير المشاب بالفلور (FTO). والأكاسيد اللابلورية المتضمنة الزجاج والسيليكون Si، بأكسيده الطبيعي والمعادن غير المؤكسدة مثل الذهب Au والتيتانيوم Ti. على أية حال، يحتاج هذا الأسلوب إلى معالجة الركازة بدرجة حرارة أعلى. يجب أن تُعالج بذور أكسيد الزنك عند درجة الحرارة 150°C بغية تحسين التصاق الجزيئات بالركازة، ويجري تحسين التراص الشاقولي لقضبان أكسيد الزنك النانوية من خلال المعالجة بالتلدين عند درجة الحرارة 350°C لنسيج بذور من هذا الأكسيد.

2.5.1.2. ذهب/بوليميد

يمكن أن يُنجز مركب أكسيد الزنك أيضاً على محفزات كالذهب والبلاتين، إذ يمكن لمثل هذه المعادن أن تُرسب على ركائز بوليميرية على شكل أغشية (أفلام) رقيقة لتحقيق نمو السلك النانوي. وفي هذه الحالة، يجب التحكم بشكل دقيق بخشونة الفيلم الرقيق بغية منع حدوث التتوي (تشكل النوى). وإضافةً لذلك، يعتمد توجيه السلك النانوي بشكل كبير على طبوغرافية (تعرجات) السطح. وبهدف الحصول على أسلاك نانوية مترابطة شاقولياً، لابد من استخدام طرائق خاصة لتحقيق سطوح ناعمة للركازة.

2.5.1.3. الترسيب الكهروكيميائي

يُعد الترسيب الكهروكيميائي لأكسيد الزنك تقنية جبارة للحصول على نطاق واسع من نسيج القضبان النانوية المنتظمة. وعلى كل حال، تحتاج هذه التقنية إلى كل من الركازة الناقلة ومواد قادرة على تحمل أوساط تفاعل الحموض. فمثلاً، يتم تدفق الأكسجين على أي من المحلول الكهربائي (الإلكتروليت) $ZnCl_2$ و KCl بغية الحفاظ على محلول كهربائي مشبع بالأوكسجين. غالباً ما يتم استخدام مجموعة من ثلاثة الكترودات (أقطاب) عيارية مع الكترود (قطب) مرجعي مشبع بالفضة $Ag/AgCl$ أو كلور الفضة $AgCl$ والكترود عداد من البلاتين، وبالتزامن مع منظم، وذلك بهدف التحكم بخواص التوتر - تيار خلال عملية الترسيب. إضافةً لذلك، يمكن تحقيق كل من تشكل نواتات أكسيد الزنك ومعدل نموه من خلال استخدام طرائق كهروكيميائية، وذلك بمحلول نترات الزنك والهيكسا ميثالين نترامين HMTA. استعمل الباحث فيننروب Weintraub وآخرون تقنية كهروكيميائية، مدمجة مع ركازة نمطية بغية تحقيق نمو انفرادي لقضبان أكسيد الزنك النانوية. ففي هذه الحالة، يسبب الكمون المطبق تزايد في تركيز الأيونات OH^- وخفضاً في الأيونات NO_3^- داخل التفاعل الكهروكيميائي وعند القطب السالب. وعليه، يتم هذا التفاعل على الشكل التالي:

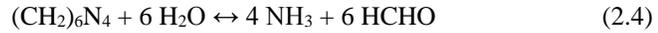


يستمر HMTA في تعزيز النمو أحادي البعد (1-D)، وذلك من خلال تغطية الأوجه غير القطبية وتقديم منبع للهيدروكسيدات.

وتعدُّ هذه الطريقة مفيدة جزئياً، إذ يمكن عن طريقها تعزيز تشكل النوى دون استعمال بذور. غالباً ما يتطلب بذور البذور مرحلة تليد ذات درجة حرارة عالية (أعلى من 200م°)، مما يُصعَّب من استعمال ركائز من بذور البوليميرات. لهذا، فإن الأسلوب الكهروكيميائي، الذي يمكن تطبيقه على أية ركازة ناقلة تجعله مفيداً لإحداث النمو على البوليميرات الناقلة.

2.5.1.4. هيكسا هيدرات نترات الزنك والهيكسا ميثالين تترامين

ربما تكون هيكسا هيدرات نترات الزنك وهيكسا ميثالين تترامين من أكثر الوسطاء الكيميائية شيوعاً للاستخدام في تصنيع أسلاك نانوية من مركب أكسيد الزنك الهيدروحراري [26,27]. ولقد أُجري بالفعل توثيق كامل للمفهوم الكيميائي للنمو. يقوم ملح هيكسا هيدرات نترات الزنك بتأمين أيونات Zn^{2+} اللازمة لبناء أسلاك أكسيد الزنك النانوية، أما جزيئات الماء في المحلول، فتؤمن أيونات O^{2-} . وعلى الرغم من أن الدور الحقيقي لهيكسا هيدرات نترات الزنك في نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية غير واضح، فإن الاعتقاد السائد أنها تتصرف كأساس ضعيف يتحلماً ببطء في المحلول المائي مولدة أيونات OH^- بشكل تدريجي. ويُعدُّ ذلك الحالة الحرجة في عملية التجميع، ذلك لأنه، إذا تحلّمت هيكسا هيدرات نترات الزنك بسرعة كبيرة وأنتجت كمية من أيونات OH^- خلال فترة زمنية قصيرة، فإن أيونات الزنك Zn^{2+} ، الموجودة في المحلول، سوف تترسب بسرعة كبيرة من هذا المحلول نتيجة لارتفاع قيم pH للوسط، مما ينعكس بشكل بسيط على النمو الموجه لأسلاك أكسيد الزنك النانوية، وبالتالي التسبب في الاستهلاك السريع للنترات وإثباط النمو اللاحق لأسلاك أكسيد الزنك النانوية.



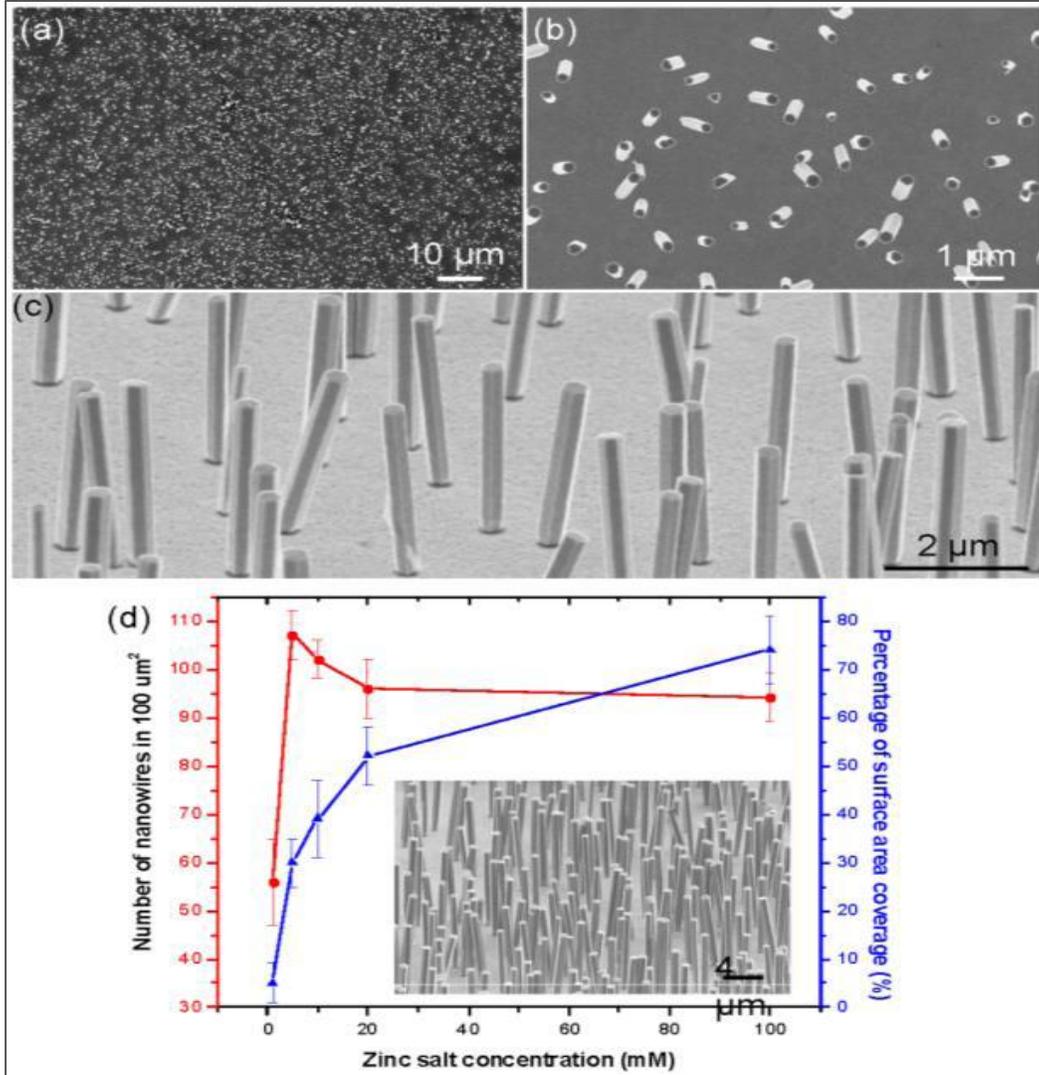
يمكن التحكم بعملية نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية من خلال إحداث التفاعلات الكيميائية الخمسة الواردة أعلاه. وتكون هذه التفاعلات الخمسة متوازنة في الواقع، ويمكن التحكم بها من خلال ضبط معاملات التفاعل، مثل التركيز السابق ودرجة حرارة النمو وزمنه، وذلك بهدف دفع توازن التفاعل إلى الأمام أو بالعكس. ويحدد التركيز السابق عموماً كثافة السلك النانوي. وتتحكم درجة حرارة النمو وزمن هذا النمو بكل من شكل السلك النانوي وسرعة توجيهه.

وبهدف تبسيط الوصف، نستخدم ركازة من السيلكون Si بغية وصف الإجراء التجريبي وبيان تأثيرات المعاملات التجريبية المختلفة في عملية النمو، إذ جرى إعداد ركازة من خلال تنظيف رقاقة السيلكون Si(100) باستخدام أسلوب تنظيف عياري مطور. بدايةً، جرى غمس الرقاقة، الواقعة تحت تأثير الأمواج فوق الصوتية، جرى غمسها مرات عديدة في كل من الأسيتون والإيثانول والكحول الإيزوبروبيلي (isopropyl alcohol) والماء غير المؤيّن، حيث استمر لمدة عشر دقائق لكل مرة غمس. بعد ذلك، جرى تعريضها تدريجياً لغاز النتروجين الجاف، ثم تحميصها على صفيحة ساخنة درجة حرارتها 200م° لمدة خمس دقائق، وذلك بهدف تخليص هذه الرقاقة من أي رطوبة اكتسبتها. وبعد ذلك، تم ترسيب طبقة من الذهب ثخانها 50 nm على السطح العلوي لرقاقة Si باستخدام بلازما الرشاشة المغنترونية، إذ من المتوقع أن تؤدي هذه الطبقة دور الوسيط لتساعد على النمو. ولقد جرى ترسيب طبقة من التيتانيوم Ti ثخانها 20 نانوميتر، على شكل طبقة لاصقة بين رقاقة Si وطبقة من الذهب، حيث تفصل هذه الطبقة اللاصقة بين سطوح Si(100) والأكسيد الطبيعي والذهب (Au(111)، وتمنع حدوث عدم التوافق في الشبيكات لهذه السطوح وتحسّن من ترابط السطوح البينية لهذه الطبقات. بعد ذلك جرى تليد الركازة لمدة ساعة عند درجة الحرارة 300م°. أما المرحلة الثانية، فتكمن في تحضير محلول النترات، إذ يتكون هذا المحلول من كل من نترات الزنك وهيكسا ميثالين تترامين بنسبة 1 إلى 1، إذ

تُوضع الركازة وجهها للأسفل في أعلى السطح لمحلول النترات. وتطفو الركازة على أعلى السطح للمحلول بسبب توافر التوتر السطحي بينهما. وتساعد عملية التلدين على تشكل غشاء رقيق من الذهب المرسَّب، حيث يتمتع هذا الغشاء ببلورات منتظمة الشكل على سطح ركازة السيلكون Si، والتي تشكل حرجاً في النمو الموجَّه المتراص لأسلاك أكسيد الزنك النانوية المترصصة. يمكن التحكم بعملية نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية من خلال التفاعلات الكيميائية الخمس الواردة آنفاً. في الواقع، تكون جميع هذه التفاعلات الخمس في حالة توازن، ويمكن التحكم بها من خلال ضبط معاملات هذه التفاعلات، مثل التركيز التمهيدي ودرجة الحرارة وزمن النمو، وذلك بهدف دفع توازن التفاعل إلى الأمام والخلف $uHmW$ ، يحدد التركيز التمهيدي كثافة السلك النانوي (الشكل 9.2c). ويتحكم كلٌّ من زمن النمو ودرجة الحرارة بطبيعة تشكل (مورفولوجية) السلك النانوي لأكسيد الزنك والنسبة البعدية له (أي النسبة بين أبعاد السلك).

يمكن التحكم بكثافة أسلاك أكسيد الزنك النانوية على الركازة من خلال التحكم بالتركيز الأولي لكلٍّ من ملح الزنك والهيكسا ميثالين تترامين HMTA. وبهدف اكتشاف العلاقة بين التركيز التمهيدي وكثافة مصفوفات السلك النانوي لأكسيد الزنك، أُجريت سلسلة من التجارب تم خلالها تغيير التركيز التمهيدي، لكن مع المحافظة على نسبة ثابتة بين ملح الزنك و HMTA. وتظهر النتائج التجريبية أن كثافة مصفوفات السلك النانوي تتعلق بشدة بالتركيز التمهيدي ويبين (الشكل 9.2d) (الخط الأحمر) تحليلاً مفصلاً للبيانات المقاسة. وتعرَّف كثافة أسلاك أكسيد الزنك النانوية على أنها عبارة عن رقم يعبر عن مقدار يتراوح بين 0.1 mM و 5 mM ميلي مول لكل $100 \mu m^2$ (ميكروناً مربعاً)، إذ من الممكن أن يزداد هذا المقدار بشكل دراماتيكي للأسباب التالية:

يزداد الكمون الكيميائي للزنك مع ازدياد تركيز الزنك داخل جسم المحلول. ويغية تعديل هذا الكمون الكيميائي المتزايد للزنك داخل المحلول، يجب أن تتوالد مواقع أكثر لتشكل النوى على سطح الركازة. ولهذا، تزداد كثافة أسلاك أكسيد الزنك النانوية. وعند الازدياد الفائض لتركيز الزنك، تبقى كثافة أسلاك أكسيد الزنك النانوية مستقرة تقريباً مع ميول بسيط للانخفاض. ويمكن إدراك هذه الكثافة المستقرة/أو المشبعة من خلال توافر كلٍّ من عملية تشكل النوى ونموها. ويتم الحكم على كثافة الأسلاك النانوية بالرقم الدال على عدد النوى المتشكلة في بداية عملية النمو، حيث تستمر هذه النوى بالنمو وتشكل قضباناً نانوية (وهي أقصر من الأسلاك النانوية). ولن تبدأ نوى جديدة بالتشكل في مرحلة متأخرة حتى لو كثرت الأيونات، التي تصل إلى الركازة، وذلك لسببين ممكنين: يتعلق الأول بالأخذ بالحسبان المقاس المطلوب تحقيقه في النوى لتنمو وتتحول إلى بلورة، إذ لن تتشكل قضبان نانوية إذا كانت مقاسات هذه النوى أصغر من المقاس الحرج. أما السبب الثاني، فيرجع إلى وجود المجموعة الأولى من القضبان النانوية التي نمت، مما يعني أن الأيونات التي تصل حديثاً إلى الركازة، تتمتع باحتمال وصول أكبر إلى الأسلاك النانوية الموجودة على الركازة، منه إلى النوى التي تشكلت حديثاً. لذا، فإن مقاس النوى يمكن ألا يتجاوز المقاس الحرج، وبالتالي سوف تتحل هذه النوى بالتأكد في جسم المحلول. وفي مثل هذه الحالة، يمكن ألا يؤدي الاستمرار في زيادة تركيز المحلول إلى ارتفاع كثافة الأسلاك النانوية، وذلك عندما تصبح كثافة هذا المحلول أكبر بكثير من كثافة الإشباع له. وهذا ما يفسر أيضاً لماذا الأسلاك النانوية، التي نمت من خلال تجاربنا، تتمتع بارتفاع منتظم موحد. حتى لو بقيت كثافة أسلاك أكسيد الزنك النانوية مستقرة عند مستوى عالٍ للتركيز التمهيدي، فإن نسبة تغطية السطح تزداد بشكل خفيف، وذلك يعود إلى النمو العرضاني للأسلاك النانوية (الخط الأزرق في الشكل 9.2d).



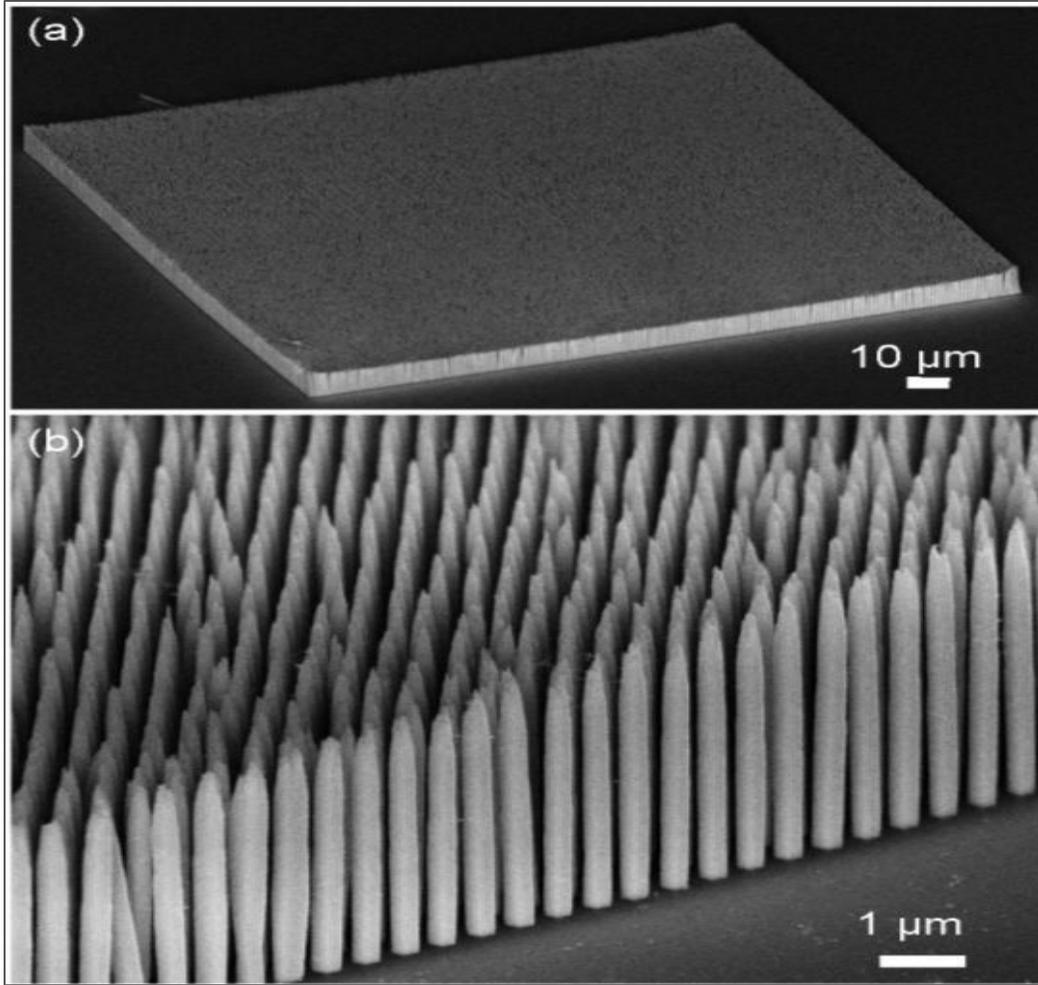
الشكل 9.2: منظر عام لكيفية نمو مصفوفات السلك النانوي لأوكسيد الزنك من أجل التركيز 5 ميلي مول واستمرار النمو لمدة 24 ساعة عند درجة الحرارة 70°م. (a) منظر علوي، (b) منظر علوي مكبر، (c) منظر بزواوية ميل 60°، (d) تغير الكثافة مع التركيز: (الخط الأحمر) يمثل خطأ بيانياً لكثافة السلك النانوي لأوكسيد الزنك في مساحة 100 μm²، (الخط الأزرق) يمثل خطأ بيانياً لنسبة المساحة المغطاة بأسلاك أكسيد الزنك النانوية. كل نقطة بيانات تم الحصول عليها من أربع مناطق مختلفة. يمثل الشكل المكبر ضمن الشكل الأساس صورة نموذجية لنمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية من أجل تركيز 5 ميلي مول.

2.5.2. النمو المنمذج لمصفوفة سلك نانوي متراس شاقولياً

لتنمية مصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية عالية الجودة نحتاج إلى نهج يلبي المتطلبات الثلاث التالية: يكمن الطلب الأول في أن النمو يجب أن يحدث عند درجة حرارة منخفضة، بحيث يمكن دمج الأسلاك النانوية مع الركيزة العامة. ويكمن الطلب الثاني في أن الأسلاك النانوية يجب أن تنمو وفقاً للنموذج المصمم مع توافر كل من الدرجة العالية في التحكم في المقاس والتوجيه والأبعاد والاتساق (التجانس) والشكل الممكن تحقيقه. وختاماً، يمكن أن تكون هناك ضرورة لحذف المحفز بغية دمج النقاثة المعتمدة على السيلكون. ولقد أسس النهج المتبع من قبلنا على كل من الطباعة الحجرية بالحزمة الإلكترونية والطريقة الحرمائية (hydro thermal) عند درجة حرارة منخفضة بغية تحقيق النمو النموذجي والمتراس لأسلاك أكسيد الزنك النانوية عند

درجة حرارة أقل من 100°م وعلى ركائز لاعضوية عامة مثل السيليكون Si و نتريد الغاليوم GaN، دون استخدام مُحفز [28]. وفي حالة النمو المنضد، فإن ركازة السيلكون المعطل إحساسها بنتريد الغاليوم ذي النمط n (n-type)، المستخدمة في هذه الحالة، جرى تصنيعها من خلال تنمية نتريد الغاليوم ذي الشحنة 2 μm على المستوى C الياقوتي من خلال استخدام عملية الترسيب البخاري الكيميائي العضوي المعدني. بعد ذلك جرى أيضاً تنظيف ركازة نتريد الغاليوم باستخدام طريقة التنظيف العيارية المطوّرة. بعد ذلك تم نسج الركازة على طبقة من البولي ميثاكريليت دو ميثيل PMMA ثخانتها 50 nm، ثم سُخنت هذه الركازة على صفيحة ساخنة عند درجة 180°م لمدة دقيقتين. وحدد هذا النموذج بمصفوفة على شكل دائرة قطرها 100 nm وبانحدار مقداره 1 μm. وتراوح مقدار الجرعة المستخدمة في هذه الحالة بين 300 μm/cm² و 600 μm/cm². لكل بعد تعرض الركازة للحزمة الإلكترونية عولجت بمزيج من أيزوبروبيل كحول (IPA) وميثيل إيزوبيوتيل كيتون (MIBK) بنسبة حجمية مقدارها (1:3) لمدة دقيقة واحدة، ولكن المعالجة ببلازما الأكسجين تكون قد أُجريت.

والآن أصبحت الركازة جاهزة لإجراء النمو الحرماي (الهيدروحراري) لمصفوفات سلك أكسيد الزنك النانوي عليها. ويتكون المحلول المغذي، المستخدم في هذه الحالة، من 5 mmol/L من كل من نترات الزنك و HMTA بنسبة 1:1. وتم وضع ركازة نتريد الغاليوم النموذجية، بحيث تطفو في أعلى السطح للمحلول المغذي. سُخنت كامل المنظومة إلى الدرجة 70°م لمدة 24 ساعة، وذلك بهدف إحداث نمو مضاعف لأسلاك أكسيد الزنك النانوية انطلاقاً من بقعة منفردة على رقاقة من السيليكون Si، ومن ثم سخنا معاً لدرجة الحرارة 90°م ولمدة 24 ساعة كل من قضيب أكسيد الزنك النانوي، الموجود في بقعة واحدة على رقاقة السيليكون Si، وركازة نتريد الغاليوم. ويبين (الشكل 10.2) المصفوفة المتراسة لسلك أكسيد الزنك النانوي نمت على نتريد الغاليوم وعلى ركازة من الياقوت. وتتمتع الأسلاك النانوية النامية بهذا الشكل بخاصية التحكم الكامل بكل من حجمها وأبعادها وتوجهها.

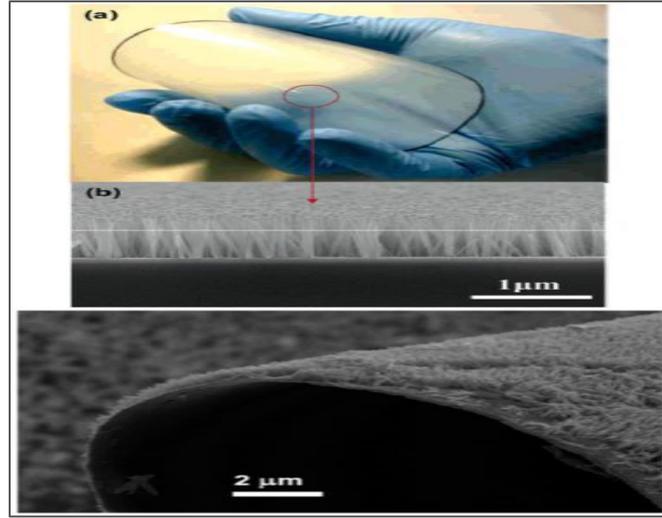


الشكل 10.2: (a) تكبير منخفض القيم، (b) تكبير عال القيم لصورة تم التقاطها بالمجهر الإلكتروني الماسح SHE لمصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية على ركازة من نتريد الغاليوم، وذلك باستخدام الطريقة الحرمانية (الهيدروحرارية).

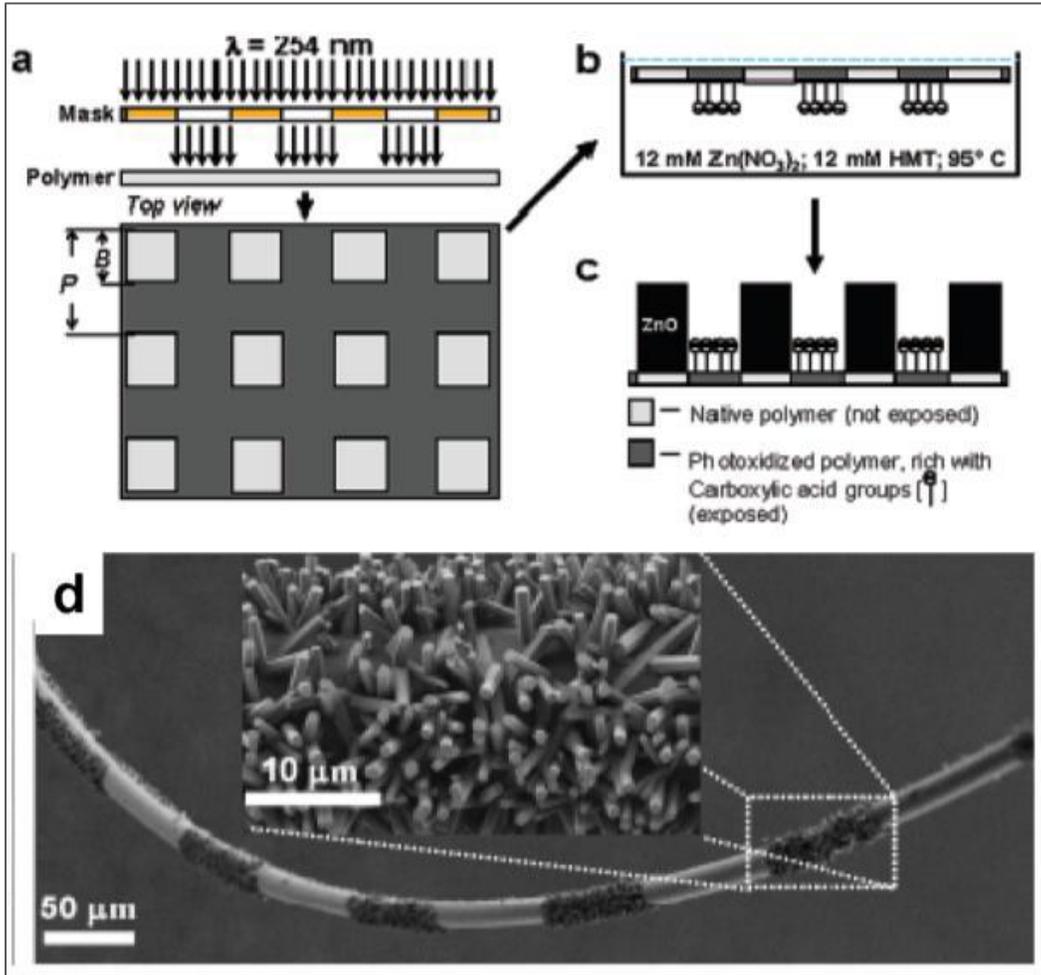
2.5.3. النمو على ركائز مرنة

يمكن أن تُنسخ قضبان أكسيد الزنك النانوية، وبأشكال مختلفة، على ركائز عضوية، إذ يمكن أن تتم رشرشة بذور أكسيد الزنك عند درجة حرارة الغرفة على أية ركازة افتراضية، مما يؤدي إلى نمو قضبان نانوية بكثافة عالية. فمثلاً، نجح الباحث لوي (Liu) وآخرون بوضع مثل هذا النسيج على ركازة من البولي يورثان الملدن حرارياً ذي الثخانة "4 بوصات، وذلك كما هو موضح في (الشكل 11.2) [29]. وتعد هذه التقنية عامة، أما فيما يتعلق بالركائز مثل البوليميد والبوليستيرين والبولي إيثيلين تيريثاليت والبولي إيثيلين نابثاليت، فهي بالضبط بضع نماذج للركائز، التي يمكن رؤيتها في الأدبيات المنشورة. وإضافة لما ذكر، يمكن ترسيب قضبان أكسيد الزنك النانوية كهروكيميائياً شريطة أن تكون الركازة إما ناقلة، أو مغطاة مسبقاً بمعدن أو أكسيد شفاف ناقل مثل أكسيد الإنديوم قصدير ITO. سوف تتكون الخطوة التجريبية النموذجية من محلول كهربائي من كلور الزنك/أو كلور البوتاسيوم $ZnCl_2/KCl$ ، بحيث يُغذى هذا المحلول بفقاعات الأكسجين O_2 للحفاظ على المحلول الكهربائي المشبع بالأكسجين. وغالباً ما تستخدم ثلاثة أقطاب (إلكترودات) عيارية مع قطب (إلكترود) مرجعي مشبع بالفضة/أو كلورها $Ag/AgCl$ ، ويستخدم مراراً قطب (إلكترود) عداد من البلاتين Pt. تساوي الكمونات النموذجية تقريباً (-1V). وتم الحصول على قضبان أكسيد الزنك النانوية مرسبة

كهروكيميائياً على غشاء رقيق (فيلم) من الذهب Au، بحيث يتمتع هذا الفيلم بنصف قطر انحناء أقل من $10\ \mu\text{m}$.



الشكل 11.2: مصفوفات لسلك أكسيد الزنك النانوي نمت على ركازة مرنة باستخدام النهج (الأسلوب) الحرمائي (الهيدروحراري).



الشكل 12.2: النمو النموذجي لمصفوفات سلك نانوي لأكسيد الزنك على الليف، [33].

2.5.4. نمو مصفوفات السلك النانوي على ألياف ميكروية

تم الحصول على نمو نموذجي لمصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية من خلال استخدام كل من محفزات ذهبية نموذجية وطبقات بذور [30]، وطبقات مفردة ذاتية التجميع [31]. ولقد طور الباحث مورين وآخرون عملية بسيطة خالية من المحفزات، التي يمكن أن لا تطبق على الأغشية الرقيقة (الأفلام) البوليميرية فحسب، وإنما على الألياف الميكروية [32]. ويكمن مبدأ العمل الرئيس لهؤلاء الباحثين في استخدام سطوح بوليميرية جرى تشيعها بالأشعة فوق البنفسجية (UV)، حيث المنطقة التي جرى تشيعها تولد مجموعة كربوكسيلية في أعلى السطح البوليميري، بينما تبقى المنطقة غير المشععة دون تغيير. والمدهش في هذه الحالة أن مصفوفات سلك أكسيد الزنك النانوي تستطيع أن تولد نوى وتتم اختيارياً في تلك المناطق، التي لا تتوافر فيها المجموعات الكربوكسيلية، ذلك لأن قطع الهيكسا ميثيلين تترامين المزودة بالبروتونات سوف تندمج مع سطح تلك المجموعات الكربوكسيلية الحامضية، مما يعيق التتوي (توليد النوى) عند أكسيد الزنك في تلك المناطق التي جرى تشيعها بالأشعة فوق البنفسجية. ويعد هذا التفسير منطقياً جداً، إذ بناءً على التقارير تتراوح قيم pka للهيكسا ميثيلين تترامين بين (5.4-5.5)، وبلغت قيم pH المقاسة 6.6 في حالات التفاعل، وأن 7% من قطع الهيكسا ميثيلين تترامين الموجودة سوف تزود بالبروتونات.

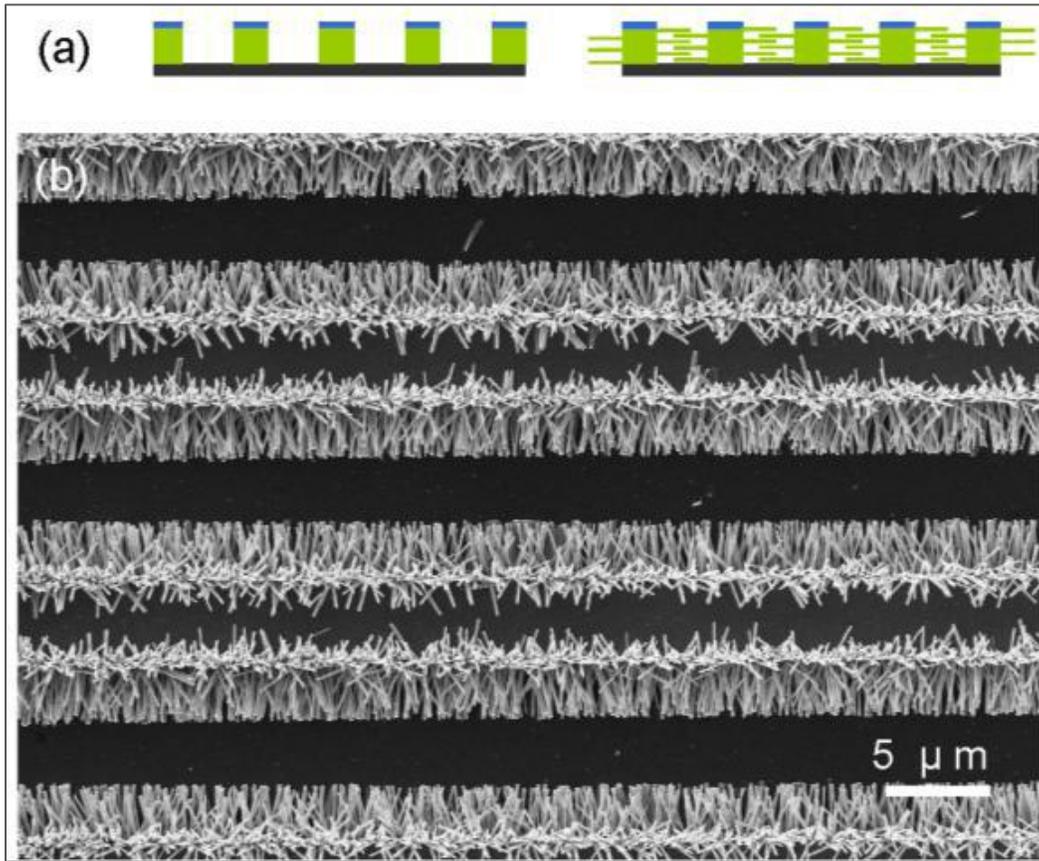
لقد استخدم هؤلاء الباحثون في تجاربهم شعيرات منفردة من البولستر (بولي إيثيلين تيريفثاليت PET)، وتعد المادة، التي تعبر خلالها مصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية، ويتم تنظيفها بعملية تنظيف عيارية. ففي البداية يجري تغطيس الشعيرات في الأسيتون لمدة 20 دقيقة، بعد ذلك تغسل بالماء المقطر وتُحمص عند درجة الحرارة 60°م لمدة 24 ساعة كحد أدنى بغية تخليص هذه الشعيرات من أية رطوبة اكتسبتها. ولجعل السطح مفعلاً، يتم شد شعيرة منفردة عبر فتحة (أو شق) في غشاء راجع من PC، بعدها يتم أكسدة الصورة باستخدام مصباح للأشعة فوق البنفسجية (UV) بطول موجة يساوي 254 nm عند كثافة اسمية من مرتبة 18.5 mM/cm² لمدة 50 دقيقة عبر قناع صورة عادي، وذلك كما هو موضح في (الشكل a12.2). بعد ذلك، يجري غمس الركازة المؤكسدة تصويرياً في حوالة حجمها 6 ml تحوي 3.5 ml من محلول النترات، الذي جرى تركيبه بنسبة 1:1 لكل من نترات الزنك وهيكسا ميثالين تترامين. ومن الممكن أن تتابن طبيعة البنى النانوية لأكسيد الزنك من خلال استخدام تراكيب مختلفة للمحلول المغذي في تجارب هؤلاء الباحثين.

وبهدف تنمية قضبان أكسيد الزنك النانوية استخدم محلول من 12 mM هيكسا هيدريت نترات الزنك و 12 mM من هيكسا ميثالين تترامين، بينما تم مزج محلول مؤلف من كل من 25 mM من هيكسا هيدريت نترات الزنك و 25 mM من هيكسا ميثالين تترامين و 0.18 mM من حمض الستريك بغية إنتاج شرائح من أكسيد الزنك، إذ يؤدي حمض الستريك دور أداة حماية لمستويات القاعدة للأسلاك النانوية بهدف تثبيط النمو المحوري لهذه الأسلاك النانوية، وهذا ما ستم مناقشته في بند لاحق. وبغية تجنب حدوث رواسب عشوائية غير المتجانسة المتشكلة من جسم المحلول، تم وضع الركازة، بحيث يكون وجهها المشع بالأشعة فوق البنفسجية (UV) متجهاً نحو الأسفل. بعد ذلك، جرى نزع العينة من القارورة وغُسلت بالإيثانول وجُففت بغاز النتروجين N₂ كما هو موضح في (الشكل b12.2).

2.5.5. النمو المنمذج لمصفوفة سلك نانوي متراص جانبياً

جرى تنمية أسلاك نانوية متراصة جانبياً باستخدام مواد مختلفة، وذلك بهدف إما تفعيل أو تثبيط النمو لهذه الأسلاك النانوية [33]، إذ جرى استخدام مادتين في هذه الحالة: استخدمت بذور أكسيد الزنك لإحداث النمو، بينما استخدمت طبقة من معدن الكروم Cr للحد من النمو الموضعي. وتكمن الخطوة الأولى للنمو في تصنيع نموذج عار من أكسيد الزنك مغطى في أعلاه بمعدن الكروم (الشكل a13.2)، إذ تنظف في البداية رقاقة من السيلكون (100) تسلسلياً بكل من محلول حمض الفلور HF،

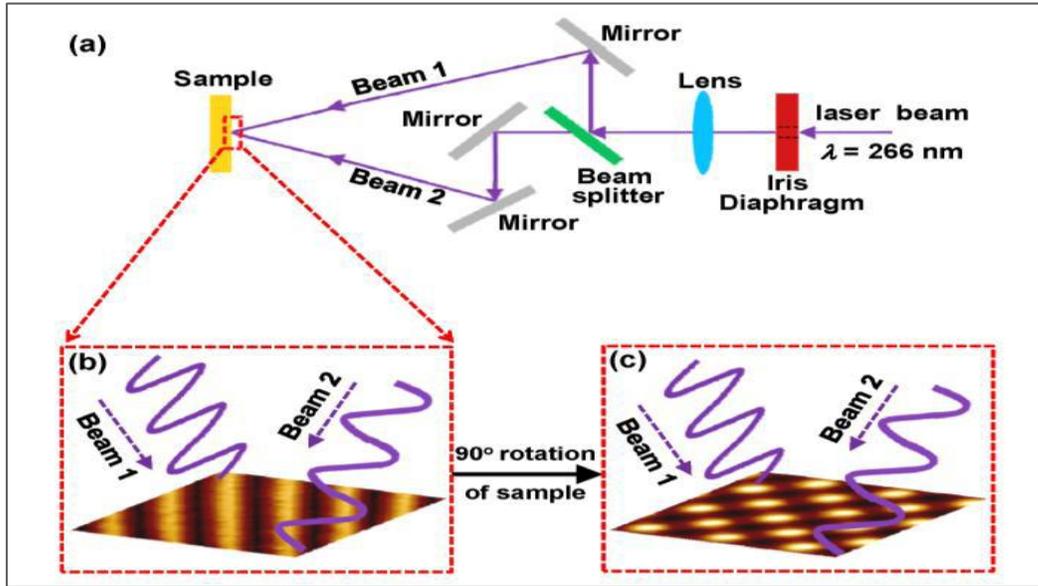
والأستيتون والكحول الإيزوبروبيلي والإيثانول. نُسجت مقاومة ضوئية، بحيث تغطي الركازة للحصول على طبقة منتظمة. بعد ذلك جرى إنتاج نموذج من خلال استخدام الطباعة الحجرية الضوئية. وتم الحصول على رقائق من أكسيد الزنك تحوي معدن الكروم على وجهها العلوي بعد أن تم نزعها من الأستيتون. ختاماً، وضعت الركازة في محلول النمو، وتمت معالجتها بالتعتيق (aged) لمدة 12 ساعة عند درجة حرارة 80°م. وبغية تحقيق تحكم منتظم في معدل النمو من خلال التحكم بتركيز المحلول، فقد جعلت الركازة تطفو رأساً على عقب على المحلول، بحيث يكون جانب الركازة، الموجود عليه النموذج، موجهاً للأسفل. ويبين (الشكل 13.2 b) النمو الجانبي لمصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية على ركازة من السيليكون Si. ويمكن في هذا الشكل ملاحظة أن مصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية قد نمت من الأطراف الجانبية للنموذج وتتمتع بتراس جيد. ويتوضع أكثر من 70% من الأسلاك النانوية بشكل متوازٍ للركازة، إذ ليس هناك سوى جزء بسيط فقط من النمو الفوضوي (المضطرب) لأسلاك أكسيد الزنك النانوية يتموضع عند حافة النموذج. وتتمتع أسلاك أكسيد الزنك النانوية بقطر يقل عن 200 nm وطول يصل إلى 4 ميكرونات تقريباً. وبدل المقطع العرضي للأسلاك النانوية، الذي يكون على شكل مواشير سداسية منتظمة، يدل على أن المحور C للسلك النانوي من أكسيد الزنك يقع على استقامة الاتجاه الطولي لهذا للسلك.



الشكل 13.2: (a) الخطوات التمثيلية لنمو مصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية النموذجية والمتراصة جانبياً. **(b)** صورة، التقطت بالمجهر الإلكتروني الماسح، لمصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك، نمت جانبياً على ركازة من السيليكون Si.

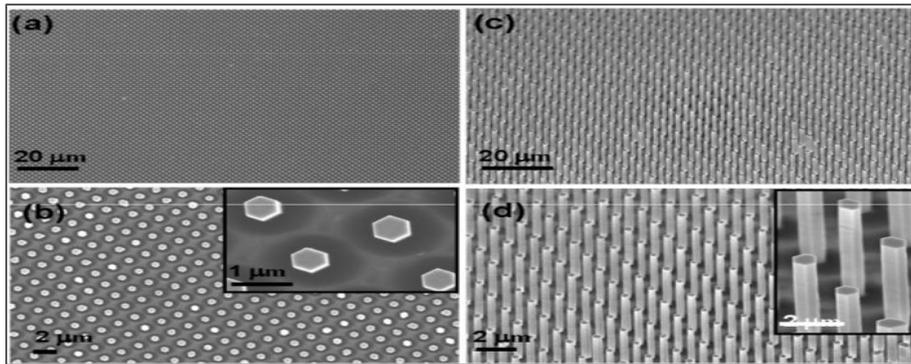
2.6. نمو مصفوفات سلك نانوي في مستوى الرقاقة بالتمنجة الليزرية

بغية تحقيق نمو مُتحكم به لمصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك عالية الترتيب ومتراصة، مع توافر طاقة إنتاجية عالية وتكلفة منخفضة على نطاق واسع، لابد من تبني الدمج (الجمع) المناسب بين كل من تقنيات النموذج وأساليب نسج أسلاك أكسيد الزنك النانوية. نستعرض أحد هذه الأساليب والمتمثل في النهج المتبع للنمو النموذجي لمصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراسة جانبياً من خلال الدمج بين تدخل الليزر والطباعة الحجرية (Laser Interference Lithography) [34,35]، إذ يُعد ذلك عبارة عن تقنية واسعة النطاق وسريعة وغير مقلّعة لتشكيل نماذج نانوية دون تماس. ويكون النمو عالي التقانة (HT) لأسلاك أكسيد الزنك النانوية، سواء تم هذا النمو بتنضيد متجانس على طبقة غير ناعمة من أكسيد الزنك، التي تتمتع أيضاً بتركيب كيميائي رطب، أو أن يتم هذا النمو بتنضيد غير متجانس على غشاء رقيق (فيلم) من نتريد الغاليوم GaN. ويمكن للركائز أن تُشكّل بأوامر دورية وخلال فترات متغيرة ومتناظرة وعلى مساحات واسعة. إذ يمكن أن يصل بُعد الرقاقة، المشكلة بطريقة الدمج بين تدخل الليزر والطباعة الحجرية (LIL)، يمكن أن يصل هذا البعد إلى 2 بوصة. وعلى نحو كامل تنمو مصفوفات سلك أكسيد الزنك النانوي في مواقع محددة مسبقاً، وذلك من خلال تطبيق طريقة ذات تقانة عالية (HT) ودون استخدام محفز، لكن مع توافر التحكم بكل من توجيه النمو وأبعاده وموقعه. وتكون الأسلاك النانوية، التي جرى توليفها، منتظمة جداً في طولها وقطرها وتراصص مثالي، وتكون هذه الأسلاك عبارة عن بلورات أحادية، وتتمتع باتجاه نمو على طول المحور [0001].

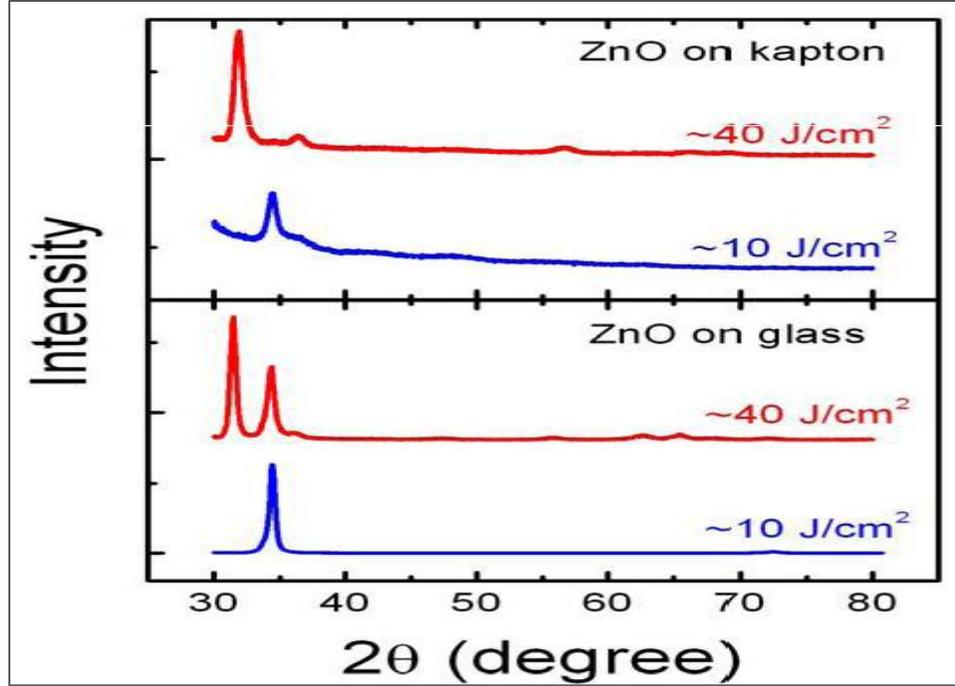


الشكل 14.2: (a) مخططات الهيكل التجريبي للتداخل الليزري في صنع النموذج، إذ يبقى هذا الهيكل نفسه سواء استخدم التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية LIL أو أسلوب التداخل الليزري LIA فقط. واستخدم كمنبع ليزري نبضي من نوع إندنيوم: ياغ Nd : YAG (شعاع كمومي PRO 290 من فيزياء الطيف)، إذ يتمتع هذا الليزر بزمن نبضة مقداره 10 ns (10 نانوثانية) وطول موجة 266 nm. ولقد تم شطر الحزمة الليزرية الأولية (266 nm) إلى حزمتين ضوئيتين متساويتين (حزمة 1 وحزمة 2). (b) شكل تداخل الحزمتين الأولى والثانية نموذج حاجز شبكي على طبقة المقاومة الضوئية (وفقاً لأسلوب التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية (LIL))، أو أن يوجه هذا التداخل الليزري على الركيزة بشكل مباشر (وفقاً لأسلوب التداخل الليزري (LIA))، وذلك عند التشعيع بنبضة ليزر مفردة مدتها 10 ns. (c) جرى بعد ذلك تدوير العينة بمقدار 90° أو عند أية زاوية تم اختيارها مع تعريض هذه العينة مرة ثانية للإشعاع، حيث تشكلت نماذج لمصفوفات نقاط نانوية دورية إما على طبقة المقاومة الضوئية أو على الركيزة. ولقد جرى تصنيع كل من الحاجز الشبكي ونماذج النقاط النانوية (الشكلان b و c) على مقاومة ضوئية ذات أساس إيبوكسي SU 8 باستخدام أسلوب التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية LIL، وتم التصوير باستخدام مجهر سبر ماسح.

جرى تحضير نماذج بهدف نسج مصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية باستخدام أسلوب التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية LIL للمقاومة الضوئية، إذ يعد ذلك طريقة كيميائية ضوئية مماثلة في أسلوبها لطريقة الطباعة الليثوغرافية الضوئية. وتستخدم المقاومة الضوئية ذات الأساس الإيبوكسي SU-8 عموماً في صناعة الإلكترونيات الميكروية، التي تم اعتمادها في تجاربنا. تقوم تقنية التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية LIL بتوليد نماذج على المقاومة الضوئية دون قناع. وعندما يتم التشعيع، يحدث تداخل السلاسل الجزيئية الطويلة للمقاومة الضوئية ذات الأساس الإيبوكسي SU-8 مسبباً تصلب المناطق التي جرى تشعيها. وبعد التطوير، تبقى المناطق المشععة من طبقة المقاومة الضوئية ذات الأساس الإيبوكسي SU-8، وتؤدي دور القناع لنمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية. ويبين (الشكل 1a) الهيكل التجريبي لنموذج التداخل الليزري، إذ استخدم منبع ليزر نبضي من النوع إنديوم-ياغ Nd: YAG (شعاع كمومي PRO 290 من فيزياء الطيف)، حيث يتمتع هذا الليزر ب زمن نبضة مقداره 10 ns وطول موجة مقداره 266 nm. وانشطرت الحزمة الليزرية الأولية (266 nm) إلى حزمتين ضوئيتين متساويتين (الشكل a14.2)، حيث شكل التداخل بين الحزم نموذج حاجز شبكي (الشكل b14.2) على طبقة المقاومة الضوئية، وذلك تحت تأثير الإشعاع الناجم عن نبضة ليزرية وحيدة لمدة (10 ns). ويجري تحديد دور الفراغ الخفي d للنموذج تبعاً لكل من طول الموجة الضوئية (λ) ونصف الزاوية (θ) الواقعة بين الحزمتين الواردتين، وذلك وفقاً لعلاقة $d = \lambda/2\sin(\theta)$. بعد ذلك جرى تدوير العينة بمقدار 90° وألحقت بتشعيع ثانٍ، وتم تشكل نماذج لمصفوفات النقاط النانوية الدورية على طبقة المقاومة الضوئية (الشكل c14.2). استخدمت الركيزة النموذجية بغية إحداث نمو مباشر لأسلاك أكسيد الزنك النانوية، وذلك باستعمال الأسلوب (النهج) الكيميائي. ولقد حددت مواقع النمو بواسطة النموذج، أما توجيه الأسلاك النانوية، فقد جرى تلقيه بواسطة علاقة التضييد بركيزة تبريد الغاليوم GaN. استخدم المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لالتقاط صور توضح طبيعة تشكل مصفوفات السلك النانوي النموذجي ومدى انتظامها، والتي نمت بواسطة أسلوب التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية LIL، ولقد جرى فحص هذه المصفوفات والتأكد من وجودها باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح آنف الذكر (الشكل 15.2). وتتمتع غالبية الأسلاك النانوية بالقطر والارتفاع نفسيهما. ولقد كان النمو منتظماً للمصفوفات المتراسة للسلك النانوي لأكسيد الزنك، حيث اتبع هذا النمو التقوب النموذجية متمتعاً بدقة عالية وبقطر يصل تقريباً إلى 600nm (الشكل b15.2). وتكون جميع الأسلاك النانوية متراسة تماماً وعمودية على الركيزة وتتمتع بالارتفاع نفسه الذي يصل تقريباً إلى 5 μm (الشكل c15.2 و d15.2).



الشكل 15.2: النمو التضييدي غير المتجانس لمصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراسة شاقولياً على ركيزة من تبريد الغاليوم GaN من خلال استخدام أسلوب التداخل الليزري مع الطباعة الحجرية (LIL). و (a) و (b) عبارة عن صور (بتكبيرات مختلفة) التقطت من الأعلى على نطاق واسع وينمط موحد بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح SEM لمصفوفات سلك نانوي لأكسيد الزنك متراسة شاقولياً على ركيزة من تبريد الغاليوم GaN. و (c) و (d) عبارة عن صور (بتكبيرات مختلفة)، التقطت من على نطاق واسع وينمط موحد بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح SEM لمناظر مائلة 45 درجة لمصفوفات سلك نانوي متراس شاقولياً لأكسيد الزنك على ركيزة من تبريد الغاليوم GaN بمقياس كيسر ونمط متجانس عند مختلف درجات التكبير.



الشكل 2.16: الأطياف الناتجة عن استخدام طريقة انعراج الأشعة السينية (XRD) لأغشية (أفلام) من أكسيد الزنك نمت على ركائز من الكابتون Kapton والزجاج باستخدام كل من شعاع ليزري عالي الاستطاعة (40 J/cm^2) ومثيله منخفض الاستطاعة (10 J/cm^2).

2.7. فيلم أكسيد الزنك المنسوج

تكمن إحدى الميزات الفريدة من نوعها لأكسيد الزنك في أنه عندما يترسب الأكسيد ليشكل غشاءً رقيقاً (فيلمًا)، يُنسج هذا الفيلم على طول المحور [0001]. ولهذا، سيكون الاتجاه القطبي متراصاً. وعلى الرغم من أن الفيلم يتمتع بتوجهات عشوائية عبر الحبيبات وفقاً لاتجاه المحورين a و b داخل مستوي، فإن الاتجاه العمودي للفيلم المرسب غالباً ما سيكون وفقاً للمحور c. وتتمتع هذه الميزة بأهمية خاصة من أجل التطبيقات على المولدات النانوية، وذلك بفضل توافر كل من التراص البلوري ومثيله الناتج عن الكهرباء الضغطية.

بغية استعراض هذه الميزة نستخدم كنموذج فيلماً من أكسيد الزنك جرى تحضيره بطريقة التوضيع بالليزر النبضي [36] PI_D. ويمكن أن تكون الركيزة التي يتموضع عليها الفيلم، معدة من الكابتون (Kapton) أو الزجاج، لكن توجيه النسيج يعتمد على تدفق الليزر. ويوضح (الشكل 2.16) طيف انعراج أشعة X لأفلام من أكسيد الزنك تموضعت على ركائز من الكابتون والزجاج. وعندما يصل تأثير الليزر لقيمه العظمى 45 J/cm^2 يمكن أن يلاحظ تغير النسيج من الاتجاه <001> إلى الاتجاه <100>، ولكن هذا التغير لن يكون مكتملاً كما هي الحال في توضيع أفلام أكسيد الزنك على ركائز من السيلكون Si. ولقد تبين أنه من الضروري أن طاقة التأثير الليزري اللازمة لتغيير نسيج فلم أكسيد الزنك من المستوي (0001) إلى مثيله (1-100) بشكل كامل على ركائز من الزجاج والكابتون، أعلى من مثيلتها اللازمة لتغيير النسيج على ركائز من السيلكون.

2.8 المراجع

- [1] J. Jagadish and S.J. Pearton (ed), Elsevier. 2006.
- [2] Physics World, October issue 36 (2008).
- [3] C.M. Lieber and Z.L. Wang, *MRS Bulletin* **32**, 99 (2007).
- [4] J.G. Lu, P.C. Chang, Z.Y. Fan, *Materials Science & Engineering R-Reports* **52**, 49 (2006). [5] Y.W. Heo, D.P. Norton, L.C. Tien, Y. Kwon, B.S. Kang, F. Ren, S.J. Pearton, J.R. LaRoche, *Materials Science and Engineering R* **47**, 1 (2004).
- [6] N. Wang, Y. Cai, R.Q. Zhang, *Materials Science and Engineering R*, 60, 1 (2008).
- [7] Z.L. Wang, *J. Nanoscience and Nanotechnology* **8**, 27 (2008).
- [8] X.D. Wang, J.H. Song and Z.L. Wang, *J. Materials Chemistry* **17**, 711 (2007).
- [9] Z.L. Wang, *Materials Science and Engineering Report*, **64** (issue 3-4), 33 (2009)
- [10] O. Dulub, L. A. Boatner, and U. Diebold, *Surf. Sci.* **519**, 201 (2002).
- [11] B. Meyer and D. Marx, *Phys. Rev. B.* **67**, 035403 (2003).
- [12] P. W. Tasker, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **12**, 4977 (1979).
- [13] O. Dulub, U. Diebold and G. Kresse, *Phys. Rev. Letts.* **90**, 016102 (2003).
- [14] A. Wander, F. Schedin, P. Steadman, A. Norris, R. McGrath, T. S. Turner, G. Thornton and N. M. Harrison, *Phys. Rev. Letts.* **86**, 3811 (2001).
- [15] V. Staemmler, K. Fink, B. Meyer, D. Marx, M. Kunat, S. Gil Girol, U. Burghaus and Ch. Woll, *Phys. Rev. Letts.* **90**, 106102 (2003).
- [16] R. S. Yang, Y. Ding and Z. L. Wang, *Nano Lett.* **4**, 1309 (2004).
- [17] Y. Ding, X.Y. Kong, Z.L. Wang, *Phys. Rev. B* **70**, 235408 (2004).
- [18] Y. Ding and Z.L. Wang, *Micron*, **40**, 335 (2009).
- [19] Z. L. Wang, Z. W. Pan and Z. R. Dai, *Microsc. and Microanal.* **8**, 467 (2002).
- [20] M.H. Huang, S. Mao, H. Feick, H.Q. Yan, Y.Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo and P.D. Yang, *Science* **292**, 1897 (2001).
- [21] X.D. Wang, C.J. Summers and Z.L. Wang, *Nano Letters* **3**, 423 (2004).
- [22] X.D. Wang, J.H. Song, P. Li, J.H. Ryou, R.D. Dupuis, C.J. Summers and Z.L. Wang, *J. Am. Chem. Soc.* **127**, 7920 (2005).
- [23] J.H. Song, X.D. Wang, E. Riedo and Z.L. Wang, *J. Phys. Chem. B.* **109**, 9869 (2005).
- [24] X.D. Wang, J.H. Song, C.J. Summers, J.H. Ryou, P. Li, R.D. Dupuis, and Z.L. Wang, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 7720 (2006).
- [25] S. S. Lin, J. I. Hong, J. H. Song, Y. Zhu, H. P. He, Z. Xu, Y. G. Wei, Y. Ding, R. L. Snyder, and Z. L. Wang, *Nano Letters* **9**, 3877 (2009).
- [26] L. Vayssieres, *Advanced Materials* **15**, 464 (2003).
- [27] S. Xu, C. Lao, B. Weintraub, Z. L. Wang, *Journal of Materials Research* **23**, 2072 (2008).
- [28] S. Xu, Y.G. Wei, M. Kirkham, J. Liu, W.J. Mai, R.L. Snyder, Z.L. Wang, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 14958 (2008).
- [29] T. Y. Liu, H. C. Liao, C. C. Lin, S. H. Hu, S. Y. Chen, *Langmuir* **22**, 5804 (2006).
- [30] Y. Tak, K. Yong, *Journal of Physical Chemistry B.* **109**, 19263 (2005).
- [31] J. W. P. Hsu, J. R. Tian, N. C. Simmons, C. M. Matzke, J. A. Voigt, J. Liu, *Nano Letters* **5**, 83 (2005).
- [32] S. A. Morin, F. F. Amos, S. Jin, *Journal of the American Chemical Society* **129**, 13776 (2007).
- [33] Y. Qin, R.S. Yang and Z.L. Wang, *J. Physical Chemistry C.* **122**, 18734 (2008).
- [34] D. Yuan, R. Guo, Y. Wei, W. Wu, Y. Ding, Z. L. Wang, S. Das, *Adv. Func. Materials* **20**, 3484 (2010).
- [35] Y. Wei, W. Wu, R. Guo, D. Yuan, S. Das and Z. L. Wang, *Nano Letters* **10**, 3414 (2010).
- [36] J. Hong, J. Bae, Z. L. Wang, R. L. Snyder, *Nanotechnology* **20**, 085609 (2009).

الفصل الثالث: الكهرباء الضغطية والكمون الضغطي

ندخل في البداية نظرية الكهرباء الضغطية، وبعدها كمون الكهرباء الضغطية (الكمون الضغطي) الناتج عن تأثير الكهرباء الضغطية، وذلك بهدف توضيح مبدأ المولدات النانوية. ولقد افترض في الأدبيات نظريات عدة للكهرباء الضغطية لبلورة نانوية أحادية البعد (1D)، بحيث احتوت هذه النظريات كلاً من المبادئ الأولى للحسابات [1,2] والمحاكاة متعددة الأبعاد [3]MD. والنماذج المتصلة [4]. على أية حال، لقد صعب إدخال كل من المبدأ الأولي والمحاكاة متعددة الأبعاد في منظومة الإلكترونيات الضغطية النانوية (ذلك لأن الأبعاد النموذجية لهذه المنظومة، هي 50 nm للقطر و 2 ميكرون للطول)، ويعود ذلك إلى الرقم الضخم من عدد الذرات. وبعدها النموذج المتصل، المقترح من قبل ميتشالسكي وآخرين، نموذجاً وثيق الصلة بالموضوع، ذلك لأنه يعطي معياراً للتمييز بين النظام الميكانيكي المهيمن ومثيله النظام الكهروساكن المهيمن أيضاً. نقترح في هذا المقطع نموذجاً متصلاً للكمون الكهروساكن لأسلاك نانوية محنية جانبياً. ويجري إدخال تقنية الاضطراب (الفوضى) بغية حل المعادلات التفاضلية المترابطة، وبذلك تعطي المعادلة التحليلية المستنتجة نتيجة تقارب 6% من تلك، التي جرى الحصول عليها من خلال إجراء الحساب العددي الكامل. وتضع النظرية، وبشكل مباشر، القواعد الأساسية لكل من الإلكترونيات الضغطية النانوية والمولد النانوي، كما هو مقترح آنفاً [1].

3.1. المعادلات الناظمة

يكن توجهننا النظري في استنباط العلاقة بين التوزع الكموني داخل السلك النانوي والميزة البعدية لهذا السلك ومقدار القوة المطبقة عند طرفه. ولتحقيق هذا الهدف بدأنا بالمعادلات الناظمة للمواد الكهروضغطية الساكنة، التي هي عبارة عن ثلاث مجموعات: معادلة التوازن الميكانيكي (Eg-1.3) ومثيلتها الأساسية (Eg-3.2) ومعادلة التوافق الهندسي (Eg-3.3) ومعادلة غاوص للحقل الكهربائي (Eg-3.4). ويكمن شرط التوازن الميكانيكي، وعندما لا تتوافر قوة أساسية فاعلة $\bar{f}e^{(b)} = 0$ تؤثر في السلك النانوي، يكمن فيما يلي:

$$\Delta \cdot \sigma = \bar{f}e^{(b)} = 0 \quad (3.1.1)$$

حيث: α التوتر الإجهادي، والذي يتعلق بكل من الانفعال ϵ ، والحقل الكهربائي \bar{E} والإزاحة الكهربائية \bar{D} وذلك وفقاً للمعادلات الأساسية التالية:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= C_{pq} \epsilon_q - e_{kp} E_K \\ D_i &= e_{iq} \epsilon_p + K_{ik} \cdot E_K \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

هنا ثابت المرونة الخطي، e_{kp} المعامل الكهروضغطي الخطي، K_{ik} ثابت العازلية. ولا بد من الإشارة إلى أن المعادلة (3.1.2) لا تحوي عناصر من الاستقطاب اللحظي المقدمة من الشحنة القطبية على السطوح القطبية (0001) \pm [5]، التي تمثل، وعلى التوالي النهايات العليا والدنيا للسلك النانوي. وسوف تجرى معالجة صلاحية هذا التقريب لاحقاً. وللحفاظ على الترميز مختصراً، استخدم الترميز كحرف مذيّل بحرفين وذلك بحسب الباحث ناي [6]. وإذا أخذ بالحسبان أن C_{6v} هو تناظر بلورة أكسيد الزنك (وفقاً لبنية فورترزيت)، يمكن كتابة المعاملات K_{ik} و e_{kp} و C_{pq} على الشكل التالي:

$$C_{pq} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(C_{11}-C_{12})}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

$$e_{kp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & C_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{15} & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{31} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

$$K_{ik} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{11} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

وتكون معادلة التوافق عبارة عن القيد الهندسي، الذي لابد من تعويضه بالانفعال ε_y ، وذلك كما يلي:

$$e_{ilm} e_{jpm} = \frac{\sigma^2 \varepsilon_{mp}}{\partial_{xl} \partial_{xq}} \quad (3.3)$$

وتكون الرموز الواردة في المعادلة (3.3) في حدودها الطبيعية، إذ لم يجري استخدام ملاحظة الباحث ناي في هذه الحالة. وتمثل المعاملات e_{ilm} و e_{jpm} توترات غير متناظرة وفقاً للباحثين ليفي - سيفيتا. وبغية تبسيط الاستنتاج نفترض أن انحناء السلك النانوي كان صغيراً.

وختاماً، وبفرض عدم وجود شحنة حرة $\rho_e^{(b)}$ في السلك النانوي، يجب أن تتحقق معادلة غاوص، وذلك كما يلي:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e^{(b)} = 0 \quad (3.4)$$

وتحد هذه الفرضية من إمكانية تطبيق المعادلة النازمة (3.4) على المواد الكهروضغطية العازلة، ولكن ذلك يعد بداية جيدة لتطوير نماذج أكثر تطوراً.

3.2. نظرية المراتب الثلاثة الأولى للاضطراب

تضمن الحالة النموذجية للسلك النانوي الكهروضغطي الشاقولي في أنه ينحرف لدى تطبيق قوة عند طرفه. وتعطي المعادلات (3.1) - (3.4)، وعند توافر شروط حدية مناسبة، تعطي توصيفاً كاملاً للنظام الكهروضغطي الساكن. وعلى أية حال، يعد حل هذه المعادلات معقداً إلى حد ما، ولا يتوافر الحل التحليلي في أغلب الحالات، حتى عندما تكون المنظومة ثنائية الأبعاد (2-D)، يستوجب الحل معادلة تفاضلية جزئية من المرتبة السادسة [7]. وبغية استنباط الحل التقريبي للمعادلات، نطبق توسع الاضطراب للمعادلات الخطية بغية تبسيط الحل التحليلي [8]. بعد ذلك، سوف نقوم باختبار دقة نظرية الاضطراب، وذلك من خلال العودة إلى النتائج الدقيقة، التي جرى حسابها باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM).

وبغية استنتاج الكمون الكهروضغطي الموزع في السلك النانوي، وعند سويات مختلفة للتأثير المقارن الكهروميكانيكي، نقوم الآن بإدخال معامل الاضطراب λ في المعادلات الأساسية، وذلك من خلال تحديد أن المعامل $\check{e}_{kp} = \lambda e_{kp}$ ، والذي يجري إدخاله بهدف اقتفاء أثر مقدار الاضطرابات الناتجة عن توافر سويات مختلفة للاضطرابات الحاصلة في بناء الكمون الكلي. نأخذ بالحسبان مادة افتراضية تتمتع بكل من معامل المرونة الخطي C_{pq} ، وثابت العازلية K_{ik} ، والمعامل الكهروضغطي \check{e}_{kp} ، فعندما $\lambda = 1$ تكون هذه المادة الافتراضية عبارة عن أكسيد الزنك الحقيقي. وعندما $\lambda = 0$ ، فإن ذلك ينسجم مع تلك الحالة، التي لا يتوافر

فيها أي تقارب بين الحقل الميكانيكي ومثيله الكهربائي. وعندما تتراوح قيم λ بين الصفر والواحد للمادة الافتراضية، فإن كلاً من الحقل الميكانيكي ومثيله الكهربائي يكونان تابع للمعامل λ ، هذه التوابع التي يمكن كتابتها بالصيغة الموسعة التالية:

$$\begin{cases} \sigma_p(\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n \sigma_p^{(n)} \\ \varepsilon_q(\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n \varepsilon_q^{(n)} \\ E_k(\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n E_k^{(n)} \\ D_i(\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n D_i^{(n)} \end{cases} \quad (3.5)$$

حيث يمثل الرمز العلوي (n) سويات نتائج الاضطراب. فإذا جرى تعويض المعادلة (3.2)، وذلك من أجل مادة افتراضية تتمتع بالمعامل الكهروضغطي e_{kp} ، ومقارنة الرموز في تلك المعادلات، التي تحوي السوية نفسها للمعامل λ ، فإن معادلات الاضطراب للمراتب الثلاثة الأولى تعطى كما يلي:

$$0^{\text{th}} \text{ order:} \quad \begin{cases} \sigma_p^{(0)} = c_{pq} \varepsilon_q^{(0)} \\ D_i^{(0)} = \kappa_{ik} E_k^{(0)} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$1^{\text{st}} \text{ order:} \quad \begin{cases} \sigma_p^{(1)} = c_{pq} \varepsilon_q^{(1)} - e_{kp} E_k^{(0)} \\ D_i^{(1)} = e_{kq} \varepsilon_q^{(0)} + \kappa_{ik} E_k^{(1)} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$2^{\text{nd}} \text{ order:} \quad \begin{cases} \sigma_p^{(2)} = c_{pq} \varepsilon_q^{(2)} - e_{kp} E_k^{(1)} \\ D_i^{(2)} = e_{kq} \varepsilon_q^{(1)} + \kappa_{ik} E_k^{(2)} \end{cases} \quad (3.8)$$

أما بالنسبة للمعادلات (3.1) و(3.3) و(3.4)، التي لا يتوافر بينها أي اقتران واضح، فليس هناك من حاجة لعملية فصل خلال السعي لحل اضطرابي.

نأخذ الآن بالحسبان حلول المراتب الثلاثة الأولى. فمن أجل المرتبة 0 في المعادلة (3.6) يكون الحل لسلك نانوي منحني دون وجود أثر كهروضغطي، مما يعني أنه لن يكون هناك أي حقل كهربائي ولو توافر الانفعال المرن، وسوف نهمل في هذه الحالة الاضطراب الناتج عن الاستقطاب اللحظي. وفي حالة السلك النانوي من أكسيد الزنك، فإن هذا السلك ينمو، بحيث يكون محوره C موازياً لاتجاه النمو. وتكون السطوح (0001)± في نهايتي السلك النانوي العليا والدنيا منتهية بالأيونات Zn^{2+} و O^{2-} على التوالي. أما الحقل الكهربائي، الذي يعود وجوده إلى ظهور الاستقطاب اللحظي من الأيونات القطبية على السطح (0001)±، يمكن إهماله (أي الحقل)، وذلك للسببين التاليين:

الأول: إن السلك النانوي يتمتع بقيمة عالية لنسبة الأبعاد، لذلك فإن الشحنات القطبية الموجودة على السطوح القطبية (0001)±، التي تشكل النهايات العليا والدنيا للسلك النانوي في أغلب الحالات، يمكن أن تُشاهد كأنها شحنات لنقطتين، وبالتالي لن تسبب نشوء حقل جوهري ملحوظ داخل السلك النانوي.

الثاني: يجري تعديل الشحنة القطبية، الموجودة عند النهاية الدنيا للسلك النانوي، من خلال الكترود (قطب) موصل، بينما تلك الشحنة، الموجودة عند النهاية العليا للسلك النانوي، يمكن أن تعدل بواسطة الجزيئات القريبة، التي امتصها السطح، وذلك

عند تعرضها للهواء. وزيادةً على ذلك، حتى لو أن الشحن القطبية عند النهاية العليا تقدم كموناً ساكناً، فإن ذلك لن يسهم في الطاقة المولدة، وإنما يؤدي إلى إزاحة خط قاعدة الكمون بقيمة ثابتة، تنتقل إلى إشارة الخلفية، ذلك لأن الشحن القطبية تكون حاضرة وتبقى ثابتة بغض النظر عن درجة انحناء السلك النانوي. وبالتالي، إذا أمكن لنا أن نعد أن: $D_i^{(0)} = 0$ و $E_k^{(0)} = 0$ ، فإنه يمكن وعلى التوالي، ومن المعادلتين (3.7) و (3.8) أن نجد أن: $\delta_p^{(1)} = 0$ و $\varepsilon_p^{(1)} = 0$ و $E_p^{(2)} = 0$. وتصبح المعادلات (3.6-3.7) على الشكل التالي:

$$0^{\text{th}} \text{ order:} \quad \sigma_p^{(0)} = c_{pq} \varepsilon_q^{(0)} \quad (3.9)$$

$$1^{\text{st}} \text{ order:} \quad D_i^{(1)} = e_{kq} \varepsilon_q^{(0)} + \kappa_{ik} E_k^{(1)} \quad (3.10)$$

$$2^{\text{nd}} \text{ order:} \quad \sigma_p^{(2)} = c_{pq} \varepsilon_q^{(2)} - e_{kp} E_k^{(1)} \quad (3.11)$$

يمكن تفسير المعنى الفيزيائي لهذه المعادلات كما يلي: يمكن لهذه المعادلات، وفي ظل مراتب مختلفة، أن تتوافق مع كلٍ من الاقتران وعدمه بين الحقل الكهربائي والتشوه (الانفعال) الميكانيكي: أي أن الحل ذا المرتبة 0 يعني تشوهاً ميكانيكياً صرفاً دون وجود كهرباء ضغطية، أما الحل ذو المرتبة 1 فهو نتيجة للأثر الكهروضغطي المباشر، الذي يعني أن الإجهاد - الانفعال يولدان حقلاً كهربائياً في السلك النانوي، ويظهر الحل من المرتبة 2 حدوث أول تغذية خلفية (أو اقتران) للحقل الكهروضغطي مع الانفعال في المادة.

وفي حالتنا هذه، أي كما هو الحال في أسلاك نانوية جرى حنئها عند الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية (AFM)، فإن سلوك التشوه الميكانيكي للمادة غالباً ما يكون غير متأثر بالحقل الكهروضغطي في السلك النانوي. وبالتالي، وكما هو الحال وعند إجراء حساب الكمون الكهروضغطي في السلك النانوي، يمكن للتقريب ذي المرتبة 1 أن يكون كافياً. أما دقة هذا التقريب، فسوف يجري اختبارها بعد الرجوع إلى كامل الحلول الرقمية لمعادلات الاقتران (3.4-3.1).

3.3. الحل التحليلي للسلك النانوي الشاقولي

بغية تبسيط الحل التحليلي، نفترض أن السلك النانوي ذو شكل أسطواني طوله L ويتمتع بمقطع عرضي منتظم بقطر $2a$. وبغية التبسيط الأكثر للاقتران، نقارب بين ثوابت المرونة للمادة من خلال استخدام نماذج مرنة متماثلة، وذلك من حيث موديل يونغ E ومعامل بواسون ν . ولقد وجد أن ذلك يُعد تقريباً ممتازاً لأكسيد الزنك. ويهدف توفير الملاءمة بين حساباتنا، نقوم بتحديد $a_{pq}^{\text{isotropic}}$ ليكون مقلوب المصفوفة $c_{pq}^{\text{isotropic}}$ ، وعندها تأخذ معادلات الانفعال والإجهاد الشكل التالي:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \sum_q a_{pq}^{\text{isotropic}} \sigma_q = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

يجري وصل نهاية الجذر للسلك النانوي مع الركازة الناقلة داخل بنية المولد النانوي، بينما يجري دفع النهاية العليا لهذا السلك بواسطة قوة جانبية f_y . نفترض أنه يجري تطبيق القوة f_y على السطح العلوي، حيث لا يتوافر هناك Saint-Venant [9]، تأخذ معادلة الإجهاد، المحدث داخل السلك النانوي، الشكل التالي:

$$\sigma_{xz}^{(0)} = -\frac{f_y}{4I_{xx}} \frac{1+2\nu}{1+\nu} xy \quad (3.13.1)$$

$$\sigma_{yz}^{(0)} = \frac{f_y}{I_{xx}} \frac{3+2\nu}{8(1+\nu)} \left[a^2 - y^2 - \frac{1-2\nu}{3+2\nu} x^2 \right] \quad (3.13.2)$$

$$\sigma_{zz}^{(0)} = -\frac{f_y}{I_{xx}} y(l-z) \quad (3.13.3)$$

$$\sigma_{xx}^{(0)} = \sigma_{xy}^{(0)} = \sigma_{yy}^{(0)} = 0 \quad (3.13.4)$$

حيث:

$$I_{xx} = \int_{CrossSection} x^2 dA = \frac{\pi}{4} a^4$$

تعد المعادلة (3.13) الحل الميكانيكي من المرتبة صفر 0 لكل من المعادلات (3.1) و(3.3) و(3.12). ولما كان مبدأ سينت فينانت Saint-Venant يستخدم بغية تبسيط الشرط الحدي، فإن حل المعادلة (3.13) يصلح فقط لتلك المناطق، التي تكون بعيدة جداً عن النهاية المثبتة للسلك النانوي. ونقصد بعبارة "بعيدة جداً" تلك المسافة، التي تكون كبيرة بما فيه الكفاية مقارنة مع قطر السلك النانوي. وختاماً، يُظهر الحساب العددي الكامل أنه من الأمان بمكان استخدام المعادلة (3.13) عندما تكون المسافة من الركيزة تزيد بمقدار الضعف على قطر السلك النانوي.

تبين المعادلتان (3.4) و(3.10) السلوك الكهروضغطي المباشر. ومن خلال تحديد الإزاحة المتبقية \bar{D}^R بأنها كما يلي:

$$\bar{D}^R = I_k \cdot e_{Kq} \cdot \varepsilon_q^{(0)} \quad (3.14)$$

نحصل على

$$\nabla \cdot (D_i^R + \kappa_{ik} E_k^{(1)}) = 0 \quad (3.15)$$

من المعادلات (3.12) و(3.13) و(3.14) و(3.22)، تكون الإزاحة المتبقية على الشكل التالي:

$$\bar{D}^R = \begin{pmatrix} -\frac{f_y}{I_{xx} E} \left(\frac{1}{2} + \nu \right) e_{15} xy \\ \frac{f_y}{I_{xx} E} \left(\frac{3}{4} + \frac{\nu}{2} \right) e_{15} \left(a^2 - y^2 - \frac{1-2\nu}{3+2\nu} x^2 \right) \\ \frac{f_y}{I_{xx} E} (2\nu e_{31} - e_{33}) y(l-z) \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

وتجدر الإشارة هنا إلى أن التباين (divergence) في مقدار الإزاحة المتبقية \bar{D}^R يكون أكبر من مقدار الإزاحة المتبقية \bar{D}^R نفسها، وهذا ما ينتج $E_k^{(1)}$. وإذا افترضنا ببساطة أن $E_k^{(1)} = (K_{ik})^{-1} D_i^R$ ، سوف نصل إلى حقل كهربائي معدوم يتمتع بصفيرة غير صفيرية. وعضواً عن ذلك، وإذا جرى تحديد شحنة الجسم المتبقي

$$\rho^R = -\nabla \cdot \bar{D}^R \quad (3.17)$$

وتحديد شحنة السطح المتبقية:

$$\Sigma^R = -\bar{n} \cdot (0 - \bar{D}^R) = \bar{n} \cdot \bar{D}^R, \quad (3.18)$$

سوف تتحول المعادلة (3.15) إلى مسألة كهروساكنة بدائية مع معادلة بواسون:

$$\nabla \cdot (\kappa_{ik} E_k^{(1)} \vec{i}_i) = \rho^R \quad (3.19)$$

وإذا أخذنا بالحسبان مقدار الشحنة المعطى بالمعادلة (3.18) والموجودة على السطح الأسطواني للسلك النانوي، يمكن باستخدام المعادلتين (3.16) و (3.17) أن تحصل على:

$$\rho^R = \frac{f_y}{I_{xx} E} [2(1+\nu)e_{15} + 2\nu e_{31} - e_{33}] y \quad (3.20)$$

$$\Sigma^R = 0 \quad (3.21)$$

من المهم جداً أن نلاحظ أنه في المعادلات (3.20) و (3.21)، تكون الشحنة المتبقية غير مرتبطة بالارتفاع الشاقولي Z، وبالتالي يكون الكمون الكهربائي $\varphi = \varphi(x, y) = \varphi(r, \theta)$ (وفي الإحداثيات الأسطوانية، يكون هذا الكمون غير مرتبط بالارتفاع الشاقولي Z). (وبغية التبسيط، وابتداءً من الآن، سوف نُسقط الرمز العلوي (1) للتقريب من المرتبة الأولى). من الناحية الفيزيائية، يُفترض أن يكون الكمون منتظماً على طول الاتجاه Z ما عدا تلك المناطق القريبة جداً من نهايات السلك النانوي. ومن خلال ملاحظة أن $K_{11} = K_{22} = K_{\perp}$ ، يكون حل المعادلات (3.19) و (3.20) و (3.21) على الشكل التالي:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{1}{8\kappa_{\perp}} \frac{f_y}{I_{xx} E} [2(1+\nu)e_{15} + 2\nu e_{31} - e_{33}] \left[\frac{\kappa_0 + 3\kappa_{\perp}}{\kappa_0 + \kappa_{\perp}} \frac{r}{a} - \frac{r^3}{a^3} \right] a^3 \sin \theta, r < a \\ \frac{1}{8\kappa_{\perp}} \frac{f_y}{I_{xx} E} [2(1+\nu)e_{15} + 2\nu e_{31} - e_{33}] \left[\frac{2\kappa_{\perp}}{\kappa_0 + \kappa_{\perp}} \frac{a}{r} \right] a^3 \sin \theta, r \geq a \end{cases} \quad (3.22)$$

حيث: K_0 مقدار السماحية في الفراغ (وسط مخلخل). وتبين المعادلة (3.22) مقدار الكمون داخل السلك النانوي وخارجه. ويمكن من المعادلة (3.22) أن نستنتج مقدار الكمون الأعظم على سطح (r = a) للسلك النانوي، وذلك من الجانب المشدود (T) حيث $(\theta = -90^\circ)$ والجانب المضغوط (C)، حيث $(\theta = 90^\circ)$ بالترتيب:

$$\varphi_{\max}^{(T,C)} = \pm \frac{1}{\pi} \frac{1}{\kappa_0 + \kappa_{\perp}} \frac{f_y}{E} [e_{33} - 2(1+\nu)e_{15} - 2\nu e_{31}] \frac{1}{a}. \quad (3.23)$$

ووفقاً لنظرية المرونة البدائية، وفي ظروف انحراف بسيط، ينسب انحراف القوة الجانبية f_y إلى الانحراف الأعظم لنهاية السلك النانوي $V_{\max} = V(z=l)$ [10]، وذلك كما يلي:

$$V_{\max} = \frac{f_y l^3}{3E I_{xx}} \quad (3.24)$$

وهكذا، يكون الكمون الأعظم عند سطح الأسلاك النانوية مساوياً:

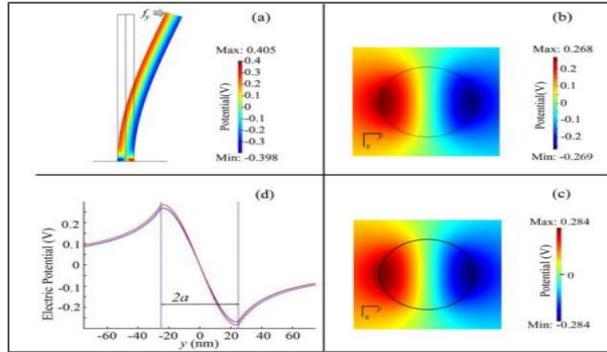
$$\varphi_{\max}^{(T,C)} = \pm \frac{3}{4(\kappa_0 + \kappa_{\perp})} [e_{33} - 2(1+\nu)e_{15} - 2\nu e_{31}] \frac{a^3}{l^3} v_{\max} \quad (3.25)$$

وهذا يعني أن الكمون الكهروساكن مرتبط بنسبة الأبعاد بدلاً من ارتباطه بالبعد. وعندما يتمتع السلك النانوي بنسبة بعدية محددة، يكون الكمون الكهروضغطي متناسباً طردياً مع الانحراف الأعظم عند نهاية هذا السلك.

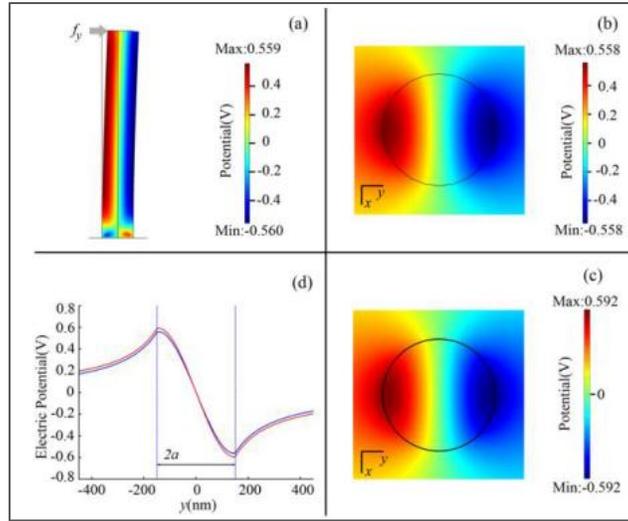
3.4. كمون الضغط لسلك نانوي منحرف عرضياً

في الحالة الأولى، يساوي قطر السلك النانوي $d = 50 \text{ nm}$ وطوله $l = 60 \text{ nm}$ ، ويساوي مقدار القوة الجانبية، المطبقة بواسطة الطرف المستدق لمجهر القوى الذرية AFM، يساوي 80 nN . وبغية التأكد أكثر من صحة حذف رموز المرتبة الأعلى في الاشتقاق التحليلي الذي نجريه، قمنا بتطبيق طريقة العناصر المنتهية (FEM) لإنجاز الحسابات لمنظومة كهروميكانيكية مقترنة بشكل كامل وباستخدام المعادلات (3.1 – 3.4) للوسطي المبسط لقيم التوتر المتجانس لنماذج مرنة تتمتع بشكل أسطواني. ويمكن الشرط الحدي، المفروض في هذه الحالة، يكمن في أن النهاية الدنيا للسلك النانوي مثبتة، أما الشرط الحدي الكهربائي (الجذر) فيكمن في أن الركيزة تتمتع بالناقلية الكاملة، واعتبر أكسيد الزنك وسطاً عازلاً. وتبين (الأشكال a 3.1 و b 3.1) على التوالي، التوزيعات الكمونية، التي جرى حسابها باستخدام طريقة العناصر المنتهية لسلك نانوي منحني، وذلك كما يبدو من جانب السلك ومقطعه العرضي، حيث يعرض بوضوح ما يدعى نموذج "المكثف ذو الصفائح المتوازية" للكمون الكهروضغطي في الجزء الأعلى لمادة السلك النانوي. وباستخدام المعادلة التحليلية (3.22)، يكون التوزيع الكموني عبر المقطع العرضي للسلك النانوي، وعند توافر ارتداد جانبي مقداره 145 nm ناتج عن دفع السلك بقوة مقدارها 180 nN ، وهذا ما جرى تمثيله في الشكل (2C)، إضافةً إلى سطحين جانبيين، يتمتعان بكمون كهروضغطي مقداره $\pm 0.28 \text{ V}$ ، على التوالي. مرةً أخرى نواجه في المعادلة (3.22) أن الكمون يكون غير مرتبط بالمقدار Z_0 إلا بالقرب من النهايتين العليا والدنيا.

أُجريت عمليات حسابية مماثلة لسلك نانوي يتمتع بأبعاد كبيرة، إذ يبلغ قطره $d = 300 \text{ nm}$ ، وطوله $l = 2 \text{ } \mu\text{m}$ ، ومقدار القوة الجانبية المطبقة 1000 nN . وقدرت قيمة قوة الدفع اعتماداً على مقدار الانحراف الجانبي، الذي تمت ملاحظته تجريبياً. وبشكل مماثل لتلك الحالة المبينة على الشكل 2 للسلك النانوي الأصغر، يعطي السلك النانوي الكبير توزيعاً كمونياً مقداره $\pm 0.59 \text{ V}$ عبر مقطعه العرضي. ومرةً أخرى، يشكل الحل التحليلي بحدود 6% من الحساب العددي الكامل، والذي أُجري باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM)، مما يبرهن، وبشكل واضح، صحة حلنا التحليلي. لذلك، تُعدُّ نظرية الاضطراب المعروضة تمثيلاً ممتازاً من أجل حساب الكمون الكهروضغطي عبر السلك النانوي، ويمكن للنتائج التحليلية، المستنبطة من المعادلات (3.22 - 3.25)، يمكن تطبيقها بغية تحقيق الفهم الكمي للنتائج المحددة تجريبياً. وانطلاقاً من الحساب، الذي جرى عرضه أعلاه. تولّد توترٌ قدره 0.3 V بين السلك النانوي ونهاية مجهر القوى الذرية خلال فترة الانحناء الميكانيكي.



الشكل 3.1: توزيع الكمون لسلك نانوي من أكسيد الزنك قطره $d = 300 \text{ nm}$ وطوله $l = 600 \text{ nm}$ لدى تطبيق قوة انحناء عليه مقدارها 80 nN . (a)، (b) تمثل خرج المقطع العرضي الجانبي والعمودي (عندما $Z_0 = 300 \text{ nm}$) للكمون الكهروضغطي في السلك النانوي المستنبت حسابياً بطريقة العناصر المنتهية وباستخدام معادلات الاقتران الكامل (3.4-3.1) بالترتيب. (c) خرج المقطع العرضي للكمون الكهروضغطي المستنبت من خلال المعادلة (3.22). ويكون الكمون الأعظم في (b) أصغر من مثيله في (a)، ذلك لأنه في هذه الحالة يكون الكمون في المنطقة العكسية السفلى أكبر من مثيله في المناطق العليا، التي تدعى "المكثف ذو الصفائح المتوازية". (d) مقارنة بين أشكال المسح الخطي مأخوذة من (b) و (c)، حيث يمثل المنحنى الأزرق الحساب الكامل بطريقة العناصر المنتهية، بينما يمثل المنحنى الأحمر الحساب باستخدام المعادلة (3.22)، وذلك بغية إظهار كل من دقة المعادلة (3.22) والتقريبات المستخدمة لاشتقاقها [8].



الشكل 2.3: توزيع الكمون لسلك نانوي قطره $d = 300 \text{ nm}$ وطوله $l = 2 \text{ } \mu\text{m}$ ، لدى تطبيق قوة انحناء جانبية 80 nN . (a),(b) تمثل خرج كل من المقطع العرضي الجانبي والعلوي (عندما $Z_0 = 1 \text{ } \mu\text{m}$) للكمون الكهروضغطي في السلك النانوي المستنبت حسابياً بطريقة العناصر المنتهية وباستخدام معادلات الاقتران الكامل (3.1-3.4) بالترتيب. (c) يمثل خرج المقطع العرضي للكمون الكهروضغطي المستنبت حسابياً باستخدام المعادلة التحليلية (3.22). وغالباً ما تكون قيم الكمون الأعظم في (b) هي نفسها في (a). (d) يمثل مقارنة بين أشكال المسح الخطي مستنتجةً من كلا الشكلين (b) و (c)، حيث يمثل المنحنى الأزرق الحساب بطريقة العناصر المنتهية، بينما يمثل المنحنى الأحمر الحساب باستخدام المعادلة (3.22)، وذلك بغية إظهار كل من دقة المعادلة (3.22) والتقريبات المستخدمة لاشتقاقها [8].

3.5. سبر الكمون الضغطي لسلك نانوي ينحني عرضياً

أجري قياس الكمون الضغطي على الجانبين الممتد والمضغوط للسلك الناعم الكهروضغطي PFW من خلال استخدام رأس معدني يتوضع إما على الجانب الممتد (المشدود) أو مثيله المضغوط للسلك النانوي، بينما يكون هذا السلك النانوي منحرفاً تحت تأثير تيار هواء [11]. فعندما طبقت نبضة لتدفق دوري للغاز على سلك من أكسيد الزنك، انحنى هذا السلك، وجرى ضبط مخرج مماثل لتوتر سالب دوري (الشكل 3.3a)، وذلك من خلال وصل سطح الجانب المضغوط للسلك النانوي بدارة قياس خارجية. ويساوي مخرج التوتر المضبوط في هذه الحالة مقدار $\sim 25 \text{ mV}$. وبشكل مماثل، جرى ضبط مخرج موجب دوري (الشكل 3.3 b) على الجانب الممتد للسلك، باستخدام إبرة مغطاة بالذهب عندما يجري دفع سلك أكسيد الزنك دورياً بواسطة هذه الإبرة المغلفة بالذهب. وأجريت مثل هذه القياسات باستخدام مضخم توتر.

3.6. الكمون الضغطي لسلك نانوي مُجهَد محورياً

يكون الجزء الرئيس من جهاز نانو الكتروني ذي مبرطين نموذجيين عبارة عن سلك نانوي سداسي الأضلاع لأكسيد الزنك، إذ نما هذا السلك على طول المحور C مع نهايتيه وشرائح قصيرة متاخمة لهذه النهايات ومحاطة بالإلكترودات بشكل مفاجئ. حيث تتوفر أنواع مختلفة من القوى، بما في ذلك قوى الشد والضغط والقتل ومركبات من هذه القوى، التي تؤثر في السلك النانوي. وتكمن مهمتنا الأولى في حساب توزيع الكمون الكهروضغطي عبر السلك النانوي تحت تأثير هذه القوى [12]. وبغية تبسيط المنظومة والتركيز على مراقبة كيفية تغير الكمون الكهروضغطي عند تطبيق إجهادات مختلفة، نفترض عدم وجود قوة جسمية (قوى الجاذبية أو مثيلتها الكهرومغناطيسية) وعدم وجود شحنة حرة في السلك النانوي، وذلك من خلال إهمال ناقليته هذا الأخير. ويمكن حل معادلات الاقتران (1-4) باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM). وبغية تبسيط عرض النموذج الفيزيائي المفروض، جرى إهمال حوامل الشحن في أكسيد الزنك. التي تبسط بشكل كبير المقاربة العددية. ويبين (الشكل 4.3 a) سلكاً نانويّاً لأكسيد

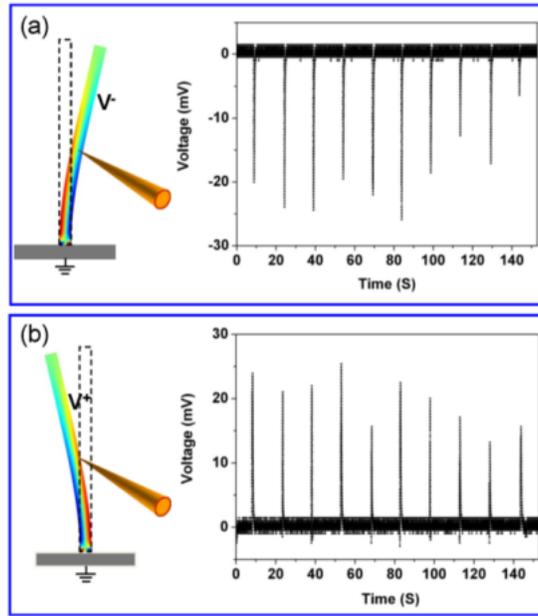
الزنك دون خضوعه لأي قوة. ويبلغ الطول الإجمالي للسلك النانوي 1200 nm مع طول مقداره 100 nm عند كل نهاية للسلك لمجال الوصل، ويساوي الطول الجانبي لسداسي الأضلاع 100 nm.

عندما تؤثر قوة شد مقدارها 85 nN بشكل منتظم على سطوح أسلاك نانوية محاطة بالإلكترونات باتجاه مواز للمحور C، سيزداد طول السلك النانوي بمقدار 0.02 nm، والذي يسبب انفعال شد مقداره 2×10^{-5} . وكما هو مبين في (الشكل 4.3 b) ينشأ هبوط في الكمون مقداره 0.4 V تقريباً بين جانبي النهاية للسلك النانوي مع جانب المحور C + للكمون الأعلى. وعندما تتغير القوة المطبقة، لتصبح قوة ضغط، ينعكس الكمون الكهروضغطي مع فرق الكمون مخلفاً 0.4 V ولكن مع جانب المحور C - عند كمون أعلى. وكما هو موضح في الشكل (c) ينخفض طول السلك النانوي بمقدار 0.02 nm مبدئياً انفعال ضغط من القيمة -2×10^{-5} . ولقد لوحظ أنه لتوليد كمون كهروضغطي يتمتع بالمقدار نفسه، يجب أن يكون مقدار الانفعال اللازم في هذه الحالة أصغر بكثير من مثيله في حالة انحناء سلك نانوي بواسطة قوة عرضانية كما جرى استعراضه آنفاً. وهكذا، فإن القوة على طول اتجاه الاستقطاب (المحور C) تسهل توليد كمون كهروضغطي عالٍ.

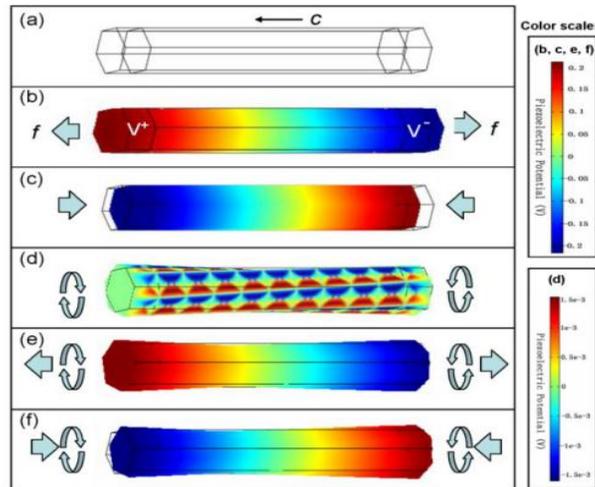
يهبط الكمون الكهروضغطي باستمرار من جانب إلى آخر للسلك النانوي سواءً طُبِق على هذا السلك قوى شد أو ضغط، مما يعني أن طاقة الإلكترون تزداد باستمرار من جانب إلى آخر. بالمقابل، سيكون مستوى فيرمي منبسطاً على كامل السلك النانوي، وذلك عند تحقيق التوازن، ذلك لأنه لا يوجد حقل كهربائي خارجي. وفي النتيجة، فإن حاجز طاقة الإلكترون بين أكسيد الزنك والإلكترود المعدني، سوف يرتفع من جانب وينخفض من جانب آخر، ويمكن ملاحظته تجريبياً على شكل الخاصية غير المتناظرة للتيار - توتر I-V. وهذا هو المبدأ الناظم لفهم النتائج التجريبية المعروضة في الجزء التالي. ولما كان الانفعال لا يمكن تجنبه أثناء تصنيع جهاز السلك النانوي، فسوف نلاحظ تصحيح سلوك النقل للعديد من أجهزة السلك النانوي الملفقة حتى مع توافر الكترودين متماثلين فيها [13].

إن أحد نماذج القوى، الذي لا يمكن إهماله خلال معالجة السلك النانوي، يكمن في قوة الفتل. ويبين (الشكل 4.3 d) نتائج المحاكاة عند خضوع السلك النانوي لعملية فتل عند نهايته بالاتجاه المعاكس، إذ لن يكون هناك هبوط في الكمون الكهربائي على طول اتجاه نمو السلك. وعلى الرغم من ملاحظة ضخامة الكمون الموضعي المولّد، والذي هو من مرتبة mV، إلا أنه أصغر بكثير من مثيله في حالي الشد والضغط. وعندما يحدث التماس مع الإلكترونات وعبر المقطع العرضي في نهايته، يصبح حاجز الطاقة بين المعدن وأكسيد الزنك متعادلاً على أحد جوانب السلك النانوي. وهكذا، يكون متوقعاً أن يحدث تماس متناظر.

تكون القوة المؤثرة عبارة عن مركب من قوتي الفتل والشد أو الفتل والضغط في غالبية الحالات العملية. وكما هو موضح في (الشكلين e 4.3 و t 4.3)، سيكون هناك هبوط في الكمون الكهروضغطي يتولد على طول السلك، بينما لن يكون توزع الكمون منتظماً في المقطع العرضي للسلك النانوي، وإنما سيكون عالياً في أحد نصفيه ومنخفضاً في الآخر على غرار حالة الانفعال المحورية النقية.



الشكل 3.3: قياسات مباشرة للتوزيع غير المتناظر للتوتر على سطوح كل من الجانب المشدود ومثيله المضغوط لسلك من أكسيد الزنك ZnO. (a) من خلال وضع طرف من المعدن في الجانب الأيمن ونفخ نبضة من غاز الأرجون على الجانب الأيسر، لوحظ أن هناك قمماً (ذروات) في طيف التوتر السالب، تصل قيمتها $\sim 25\text{mV}$ في تلك اللحظة التي تؤثر فيها نبضة الغاز. (b) عند خضوع السلك لدفع سريع وإزالة لهذا الدفع على جانبه الأيمن بواسطة طرف المعدن، لوحظ أن هناك قمة (ذروة) في طيف التوتر الموجب، تصل قيمتها إلى $\sim 25\text{mV}$ عند كل دورة انحراف لهذا السلك. وقد بلغ تردد هذا الانحراف مرة واحدة كل 15 ثانية.



الشكل 3.4: الحساب العددي لتوزيع الكمون الكهروضغطي لسلك نانوي من أكسيد الزنك ZnO دون شوائب. (a) نمو سلك نانوي من أكسيد الزنك، لم يخضع هذا السلك لانفعالات وينمو على طول المحور C وطوله 1200nm وطول الجانب سداسي الأضلاع 100nm . افترض أن نهايتين من السلك النانوي محاطتان بالكترودات لطول يصل إلى 100nm ، مناظر ثلاثية الأبعاد لتوزيع الكمون الكهروضغطي مترافقاً مع شكل مشوه للسلك النانوي. (b) عند تأثير قوة شد مقدارها 85nN . (c) عند تأثير قوة ضغط مقدارها 85Nn . (d) عند تأثير قوة قتل مزدوجة مقدارها 60nN . (e) عند تأثير مجموعة مؤلفة من قوة شد مقدارها 85Nn وقوة قتل مقدارها 60nN . افترض أن قوى الشد والضغط تتمتع بفعل منتظم على كلا السطحين الطرفي والجانبى لأجزاء من السلك النانوي المحاطة بالكترودات، بينما افترض أن قوى القتل طبقت بشكل منتظم على السطوح الجانبية لأجزاء من هذا السلك النانوي المحاطة بالكترودات. يمثل الجانب الأحمر جانب الكمون الموجب، بينما يمثل الجانب الأزرق جانب الكمون السالب. وبلغ فرق الكمون نحو 0.4V . لوحظ أن كلاً من الأشكال (b, c, e, f) تتمتع بمقياس اللون نفسه، بينما يتمتع الشكل (d) بمقياس لون أصغر بكثير من الأشكال السابقة.

هناك العديد من الأمور التي لا بد من الإشارة إليها: أولاً، يتضمن أثر الكهرباء الضغطية في خواص النقل لمعدن السلك النانوي من أكسيد الزنك، يتضمن هذا الأثر جزأين: يكمن الجزء الأول في أثر شحنة الاستقطاب اللحظي المولدة من قبل الأيونات Zn^{2+} و O^{2-} للشرائح النهائية الموجودة في السطوح النهائية +C و -C. بينما يكمن الجزء الآخر في أثر الكمون الكهروضغطي. تتوافر شحنات استقطاب عند السطح النهائي للسلك النانوي، ولا تستطيع هذه الشحنات أن تتحرك بحرية. يود هؤلاء أن يقوموا بتعديل طاقة فيرمي الموضوعية بغية تغيير ارتفاع حاجز شوتكي وشكله. وعلى أية حال، ومن الناحية العملية لن تكون تماسات معدن أكسيد الزنك بالضبط عند أقصى سطح نهائي للسلك النانوي، ولكنها بالمقابل ستكون كبيرة عند السطح الجانبي وذلك بسبب توافر مساحة تماس كبيرة لكل من المعدن والسلك النانوي. وتكون مساحة السطح الجانبي، ولمعظم الوقت، أكبر بكثير من مثلتها في السطح النهائي. وإذا ما أخذنا بالحسبان أنه يتوافر أثر شحنة الاستقطاب، فإن الإلكترونات تستطيع أن تمر عبر تماس السطح الجانبي، حيث لا يوجد حاجز للطاقة.

ثانياً، بُنيت الحسابات الواردة ذكرها آنفاً على نظرية ليبمان (Lippman theory)، وذلك منذ أن افترضنا أنه لا توجد حوامل للشحنة الحرة بغية تبسيط الحسابات وجعل كامل المنظومة معزولة. وتكون أسلاك ZnO النانوية المولف فيما بينها، تكون بالمجمل من النمط n (n-type) وبالتزامن مع تركيز ممنوح نموذجي يصل إلى $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. وتُظهر الحسابات النظرية، المبنية على التوزيع الإلكتروني الساكن في نطاق التوصيل الكهربائي، تُظهر هذه الحسابات أن الإلكترونات الحرة تميل لأن تتراكم في الجانب الكموني الموجب للسلك النانوي، وذلك عند حدوث التوازن الحراري. وعلى أية حال، سيكون لأثر الحوامل الحرة دوراً في الحجب الجزئي، إن لم يكن هذا الحجب كلياً للكمون الكهروضغطي الموجب، في حين لن يكون هناك أي تغيير في الكمون الكهروضغطي السالب. وفي مثل هذه الحالات، يمكن الاستمرار في تبني نتائج الحسابات الموضحة في الشكل (2) لتفسير نتائج التجارب العملية ما عدا الكمون الموجب، والذي لا بد من خفضه بغية تعديل أثر الحوامل الحرة.

ثالثاً، لن يقتصر دور الانفعال في إثارة الأثر الكهروضغطي داخل أكسيد الزنك فحسب، وإنما يسبب تغييراً في بنية المجال أيضاً. ويمكن لكمون الانفعال المتولد أن يغير في ارتفاع حاجز شوتكي، وذلك كما يلي: سينخفض الحاجز تحت تأثير انفعالات الشد، بينما سيزداد هذا الحاجز تحت تأثير انفعالات الضغط. وعلى أية حال، ستكون التغيرات عند نهايتي السلك النانوي متماثلة، وفي الاتجاه نفسه، ولن يؤدي ذلك إلى حدوث تحول في منحنى التيار - جهد (I-V) المتناظر إلى سلوك معدل لهذا المنحني. وهنا يكمن أثر المقاومة الضغطية.

3.7. الكمون الضغطي المتوازن في سلك نانوي نصف ناقل مشاب

يمكن استخدام نظرية ليبمان لوصف الأسلاك النانوية الكهروضغطية المنحنية عندما يكون التركيز الممنوح منخفضاً للغاية، لهذا، يمكن حذف الناقلية أو إهمالها. وعلى أية حال، تكون الأسلاك النانوية لأكسيد الزنك النامية بهذا الشكل، تكون هي حكماً من النمط n (n-type)، وذلك بسبب عدم تجاوز العيوب النقطية في هذه الأسلاك. أما بالنسبة للمواد نصف الناقلية، التي تتمتع بكمية كبيرة من الإلكترونات الحرة، فإن نظرية ليبمان لا يمكن تطبيقها مباشرة، ذلك لأن حوامل الشحنة الحرة قادرة على التوزيع ضمن كامل المادة. ولابد من الأخذ بالحسبان إحصائيات كل من الإلكترونات والثقوب، إضافة إلى ظاهرة الديناميك الحراري. وتكمن الغاية الأساسية من هذا الجزء من الكتاب في عرض هذا النموذج الإحصائي الماكرومجهري للكهرباء الضغطية داخل سلك نانوي نصف ناقل منحني جانبياً. وذلك من خلال الأخذ بالحسبان الناقلية المعتدلة ضمن مجال الإشابة.

3.7.1. الإطار النظري

أشارت النتائج السابقة إلى أنه عندما يتمتع السلك النانوي من أكسيد الزنك ZnO بكثافة حامل الشحنة الحر المساوية للصفر، فإن سطح الشد سيُظهر الكمون الكهروضغطي الموجب، بينما يُظهر الجانب المضغوط كموناً سالباً (وفي هذا السياق نعني بمصطلح "الكمون الكهروضغطي" ذلك الكمون المولّد نتيجة استقطاب الشوارد الموجبة والسالبة داخل السلك النانوي، مما يعني أن هذه الشحنات لن تتمتع بحرية الحركة ما دام هناك انفعال متبقٍ في هذا السلك). وبغية التركيز على فيزياء النواة وعدم الابتعاد عن الموضوع الأساس إلى المسائل الأقل أهمية حول السطوح البينية، نفترض أن الركازة مصنوعة من أكسيد الزنك أيضاً. تحدث مثل هذه الحالات عندما تنمو الأسلاك النانوية لأكسيد الزنك ZnO على ركائز من نتريد الغاليوم GaN باستخدام طريقة البخار - سائل - صلب (VLS)، وذلك لأن فيلم أكسيد الزنك أو جدران هذا الأكسيد عادةً ما تنمو تحت الأسلاك النانوية. وتكمن مهمتنا في حساب الكمون الكهروضغطي عندما يتحقق التوازن الحراري الديناميكي في الأسلاك النانوية المنحنية جانبياً [14].

من المعروف جيداً أنه عند توافر إلكترونات/أو ثقب داخل مادة كهروضغطية، فإن الحوامل ستعيد توزيعها بسبب وجود الحقل الكهربائي الناشئ من خلال الاستقطاب. ويمكن أحد أشهر التطبيقات لأثر التوزيع هذا في نتريد الغاليوم/أو نتريد الألمنيوم غاليوم مع هيكسا ميثالين تترامين GaN/ALGaN HEMTs، حيث تتراكم الإلكترونات عند السطح البيني لتخلق ضباباً (غازاً) إلكترونياً ثنائي الأبعاد (2DEG) [15]. وعند إجراء تطبيقات على السلك النانوي الكهروضغطي، يُعد السلوك الميكانيكي الأكثر تعقيداً، ولكن الصور الفيزيائية تكون نفسها بشكل أساس. وبدلاً من استخدام المعادلة الأساسية للاقتزان الكلي، فإننا نورد كلاً من التوازن الميكانيكي والأثر الكهروضغطي المباشر، وذلك كما يلي:

$$\begin{cases} \sigma_p = c_{pq} \varepsilon_q \\ D_i = e_{iq} \varepsilon_q + \kappa_{ik} E_k \end{cases} \quad (3.26)$$

حيث: σ إجهاد الشد، ε الانفعال، \bar{E} الحقل الكهربائي، \bar{D} الإزاحة الكهربائية. K_{ik} ثابت العازلية، e_{kp} ثابت الكهرياء الضغطية، c_{pq} عامل الصلابة الميكانيكي. جرى استخدام ملاحظة فويت - ناي²⁴ (Voigt-Nye). بتعويض المعادلة الثانية في قانون غاوص، نحصل على علاقة للحقل الكهربائي:

$$\nabla \cdot \bar{D} = \frac{\partial}{\partial x_i} (e_{iq} \varepsilon_q + \kappa_{ik} E_k) = \rho_e^{(b)} = ep - en + eN_D^+ - eN_A^- \quad (3.27)$$

حيث: P تركيز الثقب في $k'hrgj;htc$ ، n تركيز الإلكترونات في نطاق التوصيل، N_D^+ تركيز مانح الأيونات، N_A^- تركيز متلقي الأيونات. ونظراً لأن أسلاك أكسيد الزنك النانوية النامية هي عادة من النمط n (n - type)، نعتبر أن $P = N_A^- = 0$ ، وبإدخال المقدار التالي:

$$\bar{D}^R = e_{kq} \varepsilon_q \hat{i}_k \quad (3.28.1)$$

كاستقطاب نتيجة للكهرياء الضغطية، وأن:

$$\rho^R = -\nabla \cdot \bar{D}^R \quad (3.28.2)$$

كشحنة كهروضغطية مناسبة، يمكن إعادة كتابة المعادلة 2 للكمون الكهربائي φ على الشكل التالي:

$$\kappa_{ik} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_k} \varphi = -(\rho^R - en + eN_D^+) \quad (3.29)$$

يجري حساب شحنة السطح، الناتجة عن الكهرياء الضغطية، من خلال العلاقة:

$$\sum^R = -n\Delta D^R$$

حيث $\Delta \bar{D}^R$ مقدار التغير في \bar{D}^R بشكل معترض مع سطح المادة، و \bar{n} هو الناظم على السطح. ويهدف التبسيط، جرى إهمال شحنات السطح المقدمة من السطوح القطبية لأكسيد الزنك.

تعطى معادلة إعادة توزع الإلكترونات، وتحت تأثير التوازن الحراري الديناميكي، تعطى من خلال إحصائيات فيرمي - ديراك:

$$n = N_c F_{1/2} \left(-\frac{E_c(\bar{x}) - E_F}{kT} \right) \quad (3.30.1)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (3.20.2)$$

حيث: حافة نطاق التوصيل $E_c(\bar{x})$ هي تابع للإحداثيات الفراغية. N_c كثافة الحالة الفعالة لنطاق التوصيل، وتُحدد بواسطة الكتلة الفعالة m_e للإلكترونات نطاق التوصيل، و T درجة الحرارة. ونظراً لتوافر الانفعال الكبير، فإن كمون التشوه يمكن أن يكون ذا أهمية. ولكي نكون دقيقين، يكون انحراف حافة المجال ΔE_c عبارة عن مجموع القدرة الكهرو ساكنة كجزء وكمون التشوه (الانفعال) كجزءٍ آخر، وذلك كما يلي:

$$E_c - E_{c_0} = \Delta E_c = -e\phi + \Delta E_c^{deform} = -e\phi + a_c \frac{\Delta V}{V} \quad (3.31)$$

حيث: E_{c_0} هي حافة نطاق التوصيل لمادة نصف ناقلة ذات وقوف - حر وغير مشوهة؛ $\Delta E_c^{deform} = a_c \Delta V/V$ هو عبارة عن انزياح حافة النطاق بسبب وجود كمون التشوه [16]، الذي يتناسب طرماً مع تغير الحجم النسبي $\Delta V/V$ ، و a_c ثابت كمون التشوه. وختاماً، تعطى عملية تفعيل المعطيات على الشكل التالي:

$$N_D^+ = N_D \frac{1}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_D}{kT}\right)} \quad (3.32)$$

حيث: $E_D(\bar{x}) = E_c(\bar{x}) - \Delta E_D$ الطاقة الممنوحة تبعاً للموقع.

الثابت ΔE_D هو طاقة التفعيل للمانحين. N_D تركيز المانح (المعطي).

3.7.2. الكمون الضغطي المحسوب مع اعتبار الإشابة

يمكن إجراء حساب الكمون الكهروضغطي داخل سلك نانوي محني لأكسيد الزنك مع كثافة حامل الشحنة المعتدل. وهنا لا بد من الإشارة إلى أن المعادلات (3.29-3.32) تكون صالحة فقط عندما لا يكون مقياس النظام صغيراً جداً. فعندما تكون الأنظمة صغيرة يتطلب التأكيد بحزم على اعتبارات ميكانيك الكم، وذلك نظراً لوجود حالات القفز المنفردة. ويُعدُّ مثل هذا الإسهاب ضرورياً في الجزء النظري، وذلك من أجل الغاز الإلكتروني ثنائي البعد في نتريد الغاليوم/أو نتريد الغاليوم ألومنيوم والهيكسا ميثالين تيتراامين (2DEG in GaN/ALGaN HEMT)، إذ يعد الأثر الكمي ذا أهمية في مثل هذه الحالات. وسوف نقوم في الجزء التالي من هذا الكتاب بإجراء الحساب للأسلاك النانوية التي تتمتع بقطر نحو 50 nm أو أكثر من ذلك، في حين لا يزال الحساب الميكانيكي غير الكمي مقبولاً.

يُعد مستوى فيرمي منبسطاً على كامل السلك النانوي نصف الناقل المحني، وذلك في حالة افتراض التوازن الحراري الديناميكي. ولما كان قد افترض أن الأسلاك النانوية فسوف تنمو على ركازة مقياسها أكبر بكثير من السلك النانوي، يمكن عدُّ هذه الركازة مستودعاً واسعاً يحرص بداخله مستوى فيرمي. سوف نفترض في هذا البحث أن الركازة مصنوعة من المادة نفسها، التي يُصنع منها السلك النانوي. فعندما تصنع الأسلاك النانوية وصلات مباشرة وغير متجانسة مع الركازة، يمكن لمناطق الاستنفاد (النضوب)

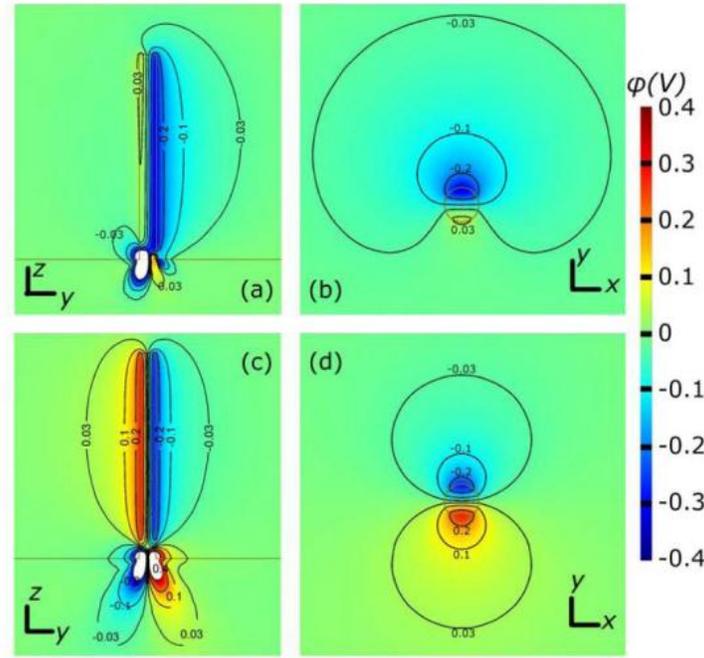
أو مناطق تراكم الشحنات أن تتشكل في أسفل هذه الوصلات، وهذا ما لم نقم بتفصيله في هذا البحث. نظراً لاستخدام التناظر، فإننا لا نحتاج للحل سوى إلى فراغ نصفي من أجل $X > 0$ ، وعندها يمكن استنباط الحل في الفراغ النصفي الآخر من خلال استخدام تناظر المرآة للمستوي $X = 0$. وبغية المساعدة في تحقيق التقارب، نقوم في البداية بتحويل المعادلتين (3.32) & (3.30.1) إلى معادلات خطية، وذلك من خلال إدخال الحالة الحدية لدرجة الحرارة العظمى T_{high} . وبغية تحقيق التقارب في الحسابات كما هو موضح في المعادلتين (3.32) & (3.30.1) نقوم بتحديد المتغيرات التالية:

$$\eta = -\frac{E_c(\bar{x}) - E_F}{kT} \text{ and } \eta_D = \frac{E_F - E_D}{kT} = \eta + \frac{\Delta E_D}{kT} \quad (3.33)$$

وعندما تكون T عالية (أي أن $T = T_{high}$) وكلٌّ من η و η_D لا تتعلق بالموقع، فسيكون الحل سهلاً من خلال تحويل المسألة إلى مسألة خطية. ولما كانت T_{high} هي ذاتها أداة تقارب، فلن يكون مطلوباً تحديد المعنى الفيزيائي الحقيقي. ومع ذلك، تقدم الحلول عند درجة الحرارة العالية $T = T_{high}$ برهاناً لبعض من الإبصار الجاد في الفيزياء. وفي الواقع تكون: $\eta = \eta_D \approx L_n (N_D/N_C)$ عندما $T = T_{high}$ ، ولما كان $N_D^+ = n$ ، فإن المعادلة (3.29) سوف تعطي حلاً غير محجوب، ذلك لأنه لا يتوافر داخل أكسيد الزنك مانحون أو حوامل للشحنة الحرة. وأن النظام تهبط درجة حرارته من درجة الحرارة العالية T_{high} إلى درجة الحرارة الحقيقية، تصبح هذه المعادلات لا خطية أكثر فأكثر. أما قيمة η فتتغير كيف يتفكك النظام، فعندما تكون $\eta > -3$ ، ينظر إلى هذه الحالة كأعلى حالة تفسخ. وكما سنرى فيما بعد في النتائج أن المسألة سوف تتطوي على بعض من درجات التفسخ ولو كان تركيز المانح منخفضاً نسبياً. ويعد ذلك مماثلاً لحالة مناطق الغاز الإلكتروني ثنائي البعد 2DEG في نتريد الغاليوم/أو نتريد الألمنيوم - غاليوم في هيكسا ميثالين تترامين، حيث تتراكم الإلكترونات ولو كان مستوى الإشابة الموضعي صغيراً.

يبين (الشكل 3.5 a) خطوطاً تساوي الكمون من أجل $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ودرجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$ على مستوي المقطع العرضي $X = 0$ ، والذي يتوضع بالضبط عبر محور السلك النانوي. أما (الشكل 2 b) فيبين خطوطاً تساوي الكمون على المقطع العرضي المتعامد مع محور السلك النانوي وعلى ارتفاع $z = 400 \text{ nm}$. جرى إجراء الحساب الكهروساكن بفرض وجود انفعال صغير، والذي من خلاله يتم حذف الفرق بين الإطار المرجعي للاغرانج Lagrangian والأطر المرجعية لأولر Eulrian. ويهدف المقارنة، فإن النتائج، التي جرى الحصول عليها عند درجات الحرارة غير الحقيقية (أي $T = T_{high} = 300,000 \text{ K}$)، جرى إدراجها في كلٍّ من (الشكل 2c) و (الشكل 2d)، والتي تتسجم مع تلك الحالة، التي يكون فيها أكسيد الزنك عبارة عن عازل دون أية حوامل للشحنة الحرة.

إن الكمون الكهربائي، الذي تكون قيمه عظمى في الجانب الأيمن من السلك النانوي، تتخفف هذه القيم من المقدار $\sim 0.3 \text{ V}$ في (الشكل 3.5 d)، تتسجم مع حالة العازل، تتخفف إلى قيم أقل من 0.05 V في (الشكل 3.5 b)، والتي تأخذ بالحسبان التعطيل المعتدل للإحساس داخل أكسيد الزنك. ومن ناحية أخرى سيكون الكمون في الجانب المضغوط (أي جانب الكمون السلبي) مصوناً بشكل جيد، وهذا ما ينسجم مع الرصد التجريبي، الذي يكمن في أن النبضات السالبة تمت مشاهدتها في مجهر القوى الذرية، انطلاقاً من تجربة للمولد النانوي باستخدام أسلاك نانوية لأكسيد الزنك من النمط (n - type). وهذا ينسجم أيضاً مع مشاهدة أن الخرج لذروة الكمون السالب يظهر فقط عندما يلمس طرف مجهر القوى الذرية الجانب المضغوط للسلك النانوي. ويرجع هذا الانخفاض في الكمون الموجب في هذا النموذج إلى حدوث جريان داخلي للإلكترونات من الركازة، حيث الشحنات الحرة تكون مهمة. وعندما تحاول شحنات الاستقطاب الموجب $P_R^- > 0$ أن تولد كموناً موضعياً موجباً $\rho > 0$ ، فإن ذلك سيؤدي إلى حدوث انحناء باتجاه الأسفل لنطاق التوصيل الموضعي. وعندما تغلق η على القيمة صفر، أو حتى أعلى منها، فإن كمية كبيرة من الإلكترونات سوف يجري حقلها من مستوي الركازة إلى داخل السلك النانوي بغية حجب الكمون الموجب.



الشكل 5.3: شبكة خطوط للكمون الكهروضغطي ϕ المحسوب من أجل $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. وبغية تسهيل رسم الشبكة لم يجري إدراج شكل الانحناء للسلك النانوي. إلى جانب شبكة الخطوط الملونة جرى إدراج معالم (خطوط) الكمون المكافئ المتداخلة أيضاً، وذلك من أجل: $\phi = -0.4 \text{ V}, -0.2 \text{ V}, -0.1 \text{ V}, -0.03 \text{ V}, 0.03 \text{ V}, 0.1 \text{ V}, 0.2 \text{ V}, 0.4 \text{ V}$ وكانت أبعاد السلك النانوي كما يلي: $l = 600 \text{ nm}$, $a = 25 \text{ nm}$ ، ومقدار القوة الخارجية $F_y = 80 \text{ nN}$. شبكة خطوط للكمون ϕ عند درجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$ والمقطع العرضي عندما $X = 0$. المنطقة الفارغة في الأسفل هي عبارة عن المنطقة التي يكون مقدار الكمون فيها $\phi < -0.4 \text{ V}$. تتمتع التفاصيل في هذه المنطقة بفرض الإشباع لأغراض العرض ولجعل مقياس الألوان مثالياً بغية إظهار الكمون ϕ داخل السلك النانوي. ركزنا في هذا البحث ويشكل أساساً، على السلوك داخل السلك النانوي، وسوف نترك التفاصيل عن المنطقة الخلفية الدنيا لأبحاث مستقبلية. (b) شبكة خطوط المقطع العرضي للكمون الكهربائي عند درجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$ وارتفاع $z = 400 \text{ nm}$. هنا جرى فقط حساب نصف الفراغ $X > 0$ باستخدام تناظر المرآة للمستوي $X = 0$. جرى استنباط شبكة الخطوط في المنطقة $X < 0$ من خلال انعكاس بسيط للحل في المنطقة $X > 0$. (c, d) أُجري الحساب لتلك الحالة، التي تكون فيها درجة الحرارة عالية جداً $T = T_{\text{high}} = 300000 \text{ K}$ بغية اختبار مدى التقارب بين هذه النتيجة مع مثيلتها، التي جرى الحصول عليها للأسلاك النانوية دون شوائب. مرة أخرى، تتمتع الذروات الحادة بفرض التشعب. (c) يظهر المقطع العرضي عند $X = 0$. (d) شبكة خطوط المقطع العرضي للكمون الكهربائي عند ارتفاع $z = 400 \text{ nm}$. [14].

وفي جانب الكمون السالب (أي الجانب المضغوط من السلك النانوي)، وبينما تُستفد حوامل الشحنة الحرة بسبب القيمة السلبية العالية للمعامل η ، فإن ما يترك في المعادلة (4) هو المقدار $\rho^R + e N_D^+$ فقط كشحنة نقية (صافية). ودعنا نستخدم المعادلة التحليلية المستنبطة في الجزء 3.3 من هذا الكتاب بغية تقويم تركيز شحنة الاستقطاب الأيوني. وبتعويض القيم التالية: $f_y = 80 \text{ nm}$, $L = 600 \text{ nm}$, $a = 25 \text{ nm}$ في المعادلة:

$$\rho^R = \frac{f_y}{I_{xx} E} [2(1 + \nu) e_{15} + 2\nu e_{31} - e_{33}] y$$

$$\text{حيث: } I_{xx} = \frac{\pi}{4} a^4$$

يمكن الحصول على كثافة شحنة الاستقطاب الكهروضغطي النموذجي $\sim -8.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، وذلك بالقرب من سطح السلك عندما $y = a$ ، حيث: e عبارة عن شحنة إلكترون وحيد. وعندما تكون: $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، فإن ρ^R لا يمكن حجبها بشكل كامل في الجانب السلبى ولو استنفدت جميع الإلكترونات، ذلك لأن N_D هي أصغر بكثير من المقدار ρ^R / e . وعندما يتمتع السلك النانوي بتركيز عال للجبهة المانحة $N_D > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، يمكن للاستقطاب الكلي، وعندما $\phi = 0$ ، أن يشغل جميع

الأمكنة. وهذا يعني أنه من المتوقع للسلك النانوي، الذي يتمتع بتركيز عالٍ لحوامل الشحنة الحرة، أن يبدي كموناً كهروضغطياً صغيراً. وتتوافق هذه النتيجة مع القياسات التجريبية المجراة على الموصل النانوي الخاضع لإثارة ضوئية بالأشعة فوق البنفسجية (UV). وفي الحقيقة، يكون مستوى تعطيل الإحساس في أسلاك أكسيد الزنك النانوية النامية، والمعطل إحساسها دون قصد، يكون هذا المستوى أقل بكثير من 10^{18} cm^{-3}

يتألف تغيير حافة النطاق ΔE_c من جزأين: جزء عبارة عن كمون كهربائي والآخر عبارة عن كمون انفعالي. وتكون معادلة الحل لسانت فينان للإجهاد داخل السلك النانوي على الشكل التالي:

$$\sigma_{ZZ} = -\frac{F_Y}{I_{XX}} (L - Z)$$

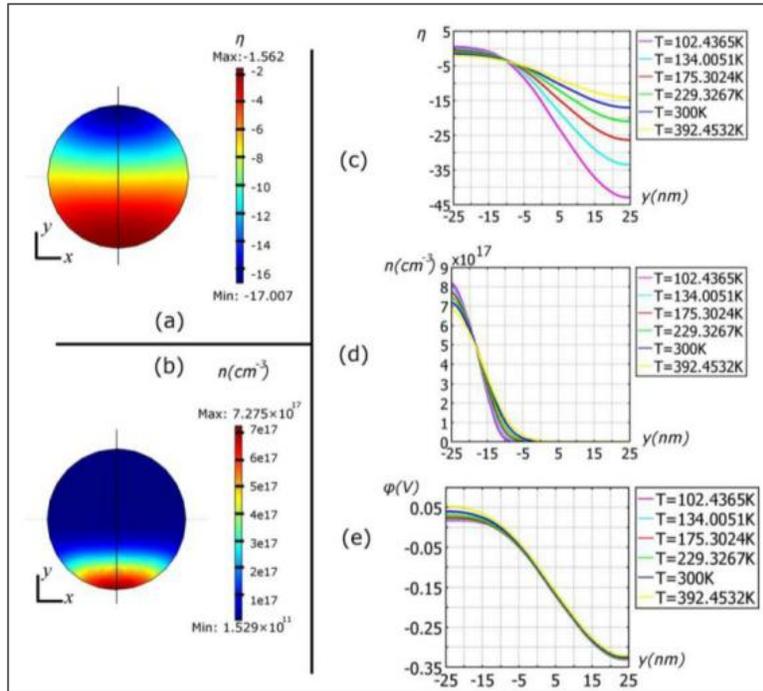
$$\sigma_{XX} = \sigma_{YY} = 0$$

وبناء عليه، يكون:

$$|\Delta E_c^{deform}| = a_c |\Delta V / V| = a_c |Tr(\epsilon)| = a_c \left| \frac{1-2\nu}{E} Tr(\sigma) \right| = -a_c \frac{1-2\nu}{E} \frac{f_y}{I_{xx}} y(l-z)$$

$$< a_c \frac{1-2\nu}{E} \frac{f_y}{I_{xx}} \cdot a \cdot l = 46 \text{ meV}$$

وإذا أجريت المراقبة اللاحقة، فإن هذه القيمة تبدو أصغر بكثير من مثيلتها للجانب السلبي من e_ϕ ، بينما يمكن لكمون الانفعال أن يكون مهملاً قبل إجراء الحساب إذا كان مقدار الكمون في الجانب السلبي يشكل الاهتمام الرئيس. وما تمت الإشارة إليه أيضاً أن الكمون السالب، الذي تمت ملاحظته من خلال التجارب العملية، لن يكون سببه حدوث تغيير في بنية النطاق لكمون الانفعال، وإنما سيكون سببه الرئيس في توافر الأثر الكهروضغطي.



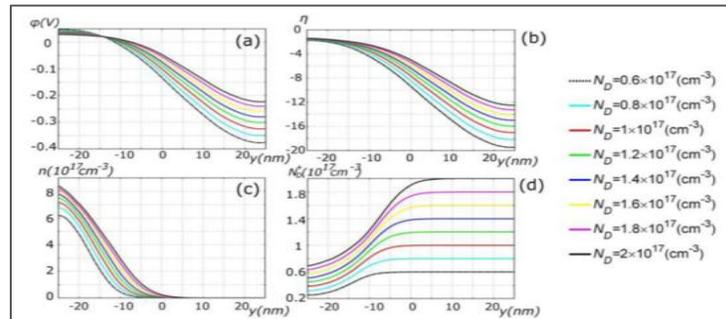
الشكل 6.3: (a, b) شبكة ملونة لمقطع عرضي ذي المعاملات η . (a) والكثافة الموضعية n للإلكترونات (b) من أجل $N_D = 1 \text{ cm}^{-3} * 10^{17}$ ودرجة حرارة $T = 300 \text{ K}$ ، وعند ارتفاع $z = 400 \text{ nm}$ ، هنا جرى حساب الفراغ النصف $X > 0$ باستخدام تناظر المرآة للمستوي $X = 0$. جرى استنباط شبكة الخطوط في المنطقة $X < 0$ من خلال إجراء انعكاس بسيط للحل في المنطقة $X > 0$. شبكة خطوط للمعاملات ϕ , n , η عند درجات حرارة مختلفة على طول القطر في (a) و (b). المحور الأفقي هو المحور y .

يكون الانحلال (أو النفخ) ذا أهمية في الجانب الموجب المحجب، وذلك كما يبدو من مخطط η في (الشكل 6.3 a)، ويعود سبب هذا النفخ في منطقة تراكم الشحنات إلى وجود الأثر الكهروضغطي، ولكن ليس للتركيز العالي للجبهة المانحة أو لانخفاض درجة الحرارة. قبل حدوث الانفعال (التشوه) تكون القيم $\eta = \eta_0 = -3.77$ عندما تكون $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ودرجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$ ؛ وبعد ذلك أدنى من معيار النفخ. وبغية تقصي كيف تؤثر درجة الحرارة في كل من توزع حوامل الشحنات الحرة والكمون الكهربائي قمنا برسم منحنيات n و η و ϕ في درجات حرارة مختلفة (الأشكال 6.3 c و 6.3 d و 6.3 e). ويكون التباين في قيم n و ϕ صغيراً في المجال الحراري الواقع بين $100 \text{ K} < T < 400 \text{ K}$. ويكون تركيز الحوامل الحرة مساوياً تقريباً $n \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ في المنطقة الضحلة، بينما يكون هذا التركيز مساوياً تقريباً $n \sim \frac{\rho^R}{e} + N_D \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ في منطقة تراكم الشحنات، وذلك كما يبدو من (الشكل 3.6 b).

يكون الحد الفاصل بين منطقة تراكم الشحنات ومثيلتها الضحلة حاداً تماماً، نلاحظ أن عرض منطقة تراكم الشحنات أصغر بكثير من قطر السلك النانوي a، والذي يفترض ضمناً وجود حاجز قوي من الكترونات نطاق التوصيل. ويمكن لهذا الحاجز القوي أن يُسفر عن أثر كمي (كوانتي) أقوى من ذلك، الذي يمكن ملاحظته في حالة عدم التشوه (عدم الانفعال) للأسلاك النانوية. وبغية التحري في مدى تأثير التباين في قيم N_D في الكمون الكهروضغطي قمنا برسم مخططات كل من (a) الكمون الكهربائي ϕ ، و (b) المعامل η ، و (c) تركيز الإلكترونات الحرة و (d) تركيز الجبهة المانحة الفعالة N_D^+ ، وذلك عندما تتراوح قيم التراكيز المختلفة للجبهة المانحة بين:

$$0.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} < N_D < 2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

وتكون درجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$ ، وذلك كما هو مبين في (الشكل 3.7). وكما يبدو من هذا الشكل يكون الكمون الكهربائي ϕ أكثر فقداً للإحساس لتركيز الجبهة المانحة في هذا النظام. وعلى أية حال، من المتوقع أن ϕ ستعدل كلياً عندما تكون $N_D > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، بحسب ما تم مناقشته سابقاً. يكون الانحلال (النفخ) في المنطقة، والتي يكون فيها $y < 0$ وهي عبارة عن الجانب الممتد من السلك النانوي، يكون شديداً عادة بسبب القيمة الكبيرة للمعامل η (الشكل 3.7 b). وبالتالي سوف تتراكم الإلكترونات في الجانب الذي يكون فيه $y > 0$ كما هو موضح في (الشكل 4 C)، بينما تنضب في الجانب المضغوط من السلك النانوي، أي في الجانب $y < 0$. ومن جهة أخرى، لن تكون مراكز الجبهة المانحة مُفعلة جيداً في الجانب الذي يكون فيه $y < 0$ كما هو موضح في (الشكل 3.7 d)، والذي يجعل الكثافة للشحنة الكهربائية المحلية $N_D^+ + n$ في الجانب الذي يكون فيه $y < 0$ أصغر ما يمكن (أي الكثافة).



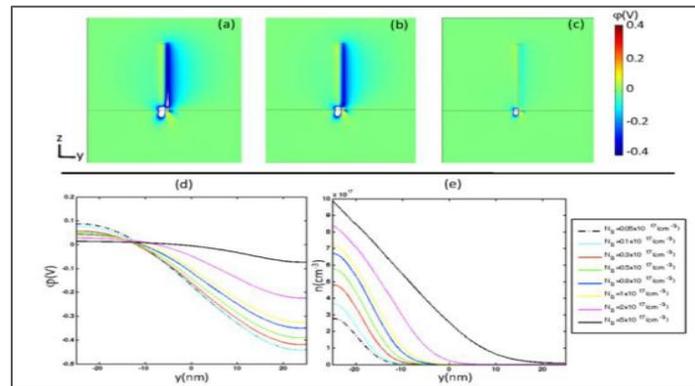
الشكل 3.7: (a) الكمون الكهروضغطي ϕ . (b) المعامل η ، (c) تركيز الإلكترونات الحرة n ، (d) تركيز الجبهة المانحة المفعلة N_D^+ لتراكيز مختلفة للجبهة المانحة $0.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} < N_D^+ < 2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. أبعاد السلك النانوي هي: $a = 25 \text{ nm}$ ، $L = 600 \text{ nm}$ ، والقوة الخارجية $f_y = 80 \text{ nN}$ درجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$.

3.7.3. تأثير تركيز الإشابة

تتم الغاية الرئيسية من هذا الجزء من الكتاب في استقصاء تأثير العوامل المختلفة في توزيع الكمون الكهروضغطي المتوازن داخل سلك نانوي نصف ناقل مشوه من أكسيد الزنك. وخاصة، سوف نقوم بحساب توزيع الكمون الكهربائي عندما يتحقق التوازن الحراري الديناميكي لغالبية حوامل الشحنة الحرة، وذلك فيما يتعلق بالأسلاك النانوية الخاضعة لكل من تراكيز مختلفة للشوائب وقوى مختلفة مطبقة والترتيبات الهندسية المختلفة [17].

ينمو السلك النانوي من أكسيد الزنك على طبقة شفافة وعلى طول المحور C ، وقد جرى حني هذا السلك جانبياً من خلال تطبيق القوة F_y في القمة. ولقد جرى اختيار نموذج متناظر محورياً بغية تبسيط إجراء الحسابات، مما يعني أن المعادلة سوف تحل بالنسبة للفراغ النصف من أجل $X > 0$ ، وفي النهاية يجري استنباط الحل، وذلك من خلال استخدام تناظر المرآة للمستوي $X = 0$.

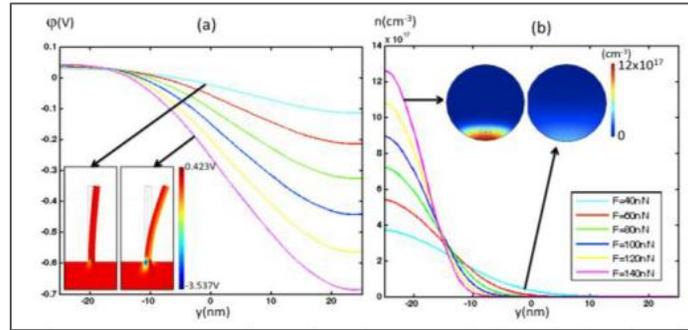
يبين (الشكل 8.3) تأثير تركيز الجهة المانحة في الكمون الكهروضغطي المتوازن والكثافة الموضعية للإلكترونات. وتبين الخطوط الملونة للكمون الكهروضغطي في الأشكال (1a, 1b, 1c) النتيجة لكل من: التراكيز المنخفضة N_D للجهة المانحة ($0.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ومثيلتها المتوسطة ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) وثالثتها العالية ($5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) بالترتيب. أما في (الأشكال 1e, 1d) فقد جرى رسم كل من الكمون الكهربائي ϕ وتركيز الإلكترونات الحرة n عند تراكيز مختلفة للجهة المانحة تتراوح بين كل من: $(0.05 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$ و $(5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$ وعند درجة الحرارة $T = 300 \text{ K}$. ويظهر الكمون الكهربائي ϕ في الجانب الممتد أن الكمون الموجب هو أقل حساسية من مثيله في الجانب السلبي المضغوط لزيادة التركيز N_D للجهة المانحة. وغالباً ما يحجب الكمون الكهربائي ϕ بشكل كامل عندما يكون تركيز الجهة المانحة مساوياً $N_D = (5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$. ويكمن السبب في حجب هذا الكمون في الجانب المضغوط للسلك النانوي من خلال أن الإلكترونات الحرة سوف تُستنفد (تتضرب) في هذه المنطقة، في حين أنها سوف تتراكم في الجانب الممتد. وعلاوة على ذلك، يرجع السبب في انخفاض الكمون الموجب إلى تدفق الإلكترونات الحرة من خزان الركازة، بينما تكون الشحنات الحرة متوافرة بكثرة في هذا الخزان. ويبدو هذا الازدياد في تركيز الإلكترونات الحرة واضحاً تماماً في (الشكل e). (8.3).



الشكل 8.3: شبكة خطوط ملزمة للكمون الكهروضغطي المحسوب من أجل مقطع عرضي عند $X = 0$ وتركيز الجهة المانحة. (a) $N_D = 0.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، (b) $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، (c) $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. وأبعاد السلك النانوي هي $a = 25 \text{ nm}$ ، $L = 600 \text{ nm}$ والقوة الخارجية $F_y = 80 \text{ nN}$. (d) الكمون الكهروضغطي و (e) الكثافة الموضعية للإلكترونات من أجل تراكيز مختلفة $0.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} < N_D < 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ، ودرجة حرارة $T = 300 \text{ K}$. تتوضع شبكة الخطوط على طول قطر السلك النانوي عند $Z = 400 \text{ nm}$ نانوميتر.

يبين (الشكل 9.3) تأثير القوة المطبقة في كل من توزيع الكمون المتوازن والكثافة الموضعية للإلكترونات. ولقد جرى الاحتفاظ بقيمة ثابتة للمعاملات الأخرى، مثلاً: طول السلك النانوي 600 nm وقطره 25 nm وتركيز الجهة المانحة $N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. ولقد جرى اختيار القوة، بحيث تتغير قيمها ضمن المجال $40 \text{ nN} < F < 140 \text{ nN}$. أما حسابياً، فقد جرى تطبيق هذه القوة على السطح العلوي للسلك النانوي بغية تجنب حدوث تشوهات (انفعالات) شبه النقضية في هذا السطح. فعند ازدياد قيم القوة المطبقة، يزداد الكمون الكهربائي للجانب المضغوط (الشكل 9.3 a)، لتصل قيمه إلى المقدار 0.7 V عندما تصل القوة المطبقة إلى قيمها العظمى. ويزداد تركيز الإلكترونات الحرة أيضاً (الشكل 9.3 b) في الجانب الممتد عند ازدياد هذه القوة، ذلك لأن الازدياد في شحنات الاستقطاب يرجع إلى توافر انفعالات عالية القيم. ويبين (الشكل 9.3 a) أيضاً الخطوط الملونة لكل من الكمون الكهربائي والتشوهات (الانفعالات) المقاسة عند تطبيق قوى منخفضة وعالية القيم. ويبين (الشكل 9.3 b) الخطوط الملونة لتركيز الإلكترونات الحرة في المقطع العرضي من أجل $Z = 400$.

أما الشكل الأخير، فقد جرى الحصول عليه بواسطة تناظر المرآة للمستوي $X = 0$.



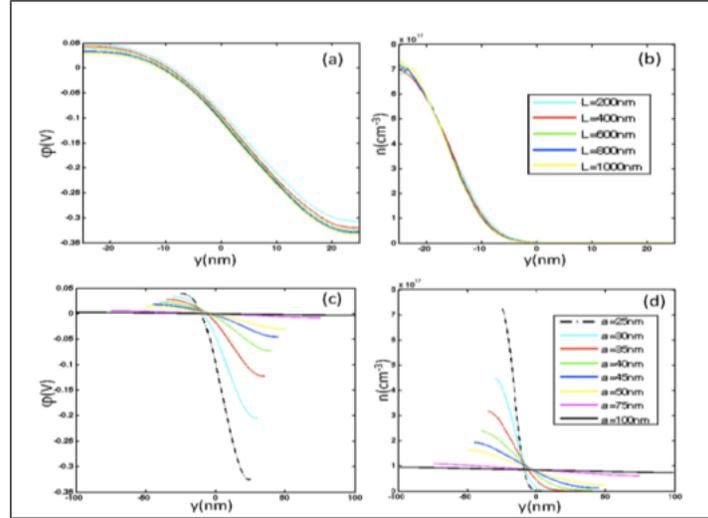
الشكل 9.3: (a) الكمون الكهروضغطي و (b) الكثافة الموضعية للإلكترونات عند قيم مختلفة للقوى الخارجية $40 \text{ nN} < F < 140 \text{ nN}$ يظهر أيضاً مخططاً ملوناً للكمون المحسوب في المقطع العرضي $X = 0$ من أجل $F = 40 \text{ nN}$ نانو نيوتن و $F = 140 \text{ nN}$. (b) يظهر أيضاً مخططاً ملوناً لتوزيع الإلكترونات الحرة الذي جرى حسابه في المقطع العرضي لسلك نانوي بارتفاع 400nm، ومن أجل $F = 40 \text{ nN}$ و $F = 140 \text{ nN}$. هنا جرى إجراء الحساب للفراغ النصفى عندما $X > 0$ فقط باستخدام تناظر المرآة للمستوي $X = 0$. ولقد جرى استنباط الخطوط في المنطقة عند $X < 0$ من خلال انعكاس بسيط للحل في المنطقة $X > 0$ [17].

جرى التدقيق في تأثير الأبعاد الهندسية للسلك النانوي في كل من الكمون الكهربائي والكثافة الموضعية للإلكترونات، وذلك كما هو موضح في (الشكلين 10.3 و 11.3). فإذا جرى الإبقاء على نصف قطر السلك النانوي عند المقدار 25 nm وتركيز الجهة المانحة عند المقدار $N_D = (5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$ والقوة المطبقة عند المقدار 80 nN، فإن طول السلك النانوي سوف تتباين قيمه ضمن المجال $200 \text{ nm} < L < 1000 \text{ nm}$. ويبين (الشكلان 9.3 a و 9.3 b) أن طول السلك النانوي لن يتأثر لا بتوزيع الكمون الكهربائي ولا بكثافة الإلكترونات الحرة.

لقد جرى التدقيق في تأثير التباين في نصف قطر السلك النانوي $100 \text{ nm} < a < 25 \text{ nm}$ وذلك عند الإبقاء على طول السلك النانوي ثابت القيمة ومساوياً 600 nm. ويبين (الشكلان 9.3 c و 9.3 d) النتائج لكل من الكمون الكهربائي وتركيز الإلكترونات الحرة بالترتيب. ويؤدي الازدياد في نصف القطر إلى انخفاض في قيم كلا المعاملين، فالكمون الكهربائي غالباً ما يكون معتدلاً عندما يكون نصف القطر مستوياً 100 nm. ولقد لوحظ أن الزيادة في نصف القطر تؤدي أيضاً إلى انخفاض مقدار الانفعال المكتسب من قبل السلك النانوي، ما دمنا حافظنا على القوة المطبقة ثابتة القيم.

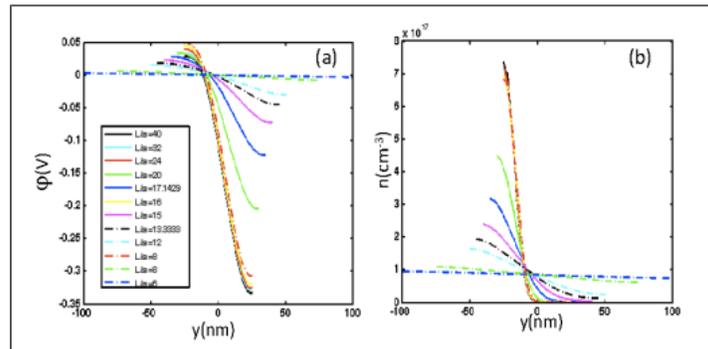
يبين (الشكل 10) تأثير النسبة البعدية L/a في كل من الكمون الكهربائي وتوزيع الإلكترونات الحرة، وهذا ما يلخص النتائج المشروحة سابقاً في (الشكل 9.3): فالتباين في الطول لن يؤثر في هذه المتغيرات، بينما يؤدي الازدياد في مقياس نصف القطر

إلى انخفاض في قيم كلا المعاملين.



الشكل 10.3: (a) الكمون الكهروضغطي و (b) الكثافة الموضعية للإلكترونات من أجل أطوال مختلفة للسلك النانوي

25 < a < 100 nm، تركيز الجهة المانحة $N_D = (10^{17} \text{ cm}^{-3})$. وعند درجة حرارة $T = 300\text{K}$ والقوة الخارجية $F_y = 80 \text{ nN}$. تتوضع شبكة الخطوط على طول القطر للسلك النانوي عند $Z = 400 \text{ nm}$.



الشكل 11.3: (a) الكمون الكهروضغطي. (b) الكثافة الموضعية للإلكترونات من أجل نسب مختلفة لأبعاد السلك النانوي

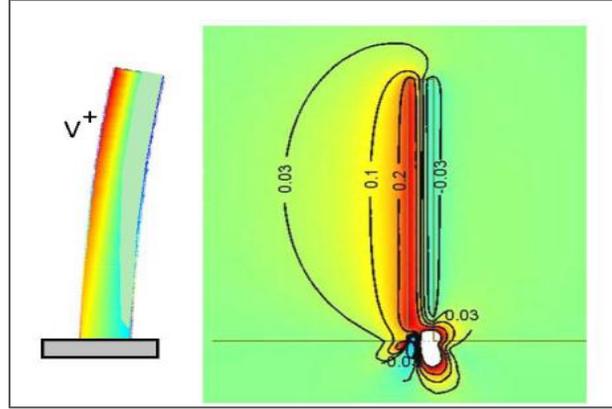
$6 < 1/a < 40$. يساوي تركيز الجهة المانحة $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. عند درجة حرارة $T = 300\text{K}$ ، والقوة الخارجية

$F_y = 80 \text{ nN}$ نانو نيوتن. تتوضع شبكة الخطوط على طول القطر للسلك النانوي عند $Z = 400 \text{ nm}$ نانوميتر.

3.7.4. تأثير نوع الحامل

بدلاً من افتراض النمط (n-type) المشوب كما هو الحال في نسيج أسلاك أكسيد الزنك النانوية، يمكن الحصول على نمط (p-type) p المستقر لأسلاك أكسيد الزنك النانوية. ويعزى سبب استقرار النمط (p-type) p، المشوب داخل الأسلاك النانوية، إلى كل من الحجم الحر للانخلاعات وتوافر تركيز عالٍ للفراغات (أو الثقوب) بالقرب من سطح الأسلاك النانوية. لقد أجرينا حساب الكمون الكهروضغطي داخل سلك نانوي منحني يحوي النمط (p-type) p آخذين بالحسبان الكثافة المنتهية للحوامل. وإذا كان السلك النانوي، المعد من أكسيد الزنك والمنحني جانبياً، لا يحوي أية شوائب، فإن كلاً من الجانب الممتد بيدي كموناً كهروضغطياً موجباً، بينما بيدي الجانب المضغوط كموناً كهروضغطياً سالباً. فإذا تمتع النمط (p-type) p بشوائب منتهية (أو محدودة)، فإن الثقوب تسعى للتراكم في جانب الكمون الكهروضغطي السالب. وهكذا يكون الجانب السلبى محجوباً جزئياً بالثقوب، بينما يكون

الجانب الموجب للكمون الكهروضغطي مصاناً. وباستخدام معادلة بواسون والتوزيع الإحصائي كحوامل الشحنة لفيرمي - ديراك، وذلك فيما يتعلق بالسلك النانوي النموذجي لأكسيد الزنك، والتمتع بقطر يساوي 50 nm وطول يساوي 600 nm والتركيز المقبول $N_D = \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ويخضع لقوة انحناء 80nN، فإن الكمون الكهروضغطي في الجانب السليبي يكون أكبر من (0.05 V) ويكون مساوياً تقريباً (~0.3 V) في الجانب الموجب (الشكل 12.3). وهذا يعني أن الكمون الضغطي في النمط P (P-type) للسلك النانوي يكون هو المهيمن، وذلك بواسطة الكمون الضغطي الموجب في الجزء الممتد للسطح [18].



الشكل 12.3: توزيع الكمون الكهروضغطي المحسوب داخل النمط p (p-type) لسلك نانوي من أكسيد الزنك، وذلك عند انحرافه من الجانب الأيسر نتيجة إخضاعه لقوة عرضانية.

3.8. المراجع

- [1] H.J. Xiang, J.L. Yang, J.G. Hou, Q.S. Zhu, *Applied Physics Letters* **89**, 223111 (2006).
- [2] Z.C. Tu, X. Hu, *Physical Review B* **74**, 035434 (2006).
- [3] A.J. Kulkarni, M.Z. a. F.J.K., *Nanotechnology* **16**, 2749 (2005).
- [4] P.J. Michalski, N. Sai, E.J. Mele, *Physical Review Letters* **95**, 116803 (2005).
- [5] Z.L. Wang, X.Y. Kong, Y. Ding, P.X. Gao, W.L. Hughes, R.S. Yang, Y.S. Zhang, *Advanced Functional Materials* **14**, (10), 943 (2004).
- [6] J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals*. Oxford University Press: 1957.
- [7] Q.H. Qin, *Fracture Mechanics of Piezoelectric Materials*. WIT Press: Southampton, UK, 2001.
- [8] Y.F. Gao, Z.L. Wang, *Nano Lett.* **7**, 2499 (2007).
- [9] R.W. Soutas-Little, *Elasticity*. Dover Publications: Mineola, NY, 1999.
- [10] L.D. Landau, E.M. Lifshĭtis, *Theory of elasticity*. Pergamon Press, Addison-Wesley Pub. Co., London, Reading, Mass., 1959.
- [11] J. Zhou, P. Fei, Y.F. Gao, Y.D. Gu, J. Liu, G. Bao, Z.L. Wang, *Nano Letters*, **8**, 2725 (2008).
- [12] Z.Y. Gao, J. Zhou, Y.D. Gu, P. Fei, Y. Hao, G. Bao, Z.L. Wang, *J. Appl. Physics* **105**, 113707 (2009).
- [13] C.S. Lao, J. Liu, P.X. Gao, L.Y. Zhang, D. Davidovic, R. Tummala, Z.L. Wang, *Nano Lett.*, **6** 263 (2006).
- [14] Y.F. Gao, Z.L. Wang, *Nano Letters* **9**, 1103 (2009).
- [15] F. Sacconi, A. Di Carlo, P. Lugli, H. Morkoc, *Ieee Transactions on Electron Devices* **48**, (3), 450 (2001).
- [16] W. Shan, W. Walukiewicz, J.W. Ager, K.M. Yu, Y. Zhang, S.S. Mao, R. Kling, C. Kirchner, A. Waag, *Appl Phys Lett.* **86**, (15), 153117 (2005).
- [17] G. Mantini, Y.F. Gao, A. D'Amico, C. Falconi, Z.L. Wang^{*}, *Nano Research* **2**, 624 (2009).
- [18] M.P. Lu, J.H. Song, M.Y. Lu, M.T. Chen, Y.F. Gao, L.F. Chen, Z.L. Wang, *Nano Letters* **9**, 1223 (2009).

الفصل الرابع: مبادئ المولدات النانوية

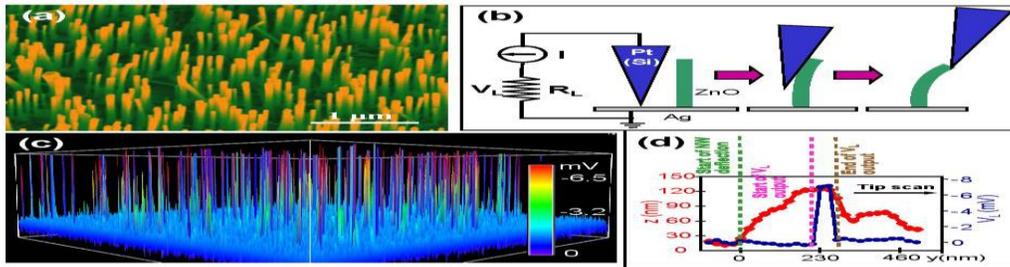
أُدخل مفهوم المولد النانوي (NG) للمرة الأولى من خلال قياس الخواص الكهروضغطية لأسلاك أكسيد الزنك ZnO النانوية NWs باستخدام مجهر القوة الذرية [1]AFM. ويتمتع أكسيد الزنك ببنية فورترت (Wurtzite)، التي يتشكل فيها أيونات Zn الموجبة ومثيلاتها O السالبة تنسيقاً رباعي الوجوه. ويستفاد من انعدام التناظر المركزي في ظاهرة الكهرباء الضغطية في تحويل الإجهاد الميكانيكي/أو الانفعال الميكانيكي إلى جهد (توتر) كهربائي، ويمكن أن يحدث العكس، إذ يمكن أن تتوافر إزاحة نسبية لكل من الأيونات الموجبة ومثيلاتها السالبة داخل البلورة. تكمن خطوتنا الأولى في هذا الفصل في إدخال المبادئ الأساسية للمولد النانوي.

4.1 المولدات النانوية باستخدام أسلاك نانوية متراسة شاقولياً

4.1.1 مفهوم المولدات النانوية الكهروضغطية

بُنيت دراستنا، وكخطوة أولى لإثبات هذا المفهوم، بُنيت على نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية على ركازة صلبة ناقلة للتيار (الشكل 1.4 (a) [2,3,4]). وأجريت القياسات بواسطة مجهر القوة الذرية (AFM) من خلال استخدام طرف مستدق سيليكوني (Si) مغلف بغشاء رقيق (فيلم) من البلاتين Pt، ويتمتع بزواوية مخروط تساوي 70°C . ويتمتع الذراع المستطيل بثابت نابض عادي معايير يساوي 0.76 N/m (انظر الشكل 1.4 (c)). وعندما كان مجهر القوة الذرية في وضع التماس، فقد تمت المحافظة على قوة عادية ثابتة القيمة، تساوي 5 nN ، بين الطرف المستدق وسطح العينة. وأجرى الطرف المستدق مسحاً على الجزء العلوي من السلك النانوي لأكسيد الزنك، بينما ضبط ارتفاع الطرف المستدق وفقاً لكل من طبيعة السطح (تضاريسه) وقوة التماس الموضعية (الشكل 1.4 (b)).

يُهمل الاهتزاز الحراري للأسلاك النانوية عند درجة حرارة الغرفة. وبغية تحقيق التماس الكهربائي في أسفل الأسلاك النانوية، طبقت لصاقة من معدن الفضة لوصل الغشاء الرقيق لأكسيد الزنك، المتوضع على سطح الركازة، مع دائرة القياس. جرى رصد مستمر لتوتر الخرج عبر حمل خارجي لمقاومة R_L مقدارها 500 ميجا أوم ، بينما كان الطرف المستدق يقوم بعملية المسح في أعلى الأسلاك النانوية (لاحظ القطبية، التي جرى تحديدها لإشارة التوتر). لم يُطبق أي توتر خارجي في أي مرحلة من مراحل التجربة.



الشكل 1.4: (a) صور بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لأسلاك أكسيد الزنك ZnO النانوية المتراسة منمأة على ركازة من نتريد الغاليوم GaN/البياقوت. (b) إعداد التجارب ومراحل إجرائها بغية توليد كهرباء من خلال إحداث تشوهات (انفعالات) في سلك نانوي كهروضغطي باستخدام طرف مستدق ناقل للكهرباء لمجهر القوة الذرية AFM. ويقوم مجهر القوة الذرية بعملية المسح عبر مصفوفات السلك النانوي في وضعية التماس. (c) صورة توتر الخرج لمصفوفات السلك النانوي عندما يقوم الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية بالمسح عبر مصفوفات السلك النانوي. (d) صورة لمجموعة مركبة من نقاط القياس بمجهر القوة الذرية (الخط الأحمر)، والتوتر المولد الموافق لها (الخط الأزرق)، وذلك عند إجراء عملية مسح فريدة للطرف المستدق لمجهر عبر السلك النانوي. يوضح هذا الشكل التأخير الحاصل في توليد الكهرباء.

جرى تجريبياً تسجيلاً متزامناً لكل من الطوبوغرافيا (أي إشارة التغذية العكسية الواردة من الماسح) وصور توتر الخرج الموافق لها عبر الحمل، وذلك عندما جرى إجراء عملية المسح في الجزء العلوي لمصفوفات السلك النانوي المترابطة بالطرف المستدق لمجهر القوة الذرية. وفي وضع التماس، وبينما كان الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية يقوم بعملية المسح في الجزء العلوي للأسلاك النانوية المترابطة شاقولياً، أُجري انحناء تدريجي للأسلاك النانوية. وسجلت مسافة الانحناء بشكل مباشر داخل الصورة الطوبوغرافية، التي يُستمد منها كلٌ من مسافة الانحناء القصوى ومعاملات المرونة للسلك النانوي، فضلاً عن كثافة الأسلاك النانوية التي جرى مسحها بالطرف المستدق لمجهر القوة الذرية.

رُصد العديد من قمم (ذرى) الخرج الحادة لكل موضع تماس داخل صورة خرج التوتر الموافق لهذا الموضع (الشكل c1.4). لاحظ أن إشارة توتر الخرج كانت في الواقع سالبة بالنسبة للنهاية المؤرّضة. ومن خلال فحص الجانب الطوبوغرافي للسلك النانوي وكُمون الخرج الموافق لهذا الجانب، لوحظ وجود تأخير في إشارة خرج التوتر (الشكل d 1.4)، مما يعني أنه ليس هناك من خرج للاستطاعة الكهربائية عندما يكون الطرف المستدق في البداية في تماس مع السلك النانوي، ولكن تولدت قمة حادة في طيف الخرج في اللحظة التي كان فيها الطرف المستدق على وشك أن ينفصل عن السلك النانوي. ويُعد هذا التأخير دليلاً مفصلياً لتفسير عملية الخرج للاستطاعة. ومن الأهمية بمكان ملاحظة أن التوتر V_L ، الوارد هنا، ناتج عن التيار عبر الحمل الخارجي (أي المقاومة الخارجية) RL. ويتمتع المولد النانوي (NG)، المبني على أسلاك أكسيد الزنك النانوية، يتمتع بالخواص التجريبية التالية:

- I) يكون كمون الخرج عبارة عن قمة حادة في الطيف، وتكون سالبة بالنسبة للنهاية المؤرّضة للسلك النانوي.
- II) لا يوجد تيار خرج عندما يمس الطرف المستدق بداية السلك النانوي ويدفعه، بينما يلاحظ وجود خرج كهربائي فقط عندما يكون الطرف المستدق على وشك أن ينفصل عن السلك النانوي في النصف الثاني من هذا التماس.
- III) يحدث خرج للاستطاعة فقط عندما تماس الطرف المستدق الجانب المضغوط من السلك النانوي.
- IV) رُصدت إشارة الخرج فقط للأسلاك النانوية الكهروضغطية. ولم يتحقق أي خرج كهربائي عندما تكون الأسلاك النانوية معدة من أكسيد التنغستين أو الأنابيب النانوية الكربونية أو السيليكون أو المعدن. ولن يلعب كمون التماس أو مثيله للاحتكاك أي دور في استطاعة الخرج التي تمت مشاهدتها.
- V) يكون مطال إشارة الخرج شديد الحساسية لمقاس (حجم) الأسلاك النانوية [6].
- VI) لتوليد الكهرباء، لا بد أن يكون التماس بين الطرف المستدق والسلك النانوي وفقاً لظاهرة شوتكي، بينما يكون التماس بين المولد النانوي والنهاية المؤرّضة أومياً (وفقاً لقوانين أوم).

4.1.2. حاجز شوتكي عند السطح البيئي إلكتروني - سلك نانوي

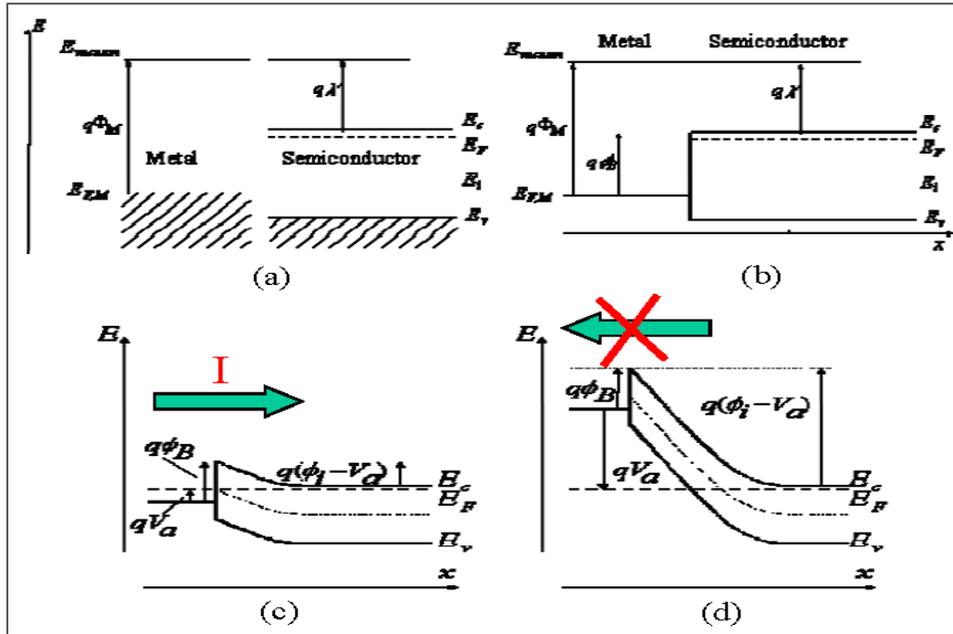
يوجد نموذجان من التماس بين المعدن ونصف الناقل، ولكن النموذج الأكثر شيوعاً هو التماس الأومي، والذي لا يفرض حاجزاً كمونياً عند السطح البيئي، مما يسمح للإلكترونات بالانتقال المتماثل في كلا الاتجاهين الأمامي والعكسي دون تمييز. وفي هذه الحالة يتمتع منحني التيار - جهد (I-V) بالشكل الخطي. ومن جهة أخرى، يمكن للحاجز الكموني أن يتشكل عند السطح البيئي، بحيث لن تكون عملية انتقال الإلكترونات عبر هذا السطح البيئي متماثلة. وبين (الشكل a2.4, b) التشكيلة الممكنة قبل تماس المعدن مع نصف ناقل من النمط n (n-type) وبعد هذا التماس. ويدعى الحاجز الكموني، ذو المقدار $\phi_B = \phi_M - \chi$ بحاجز شوتكي، إذ يتشكل هذا الحاجز عند السطح البيئي، حيث ϕ_B هو دالة العمل للمعدن، و χ هي الألفة الإلكترونية. ويكون التماس أومياً عندما تكون $(\phi_M < \chi)$ ، ووفقاً لظاهرة شوتكي عندما تكون $(\phi_M > \chi)$.

ويؤدي وجود تماس شوتكي دور صمام ثنائي (ديود) (الشكل 2.4,c,d). فإذا كان انتقال الإلكترونات بالاتجاه الأمامي (المباشر)، ويتمتع المعدن بكمون أعلى، استطاع التيار أن ينساب عبر الحاجز (أي أن الإلكترونات سوف تنتقل من جانب نصف الناقل باتجاه الجانب المعدني). أما إذا كان الانتقال بالاتجاه المعاكس، ويتمتع المعدن بكمون منخفض، فلن تستطيع الإلكترونات أن تتجاوز الحاجز لتصل إلى الجهة الأخرى، مما يسبب انقطاع التيار بالفعل.

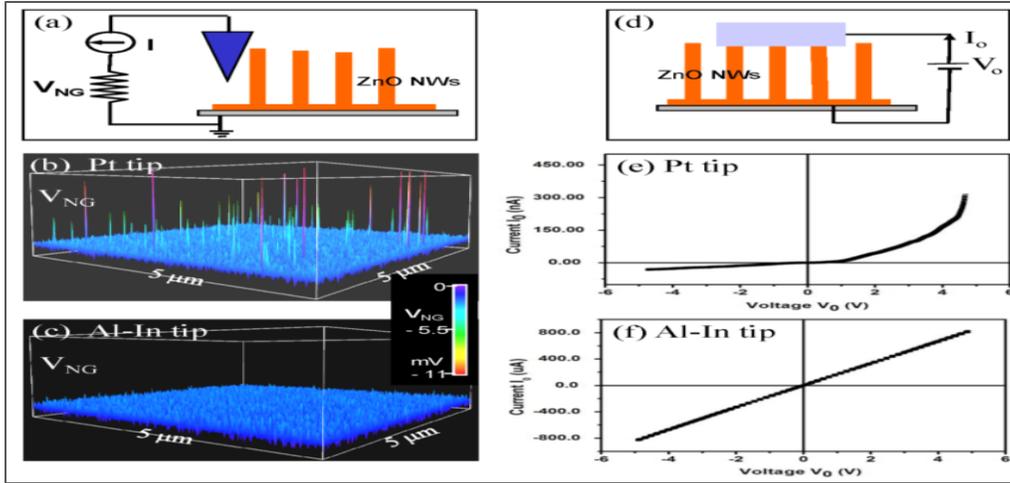
يُعد تماس شوتكي، الموجود بين التماس المعدني والسلك النانوي لأكسيد الزنك، يُعد المفتاح الرئيس لكل من توليد التيار وحدوث عملية خرج للمولد النانوي. وبغية دراسة الدور الذي يؤديه حاجز شوتكي في المولد النانوي استخدمنا مجهر القوة الذرية (AFM) معتمدين على كلٍّ من مبدأ المناورة ومنظومة القياس، وذلك كما جرى في دراستنا الأولى عند استعراض المولد النانوي الكهروضغطي (انظر الشكل 3.4,a). فعندما جرى استخدام لصاقة من معدن البلاتين Pt ثخانتها 100 nm لتغليف الطرف المستدق السيلكوني بغية إجراء مسح للأسلاك النانوية الموجودة في وضع تماس، لوحظ وجود قمم في طيف التوتر (الشكل 3.4,b)، وكان مقدار توتر الخرج في حدود -11mV (تعني الإشارة السالبة أن التيار ينساب من النهاية المؤرضة عبر الحمل الخارجي).

وعند تغيير الطرف المستدق، ليصبح معداً من السيلكون المغلف بخليطة من الألمنيوم- إندنيوم AL-In أبعادها (30 nm/30 nm)، لم تُبد أسلاك أكسيد الزنك النانوية أي خرج كهروضغطي (الشكل 3.4,c).

وبغية فهم الأدعائين المتميزين لكلا النموذجين من الأطراف المستدقة التي تقوم بعملية المسح، قمنا بإجراء قياس خواص منحنيات التيار - جهد (V-I) الموافقة لهما مع أسلاك أكسيد الزنك النانوية. وللتأكد من استقرار التماس استخدمنا الكتروداً ضخماً كان يوضع تماس مع مجموعة من الأسلاك النانوية كما هو موضح في (الشكل 3.4,e). يعرض التماس بين البلاتين وأكسيد الزنك Pt-zNo الصمام الثنائي (الديود) لشوتكي بوضوح (الشكل 3.4,e) بينما كان التماس بين خليطة الألمنيوم - إندنيوم وأكسيد الزنك عبارة عن تماس أومي. أما فيما يتعلق بالخرج الكهروضغطي، المعروف في (الشكل 3.4,b,c)، فقد خلصنا إلى أن تماس شوتكي، الحاصل بين كل من الكترود المعدني وأكسيد الزنك، لابد من توافره لتشغيل المولد النانوي [7].



الشكل 2.4: (b,a) المعدن ونصف الناقل من النمط n (n-type) قبل إجراء التماس بينهما وبعده. (c, d) تماس شوتكي عند انتقال الإلكترونات بالاتجاه الأمامي وبالعكس.



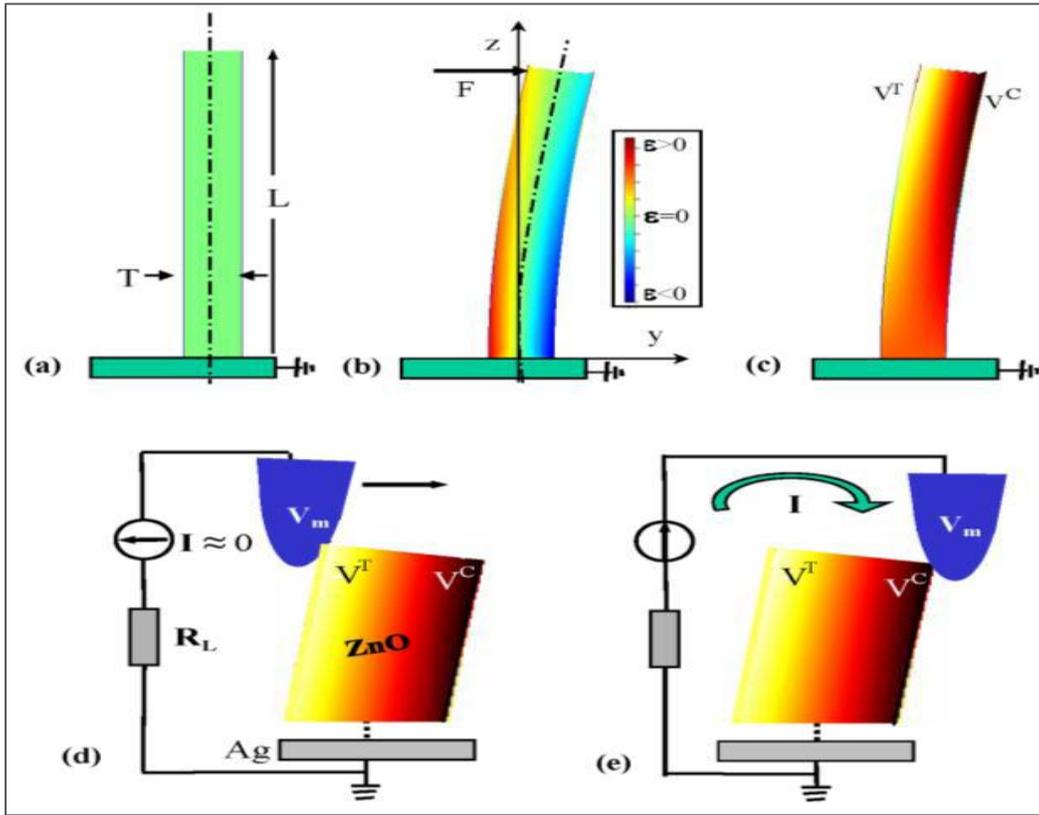
الشكل 3.4: (a) نظام القياس بمجهر القوة الذرية AFM بغية ربط العلاقة بين تماس المعدن - أكسيد الزنك وخرج المولد النانوي. (b) كمن خرج المولد بواسطة مصفوفة السلك النانوي لأكسيد الزنك عند إجراء عملية المسح بواسطة الطرف المستدق السيلكوني المغلف بمعدن البلاتين. (c) لم يجر توليد كمن خرج بواسطة مصفوفة السلك النانوي لأكسيد الزنك عند إجراء عملية المسح بواسطة الطرف المستدق السيلكوني المغلف السيلكوني بمعدن الألمنيوم - انديوم. (d) منصة الاختبار بغية توصيف ميزة النقل لمنحنى التيار - جهد (I-V) عند حدوث تماس بين المعدن والسلك النانوي لأكسيد الزنك. (e) منحنى التيار - جهد عند حدوث تماس بين معدن البلاتين والسلك النانوي لأكسيد الزنك، أي أثر الصمام الثنائي (الديود) لثوتكي. (f) منحنى التيار - جهد عند حدوث تماس بين الخليطة AL/In والسلك النانوي لأكسيد الزنك (AL/In-ZnO NW)، والذي يبين السلوك الأومي في هذه الحالة.

4.1.3. توليد الشحنة وعمليات الخرج

يبين (الشكل 4.4) آلية كل من خلق (توليد) الشحنات المارة عبر السلك النانوي وتفرقتها وتجميعها وتفرغها (الشكل 4.4)[1]. فعنما يكون السلك النانوي لأكسيد الزنك مستقيماً وشاقولياً (الشكل 4.4a)، فإن انحناء هذا السلك النانوي بواسطة الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية AFM سوف يولد حقل انفعال، بحيث يكون السطح الخارجي لهذا السلك ممتداً (مشدوداً)، وسطحه الداخلي مضغوطاً (الشكل 4.4b). وفي النتيجة، سوف ينشأ كمن كهروضغطي عبر هذا السلك النانوي، بحيث يكون كمن الجانب المشدود موجباً وكمن مثيله المضغوط سالباً (الشكل 4.4c)، وذلك عندما يكون الالكترود، المتوضع عند قاعدة السلك، مؤرضاً. وينشأ هذا الكمن بفعل الإزاحة النسبية للأيونات الموجبة للزنك Zn^{2+} بالنسبة للأيونات الأكسجين السالبة O^{2-} ، وذلك بفضل الأثر الكهروضغطي داخل بنية فورترزيت البلورية. وهكذا، لن تستطيع هذه الشحنات المتأينة أن تتحرك بحرية، ولن تكون قادرة على إعادة الدمج دون إزالة الانفعال (الشكل 4.4c). سيبقى فرق الكمن محافظاً على قيمه ما دام التشوه (الانفعال) موجوداً في مكانه، ولم يجرى حقن شحنات حرة خارجية إلى داخل هذا المكان (مثلاً الشحنات الواردة من التماسات المعدنية)، إذ يمكن أن تحدث عملية الحقن هذه إذا كانت الإثابة داخل السلك النانوي أخفض ما يمكن. وهنا تكمن كل من عملية توليد الشحنة وتفرقتها.

سوف نأخذ الآن بالحسبان كلاً من عملية تجميع الشحنات وتحريرها (إطلاقها). وتكون الخطوة الأولى، التي تكمن في عملية تجميع الشحنات، وذلك عندما يكون الطرف المستدق الموصل لمجهر القوة الذرية، الذي يحدث التشوه (الانفعال)، يكون بوضع تماس مع السطح المشدود ذي الكمن الموجب V^T (الشكل 4.4c,d). يتمتع طرف معدن البلاتين بكمن مقداره تقريباً $(V_m = 0)$ ، لهذا يميل السطح البيني بين طرف المعدن وأكسيد الزنك، لأن يكون فرق كمنه سالباً، أي أن: $\Delta V = V^m - V^T < 0$. وإذا أخذنا بالحسبان ميزة النمط n (n-type) لنصف الناقل لأسلاك أكسيد الزنك النانوية المنسوجة، فإن السطح البيني لمعدن البلاتين مع نصف الناقل ZnO، سيكون في هذه الحالة عبارة عن صمام ثنائي (ديود) منحاز عكسياً لثوتكي (الشكل 4.4d)، وسوف يتدفق

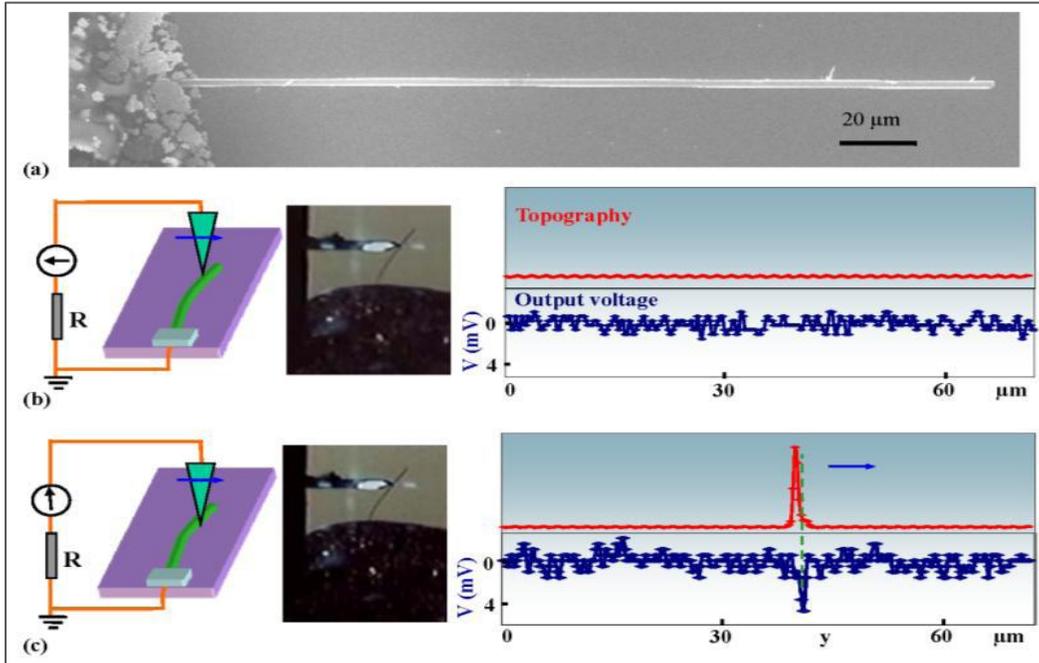
تيار صغير عبر السطح البيني. أما الخطوة الأخرى، فتكمن في عملية تحرير الشحنات. فعندما يكون الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية في وضع التماس مع الجانب المضغوط للسلك النانوي (الشكل e4.4)، يتمتع السطح البيني للطرف المستدق للمعدن مع أكسيد الزنك بفرق كمون موجب أي أن $\Delta V = V_m - V^C > 0$. سيكون السطح البيني في هذه الحالة بين المعدن ونصف الناقل عبارة عن صمام شوتكي الثنائي (ديود) ذي الانحياز الموجب، حيث يُؤد هذا الصمام ازدياداً مفاجئاً في التيار الكهربائي للخارج. ويُعدُّ هذا التيار نتيجة توافر فرق الكمون ΔV ، الذي يقوم بدفع تيار من الإلكترونات من السلك النانوي نصف الناقل المعد من أكسيد الزنك باتجاه الطرف المستدق للمعدن. وهذا التيار من الإلكترونات الحرة، المنطلق من العقدة عبر السلك النانوي إلى الطرف المستدق للمعدن، سيُعدل من الشحنات المتأينة الموزعة داخل حجم السلك النانوي، وبالتالي سيخفض من مقادير كلٍّ من الكمون V^C ومثيله V^T .



الشكل 4.4: آلية العمل لطريقة توليد الطاقة من سلك/أو حزام لأكسيد الزنك الكهروضغطي كنتيجة لتوافر الخواص الكهروضغطية ونصف الناقلية مجتمعة جنباً إلى جنب مع حاجز شوتكي عند السطح البيني للطرف المستدق لمجهر القوة الذرية ونصف الناقل. (a) مخطط تعريف بالسلك / أو الحزام. (b) توزيع الانفعال الطولاني داخل السلك / أو الحزام بعد خضوعه لانحناء من أحد جوانبه بواسطة الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية. (c) توزيع الكمون داخل السلك / أو الحزام كنتيجة للأثر الكهروضغطي، مع سطوح الجانبين المشدود والمضغوط المتمتعين بالكمون الموجب والسالب بالترتيب. (d, e) التماسات المعدنية ونصف الناقلية الحاصلة بين الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية والسلك / أو الحزام نصف الناقل المعد من أكسيد الزنك، وذلك عند توافر كموني تماس موضعيين معكوسين (موجب وسالب)، ويظهر في هذا الشكل السلوك المعدل لانحياز لشوتكي بالاتجاهين الأمامي والعكسي بالترتيب. وهذا هو حاجز شوتكي ذو الانحياز المتعاكس عند السطح البيني للطرف المستدق للمجهر والحزام، مما يجعل من الممكن توفير الشحنات الكهروضغطية، ثم إنتاج خرج التفريغ فيما بعد. ويعد دور التوصيل باتجاه واحد، والذي يؤديه صمام شوتكي الثنائي (ديود)، هاماً بالنسبة لنا بهدف مراقبة الخرج الكهروضغطي. تكمن العملية المعروضة في الشكل (d)، في توليد شحنات / أو كمون والحفاظ عليهما، بينما تكمن مثيلتها، المعروضة في الشكل (e)، في تفريغ هذا الكمون عبر تيار من الإلكترونات من الدارة. ويكون التوتر السالب للخارج على الحمل نتيجة لتدفق التيار من الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية عبر حزام أكسيد الزنك إلى الأرض.

قمنا بتصميم مجموعة من التجارب بهدف برهنة الآلية المشار إليها أعلاه. ولقد بُنيت تجربتنا على إجراء المعالجة الميكانيكية لسلك / أو حزام مفرد من أكسيد الزنك بواسطة مجهر القوة الذرية [5]AFM. ومن خلال اختيار سلك/ أو حزام من أكسيد الزنك، يكون طويلاً كفاية، ليصار إلى رؤيته بالمجهر الضوئي، وبحيث يجري تثبيت إحدى نهايتي السلك على ركازة من السيلكون بواسطة لصاقة فضية، بينما نترك النهاية الأخرى حرة. ولقد أُعدت الركازة من السيلكون الحقيقي، وبالتالي فإنها تتمتع بناقلية ضعيفة جداً. يتوضع السلك على الركازة، لكن تترك مسافة بينه وبين الركازة، طبعاً ما عدا الجانب المثبت من هذا السلك، وذلك بهدف التخلص من أي احتكاك بين السلك والركازة (الشكل a5.4).

ولقد جرى تسجيل كل من الشكل الطبوغرافي (أي إشارة التغذية العكسية الواردة من الماسح) وما يرافقه من صور لتوتر الخرج (V) عبر الحمل، حيث جرى هذا التسجيل بشكل متزامن عندما كان الطرف المستدق للمجهر القوة الذرية يقوم بعملية المسح عبر السلك/أو الحزام. وتعكس الصورة الطبوغرافية مدى التغير الحاصل في مقدار القوة النازمة العمودية على الركازة، حيث تُظهر هذه الصورة المضخة فقط عندما يقوم الطرف المستدق للمجهر بعملية المسح فوق السلك. أما توتر الخرج بين الطرف المستدق الموصل (أو الناقل) والقاعدة، فقد تمت مراقبته باستمرار ما دام الطرف المستدق للمجهر يقوم بعملية المسح في أعلى السلك / أو الحزام. لم يطبق أي توتر خارجي وخلال أي مرحلة من مراحل التجربة. ولقد جرى التقاط الصور لكل من العمل التجريبي الداخلي والخرج بواسطة كاميرا فيديو، وبالتالي كنا قادرين على تصور عملية توليد الكهرباء بشكل مباشر.



الشكل 5.4: المراقبة في الموقع الأصلي (In-Situ) لعملية تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية بواسطة حزام كهروضغطي من أكسيد الزنك. (a) صور جرى التقاطها بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM لحزام من أكسيد الزنك، حيث تُثبت إحدى نهايتيه على الركازة السيليكونية بواسطة لصاقه فضية، بينما تترك النهاية الأخرى حرة، ويتمتع هذا الحزام بمقطع عرضي مستطيل الشكل. (b, c) صور لثلاث مزايا مختصرة والطبوغرافية المطابقة لها (اللون الأحمر) وتوتر الخرج (اللون الأزرق)، وذلك عندما يقوم الطرف المستدق للمجهر بالمسح عبر المقطع العرضي الأوسط للحزام. ويظهر المخطط التوضيحي شروط التجربة في الجانب الأيسر، مع الإشارة إلى أن اتجاه المسح للطرف المستدق للمجهر يبدو على شكل رأس سهم. يبين الشكل (b) أن الطرف المستدق للمجهر القوة الذرية دفع الحزام باتجاه الجانب الأيمن، ولكنه لم يمر أعلاه أو عبر عرضه، وذلك من خلال الحكم على الصورة الطبوغرافية في هذا الشكل، كما لم يُضبط أي توتر خرج. ويبين الشكل (c) أن الطرف المستدق للمجهر القوة الذرية دفع الحزام بالاتجاه الأيمن، ومَر أعلى هذا الحزام وعبر عرضه، وذلك من خلال الحكم على الذروة في الصورة الطبوغرافية، وأظهرت صورة توتر الخرج وجود ذروة حادة سالبة. هناك تأخير في ذروة توتر الخرج في إشارة إلى صورة القوة النازمة (أي الذروة في الصورة الطبوغرافية).

يبين الشكل (d) وفي حال الحزام المتناوب، أن الطرف المستدق للمجهر القوة الذرية يدفع الحزام بالاتجاه الأيسر، ولم يمر أعلاه أو عبر عرضه، وذلك من خلال الحكم على الصورة الطبوغرافية، ولم يضبط أي توتر خرج ما عدا مستوى الضجيج، وكان الانحناء كبيراً أيضاً [5].

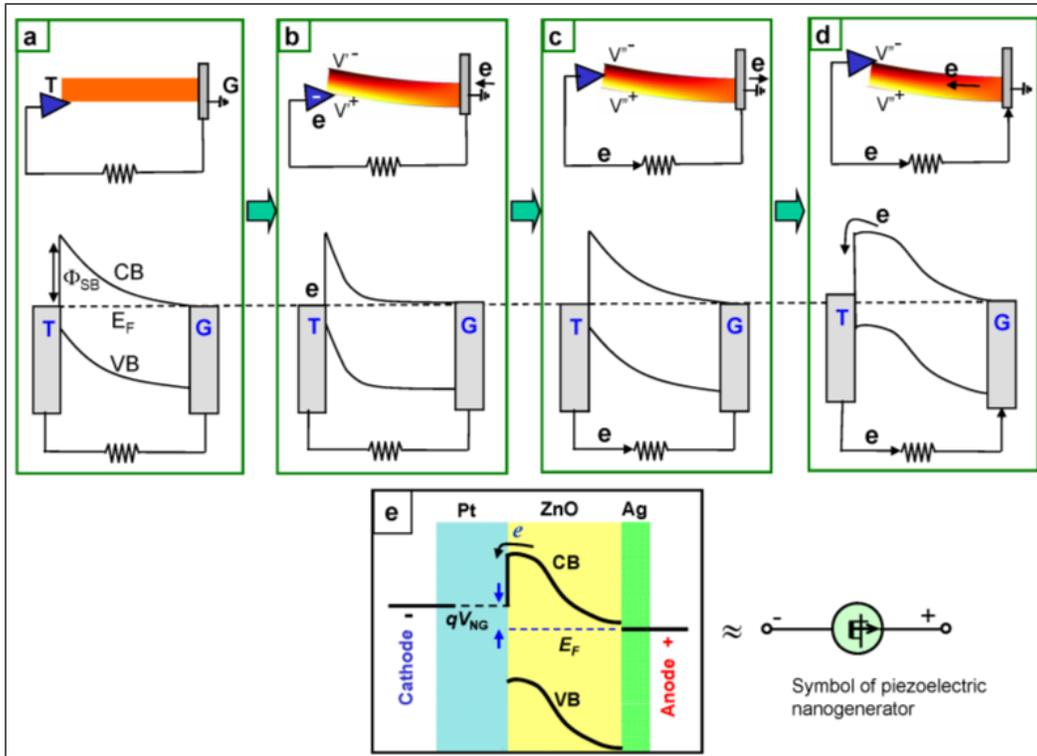
جرى التقاط الصور الطبوغرافية مباشرة سواء من الطرف المستدق للمجهر أعلى الحزام أم لم يمر، إذ إن ذلك يمثل القوة النازمة المستلمة بواسطة الذراع. وعندما يدفع الطرف المستدق للمجهر السلك، ولكنه لم يمر أعلاه أو عبره، وذلك من خلال الحكم على إشارة الخرج المستوي في الصورة الطبوغرافية (الشكل b5.4)، لم يتولد أي توتر خرج، مع الإشارة إلى أن الجانب المشدود لم يحدث أي حالة تفريغ كهروضغطي. مرة واحدة فقط من الطرف المستدق للمجهر أعلى الحزام، وكان بوضع تماس مع الجانب المضغوط، وهذا ما تشير إليه الذروة الموجودة في الصورة الطبوغرافية، إذ لوحظ وجود ذروة حادة لتوتر الخرج (الشكل c5.4). ومن خلال تحليل أماكن توضع الذرى (القمم) المكتشفة في الصورة الطبوغرافية وصورة توتر الخرج، لاحظنا أن التفريغ يحدث بعد أن يُنهى تقريباً الطرف المستدق للمجهر عبوره للسلك. وهذا ما يشير بوضوح إلى أن الجانب المضغوط كان المسؤول عن إحداث توتر سالب للتفريغ الكهروضغطي.

4.1.4. مبدأ المولد النانوي للمواد من النمط n (n-type)

سنقوم الآن بدراسة طبيعة الكمون الكهروضغطي، إذ يتولد الكمون الكهروضغطي من خلال استقطاب الأيونات داخل البلورة بدلاً عن الشحنات حرة الحركة. ولما كانت الشحنات المرتبطة بالأيونات غير مرنة وملتصقة بالذرات، فإنها لا تستطيع الحركة بحرية. ويمكن للحوامل الحرة داخل السلك النانوي نصف الناقل أن تحجب الشحنات الكهروضغطية، ولكنها لا تستطيع أن تلغي هذه الشحنات بشكل كامل أو تستنزفها. وإذا أخذ حاجز شوتكي عند السطح البيني بالحسبان، فإن الإلكترونات الحرة لا تستطيع أن تعبر الحد بين المعدن وأكسيد الزنك. وهكذا، على الأرجح أن تتشكل طبقةً لثنائي قطب بين الإلكترونات المجتمعة في الجانب المعدني والشحنات الكهروضغطية في جانب أكسيد الزنك. وهذا هو الفارق الواضح عن الوصلة الثنائية p-n في فيزياء أنصاف النواقل. لهذا، لا يزال الكمون الكهروضغطي محفوظاً على الرغم من إمكانية انخفاض مقدار هذا الكمون بسبب تمتع السلك النانوي بموصلية محدودة.

يتمتع السلك النانوي المعدن من أكسيد الزنك بالنمط n (n-type) بشكل عام. ويؤدي توافر كل من الفراغات الأكسجينية والإشابات وجزء كبير من الذرات السطحية (الحالات السطحية) داخل السلك النانوي، يؤدي إلى تمتع الأخير بموصلية معتدلة. ويمكن لهذه الحوامل الحرة أن تحجب جزئياً الشحنات الكهروضغطية، ولكنها لا تستطيع تعديل هذه الشحنات بشكل كامل. لذلك، يبقى الكمون الكهروضغطي مُحْتَفَظاً به، ولكن مقداره منخفض حتى مع الأخذ بالحسبان تمتع أكسيد الزنك بموصلية معتدلة.

سنقوم الآن بعرض لفهم عملية تحرير الشحنة للمولد النانوي المنشأ وفقاً للنموذج البنيوي الحزمي (على شكل أحزمة). يتمتع الطرف المستدق (T) لمجهر القوة الذرية AFM بتماس شوتكي مع السلك النانوي (يساوي ارتفاع الحاجز المقدار ϕ_{SB})، بينما يتمتع السلك النانوي بتماس أومي مع الجانب الأرضي (G) (الشكل a6.4). فعندما يدفع الطرف المستدق للمجهر، وبشكل بطيء، السلك النانوي، فإن كموناً كهروضغطياً موجباً V^+ سوف يتولد عند السطح المشدود لهذا السلك. ولما كانت هذه الأطراف المستدقة سوف تستمر بدفع السلك النانوي، فإن الإلكترونات لن تستطيع أن تعبر السطح البيني للطرف المستدق مع السلك النانوي بسبب وجود انحياز عكسي لحاجز شوتكي عند منطقة التماس (الشكل b6.4). وفي مثل هذه الحالة، يمكن للشحنات الحرة المجتمعة عند الطرف المستدق أن تؤثر في توزيع الكمون الكهروضغطي داخل السلك النانوي مسببةً تأثير الحجب في حوامل الشحنة. يعود السبب في تولد الكمون الكهروضغطي إلى توافر الشحنات المتأينة غير المرنة ومعدومة الحركة داخل السلك النانوي، ولا يمكنها أن تُستنفد كلياً بواسطة الحوامل الحرة. ويؤدي الكمون الموضعي V^+ الناشئ مجدداً إلى انخفاض قليل في نطاق التوصيل (CB).



الشكل 6.4: مخطط التوصيل بغية فهم خرج الشحنات والعمليات الجارية داخل السلك النانوي. (a) المخطط التمثيلي والرسم البياني لطاقة سلك نانوي إحدى نهايتيه مؤرضة (G) والنهائية الأخرى مدفوعة بواسطة الطرف المستدق الموصل (T) لمجهر القوة الذرية AFM. يتوافر حاجز شونكي عند السطح البيئي للطرف المستدق للمجهر مع السلك النانوي. (b) حال البدء بتطبيق الانحناء البطيء، يغير الكمون الكهروضغطي غير المتناظر داخل السلك النانوي من شكل منطقة التوصيل (CB). ويتولد الكمون الكهروضغطي الموضعي الموجب في منطقة التماس داخل التدفق البطيء للإلكترونات من الأرض عبر الحمل إلى الطرف المستدق للمجهر. وسوف تتجمع هذه الإلكترونات داخل هذا الطرف المستدق. (c) عندما يقوم الطرف المستدق للمجهر بالمسح عبر السلك النانوي ويصل إلى نقطة المنتصف لهذا السلك، يحدث هبوط في الكمون الموضعي ليصل إلى الصفر، مما يُسفر عن حدوث تدفق عكسي للإلكترونات المتراكمة عبر الحمل لتصل إلى الأرض. (d) عندما يصل الطرف المستدق للمجهر إلى السطح المضغوط، يرفع الكمون الكهروضغطي السالب الموضعي القطاع الجانبي من منطقة التوصيل. وإذا كان مقدار الكمون الكهروضغطي كبيراً كفاية، يمكن للإلكترونات، الموجودة داخل السلك النانوي لأكسيد الزنك من النمط n، يمكن لها أن تنساب إلى الطرف المستدق للمجهر. (e) مخطط منطقة الطاقة للمولد النانوي، حيث يوضح هذا المخطط كلاً من توتر الخرج والدور الذي يؤديه الكمون الكهروضغطي. ويعد المخطط، الموجود في الجانب الأيمن، مثلاً (رمزاً) جرى تصميمه بغية تمثيل المولد النانوي الكهروضغطي.

عندما يقوم الطرف المستدق للمجهر بالمسح، وهو في وضع التماس، عبر السلك النانوي، ويصل إلى نقطة المنتصف لهذا السلك (انظر الشكل 6.4c)، يكون الكمون الكهروضغطي الموضعي مساوياً للصفر. وفي مثل هذه الحالة، ومع توافر هبوط مفاجئ في الكمون الموضعي، فإن الإلكترونات الأصلية المتراكمة داخل الطرف المستدق، سوف تتدفق بشكل معاكس عبر الحمل إلى الأرض. وتعد هذه العملية أسرع من عملية تراكم الشحنات الموضحة في (الشكل 6.4b). وتكمن الحالة البديلة، التي تبدي النتيجة نفسها، في الابتعاد المؤقت للطرف المستدق عن السلك النانوي، الذي يقود أيضاً إلى حدوث تدفق عكسي للإلكترونات المتراكمة إلى الأرض.

عندما يصل الطرف المستدق إلى الجانب المضغوط للسلك النانوي (الشكل 6.4d)، يهبط الكمون الموضعي إلى المقدار V^- (السالب)، مما يسبب ارتفاعاً كبيراً في منطقة التوصيل بالقرب من هذا الطرف. وإذا كان الارتفاع في طاقة الكمون الموضعي كبيراً إلى حدٍ كافٍ. وكما هو محدد من خلال درجة انحناء السلك النانوي، فإن الحوامل المتراكمة موضعياً من النمط (n-type)

n داخل السلك النانوي، يمكن أن تتساقب بسرعة عبر منطقة التماس إلى الطرف المستدق، مما يسبب تدفقاً دائرياً للإلكترونات داخل الدارة الخارجية، ومولداً بالتالي التيار. وتعد هذه العملية أسرع بقليل من عملية تراكم الشحنات. وهكذا، يكون الكمون المولد، والعابر عند الحمل الخارجي، يكون كبيراً إلى حدٍ كافٍ، بحيث يمكن كشفه بعيداً عن مستوى الضجيج. بعد وجود الصمام الثنائي (الديود) لشوتكي، عند السطح البيئي للطرف المستدق مع السلك النانوي، يعد ضرورياً للمولد النانوي، والذي يعمل "كبوابة" بغية إحداث تفريغ للشحنات وتراكمها ببطء، ومن ثم التفريغ السريع لهذه الشحنات. يسبب فقد "البوابة" في حالة التماس الأومي عدم حدوث أي تراكم للشحنات أو تفريغها، وبالتالي لن يجرى استقبال أية إشارة قابلة للكشف. يكمن السؤال التالي في تحديد ما هو مقدار كبير توتر الخرج؟ إذ يمكن الإجابة عن هذا السؤال من خلال مخطط منطقة الطاقة الموضح في (الشكل 6.4e)، وذلك فيما يتعلق بالمولد النانوي. ويكمن الدور الذي يؤديه الكمون الكهروضغطي، في دفع الإلكترونات من داخل السلك النانوي لأكسيد الزنك لتتجاوز عتبة الطاقة عند السطح البيئي للمعدن مع أكسيد الزنك، ولتصل إلى داخل إلكترود البلاتين، ولكن لن يحدد هذا الكمون مقدار توتر الخرج بشكل مباشر. وكلما ازداد عدد الإلكترونات، التي يجرى ضخها إلى داخل إلكترود البلاتين، كَبُر سطح فيرمي الموضعي. وبالتالي، يساوي توتر الخرج مقدار الفرق بين طاقات فيرمي لالكتروود البلاتين ومثيلاتها لالكتروود الفضة السفلي.

لا بد من الإشارة إلى أنه على الرغم من أن كمية الشحنات المتولدة بواسطة سلك نانوي مفرد، هي كمية صغيرة نحو (1000-~) $10000e$ ، إلا أن التفريغ السريع لهذه الإلكترونات يمكن أن يُولّد نبضة لتيار/أو توتر كهربائي، بحيث تكون هذه النبضة كبيرة وقابلة للقياس بشكل ملحوظ، ذلك لأن:

$$V_L \approx R_L \cdot Q / \Delta t$$

حيث Δt : الفترة الزمنية لعملية تفريغ الشحنات. أما فيما يتعلق بالحساب التقليدي لتوتر الخرج من خلال السعة C للأسلاك النانوية والنظام، $V = Q / C$ ، فيمكن تطبيقه في حالة السكون فقط. وسيكون مقدار التوتر المتوقع من خلال إجراء هذا الحساب أقل بكثير من مقدار نبضة التوتر المشاهدة تجريبياً.

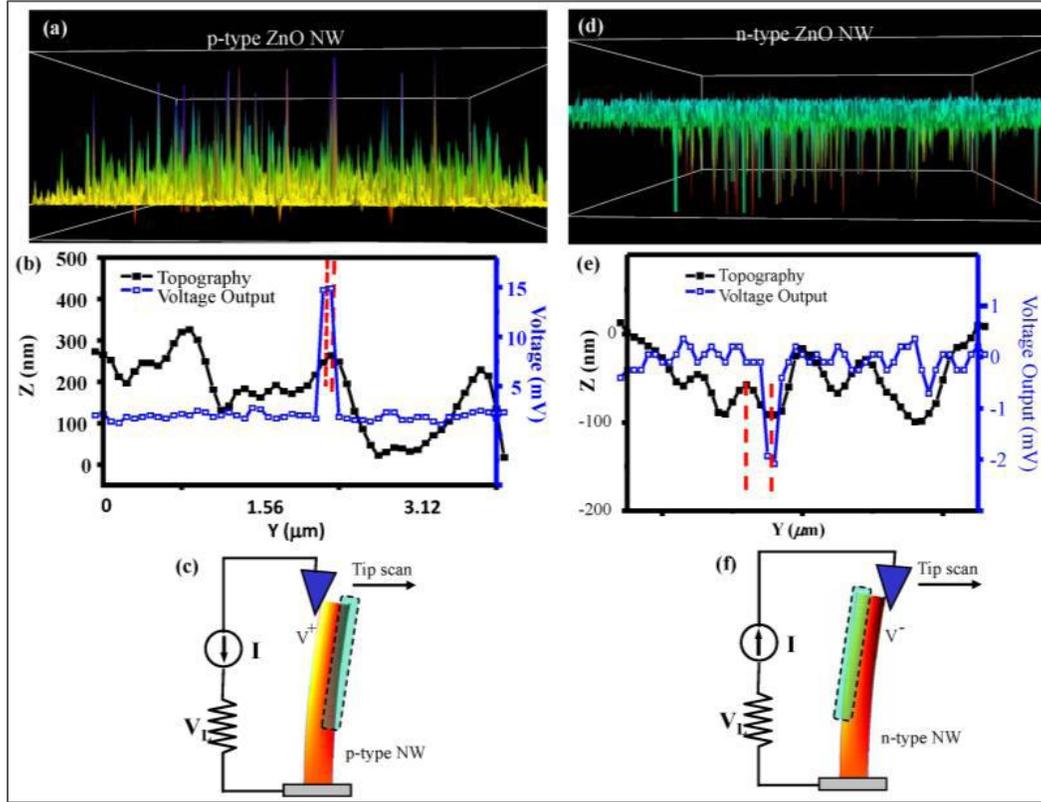
يمكن تلخيص عمليات تدفق الشحنات المعروضة في (الشكل 6.4) على الشكل التالي: تكمن العملية الأولى في التدفق الأمامي والعكسي للإلكترونات عبر الحمل من الأرض إلى الطرف المستدق للمجهر، بينما تكمن العملية الثانية في قيام الكمون الكهروضغطي بدفع التدفق الدائري للإلكترونات عبر السلك النانوي. تُولّد كلتا العمليتين التيارات البناءة، التي تتساقب بالاتجاه نفسه مسببة إحداث توتر سالب على الحمل في إشارة إلى الالكتروود المؤرض. وتعد هذه خاصية هامة. يمكن أن يتمتع تيار الخرج بقيمة عالية بشكل ملحوظ إذا كانت عملية تفريغ الشحنات سريعة. وفي حال وجد تماس للطرف المستدق لمجهر القوة الذرية، فإن العملية الثانية هي الغالبة. يمكن تلخيص كامل عمليات توليد الطاقة في جملة واحدة: إن قيام الكمون الكهروضغطي بدفع التدفق للإلكترونات الخارجية هو الذي يحدد استطاعة الخرج للمولد النانوي.

4.2. المولد النانوي للمواد من النمط (p-type) p

4.2.1. ميزات إشارات الخرج

من المعروف أن أسلاك أكسيد الزنك النانوية، التي يجرى إنمائها هي أسلاك من النمط n (n-type). ويعطي الخرج الكهروضغطي، المقاس باستخدام مجهر القوة الذرية، يعطي عادة الكمون السالب للخرج، ويرصد هذا الكمون عندما يلمس الطرف المستدق للمجهر الجانب المضغوط من السلك النانوي. تمكناً مؤخراً من قياس الكهرباء المولدة من أسلاك أكسيد الزنك النانوية لأكسيد الزنك من النمط P . ويوضح (الشكلان 7.4a, b) نتائج هذا القياس [8]. وبمقارنة هذه النتائج مع مثيلاتها لأسلاك أكسيد الزنك النانوية من النمط n (n-type)، نلاحظ أن توتر الخرج عند الحمل الخارجي يكون دائماً موجباً في إشارة إلى جذر السلك النانوي

المؤرّض. وبغية التأكد من هذه النتيجة، استخدمنا الطرف المستدق نفسه لمجهر القوة الذرية وفي ظروف تجريبية متماثلة والفترة الزمنية نفسها تقريباً، قمنا بقياس الكهرباء المولدة من أسلاك أكسيد الزنك النانوية من النمط n (n-type)، وبين (الشكل 7.4، d، e) نتائج هذا القياس، حيث يظهر بوضوح التوتر السالب للخروج. والأكثر أهمية، وبالإشارة إلى الصورة المورفولوجية (التشكيلية) للسلك النانوي، تحدث الذروة لتوتر الخرج في النصف الأول من منطقة التماس بين الطرف المستدق للمجهر والسلك النانوي، وذلك عندما يكون هذا السلك النانوي من النمط p (p-type) (الشكل 7.4، b)، بينما تحدث هذه الذروة في النصف الأخير من منطقة التماس بين الطرف المستدق للمجهر والسلك النانوي، وذلك عندما يكون هذا السلك من النمط n (n-type) (الشكل 7.4، f). ويتعلق هذا الفارق المميز بآلية عمل المولد النانوي بشكل مباشر.



الشكل 7.4: مقارنة بين المولدات النانوية المبنية على أسلاك أكسيد الزنك النانوية من النمط n ومثيلاتها من النمط p. (a) مظهر جانبي ثلاثي الأبعاد لتوتر الخرج عبر مصفوفة سلك نانوي لأكسيد الزنك من النمط n عندما كان الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية يقوم بالمسح للكهرباء المولدة وهو في وضع التماس. (b) مقارنة متماثلة بين كل من المسح الطبوغرافي ومسح توتر الخرج، حيث يظهر هذا المسح أن التوتر السالب للخروج يتولد عندما يصل الطرف المستدق للمجهر إلى الجانب المضغوط من السلك النانوي. (c) آلية عمل المولد النانوي المعد من سلك نانوي من النمط n (n-type). (d) مظهر جانبي ثلاثي الأبعاد لتوتر الخرج عبر مصفوفة سلك نانوي لأكسيد الزنك من النمط p عندما كان الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية يقوم بالمسح للكهرباء المولدة وهو في وضع التماس. (e) مقارنة متماثلة بين كل من المسح الطبوغرافي ومسح توتر الخرج، حيث يظهر المسح أن التوتر السالب للخروج يتولد عندما يصل الطرف المستدق للمجهر إلى الجانب المشدود من السلك النانوي. (f) آلية عمل المولد النانوي المعد من سلك نانوي من النمط p (p-type).

أما بالنسبة للأسلاك النانوية من النمط p، فإن مستوى فيرمي يتوضع أقرب ما يكون إلى حافة منطقة التكافؤ. ويكون المعدن – نصف الناقل منحازاً باتجاه أمامي إذا تمتع نصف الناقل بكمون أعلى، وإلا فإن الوصلة ستتحاز بالاتجاه المعاكس. وعندما يكون الطرف في وضع التماس مع السلك النانوي، وكما هو موضح في (الشكل 7.4، c)، فإن الشحنات الكهروضغية السالبة، المتولدة

عند الجانب المضغوط للسلك النانوي، ستكون محجوبة جزئياً بواسطة الثقوب المشحونة إيجابياً. ولدى تجاوز الكمون الكهروضغطي الموجب عند الجانب المشدود تلك القيمة، التي تستطيع دفع الحوامل من النمط p، أو الإلكترونات داخل الطرف المعدني، عبر الوصلة، فإن توتراً موجباً للخارج سوف يُلاحظ على الحمل الخارجي. وتحدث هذه الظاهرة في النصف الأول من منطقة التماس الواقعة بين الطرف المعدني والسلك النانوي.

أما بالنسبة للأسلاك النانوية من النمط n، يكون المعدن نصف الناقل منحازاً باتجاه أمامي إذا تمتع المعدن بكمون أعلى، وإلا فإن الوصلة ستتحاز بالاتجاه المعاكس. وعندما يكون الطرف في وضع التماس مع السلك النانوي، وكما هو موضح في (الشكل 7.4)، فإن الشحنات الكهروضغطية الموجبة عند الجانب الممتد من السلك النانوي، ستكون محجوبة جزئياً بالإلكترونات. ينشأ فرق كمون بين الطرف والسلك النانوي لمرة واحدة عندما يكون الطرف في وضع التماس مع الجانب المضغوط للسلك النانوي، والذي يتمتع بكمون كهروضغطي سالب. ويقوم الكمون الكهروضغطي عند الجانب المضغوط بدفع الإلكترونات لتتساب عبر الوصلة مسببة توتراً سالباً على الحمل الخارجي. وتحدث هذه الظاهرة في النصف الأخير من منطقة التماس الواقعة بين الطرف المعدني والسلك النانوي.

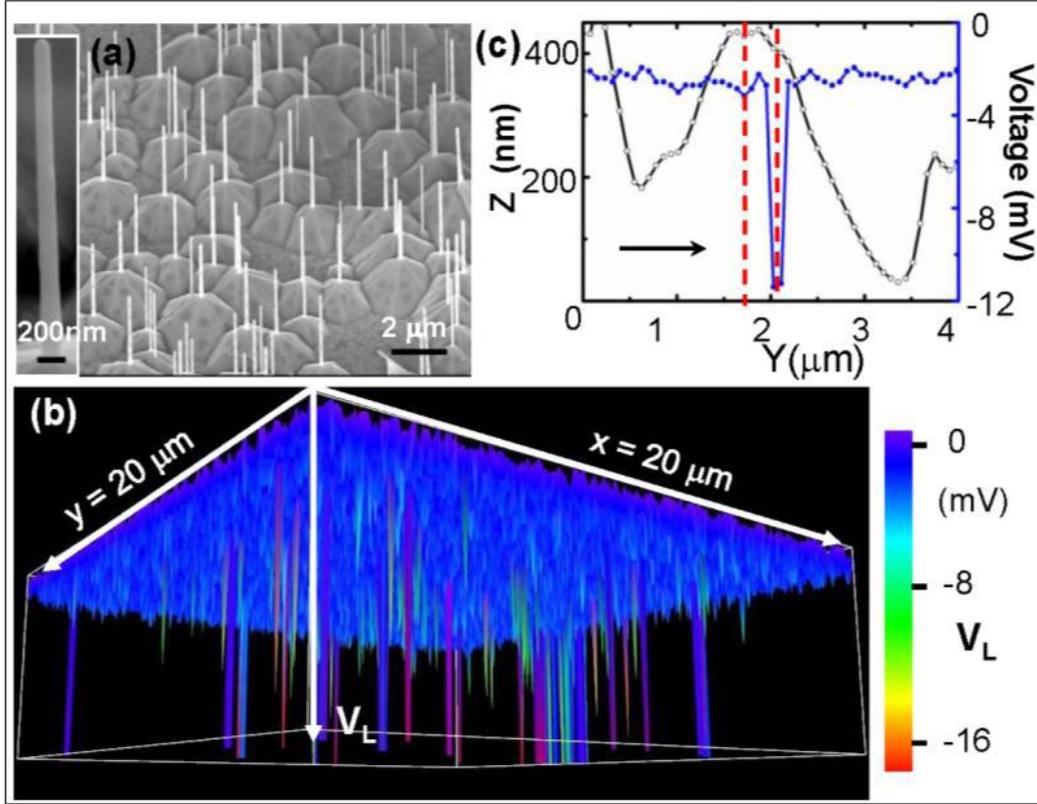
4.2.2. المعيار للتمييز بين أسلاك نانوية من النمط n- ومن النمط p-

يجرى تحديد الناقلية لعينات، ولكل من النمط n والنمط p لأغشية رقيقة (أفلام) من أكسيد الزنك، باستخدام الطريقتين التاليتين: إجراء قياسات لكل من أثر هول Hall وأثر سيبيك Seebeck، التي تعد تقنيات راسخة ومناسبة لكونها سهلة بغية تصنيع إلكترونيات للأفلام الرقيقة. وعلى كل حال، ونظراً لأن الأبعاد منخفضة، فإنه من الصعب إجراء مثل هذه القياسات لأسلاك أكسيد الزنك النانوية. وحتى تاريخه لا يزال القياس المتقل لسلك نانوي مفرد، المبني على ترانزستور الأثر الحقلي (FET)، لا يزال يُطبق بغية تحديد نوع الحامل لأسلاك أكسيد الزنك النانوية. ويطبق ترانزستور الأثر الحقلي بشكل واسع بغية دراسة الخواص الإلكترونية لسلك نانوي نصف ناقل مفرد.

اقترحنا معياراً جديداً بغية تمييز نوع الحامل لأسلاك أكسيد الزنك النانوية المستقلة مستندياً إلى الخرج الكهروضغطي للسلك النانوي، عندما يكون هذا الأخير مشوهاً ميكانيكياً من خلال وصل الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية وهو في وضع التماس [9]. وتبدي النواة/القشرة للأسلاك النانوية من النمط n / النمط p، تبدي خروجاً كهروضغطية موجبة، بينما تنتج الأسلاك النانوية من النمط n خروجاً كهروضغطياً سالباً. ومن الأهمية بمكان أن هذه النتائج قابلة للتكرار وموثوقة لثلاث مجموعات من العينات. هذه النتيجة، وبالاشتراك مع النتائج السابقة المستنبطة أسلاك أكسيد الزنك النانوية من النمط n والمشاباة فوسفورياً، تؤسس بالتأكيد لتقنية بسيطة هدفها الكشف السريع عن نوع الناقلية لأسلاك أكسيد الزنك النانوية دون إحداث أي ضرر في العينة.

نُسجت (أو وُلّفت) أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراسة شاقولياً من النمط n على ركازة من السيلكون باستخدام طريقة التوضيع بالليزر النبضي (PLD). وسيجرى سرد عملية التوليف هذه بالتفصيل لاحقاً وبشكل منظم. جرى ترسيب طبقة قشرية من النمط p المشاباة بالنتروجين باستخدام طريقة البلازما - الترسيب بالبخار الكيميائي الحيوي المعدني الحر (Plasma-Free MOCVD)، وذلك باستخدام ديثيل الزنك مصدراً للزنك ومزيج من الأكسجين O₂ (13 sccm) وأكسيد الآزوت NO (13 sccm) مصدر إشابة لكل من الأكسجين والآزوت. وثُبّتت درجة حرارة الإنماء عند الدرجة 400°C وثخانة الترسيب تساوي 300-400 nm. يظهر (الشكل a8.4) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لمصفوفة أسلاك نانوية نمطاً بواسطة التوضيع بالليزر النبضي (PLD) والصورة المكبرة لسلك نانوي مفرد. تتمتع الأسلاك النانوية المولّفة بهذا الشكل بأقطار نموذجية تتراوح بين (100-150 nm). ويبين (الشكل b8.4) صورة لتوتر الخرج المناسب ثلاثي الأبعاد 3D، وذلك بعد إجراء المسح لمساحة (20 µm × 20 µm) من أعلى مصفوفة سلك نانوي

من أكسيد الزنك ذي النمط n . وتولد أسلاك أكسيد الزنك النانوية من النمط n ، تُؤدّ خروجات توتر سالب عندما يجرى حينها بالطرف المستدق المغطى بالبلاطين لمجهر القوة الذرية. ويبين (الشكل 8.4c) مظهراً جانبياً نموذجياً لتوتر الخرج، كاشفاً أن التوترات السالبة تتولد عندما يلمس الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية الجانب المضغوط من الأسلاك النانوية، وذلك كما أشير إليها من خلال التأخير الحاصل في ذروة التوتر بالنسبة للذروة في المظهر الجانبي المورفولوجي (التشكلي). ويعد هذا التأخير حالة خاصة فريدة للسلك النانوي من أكسيد الزنك ذي النمط n .



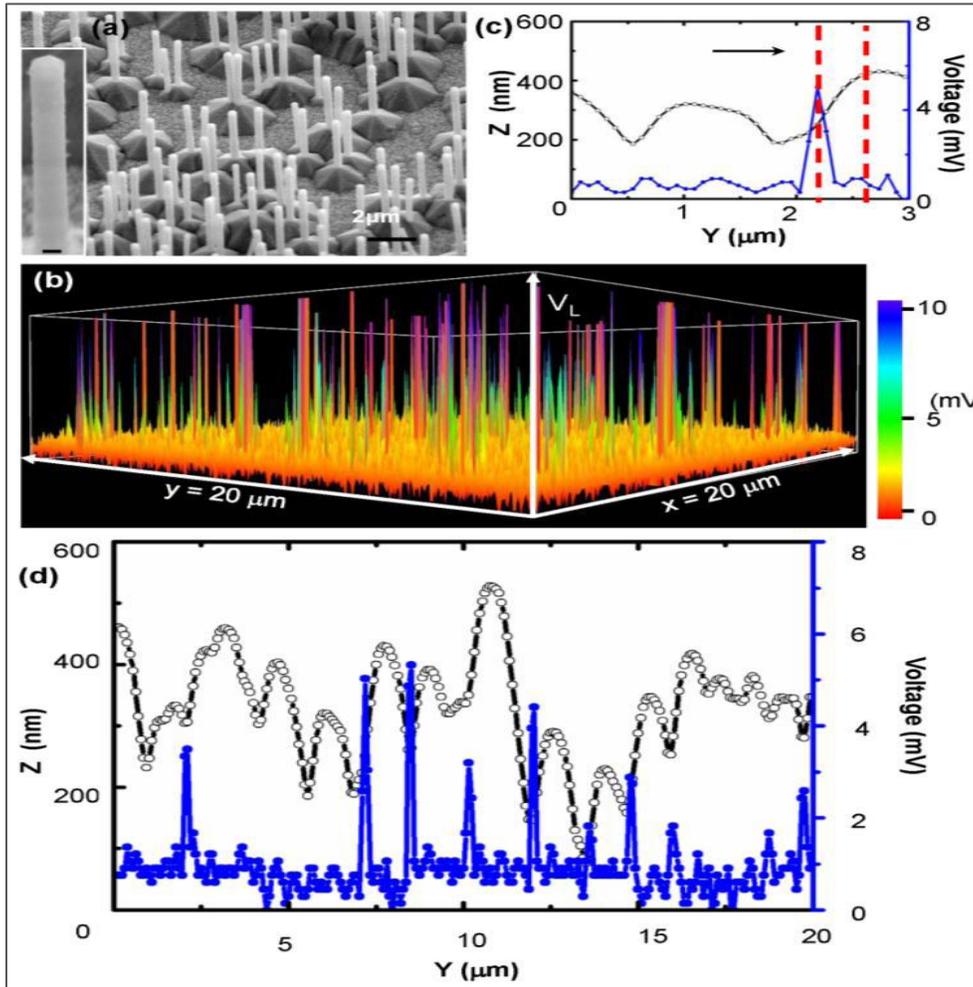
الشكل 8.4: (a) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM لمصفوفة أسلاك أكسيد الزنك النانوية جرى توليفها (نسجها) باستخدام التوضيع بالليزر النبضي. توضح الصورة المكبرة سلكاً نانويًا مفرداً قطره تقريباً (150 nm). (b) مخطط ثلاثي الأبعاد لتوتر الخرج لأسلاك أكسيد الزنك النانوية مؤلفة من النمط n . (c) مظهر جانبي من طوبوغرافية مجهر القوة الذرية AFM، جرى مسحه على شكل خط نموذجي (اللون الأسود) وتوتر الخرج الموافق له (اللون الأزرق).

أما في المرحلة الثانية، ومن خلال استخدام مصفوفة سلك نانوي كقالب، حيث نمت هذه المصفوفة بطريقة التوضيع بالليزر النبضي (PLD)، فإن الطبقة الرقيقة (300-400 nm)، المعدة من أكسيد الزنك ذي النمط P المشاب بالآزوت N ، قد جرى توضيعها بانتظام على سطح مصفوفة السلك النانوي باستخدام طريقة Plasma-Free MOCVD²² أنفة الذكر. أما بالنسبة للخواص الإلكترونية للفيلم من النمط P المنمى على ركازة من الزجاج، الذي جرى إنماؤه تماماً في الظروف نفسها، التي نمت فيها الطبقة القشرية من النمط P ، التي جرى القياسات وفقاً لأثر هول Hall.

يبين (الشكل 9.4a) صورة التقطت بالمجهر الإلكتروني لأسلاك نانوية بعد توضيع طبقة من النمط P . وتتمتع الأسلاك النانوية ذات النواة/أو القشرة من النمط p أقطارها تصل تقريباً إلى 400 nm كما هو موضح في (الشكل 9.4a). أما بالنسبة للأسلاك النانوية ذات النواة/أو القشرة ذات النمط n/p التي تتمتع بكل من الشكل المنتظم وقطر أكبر بكثير مقارنة مع تلك الأسلاك النانوية المؤلفة، تظهر أن الطبقة ذات النمط n . قد نمت بنجاح وبشكل منضد على الأسلاك النانوية ذات النمط n (لقد جرى تأكيد ذلك

بواسطة نموذج الانعراج الإلكتروني، الذي لم يظهر هنا).

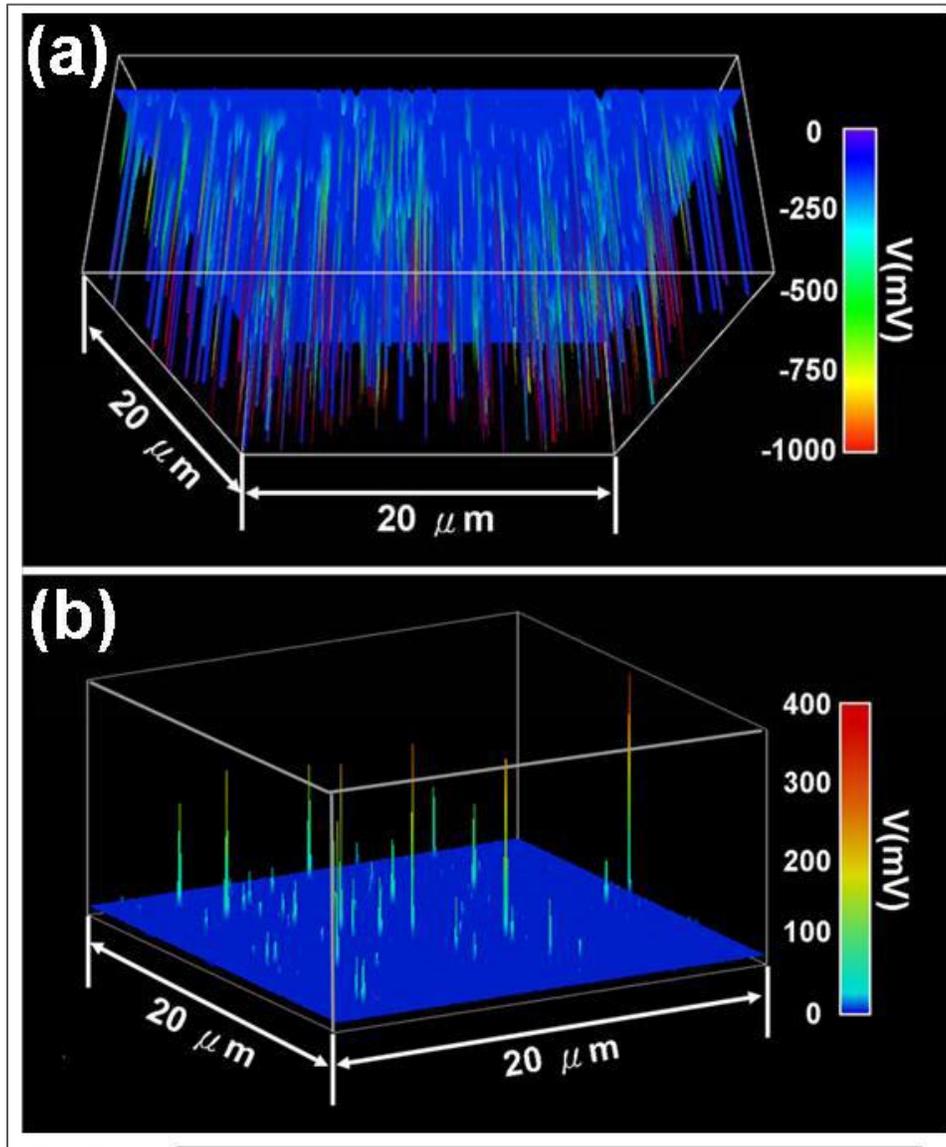
وبعد إجراء المسح لمساحة قدرها $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ من أعلى البنيات لأكسيد الزنك ذات النواة/القشرة من النمط n/p، وفقاً لنمط التماس باستخدام مجهر القوة الذرية، فإن (الشكل 9.4b) يظهر صورة لخرج ثلاثي الأبعاد، الذي جرى توليده. تولد الأسلاك النانوية ذات النواة/القشرة من النمط n/p مخرجات موجبة عبر كامل مجال المسح. ويظهر التحليل التفصيلي أن ذروة التوتر تتقدم على الذروة في الصورة التشكيلية بالنسبة لاتجاه المسح من قبل طرف المجهر. وذلك كما هو موضح في (الشكل 9.4c). ويعطي (الشكل 9.4d) دلالات أكثر، التي تكمن في أن جميع ذروات التوتر الموجب يجري توليدها عندما تلامس أطراف مجهر القوة الذرية الممتد للأسلاك النانوية الموافقة لذلك. ولقد وجد أن فوارق الاستجابة الكهروضغطية بين الأسلاك النانوية ذات النواة/القشرة من النمط n/p ومثيلاتها من النمط n يمكن تكرار ظهورها كلما طالقت الفترة الزمنية.

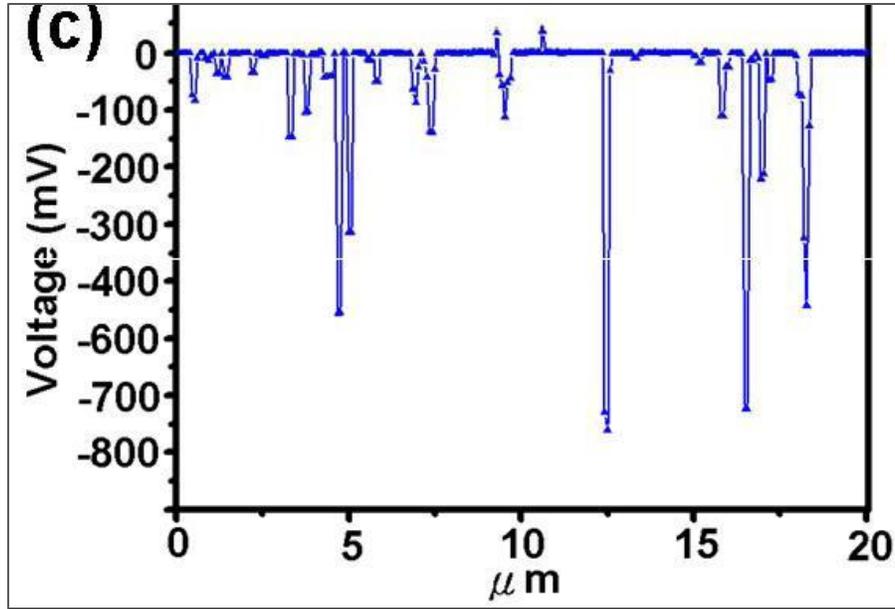


الشكل 9.4: (a) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM لمصفوفات أسلاك أكسيد الزنك النانوية وذات النواة/القشرة من النمط n/p. يظهر الشكل المكبر سلكاً نانوياً مفرداً قطره يساوي تقريباً (400nm). (b) مجموعة ثلاثية الأبعاد لتوترات خرج أسلاك أكسيد الزنك النانوية ذات النواة / القشرة من النمط n/p. (c) مظهر جانبي من طبوغرافية مجهر القوة الذرية جرى مسحه على شكل خط نمذجي (اللون الأسود). وصورة لتوتر الخرج الموافق له (اللون الأزرق). (d) مظهر جانبي من طبوغرافية مجهر القوة الذرية جرى مسحه على شكل خط ثخائته $20 \mu\text{m}$ (اللون الأسود) وصورة لتوتر الخرج الموافق له (اللون الأزرق): جرى توليد ذُرا (قمم) التوتر عند حدوث تماس بين الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية والجانب المشدود من الأسلاك النانوية.

4.3. المولد النانوي المبني على أنواع أخرى من الأسلاك النانوية المتمتعة ببنية فورتزيت (Wurtzite)

إضافةً إلى أكسيد الزنك، فإن الأسلاك النانوية، المعدة من كل من نتريد الغاليوم [10]GaN ونتريد الإنديوم [11]InN، وكبريت الكاديوم [12]GdS، وجميعها من عائلة فورتزيت، جرى استخدامها لتوليد الكهرباء. وبعد الخرج الناتج عن كل من نتريد الغاليوم GaN ونتريد الإنديوم InN، مشجعاً بشكل خاص: يمكن أن يعطي سلك نانوي مفرد توتراً مقداره تقريباً 1V (الشكل 10.4). وتعد الآلية لعملية خرج الشحنة في هذه الحالة مشابهة تماماً لمثيلتها الناتجة عن أكسيد الزنك. ونتوقع الحصول على خرج عالي القيم لمولد نانوي NG مصنع إذا استطعنا تحقيق نمو مصفوفات لأسلاك نانوية من نتريد الغاليوم GaN متراسة شاقولياً وعالية الجودة.





الشكل 10.4: قياس بمجهر القوة الذرية AFM لخرج كهروضغطي مُولّد من أسلاك نتريد الإندسيوم InN النانوية المنمّاة. مجموعات ثلاثية الأبعاد ومجموعة مسح خطي لإشارة خرج تبين أن توتر الخرج يمكن أن يصل إلى المقدار (1 V~).

4.4. مولد نانوي مبني على أسلاك نانوية مُحزّمة جانبياً

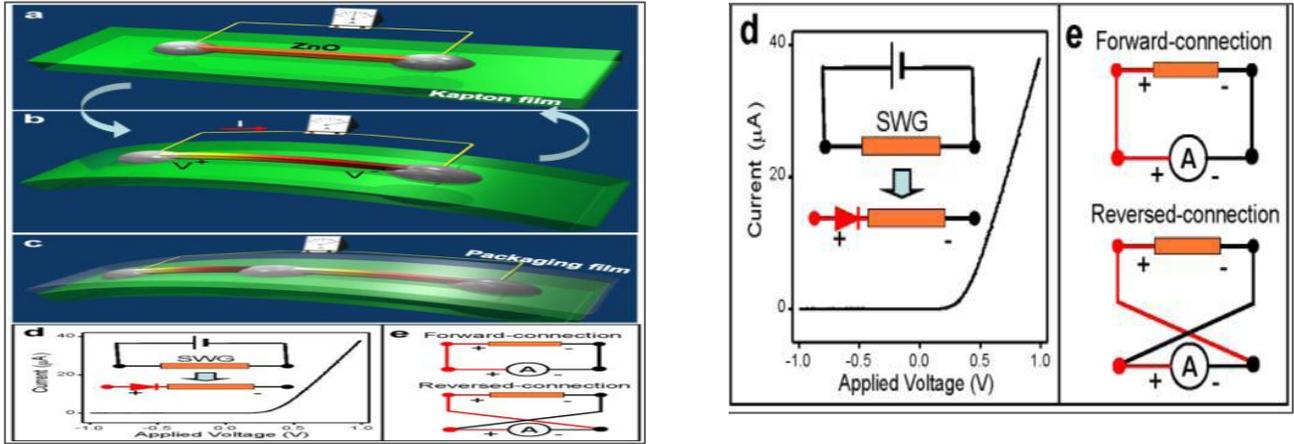
يُعرض في هذا المقطع مولد تيار متناوب AC مبني على الشد والإرخاء الدوري لسلك ناعم كهروضغطي (PFN) (أي سلك ميكروي وآخر نانوي)، والذي جرى وصله بشدة من نهايتيه بالإلكترونيات معدنية، بحيث يكون مُحزّماً جانبياً ومغلفاً على ركازة مرنة [13]. وإذا كان السلك الناعم الكهروضغطي مشدوداً كما لو أنه مقادراً من خلال انحناء الركازة، نشأ هبوط في مقدار الكمون الكهروضغطي على طول هذا السلك الناعم الكهروضغطي، وإذا تشكل حاجز شوتكي عند إحدى نهايتي التماس لهذا السلك الناعم الكهروضغطي، فإن هذا الحاجز يخدم "كبوابة" تمنع تدفق الإلكترونات في الدارة الخارجية عبر السلك الناعم الكهروضغطي، مما يُحافظ على الكمون الكهروضغطي. يؤدي السلك الناعم الكهروضغطي دور كلٍّ من "المكثف" و"مضخة الشحنات"، إذ يقود هذا السلك التدفق الأمامي والعكسي للإلكترونات في الدارة الخارجية بغية الحصول على كلٍّ من عملية الشحن والتفريغ، وذلك عندما يكون هذا السلك مشدوداً ومحزّماً بالترتيب. فإذا تكررت عملية الشد - تحرير لسلك ناعم كهروضغطي مفرد بانفعال مقداره 0.1-0.05%، تولد توتر لتيار متناوب، إذ يصل مقدار هذا التوتر إلى نحو 50 mV~.

يصل مردود تحويل الطاقة للسلك الناعم الكهروضغطي إلى 6.8%. ويكون الخرج قابلاً للقياس من خلال إجراء وصل تسلسلي لعدة مولدات تيار متناوب. يستعرض العمل الموثق تقانة إعداد سلك نانوي متين ولا ينزلق في مكان التماس وقابلاً للتغليب (أو التعبئة) داخل فيلم بوليميري بهدف تجميع طاقة ذات تردد منخفض ناتجة عن الاهتزاز أو تدفق الهواء/الرياح والانفعال (التشوه) الميكانيكي. وتعد مولدات التيار المتناوب المرنة مجدية وعملية بهدف زرعها داخل العضلات وتضمينها داخل الملابس وإنشائها في الطبقات السطحية ووضعها في بطانة الحذاء.

4.4.1. التصميم الأساس

صُنِع مولد من خلال توضع سلك ناعم كهروضغطي من أكسيد الزنك ZnOPFW على غشاء رقيق (فيلم) معد من بوليميد كابتون (Kapton polyimide) (الشكل 11.4(a) [13]). جرى توليف (نسج) أسلاك أكسيد الزنك الناعمة الكهروضغطية باستخدام طريقة ترسيب البخار فيزيائياً، وتمتّع هذه الأسلاك عادةً بأقطار تتراوح بين 3-5 μm وأطوال ما بين 200-300 μm. ولقد اخترنا

أسلاكاً ناعمة كهروضغطية طويلة لسهولة معالجتها، ويمكن للعملية نفسها أن تطبق على الأسلاك النانوية. طبقت لصاقه فضية على كلتا النهايتين للسلك الناعم كهروضغطي من أكسيد الزنك بغية تثبيت هاتين النهايتين بإحكام على ركازة مرنة. جرى توصيل مقياس التيار/توتر إلى نهايتي السلك الناعم كهروضغطي دون إدخال أي منبع طاقة خارجي في الدارة. وبغية قياس الطاقة الكهربائية المتولدة بواسطة سلك ناعم كهروضغطي من أكسيد الزنك عند تعرضه لتشوه ميكانيكي، طُبِق انحناء ميكانيكي دوري على الركازة باستخدام ذراع ميكانيكي يدار بمحرك. وكان نصف قطر الانحناء النهائي للركازة مساوياً تقريباً $\sim 2\text{cm}$ ، والذي يعد أكبر بكثير من طول السلك الناعم كهروضغطي. وإضافة لذلك، كانت ثخانة فيلم كابتون (Kapton film) أكبر بكثير من قطر السلك الناعم كهروضغطي. والنتيجة، أدى انحناء فيلم الركازة إلى توليد انفعال شد مقداره 0.1% داخل المنطقة المرتبطة بالسطح الخارجي للسلك الناعم كهروضغطي (الشكل 11.4 b). ونظراً لامتداد أكسيد الزنك بالخاصية كهروضغطية، جرى توليد حقل كموني كهروضغطي على طول السلك الناعم كهروضغطي، الذي قاد تدفق الإلكترونات داخل الدارة الخارجية (أو نقاط التوصيل). وعندما تعرضت الركازة للانحناء وإزالته بشكل دوري، خضع السلك الناعم كهروضغطي لشد وارتخاء بشكل دوري أيضاً، ونتج عن ذلك تيار متناوب. جرى دمج المولدات، المبنية على الأسلاك الناعمة كهروضغطة، بغية رفع توتر الخرج (الشكل 11.4 c). ولقد جرى تغليب كامل البنية داخل طبقة رقيقة من الشمع العازل أو البوليمير المرن بغية المحافظة على الاستقرار الفيزيائي لهذه البنية خلال تشوه الركازة (الشكل 11.4 c).



الشكل 11.4: تصميم مولد لسلك ناعم كهروضغطي PFW على ركازة مرنة. (a) يتوضع السلك الناعم كهروضغطي على ركازة من فيلم كابتون البوليميري، وثبتت نهايتيه بشكل محكم إلى كلٍّ من الركازة وروابط المخرج (مأخذ التيار). يمكن تغليف كامل السلك الناعم كهروضغطي والروابط بطبقة عازلة بوليميرية مرنة أو بالشمع المستخدم لأغراض التغليف (لم يظهر هنا للتوضيح). (b) يُؤلّد الانحناء الميكانيكي للركازة انفعال شد وما يوافقه من كمون كهروضغطي داخل السلك الناعم كهروضغطي، والذي يقوم بقيادة الإلكترونات عبر الحمل الخارجي. (c) تغليب المولدات المصنوعة من عدة أسلاك ناعمة، داخل فيلم بوليميري مرن ورفيق، مظهراً تكامله مع المواد الطرية بغية تحسين الاستقرار الميكانيكي والتأقلم مع الوسط المحيط. (d) خاصية التيار - جهد (I-V) لمولد سلك مفرد SWG، والذي يعد فعلاً بغية توليد استطاعة خرج، ويبيدي هذا المولد خاصية صمام شوتكي الثنائي (ديود) النموذجي، الذي يتمتع بتوتر لعتبة الانحياز الأمامي مقداره تقريباً $\sim 0.3\text{V}$. وتُعرّف في دراستنا هذه منطقة تماس نهاية السلك المفرد في المولد، التي تتمتع بسلك شوتكي، تُعرّف على أنها موجبة، في حين جرى إدخال رمز الصمام الثنائي (الديود) بغية تمثيل وجود هذا الصمام في السطح البيني (المخطط السفلي في الشكل). (e) التعريف بتجربة قطبية التبديل، التي جرى اعتمادها لإجراء جميع القياسات.

4.4.2. قياسات الخرج

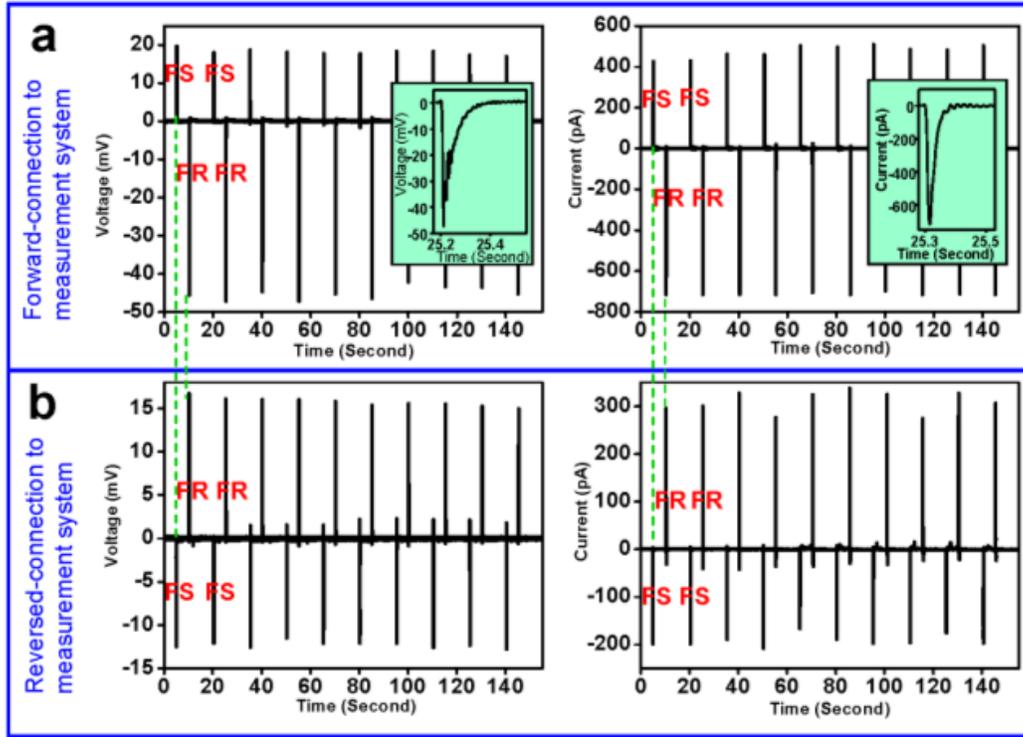
جرى توصيف خاصية النقل لمولد سلك مفرد SWG بغية فهم أدائه وإشارة خرجيه، وذلك قبل اختبار المولد لتوليد الكهرباء وبعد هذا الاختبار. فعندما كان المولد لسلك مفرد في وضع التشغيل وكان فعالاً في توليد استطاعة خرج، كانت خاصية التيار – جهد (I-V) تُظهر دائماً سلوك شوتكي. وتعد هذه الخاصية من أكثر الخواص جودة لمولد سلك مفرد من النوع الجيد. وبغية الإيضاح بدقة عن مكان وجود حاجز شوتكي في المخطط البياني، جرى إدخال رمز الصمام الثنائي (الديود) في الجانب الأيسر بغرض الإشارة، وفي إشارة إلى أن ذلك يشكل الدليل على أن إشارة الخرج قد جرى تحديدها. ويهدف متابعة المناقشة فيما بعد، قمنا بتحديد الجانب، الذي يتمتع بصمام شوتكي الثنائي، على أنه الجانب الموجب من مولد السلك المفرد.

أجري قياس كل من تيار دائرة القصر (I_{sc}) وتوتر الدارة المفتوحة (V_{oc}) بغية توصيف أداء المولد لسلك مفرد. وللتأكد من أن الإشارة المقاسة قد جرى توليدها من قبل مولد السلك المفرد عوضاً من أن تكون هذه الإشارة من منظومة القياس نفسها، جرى تطبيق اختبار "تبديل القطبية" (انظر الفصل الخامس)، على جميع القياسات التي أجريناها (الشكل 11.4 e). فعندما يكون جهاز قياس التيار موصلاً بشكل مباشر إلى مولد السلك المفرد، مما يعني أن المسابير الموجبة والسالبة للمقياس قد جرى وصلها إلى الالكترودات الموجبة والسالبة لمولد السلك المفرد بالترتيب، فإن النبضة الموجبة للتيار/الجهد، قد جرى الحصول عليها عند حدوث كل عملية شد سريع FS للركازة البوليمرية (الشكل 12.4 a)، بينما تولدت النبضة السالبة الموافقة عند حدوث التحرير السريع FR لهذه الركازة من الشد. ولقد قصدنا بكل من عملية الشد السريع ومثيلتها للتحرير، قصدنا بمعدل زاوية الانحناء للركازة، وكان مساوياً تقريباً $260^\circ/sec$ ، ونصف قطر الانحناء مساوياً 2 cm . ويعد زوج الذرا (القمم) الموجبة والسالبة عبارة عن تيار/وتوتر الخرج عند كل دورة شد سريع وتحرير سريع بالترتيب. وسيكون مقدار توتر الخرج مساوياً $50\text{-}20\text{ mv}$ ، وتيار الخرج بحدود $750\text{-}400\text{ PA}$ ، وذلك من أجل سلك ناعم كهروضغطي مفرد قطره يساوي $4\text{ }\mu\text{m}$ وطوله نحو $200\text{ }\mu\text{m}$. وعلى الرغم من أن ذرا (قمم) التيار، وعند الشد السريع والتحرير السريع، تظهر بشكل متباين فيما بينها، إلا أن هذا ممكن نظراً لاختلاف معدل الانفعال، وتبقى المساحات الموجودة تحت هذه الذرا نفسها (الجدول 1.4)، وغالباً ما يبقى مجموع الشحنات، التي جرى نقلها في كلتا العمليتين، يبقى نفسه (مع وجود فارق بنسبة 5%). وكان مجموع الالكترونات التي جرى نقلها من أجل كل عملية انفعال، مساوياً 10^8 .

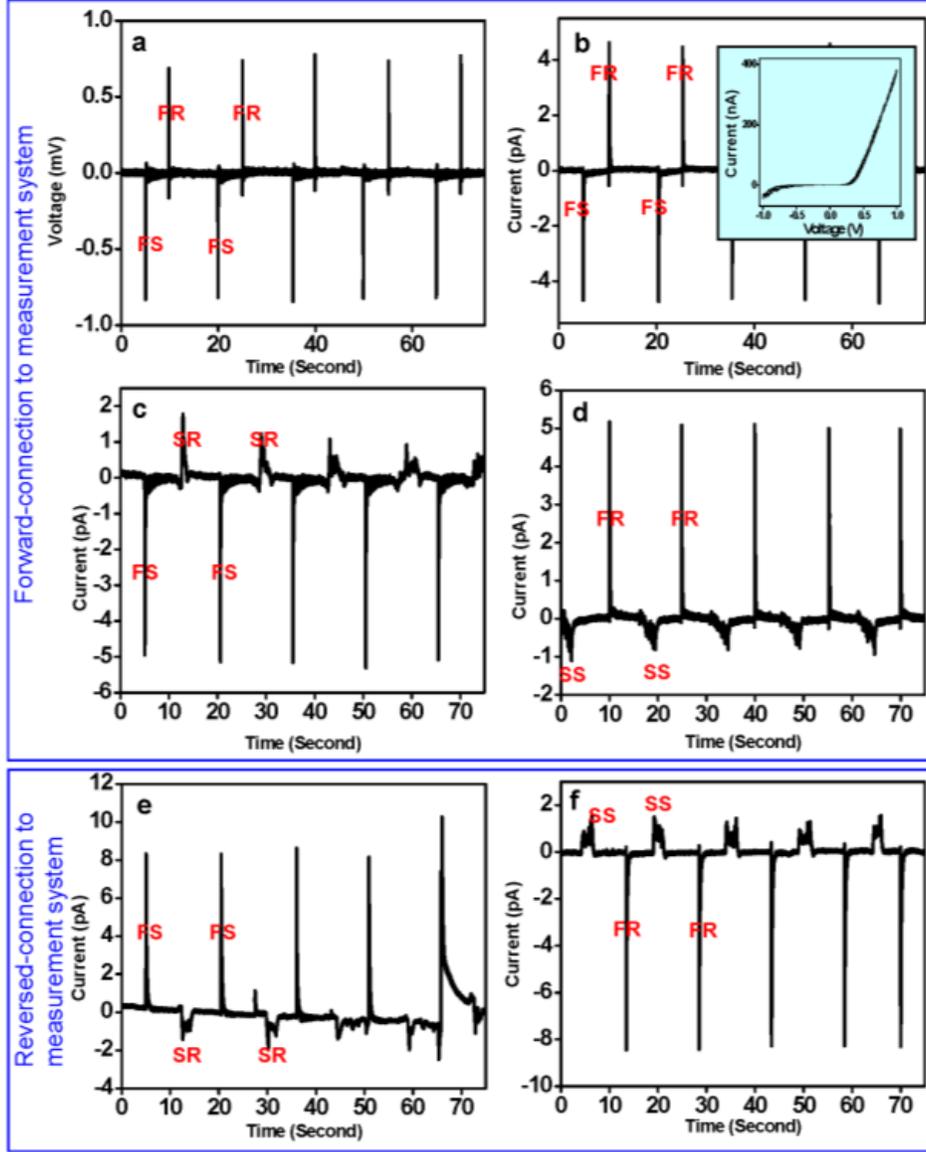
الجدول 1.4: مجموع الشحنات الكلي المولدة عند خضوع المولد لسلك مفرد إلى شد سريع وتحرير سريع (إزالة سريعة)، وذلك من خلال تكامل مساحة الذروة في منحنى التيار – زمن (I-T) الموضحة في (الشكل 12.4 a). تعني الإشارة السالبة أن تدفق الشحنات هو في الاتجاه المعاكس.

مجموع الشحنات المولدة عند الإزالة السريعة (التحرير السريع) $c*10^{-11}$	مجموع الشحنات المولدة عند الشد السريع $c*10^{-11}$	ذرا (قمم) تيار الخرج
-1.88	1.49	الأول
-1.87	1.73	الثاني
-1.86	1.76	الثالث
-1.94	1.74	الرابع
-1.72	1.85	الخامس
-1.92	1.67	السادس
-1.77	1.86	السابع
-1.87	1.9	الثامن
-1.69	1.9	التاسع
-1.85	1.79	العاشر
-1.84	1.77	المتوسط

إذا جرى ربط جهاز قياس الأمبير بالاتجاه المعاكس (انظر الشكل 11.4 c)، الذي يعني أن المسابر الموجبة والسالبة لجهاز المقياس قد جرى وصلها مع الالكتروودات السالبة والموجبة لمولد السلك المفرد SWG بالترتيب، فإن كلاً من إشارات التوتر والتيار، التي تمت ملاحظتها في (الشكل 12.4 b)، هي معاكسة لتلك، التي تمت ملاحظتها في (الشكل 12.4 a). وتؤكد إشارات الخرج المعكوسة أن الطاقة قد جرى توليدها بالفعل من قبل المولد لسلك مفرد SWG.



الشكل 12.4: توتر الدارة المفتوحة وتيار دارة القصر عند الخرج لمولد سلك مفرد واستقرارهما. (b,a) توتر وتيار متناوبان، جرى توليدهما من المولد لسلك مفرد SWG عند خضوعه لشد سريع FS وتحرير سريع FR. وبشكل متكرر، ويظهر الانعكاس في خرج الإشارة عند وصل المولد لسلك مفرد بالاتجاهين الأمامي والعكسي إلى منظومة القياس الكهربائي بالترتيب. وبعد اختبار تبديل القطبية هذا معياراً بهدف منع حدوث أخطاء ممكنة في المنظومة من صنع الإنسان نفسه. وتعد الأشكال المكبرة في (a) و (b) تكبيراً لكل من ذرا (قمم) التيار وتوتر الخرج بالترتيب. وتُعبّر المساحة الموجودة تحت منحنى التيار - زمن (I-T) عن المجموع الكلي للشحنات المنقولة.



الشكل 13.4: توتر الدارة المفتوحة وتيار دارة القصر عند الخرج لمولد سلك مفرد، اللذان يبديان إشارة عكسية لإشارة الخرج بالمقارنة مع تلك المبيّنة في (الشكل 12.4). (a, b) التوتر والتيار المتناوبان، اللذان جرى توليدهما من قبل المولد لسلك مفرد عند تعرضه لشد سريع FS وتحرير سريع FR بشكل متكرر. (c, d) التيار الكهربائي المتولد عند خضوع السلك الناعم الكهروضغطي لكل من شد سريع FR وتحرير سريع FR، أو عند خضوعه لشد بطيء SS، لكن تحرير سريع لهذا الشد البطيء، مبيّناً انخفاضاً كبيراً في مطال ذروة تيار الخرج، ولكن مع ازدياد في عرض هذه الذروة. ولقد بقي مجموع الشحنات المنقولة في كل عملية نفسه. (e, f) مخططات مماثلة لتيار الخرج المبيّنة في الشكلين (c, d)، ولكن مع توافر وصل عكسي في القطبية لمولد السلك المفرد SWG مع منظومة القياس، مظهراً عكوس إشارة الخرج.

تعتمد كمية الكهرباء المتولدة على معدل الانفعال الذي يجري إدخاله. فإذا جرى تطبيق شد سريع FS وتحرير سريع FR (إزالة سريعة) لهذا الشد على المولد لسلك مفرد، تولد فيه خرج تيار/وتوتر خرج متناوبان (الشكل 13.4 a,b)، بينما إذا طبق شد سريع، ثم أُتبع بتحرير بطيء SR، أو طبق شد بطيء SS وأُتبع بتحرير سريع، تولد فقط خرج كهربائي قوي عندما كان تأثير الانفعال سريعاً (الشكل 13.4 c,d). ونعني بالشد البطيء والتحرير البطيء أن معدل زاوية الانحناء كان بحدود $7^\circ/\text{sec}$ ونصف قطر انحناء مقداره 2cm. وإذا انعكست قطبية التوصيل، انعكست معها إشارة الخرج (الشكل 13.4 e,f)، مما يبرهن ودون ريب أن هذه

الإشارة قد جرى توليدها من قبل المولد لسلك مفرد. وسواء كان الشد بطيئاً أو التحرير بطيئاً تولدت إشارة خرج تتمتع بمطال عريض ولكنه صغير¹⁴. ولكن غالباً ما تبقى المساحات، الموجودة تحت ذُرر الإشارة، وفي كلتا الحالتين: الشد السريع والتحرير البطيء أو الشد البطيء والتحرير السريع، تبقى هذه المساحات نفسها (مع فارق بنسبة 45%، انظر (الجدول 2.4 و3.4)، مع الإشارة إلى أن المجموع الكلي للشحنات المحررة بقي نفسه عند تطبيق انفعال نهائي مركز مهما يكن معدل هذا الانفعال وطريقة تطبيقه. لذا، بقي المجموع الكلي للشحنات المنقولة دون تغيير خلال عمليتي الشد والتحرير، وتمتع المولد لسلك مفرد بتيار تسريب ضعيف.

الجدول 2.4: المجموع الكلي للشحنات المتولدة عند إخضاع السلك الناعم الكهروضغطي PFW لشد بطيء وتحرير سريع لهذا الشد، وذلك من خلال تكامل المساحة الموجودة تحت الذروة في منحنى التيار - زمن (I-t) المبينة في (الشكل 13.4 c). وتعني الإشارة السالبة أن الشحنات تتدفق بالاتجاه المعاكس.

مجموع الشحنات المولدة عند الشد السريع $c*10^{-13}$	مجموع الشحنات المولدة عند التحرير البطيء $c*10^{-13}$	ذُرر (قمة) تيار الخرج
- 6.75	8.02	أولاً
-7.39	6.95	ثانياً
-7.47	7.49	ثالثاً
-7.55	7.39	رابعاً
-8.21	8.97	خامساً
-7.48	7.76	المتوسط

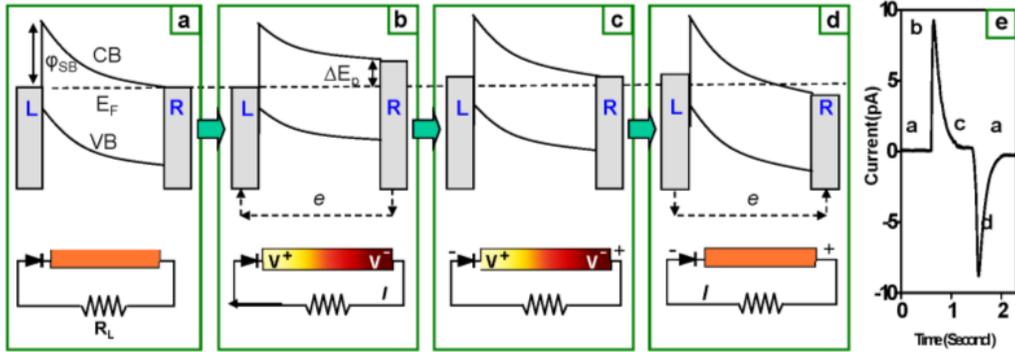
الجدول 3.4: الشحنات الكلية المتولدة عندما خضع السلك الناعم الكهروضغطي PFW لشد بطيء وتحرير سريع لهذا الشد، وذلك بتكامل المساحة تحت الذروة لمنحنى التيار - الزمن (بالشكل 13.4 f). تعني الإشارة السالبة أن الشحنات تتدفق في الاتجاه المعاكس.

مجموع الشحنات المولدة عند التحرير السريع $c*10^{-13}$	مجموع الشحنات المولدة عند الشد البطيء $c*10^{-13}$	ذُرر (قمة) تيار الخرج
-16.44	14.9	الأول
-16.81	15.44	الثاني
-15.90	16.695	الثالث
-15.53	17.795	الرابع
-14.48	17.89	الخامس
-15.83	16.54	المتوسط

4.4.3. مبدأ المولد النانوي

أُقترح أن مبدأ عمل المولد لسلك مفرد SWG بني على تركيب نطاق المنظومة مع توافر حاجز شوتكي وخلق حقل كهروضغطي داخلي في السلك الناعم الكهروضغطي PFW الخاضع لانفعال شد^[13]. جرى توجيه أسلاك أكسيد الزنك الناعمة الكهروضغطية، والمستخدمة في تجاربنا، جرى توجيهها على طول المحور C. من المعروف أن السطوحات من الخلية الواحدية لأكسيد الزنك، التي تتمتع بالإشارات (0001) و ($\bar{000}1$)، هي عبارة عن أوجه هذه الخلية، التي تنتهي بذرات الزنك والأكسجين على التوالي. ويظهر تماس شوتكي غير المتناظر عادةً عند إحدى النهايتين في قياس النقل. ويبين (الشكل 14.4 a) مخطط نطاق الطاقة للسلك الناعم الكهروضغطي لأكسيد الزنك ZnO PFW، الذي يكون بوضع التماس مع الإلكترونات المعدنية من مستوى فيرمي

في حين يتوضع حاجز شوتكي ذو الارتفاع ϕ_{SB} في الجانب الأيسر (L)، ويتوضع التماس الأومي في الجانب الأيمن (R). وجرى تمثيل حاجز شوتكي من خلال رمز صمام ثنائي (ديود). في الخطوة الأولى، ولدى التعرض لانفعال الشد، يتولد الحقل الكهروضغطي داخل السلك الناعم الكهروضغطي (الشكل 14.4 b)، والذي يعد نتيجة للشحنات الأيونية، التي ترتبط مع قطبية الذرات داخل البلورة، التي لا تتمكن من التحرك بحرية. وتبقى الشحنات الكهروضغطية داخل السلك الناعم الكهروضغطي، ولو لبضع ثوان على الأقل، حتى لفترة أطول من ذلك، دون أن تتضرب (تُستنفد) من قبل الحوامل الحرة ما دام الانفعال محتفظاً به. ولقد افترضنا، في الحالة الأولى، أن الكمون الكهروضغطي موجب V^+ عند جانب حاجز شوتكي وسالب V^- عند الجانب الأومي (مفترضين أن $V^+ > V^-$). وفي مثل هذه الحالة، سيزداد كل من نطاق التوصيل ومستوى فيرمي للإلكترونات في الجانب الأيمن R، سيزداد بالمقدار: $\Delta E_F = e(V^+ - V^-)$ ، وذلك مقارنة مع الإلكترونات في الجانب الأيسر L. وهكذا سوف تتدفق الإلكترونات من الإلكترونات من الجانب الأيمن إلى مثيله في الجانب الأيسر عبر الحمل الخارجي R_L ، ذلك لأن المقاومة عبر حاجز شوتكي تكون عالية جداً عندما يكون التوتر الموضعي أقل من توتر العتبة الأمامية للصمام الثنائي (الديود) والذي مقداره (~0.3 eV) حتى عند الانحياز الموجب. وتتراكم الإلكترونات في منطقة التماس بين إلكترونات الجانب الأيسر L والسلك الناعم الكهروضغطي لأكسيد الزنك بسبب توافر حاجز شوتكي. وتستمر هذه العملية حتى يتعادل الكمون المولد نتيجة الإلكترونات المتراكمة، مع مثيله الكهروضغطي. وهكذا، تصل مستويات فيرمي ولكلا الإلكترونين، إلى توازن جديد (الشكل 14.4 c). وهذه هي عملية توليد الذروة الأولى للخروج الموجب للتيار/التوتر (الشكل 14.4 e).



الشكل 14.4: استعراض كل من عملية توليد الشحنات وآلية الخرج لمولد سلك مفرد ذي تيار متناوب، وذلك من خلال مخطط نطاق الطاقة. (a) مخطط نطاق الطاقة لسلك ناعم كهروضغطي من أكسيد الزنك موجود في وضع التماس مع الكترودين معدنيين، حيث نطاق التوصيل VB ونطاق التكافؤ لهذا السلك بالترتيب، المخطط السفلي هو عبارة عن مقطع لدارة القياس الحقيقية، حيث يجري إدخال حمل أومي صغير R_L في هذه الدارة، والذي هو أصغر بكثير من مقاومة السلك الناعم الكهروضغطي و/أو مناطق التماس. (b, c, d) مخططات نطاق الطاقة لمولد سلك مفرد عندما يكون السلك الناعم الكهروضغطي ممتداً بفعل الشد، ومعادواً وصوله لحالة التوازن، ومن ثم تحريره من الشد بالترتيب، مظهراً بذلك عملية توليد زوج من الذرات لكل من التوتر/التيار الموجبين والسالبين (انظر النص)، وذلك في تلك الحالة التي يفترض فيها أن يكون الكمون الكهروضغطي للسلك الناعم الكهروضغطي أعلى في الجانب المجاور لحاجز شوتكي، في حين يتمتع الجانب الآخر ذو التماس الأومي بكمون كهروضغطي أدنى. (e) تيار الخرج المقاس تجريبياً من مولد سلك مفرد، الذي تتوافق فيه مناطق الخرج مع تلك العمليات المدرجة في الأشكال (a-d)، التي أُشير إليها بالرموز المماثلة a-d . (h,g,f) مخططات نطاق الطاقة لمولد سلك مفرد، وذلك عندما يكون السلك الناعم الكهروضغطي ممتداً بفعل الشد، ومعادواً وصوله لحالة التوازن، ومن ثم تحريره من الشد بالترتيب، مظهراً بذلك عملية توليد زوج من الذرات لكل من التوتر/التيار الموجبين والسالبين لحالة التناوب، التي يكون فيها الكمون الكهروضغطي للسلك الناعم الكهروضغطي PFW أدنى في الجانب المجاور لحاجز شوتكي، بينما يتمتع الجانب الآخر ذو التماس الأومي بكمون كهروضغطي أعلى.

أما في الخطوة الثانية، ولدى تحرير الركيزة البوليميرية، يتحرر انفعال الشد داخل السلك الناعم الكهروضغطي أيضاً. ويحدث زوال فوري للكمون الكهروضغطي خافضاً سطح فيرمي للإلكترونات في الجانب الأيمن R بمقدار ΔE_p ، ويصاحبه أن الإلكترونات المتراكمة أصلاً في المنطقة البينية الواقعة بين الأيسر L والجانب الأيمن R بسبب وجود حاجز شوتكي عند السطح البيني (الشكل 14.4 d). وهذه هي عملية توليد ذروة الخرج السالب لكل من التيار/ والتوتر المدرجة في (الشكل 14.4 e). ويكون مجموع الإلكترونات المنقولة في كلتا الخطوتين نفسه بغض النظر عن عملية الانفعال شريطة أن لا يكون هناك أي تسريب للتيار (انظر الجداول 1.4-3.4). ويؤدي تكرار الخطوتين الأخيرتين إلى توليد خرج متناوب.

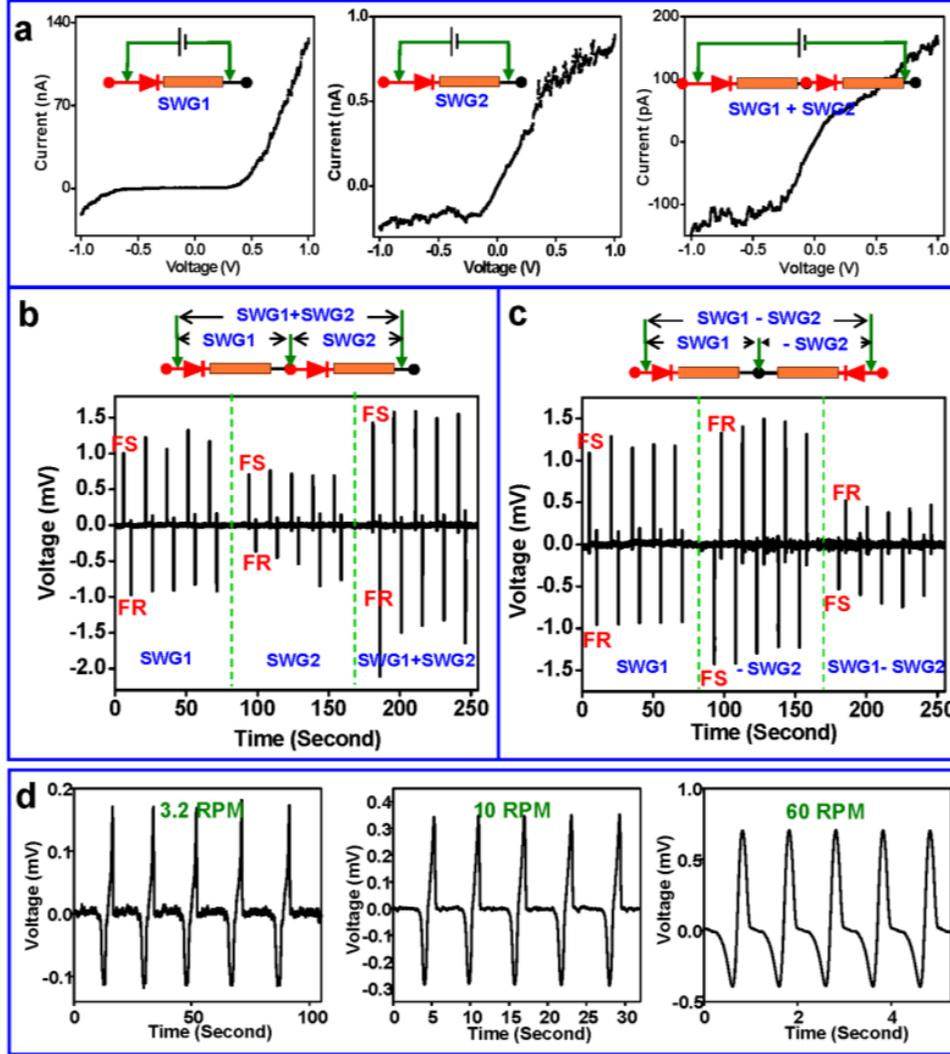
في الحالة البديلة، نفرض أن الكمون الكهروضغطي في الجانب الحاوي حاجز شوتكي سالباً V^- وفي الجانب الأومي موجباً V^+ . ولهذا، يزداد مستوى فيرمي للإلكترونات في الجانب الأيسر L بمقدار ΔE_p مقارنة مع مثيله في الجانب الأيمن R (الشكل 14.4 f). وهكذا، تتدفق الإلكترونات من إلكترونات الجانب الأيسر L عبر الحمل الخارجي R_L إلى الكترود الجانب الأيمن R، وذلك بسبب وجود حاجز شوتكي عند السطح البيني. يمكن أن تدخل الإلكترونات الحرة في الأسلاك الناعمة الكهروضغطية، وذلك لأن هذه الشحنات صلبة وملتصقة بالذرات ولا يمكنها التحرك بحرية. وبغية تمثيل الانخفاض الحاصل في مقدار الكمون نتيجة لأثر التحجيب الممكن، أُشير إلى الكمون الفعال الموضعي بالرموز V^- و V^+ . وتكون الشحنات الموجبة المتراكمة في الكترود الجانب الأيسر L ملتصقة بالذرات ولا يمكنها التحرك بحرية (انظر الشكل 14.4 g). وهكذا يمكن الحصول على بعض الشحنات المتبقية على يسار الإلكترونات. وتستمر العملية حتى يتولد كمون كهربائي ناتج عن الإلكترونات المتحركة بحرية عبر السلك الناعم الكهروضغطي ليوازن كلاً من الكمون الكهروضغطي ومستويات فيرمي في الإلكترونات ومحققاً توازناً جديداً (الشكل 14.4 g). وتعد هذه العملية بعملية خلق ذروة لتوتر/وتيار سلبيين لدى تمدد السلك الناعم.

وفي الخطوة التالية، ولدى إزالة الانفعال، يختفي الكمون الكهروضغطي، وتكون الشحنات المستخدمة في حجب الشحنات الكهروضغطية حرة الحركة. وفي تلك اللحظة، يكون مستوى فيرمي، الموجود في الكترود الجانب الأيمن R، أعلى من مثيله في الجانب الأيسر L، مسبباً بذلك تدفقاً عكسياً لحظياً للإلكترونات من إلكترونات الجانب الأيمن R عبر الدارة الخارجية إلى إلكترونات الجانب الأيسر L، وذلك بسبب الانخفاض الكبير للمقاومة مقارنة مع تلك لكل من السلك الناعم الكهروضغطي ومناطق التماس. وتنتهي هذه العملية عندما تصل مستويات فيرمي في كلا الجانبين لحالة التوازن، الذي يكمن في الترتيب الأولي المبين في (الشكل 14.4 a). وتعد هذه العملية بعملية توليد ذروة لخرج التوتر/والتيار الموجبين عندما يكون السلك الناعم الكهروضغطي محرراً.

4.4.4. التوصيلات الخطية

جرى تحسين استطاعة الخرج للمولدات من خلال وصلها على التسلسل أو التفرع، وذلك بغية زيادة توتر الخرج أو تياره. وقبل توصيل مولدين من سلك مفرد SWGs على التسلسل، جرى تحديد قطبية حواجز شوتكي في نهايتي هذين المولدين من خلال قياس منحنيات خاصية التيار/توتر (I-V) كما هو مبين في (الشكلين 14.4 a,b). وعليه جرى توصيل المولدين وفقاً للقطبية الصحيحة والمتسلسلة. ولدى توصيل المولدين على التسلسل، تبقى خاصية التيار - توتر الموافقة لذلك، تبقى مبدية سلوك شوتكي. ويشكل التوتر المقاس تقريباً مجموع توترات المولدين من سلك مفرد SWGs (الشكل 15.4 b). ولدى إجراء التوصيل العكسي للمولدين من سلك مفرد على التسلسل، يشكل توتر الخرج الفارق بين توترتي هذين المولدين (الشكل 15.4 c). وتشكل هذه الميزة من التطابق الخطي سوية مع انعكاس إشارة الخرج بعد عكس قطبية التوصيل، تشكل الشروط الضرورية والكافية للتأكد من

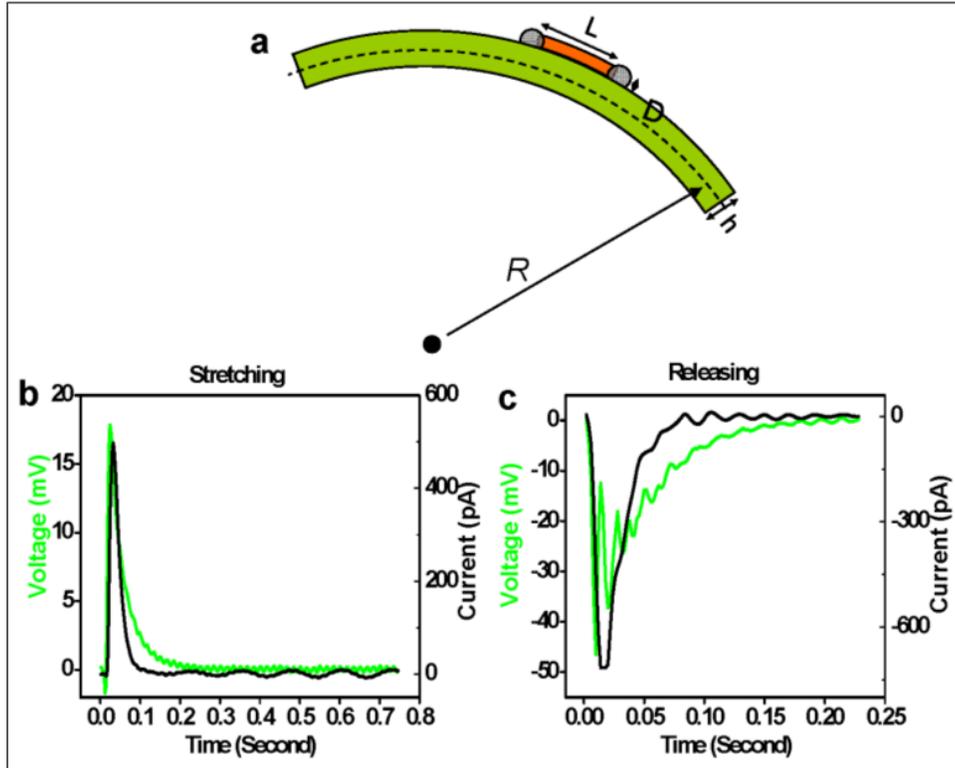
الإشارات الحقيقية المتولدة من قبل المولدين من سلك مفرد (انظر الجزء الخامس).
 وختاماً، يؤدي ازدياد معدل الانفعال إلى تحسن واضح في كمية كهرياء الخرج ولكلا التوتر والتيار (الشكل 15.4 d). وعندما يصل تردد الانحناء إلى 60 rpm (ستين دورة في الدقيقة)، يكون شكل منحني توتر الخرج قريباً من المنحني الجيبي (الشكل 15.4 d)، وعلى سبيل المثال يكون التيار متناوباً.



الشكل 15.4: وصل تسلسلي لمولدين من السلك المفرد SWGs بغية إظهار كمونهما لرفع سوية استطاعة الخرج. (a) خواص التيار - توتر لمولدين من السلك المفرد SWGs مستقلين وخاصية الناقلية الناجمة عنهما بعد وصلهما على التسلسل، واللذان من خلال استخدامهما يمكننا التمييز بين قطبية هذين المولدين. ويُعدُّ سلوك شوتكي الأساس لكهرياء الخرج. (b) خرج التوتر لمولدين من السلك المفرد مستقلين، واللذان بعد وصلهما أصولاً على التسلسل يظهران المحصلة الخطية لتوترات الخرج. وجرى قياس إشارة الخرج تحت الشروط التجريبية نفسها ما عدا تلك التي جرى فيها التقاط إشارات الخرج في نقاط مختلفة من مناطق التماس، وكما هو موضح تخطيطياً في أعلى الشكل. (c) خرج التوتر لمولدين من السلك المفرد مستقلين، وذلك بعد أن جرى وصل هذين المولدين على التسلسل بطريقة غير بناءة، إذ يظهر الطرح الخطي لتوترات الخرج في هذا الشكل. ويعد التناوب الخطي لإشارات الخرج، ولكلا المولدين من السلك المفرد، المعيار الأساس لاستبعاد تصنيع المنظومة الممكنة. (d) يقود الازدياد في معدل الانفعال إلى ازدياد في توتر الخرج. وعندما يصل تردد الانحناء إلى 60 rpm (ستين دورة في الدقيقة)، يكون شكل توتر الخرج قريباً من المنحني الجيبي.

4.4.5. مردود تحويل الاستطاعة

جرى تقدير مردود المولد من سلك مفرد (الشكل 16.4) [13]. ويفرض أن ركازة كابتون جرى حنيها بنصف قطر انحناء مقداره R . وتساوي ثخانة هذه الركازة المقدار h ، ويتمتع السلك الناعم من أكسيد الزنك بكل من الطول L والقطر D ، ولما كان $(R \gg h)$ وأن $(h \gg D)$ ، فإن انفعال السلك النانوي من أكسيد الزنك مكافئاً لمثيله في السطح الخارجي لفيلم كابتون، ويساوي $\epsilon \approx h/2R$ (الشكل 16.4 a). وتساوي ثخانة ركازة كابتون $50 \mu\text{m}$ ، ويتراوح مقدار نصف القطر R بين $(2.0-3.0 \text{ cm})$. ووفقاً للمعادلة الواردة أعلاه وقيم كل من R و h ، يكون مقدار الانفعال للأسلاك الناعمة من أكسيد الزنك مساوياً $\epsilon = 0.05 \div 0.1\%$. وتكون طاقة الانفعال الميكانيكي المخزنة داخل السلك الناعم الكهروضغطي، بعد خضوعه للشد، مساوية: $W_m = \frac{1}{2} EA(L - L_0)^2$ ، حيث E معامل المرونة للسلك الناعم الكهروضغطي PFW، و L_0 و L الطول الأصلي للسلك وطوله النهائي بعد خضوعه للانفعال على التوالي، A المقطع العرضي. وتساوي الاستطاعة الكهربائية الكلية المتولدة $W_e = \int VI dt$ (الشكلان 16.4 b,c). ويتمتع السلك النانوي من أكسيد الزنك، الوارد في هذا التقرير، بقطر مساوٍ $4 \mu\text{m}$ وطول L_0 نحو $200 \mu\text{m}$ ، وتتراوح قيم E بين $(30-50 \text{ GPa})$ ، وتصل قيمة ϵ إلى نحو 50% . ويرتفع مردود تحويل الطاقة للسلك الناعم الكهروضغطي ذاته، ليصل إلى 6.8% ، وذلك بعد استبعاد فيلم الركازة.



الشكل 16.4: حساب مردود تحويل الطاقة لسلك كهروضغطي. (a) إحداث انفعال الشد داخل السلك الكهروضغطي عندما يكون فيلم الركازة في حالة انحناء. (b,c) تيار الخرج وتوتره عند تعريض المولد من سلك مفرد للتمدد والتقلص.

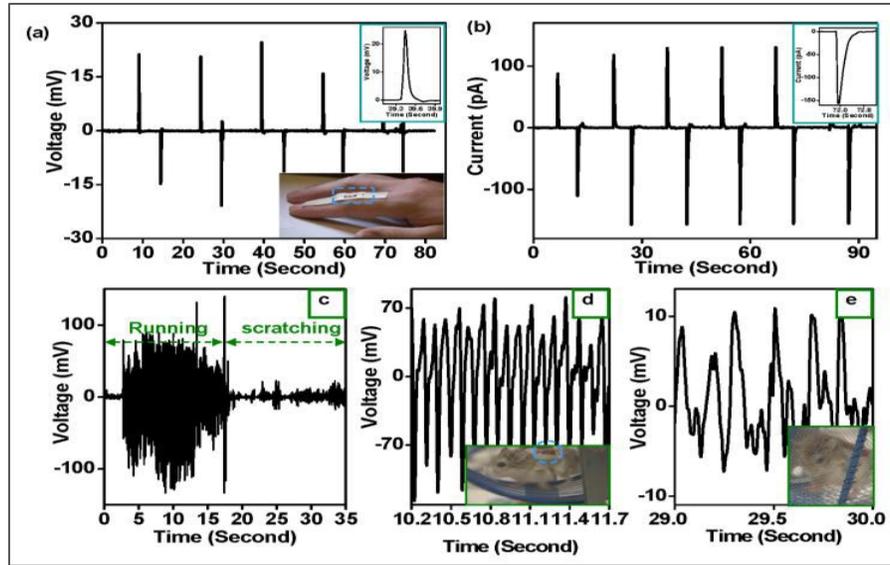
4.4.6. تجميع الطاقات الميكانيكية الحيوية

4.4.6.1. حالة عمل خارج الجسم الحي in-vitro

تتمتع الكائنات الحية بمصادر وفيرة للطاقة الميكانيكية كعملية السير والتنفس وضربات القلب. ويعد المجال الواسع من التآرجح في قيم كل من التردد والكثافة، يعد قضية تحد، ولقد أخرجت هذه القضية جدياً من عملية تطوير تجميع الطاقة من خلال استخدام التقنيات التقليدية. ويقدم نهجنا تقانة حديثة لتجميع الطاقة الميكانيكية من حركة غير منتظمة. حيث تتمتع هذه الطاقة بمقدار ذي سوية مقبولة جداً دون إضافة أي عبء ممكن.

كان المثال الأول لتجميع الطاقة الميكانيكية الحيوية عبارة عن مولد من سلك مفرد مقاد بإصبع بشرية [14]. تراوح قطر السلك النانوي داخل المولد من سلك نانوي SWG بين (800-100 nm) وطوله بين (500-100 μm). ولقد حسنت طبقة البوليمير المرنة، المتوضعة فوق المولد من سلك مفرد، حسنت من صلابته وتأقلمه. نُتبت مولد السلك المفرد في مكان الوصل في أعلى إصبع السبابة كما هو مبين في الصورة المكبرة داخل (الشكل 17.4 a). أدى ضغط الأصبع إلى حدوث تشوه (انفعال) للسلك النانوي من أكسيد الزنك ZnO NW، الموجود داخل المولد لسلك مفرد، وأدى إلى إحداث معدل انفعال في هذا السلك مقداره $(4 - 8) \times 10^{-3} \cdot S^{-1}$ ، ووصل مقدار الانفعال الأعظم إلى نحو (0.2% ~). وكما نوقش مبكراً، يسبب هذا الانفعال استقطاباً كهروضغطياً على طول السلك النانوي، وبالتالي فارق كمون بين نهايتي هذا السلك والذي دفع بتدفق الإلكترونات داخل الدارة الخارجية. وتدعى مثل هذه الحركة الفيزيائية حركة بطيئة ولطيفة جداً.

جرى إدراج كل من توتر الدارة المفتوحة وتيار الدارة المغلقة المقاسين في (الشكلين 17.4 a,b) بالترتيب. وتتوافق الذرى الدورية مع الضغط الدوري المطبق على الأصبع. ويبين (الشكل 17.4 a) أن توتر الخرج يمكن أن يصل إلى المقدار 25 mV، بينما بلغت قيمة التيار المدرج في (الشكل 17.4 b) لمولد سلك مفرد، بلغت 150 pA.



الشكل 17.4: تجميع الطاقة من نظام حيوي مع مولد نانوي. (a) توتر الدارة المفتوحة و (b) تيار دارة القصر للخرج من مولد لسلك مفرد مثبت في أعلى السبابة، وكما هو موضح في الشكل المكبر ضمن الشكل (b). (c) توتر خرج الدارة المفتوحة من مولد نانوي مثبت على سترة خارجية يرتديها حيوان الهامستر* عند قيامه بالركض أو الحك. (d) و (e) توترات الخرج المكبرة الموافقة لكل من حالتي الركض والحك لحيوان الهامستر بالترتيب. تمثل الأشكال الداخلية المكبرة في (d) و (e) لقطات موافقة لحيوان الهامستر والمولد النانوي مثبت على ظهره.

* الهامستر: هو حيوان من القوارض شبيه بالجرذ.

وإضافة للإصبع البشرية، استعرض أيضاً هامستر حي لتوليد الكهرباء باستخدام مولد سلك مفرد SWG. والهامستر، الذي اختير في هذه التجربة ينتمي إلى شريحة الحيوانات الصغيرة وفقاً لتصنيف كامبيل Campbell's dwarf type، يمكن أن يعرض كلا نوعي الحركة المنتظمة كالركض والحك صُنع لهامستر معطف (سترة خارجية) خاصاً ليرتديها، بحيث يستطيع هامستر أن يتحرك بحرية ضمن حجرة دائرية ذات قضبان ويقود المولد من سلك مفرد، والمثبت على السترة، في الوقت نفسه. قمنا بقياس إشارة الخرج الكهربائي الصادرة عن المولد من سلك مفرد دون تعكير لحركة الهامستر كما هو موضح في (الشكل 17.4 e,c). تعطي الحركة المتغيرة لهامستر سواءً بالركض أو بالحك، طاقة ميكانيكية للمولد من سلك مفرد، بحيث تتمتع هذه الطاقة بنمط وكثافة مميزين. وكما كان متوقعاً، تغيرت قيم كهرياء الخرج من مولد السلك المفرد أيضاً. وتظهر الإشارة المكبرة لتوتر الخرج، المدرجة في (الشكل 17.4 d) والناجمة عن ركض الهامستر، تظهر نموذجاً دورياً واضحاً لمقدار هذا التوتر، الذي يتراوح بين (100-50 mV) وتردده بين (10-11 Hz). وتتوافق هذه التواترات الدورية بشكل جيد مع خطوات الركض للهامستر. ويرجع السبب في أن الإشارة الصادرة عن مولد السلك المفرد المثبت على سترة الهامستر هي أعلى بكثير من مثيلتها الصادرة عن المولد المثبت على الأصبع البشرية، يرجع إلى توافر معدل انفعال أسرع عند ركض الهامستر. ومن خلال المقارنة، يكون توتر الخرج الناتج عن حك الهامستر، وكما هو موضح في (الشكل 17.4 d)، يكون غير منتظم ويتمتع بمطال منخفض وذلك يعود إلى أن حركة الهامستر تكون أقل فعالية في هذه الحالة. ويبيد التيار المقاس لدارة القصر ظاهرة مماثلة، أي أن ركض الهامستر يولد تياراً متناوباً دورياً تصل قيمته إلى نحو (0.5 nA) نانو أمبير، وأما الحك فيولد تياراً غير منتظم قيمته أخفض.

4.4.6.2. حالة عمل داخل الجسم الحي (in-vivo)

يعود الفضل في توافر الحالة داخل الكائن الحي إلى وجود سائل حيوي ناتج عن ظروف العمل داخل هذا الكائن، وذلك من خلال تغليب (أو تغليف) الجهاز بمادة بوليمرية مرنة بغية عزله عن الوسط المحيط وتحسين صلابته [15]. ويتمتع الخرج لمولد السلك المفرد عادةً بتوتر قيمته أقل من 50mV وتيار أقل من 500pA في معظم الحالات. ويجب أن يبدي مولد السلك المفرد الفعال سلوك شوتكي في إحدى نهايتيه قبل القياس وبعده. ولا بد لكل من توتر الخرج للمولد وتياره من أن يتعرضا لتجربة تبديل القطبية. وبغية تسهيل الترميز والمرجعية قمنا بتحديد الجانب من مولد السلك المفرد، الذي يحوي تماس شوتكي، على أنه الجانب الموجب. وعند وصل المعابر السالبة والموجبة من منظومة القياس إلى الجوانب السالبة والموجبة لمولد السلك المفرد بالترتيب، وتوصف طريقة التوصيل هذه بالتوصيل الأمامي. أما إذا وصلت المسابر بالعكس، وصفت بطريقة التوصيل العكسي. ولا بد من اختبار كلتا الطريقتين. ويمكن أن تختلف قيمة الإشارة الصادرة عن طريقتي التوصيل كليهما بسبب تأثير تيار الانحياز الصغير لمنظومة القياس. لذا تساوي قيمة الإشارة الحقيقية متوسط قيم إشارتي التوصيل الأمامي والعكسي.

أجريت مجموعة من التجارب بهدف تحويل التشوه (الانفعال) الميكانيكي، الناتج عن تمدد الحجاب الحاجز لفأر وتقلصه، إلى كهرياء (الشكل 18.4). لقد أظهر المولد المرن المشار إليه الابتكارات التالية مقارنة مع مثيله النانوي المبني على مصفوفات السلك النانوي المتراسة شاقولياً. أولاً: جرى تثبيت السلك الناعم الكهروضغطي إلى ركازة بوليمرية بشكل جيد. ولهذا لن يوجد أي انزلاق/ أو دك/ أو احتكاك بين الالكتروود والسلك النانوي. ولهذا جرى تحقيق تحسن كبير في كل من الاستقرار والمتانة للمولد، بدءاً من مبدأ العمل الأساس إلى التصميم التقني. ثانياً: جرى تغليف كامل منظومة المولد بمادة بوليمرية مرنة. لهذا يمكن لهذا المولد أن يجري تغليفه/وبناؤه داخل مواد طرية، مما يسمح باستخدامه سواءً ضمن سائل أو تحت ظروف هشة، بحيث يتوقع أن يحدث تسريب لسائل/أو ماء/أو غاز. ويمكن رفع استطاعة الخرج من خلال إجراء توصيل منطقي على التسلسل لمولدات مستقلة: مثلاً، يمكن دمج (تكامل) الآلاف من مثل هذه المولدات داخل ركازة مشتركة بغية تشكيل شريحة/أو فيلم لاستطاعة مرنة انظر (الفصل السابع). ثالثاً: يلغي التصميم الجديد التعقيد الناجم عن صيانة الفجوة الصغيرة (50-100 nm) الواقعة بين أعلى الالكتروود

المتعرج (زاك زاك) ومصفوفات السلك النانوي، وذلك خلال إجراء عملية التغليف للمولد، مما يجعل ذلك سهلاً وأقل كلفة لعمليات التصنيع. وختاماً يمكن للمولد المؤسس هنا أن تتسع آفاق استخدامه لتشمل كلاً من الأسلاك النانوية/والأسلاك الميكروية المعدة من $Pb(Zr, Ti)O_3$ مثلاً، التي تتمتع بقيمة عالية للمعامل الكهروضغطي لهذه الأسلاك. وتعد المولدات المرنة مناسبة وعملية بغية زرعها في العضلات وإخفائها داخل الملابس وإنشاء طبقات سطحية منها ووضعها داخل بطانة الحذاء. ويؤسس كلاً من المبدأ والتصميم المعروضين لمنهج وتقانة أساسيين وجديدين لتجميع الطاقة الميكانيكية من الوسط المحيط لاستخدامها في التطبيقات العملية في كل من علم الطب الحيوي ومراقبة البيئة وتقانة الدفاع والأجهزة الإلكترونية الشخصية.

4.5. المراجع

- [1] Z.L. Wang, J.H. Song, Science 312, 242 (2006).
- [2] X.D. Wang, J.H. Song, P. Li, J.H. Ryou, R.D. Dupuis, C.J. Summers and Z.L. Wang, J. Am. Chem. Soc. 127, 7920 (2005).
- [3] Z.L. Wang, J. Nanoscience and Nanotechnology 8, 27 (2008).
- [4] X.D. Wang, J.H. Song and Z.L. Wang, J. Materials Chemistry 17, 711 (2007).
- [5] J.H. Song, J. Zhou, Z.L. Wang, Nano Letters 6, 1656 (2006).
- [6] P.X. Gao, J.H. Song, J. Liu and Z.L. Wang, Adv. Materials 19, 67 (2007).
- [7] J. Liu, P. Fei, J.H. Song, X.D. Wang, C.S. Lao, R. Tummala, Z.L. Wang, Nano Letters 8, 328 (2008).
- [8] M.P. Lu, J.H. Song, M.Y. Lu, T.C. Chen, L.J. Chen, Z.L. Wang, Nano Letter, submitted.
- [9] S. S. Lin, J. H. Song, Y. F. Lu, Z. L. Wang*, Nanotechnology 20, 365703 (2009).
- [10] C.T. Huang, J.H. Song, W.F. Lee, Y. Ding, Z.Y. Gao, Y. Hao, L.J. Chen, Z.L. Wang, J. Am. Chem. Soc. 132, 4766 (2010).
- [11] C.T. Huang, J.H. Song, C.M. Tsai, W.F. Lee, D.H. Lien, Z.Y. Gao, Y. Hao, L.J. Chen, and Z.L. Wang, Adv. Mater. 36, 4008-4013 (2010).
- [12] Y.F. Lin, J.H. Song, D. Yong, S.Y. Lu, Z.L. Wang, Adv. Materials 20, 3127 (2008).
- [13] R.S. Yang, Y. Qin, L.M. Dai, Z.L. Wang, Nature Nanotechnology 4, 34 (2009).
- [14] R.S. Yang, Y. Qin, C. Li, G. Zhu, Z.L. Wang, Nano Lett. 9, 1201 (2009).
- [15] Z. Li, G. Zhu, R.S. Yang, A.C. Wang, Z.L. Wang, Adv. Mater. 22, 2534 (2010).

الفصل الخامس: توصيف خروج المولد النانوي

يُعد التأكد من الإشارة الحقيقية، المُولدة بواسطة المولد النانوي NG أمراً محرجاً، ذلك لأن الإشارات الصادرة عن المولدات النانوية NGs الكهروضغطية صغيرة وغير متجانسة الخواص، إضافةً إلى تأثير كل من منظومة القياس والوسط المحيط في هذه الإشارات. ويمكن لخروج مولد من السلك المفرد SWG أن يتأثر بمنظومة القياس، وذلك بحدوث تغيير في سعة كل من السلك النانوي والدارة الكهربائية خلال فترة تطبيق التشوه "الانفعال" الميكانيكي، إضافةً إلى اقتران مولد السلك المفرد بمنظومة القياس، وهذا ما يجعل من السهولة بمكان اكتشاف الإشارات الزائفة. وبغية التمييز بين الطاقة الكهربائية، المتولدة بواسطة المولد من سلك مفرد، عن مثيلتها المتولدة بواسطة مصادر صناعية ممكنة، قمنا بتطوير ثلاثة معايير تتألف من إحدى عشرة تجربة بهدف إلغاء هذه المصادر الصناعية [2,1]. لم يكن مطلوباً من المولد أن يحقق كلاً من سلوك شوتكي (التجربة 1) وتبديل القطبية (التجربة 2) فحسب، وإنما كان مطلوباً منه تحقيق التوافق الخطي لكل من (التيار والتوتر) لثمان تشكيلات أيضاً. ولهذا كان لا بد للإشارة الحقيقية لكل من (التيار والتوتر)، والصادرة عن المولد، أن تفلح في اجتياز كل تجربة وجميع التجارب. وتعد هذه المعايير والتشكيلات قابلة للتطبيق لجميع أنواع المولدات، ويمكنها أن تشكل اختبارات قياسية للأهداف العامة.

5.1. تيار الخرج

بغية قياس تيار دارة القصر، قمنا أولاً بإجراء القياس في حالة التوصيل الأمامي، التي يكون فيها كل من المسير الموجب ومثيله السالب لمنظومة القياس موصولين مع النهائيين الموجبة والسالبة للمولد بالترتيب. ويبين (الشكلان a,1.5b) نتائج هذا القياس للمولد A لسلك مفرد SWGA وللمولد B لسلك مفرد SWGB. وتبين الأشكال المدرجة ضمن الشكلين السابقين طرائق التوصيل للمولدين. توافق الذرا القمم الموجبة حالات التمدد (الشد) للسلك الناعم الكهروضغطي عندما تكون الركازة السفلى منحنية نحو الداخل. وعند تحرير الركازة، يعود السلك الناعم الكهروضغطي إلى حالته الحرة مسبباً توليد ذروة كهربائية سالبة. وسوف يتم إدراج تقرير مفصل عن آلية توليد هذه الإشارة في موضع آخر من هذا الكتاب.

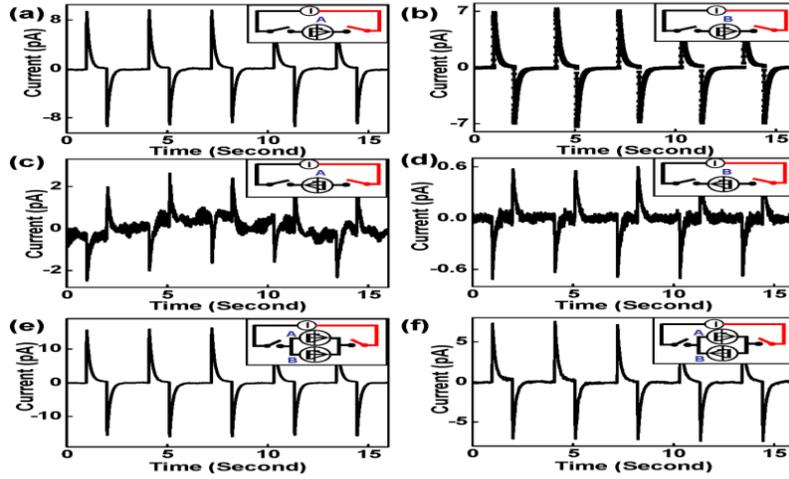
وبغية التأكد من كون كانت الإشارة هي الخرج الكهربائي الحقيقي نظراً لتمتع السلك الناعم من أكسيد الزنك بخاصية الكهروضغطية، أجرينا اختبار تبديل القطبية، جرى فيه وصل المسيرين الموجب والسالب لمقياس الأمبير مع النهائيين السالبة والموجبة لمولد السلك المفرد بالترتيب. ويبين (الشكلان d,1.5c) نتائج هذا القياس. وستكون إشارة الخرج في هذه الحالة عكس مثيلتها المدرجة في (الشكلين a,1.5b)، يُعطى تمدد (شد) السلك الناعم الكهروضغطي PFW نبضة سالبة، في حين تتولد مثيلتها الموجبة عند تحرير هذا السلك. وسوف تُلغى القناة بإجراء اختبار تبديل القطبية احتمال حدوث أي خطأ، يمكن أن ينتج عن تغيير سعة المنظومة. يمكن أن يولد التغيير الحاصل في مقاومة التماس إشارة عندما يكون مولد السلك المفرد خاضعاً للتشوه (الانفعال)، ولكن مثل هذه الإشارة لن تغير من رمزها من الموجب إلى السالب عندما تنعكس طريقة التوصيل. يضاف إلى ذلك، أننا لاحظنا أيضاً أن هناك فارقاً في المقدار بين الإشارات في حالة التوصيل الأمامي ومثيله العكسي. سيكون الخرج غير المتناظر لمولد السلك المفرد، قبل تبديل القطبية وبعده، سيكون هذا الخرج على الأرجح سببه منظومة القياس، التي تتمتع بتيار انحياز. فإذا أضيف تيار الانحياز إلى مثيله الناتج عن مولد السلك المفرد في حالة التوصيل الأمامي، فإن تيار الانحياز هذا سيتم طرحه من مثيله الناتج عن المولد في حالة التوصيل العكسي. وستكون الإشارة الحقيقية، المتولدة من مولد السلك المفرد، عبارة عن متوسط القيم المسجلة في حالتي التوصيل الأمامي والعكسي.

ونظراً لتوافر تماس شوتكي عند إحدى نهايتي مولد السلك المفرد، فإن اختبار تبديل القطبية لن يكون كافياً لإلغاء بعض المصادر الصناعية، وعندها سيطبق التطابق الخطي بهذا الشكل. لقد أجرينا قياس التيار عندما كان المولدان موصولين على التوازي التفرعي بهدف اختبار مدى التطابق الخطي للتيارات. ولما كان تماس شوتكي موجوداً عند إحدى نهايتي مولد السلك المفرد، فإننا بحاجة للانتباه إلى اتجاه التوصيل. ويبين (الشكل e1.5) نتائج القياس عندما يكون مولدا السلك المفرد موصولين بالاتجاه نفسه، والذي يتحسن فيه تيار الخرج ويصبح مكافئاً تقريباً لمجموع الإشارات المدرجة في (الشكلين a1.5 و b1.5). وبالمقابل، وعندما يكون مولدا السلك المفرد موصولين بالاتجاه المتعاكس، وكما هو موضح في (الشكل e1.5)، انخفضت قيم تيار الخرج، وأصبح مكافئاً تقريباً لمجموع الإشارات. وفي النتيجة يكون التطابق الخطي للتيار مقنعاً لمولدي السلك المفرد. يُضاف إلى ذلك أن وصل مولدي السلك المفرد على التفرع يحقق اختبار تبديل القطبية أيضاً.

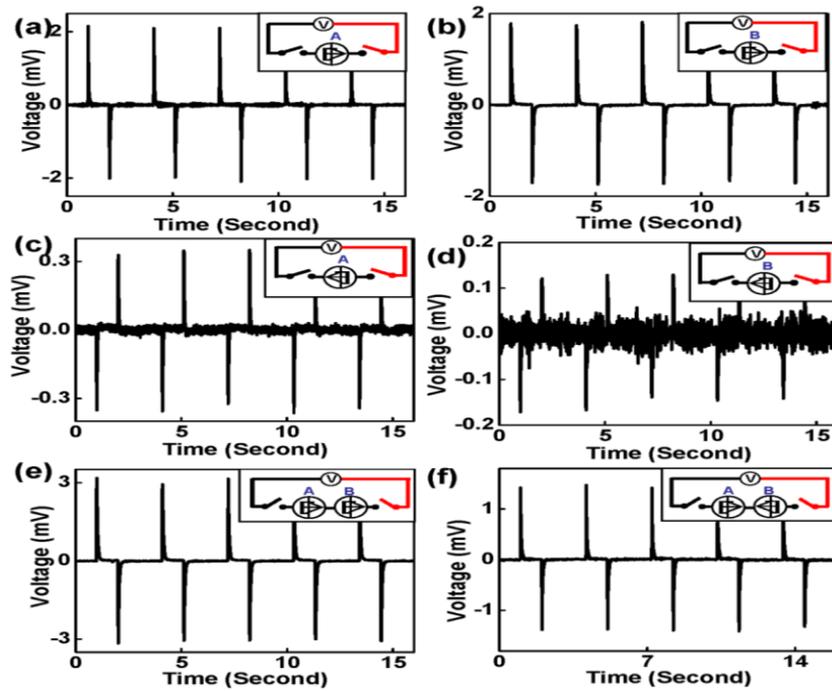
5.2. توتر الخرج

يبين (الشكل 2.5) توتر الخرج لمولدات السلك المفرد، حيث يُعطي كلٌ من المولدين لسلك مفرد SWGA و SWGB إشارة توتر موجبة عندما تكون الأسلاك الناعمة الكهروضغطية PFWs ممتدة (مشدودة) وإشارة سالبة عندما تكون هذه الأسلاك مرتخية (محررة)، وذلك كما هو موضح في (الشكلين a,b,2.5). ولقد كانت نتائج تبديل القطبية مقنعة أيضاً لتوتر الخرج، وكما هو موضح في (الشكلين c,d,2.5). وبغية تثبيت الإشارة وإعطاء توصيف أكثر للمولد من الضروري إجراء القياس للتوتر عندما يكون المولدان المفردان موصولين على التسلسل كما هو موضح في (الشكلين e,f,2.5). فعندما يكون مولدا السلك المفرد موصولين بالاتجاه نفسه، ازدادت قيمة التوتر النهائي بشكل واضح. وبالمقابل لدى وصل المولدين ذوي السلك المفرد بالاتجاه المعاكس، انخفضت قيمة التوتر النهائي. وفي النتيجة، سيكون تطابق التوتر مقنعاً أيضاً لكلا هذين المولدين ذوي السلك المفرد. زد على ذلك، فإن وصل المولدين ذوي السلك المفرد على التسلسل يؤكد اختبار تبديل القطبية.

لدى اتخاذ القيمة المتوسطة لإشارات الخرج عندما يطبق انحناء على المولدات ذات السلك المفرد، فإن كلاً من تيار الخرج وتوتر الخرج في (الشكلين 1.5 و 2.5) قد تم إدراجهما في (الجدول 1.5). وبغية تبسيط المناقشة، تُعرف كلاً من V_A^+ و I_A^+ على أنهما مقدار التوتر والتيار المقاسين للمولد A ذي السلك المفرد SWGA عندما يكون التوصيل أمامياً، وتُعرف كلاً من V_A^- و I_A^- على أنهما مقدار التوتر والتيار المقاسين للمولد نفسه عندما يكون التوصيل عكسياً. وتطبق التعاريف السابقة نفسها على المولد SWGB. وفي الحالة المثالية سيكون لدينا أن: $V_A^- = -V_A^+$ و $I_A^- = -I_A^+$. وعلى أية حال، وبعد الأخذ بالحسبان مساهمة تيار الانحياز الصادر عن منظومة القياس، فإن كلاً من التوتر/والتيار المقاسين لن يتمتعاً بالمطال نفسه. وفي جميع الحالات، لا بد للخرج الكهربائي الحقيقي من المولد ذي السلك المفرد من أن يُغير إشارته عندما يكون هذا المولد موصولاً عكسياً. ويدعم الصفان الأوليان في (الجدول 1.5) وبشكل كامل، الفكرة التي تكمن في أن كلاً من (المولد A ذي السلك المفرد SWGA والمولد B ذي السلك المفرد SWGB يحققان المعيار الأول من اختبار تبديل القطبية لكل من توتر الخرج وتيار الخرج).



الشكل 1.5: (a) و (b) تيار دائرة القصر لاستطاعة الخرج، الصادر من كل من المولد A ذي السلك المفرد SWG A، والمولد B ذي السلك المفرد SWG B بالترتيب، وذلك عند التوصيل الأمامي لهذين المولدين. (c) و (d) تيار دائرة القصر لاستطاعة الخرج الصادر من كل من المولد A ذي السلك المفرد SWG A، والمولد B ذي السلك المفرد SWG B بالترتيب، وذلك عند التوصيل العكسي لهذين المولدين. (e) و (f) التوصيل على التفرع لكل من المولد A ذي السلك المفرد SWG A ومثيله SWG B، حيث يظهر هذا النوع من التوصيل مقدرة هذين المولدين على "الإضافة" أو "الحذف". وتوضح جميع الأشكال الداخلية شكل التوصيل لهذين المولدين بالنسبة لمنظومة القياس.



الشكل 2.5: (a, b) توتر خرج للدائرة المفتوحة لكل من المولد A ذي السلك المفرد SWG A ومثيله المولد B بالترتيب، وذلك عند التوصيل الأمامي لهذين المولدين. (c, d) توتر الدائرة المفتوحة لاستطاعة الخرج لكل من المولد A ذي السلك المفرد SWG A ومثيله المولد B بالترتيب، وذلك عند التوصيل العكسي لهذين المولدين. (e, f) يبين التوصيل على التسلسل لكل من المولد A ذي السلك المفرد SWG A ومثيله SWG B، إذ يبين هذا النوع من التوصيل أثر "الإضافة" و"الحذف". وتوضح جميع الأشكال الداخلية شكل التوصيل لهذين المولدين بالنسبة لمنظومة القياس.

الجدول 1.5: ملخص لكل من تيار الخرج وتوتر الخرج، وذلك عند وصل المولدين SWG A و SWG B بأشكال توصيل مختلفة، والتي تم إدراجها في (الشكلين 1.5 و 2.5).

التوتر (mV) ميلي فولت		التيار (PA) بيكو أمبير		نوع المولد
التوصيل العكسي	التوصيل الأمامي	التوصيل العكسي	التوصيل الأمامي	
-0.36	2.13	-2.42	9.54	SWG A
-0.15	1.81	-0.7	7.31	SWG B
-0.37	3.18	-3.76	16.2	SWG B + SWG A
1.5	1.46	4.65	7.33	SWG B - SWG A

يُظهر الصفان الأخيران في (الجدول 1.5) المعيار الثاني للتطابق الخطي لكل من التيار والتوتر، وذلك لأشكال التوصيل الثمانية. فعندما جرى توصيل المولدين SWG A و SWG B على التفرع، وكما هو موضح في الأشكال الداخلية ضمن (الأشكال e1.5 و f1.5)، تلبى التيارات المقاسة (الموجودة في الصفين الأخيرين من أعمدة التيار في الجدول) الشروط التالية:

$$I_{A+B}^+ = I_A^+ + I_B^+$$

$$I_{A+B}^- = I_A^- + I_B^-$$

$$I_{A-B}^+ = I_A^+ + I_B^-$$

$$I_{A-B}^- = I_A^- + I_B^+$$

أما عند توصيل المولدين SWG A و SWG B على التسلسل وكما هو موضح في الأشكال الداخلية من (الشكلين e2.5 و f2.5)، تلبى التواترات المقاسة (الموجودة في الصفين الأخيرين من أعمدة التوتر في الجدول) الشروط التالية:

$$V_{A+B}^+ = V_A^+ + V_B^+$$

$$V_{A+B}^- = V_A^- + V_B^-$$

$$V_{A-B}^+ = V_A^+ + V_B^-$$

$$V_{A-B}^- = V_A^- + V_B^+$$

5.3 الملخص

باختصار، قمنا بتطوير معيارين، يكمنان في إجراء اختبارات تبديل القطبية واختبارات التطابق الخطي لكل من التيار والتوتر، وذلك بعد إجراء 10 أشكال من هذه الاختبارات بهدف تحديد الخرج الكهربائي للمولدات موضوع البحث. ويمكن لهذين المعيارين أن تمنع بوضوح وقوع أخطاء في منظومة القياس العامة، وأن تؤدي دور المواصفات القياسية لريادة التوصيف للمولدات النانوية الكهروضغطية المختلفة. وتتمتع هذه الدراسة بأهمية كبيرة لبحث أعمق وأوسع للمولدات النانوية بهدف استخدامها في التطبيقات العملية.

5.4 المراجع

- [1] R.S. Yang, Y. Qin, C. Li, L.M. Dai and Z.L. Wang, *Appl. Phys. Letts.* **94**, 022905 (2009).
 [2] R.S. Yang, Y. Qin, L.M. Dai, Z.L. Wang, *Nature Nanotechnology* **4**, 34-39 (2009).

الفصل السادس: المولدات النانوية ذات الخرج الكبير – مصنوعات السلك النانوي الشاقولي

على الرغم من أن المبادئ المدرجة في الفصل الرابع قابلة للتطبيق بهدف تجميع الطاقة [1]. إلا أن استطاعة الخرج الناتجة من خلال استخدام سلك نانوي مفرد، صغيرة جداً. لهذا، كان لابد من تطوير أساليب مبتكرة بغية تحقيق مقارنة أكثر، بحيث يمكن الحصول على قدر مميز من الاستطاعة. وسوف نقوم في هذا الفصل بعرض الأسلوبين اللذين جرى تطويرهما من خلال استخدام مصنوعات السلك النانوي المتراسة شاقولياً.

6.1. المولد النانوي المقاد بالأمواج فوق الصوتية

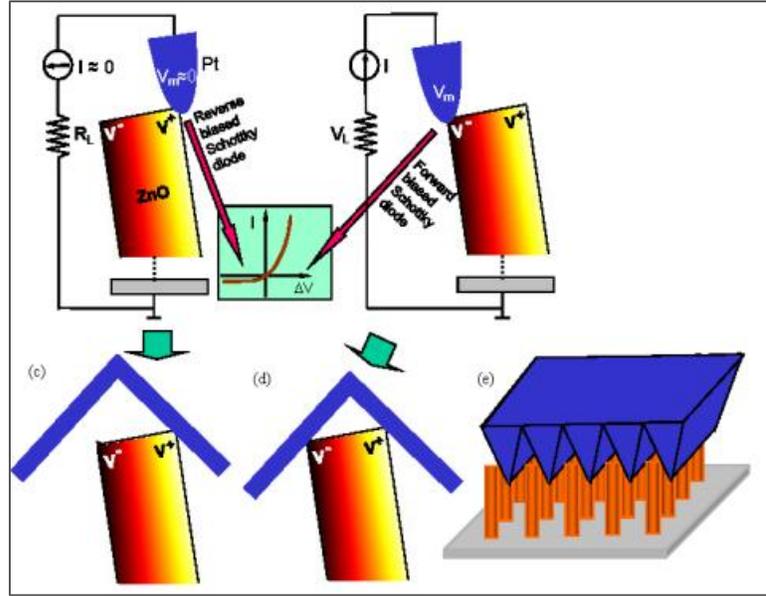
وكما هو الحال في الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية AFM، والذي يُعدُّ الأساس في التحريض الميكانيكي، كان لابد لنا من ابتكار تصميم يُحسِّن، وبشكل كبير، أداء المولد النانوي في المجالات التالية: علينا أولاً أن نلغي استخدام مجهر القوة الذرية بغية إحداث التشوه (الانفعال) الميكانيكي في الأسلاك النانوية، وعليه يمكن التوصل إلى توليد الاستطاعة بواسطة أسلوب ملائم وقابل للحركة وذي قيمة فاعلة وعلى مستوى عالٍ من الحداثة. وثانياً، مطلوب من جميع الأسلاك النانوية أن تولد كهرياء بشكلٍ متزامنٍ وباستمرار، ويمكن أن يتم تجميع كامل الكهرياء بشكلٍ فعال وإخراجها من هذه الأسلاك. وختاماً إذا كان لابد من تحويل الطاقة إلى كهرياء، وجب تهيئة هذه الطاقة على شكل موجة/أو اهتزاز صادر من الوسط المحيط حتى ولو كان تردد هذه الموجة/أو هذا الاهتزاز منخفضاً جداً، أي يكون هذا التردد مساوياً بضع وحدات من الهرتز (Hz). ولقد طورنا أسلوباً مبتكراً بغية معالجة التحديات ألفة الذكر.

6.1.1. لماذا المأخذ (الالكترود) على شكل متعرج (زكزاك)؟

يُبين (الشكل b,a1.6) الآلية التي يتمتع بها خرج الاستطاعة عندما يقوم الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية FAM بإدارة (قدح) السلك النانوي الكهروضغطي، وكما جرى إدراج ذلك في الفصل الرابع. وبغية استبدال الدور، الذي يؤديه الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية في حني السلك النانوي، قمنا في البداية باختبار الكترود على شكل V مقلوب، أي الكترود (i-V). ولدى تحريك الكترود (i-V) باتجاه الأسفل كما لو أنه مدفوع بتحريضٍ خارجي، انحنى السلك النانوي باتجاه الجانب الأيسر مثلاً. وعند حدوث نقطة التماس الأولى، ينشأ كمون موجب مرده إلى انفعال الشد الموضعي (الشكل c1.6). وفي مثل هذه الحالة، يبقى الكمون الكهروضغطي موجوداً ما دام التماس الموضعي منحازاً عكسياً بحاجز شوتكي، الذي لن يسمح بتدفق الشحنات. وعندما يزداد دفع الكترود للسلك النانوي، لينحني هذا الأخير بما فيه الكفاية، وليصل إلى الجانب الآخر من الكترود (i-V) (الشكل d1.6)، يكون التماس الموضعي منحازاً أمامياً بحاجز شوتكي. لهذا، يمكننا استبدال الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية بالكترود (i-V). ويمكن للكترود (i-V) أن يُطوَّر ليصبح على شكل متعرج (زكزاك) كما في (الشكل e1.6)، والذي يُصنع من السيلكون Si المغلف بمعدن البلاتين Pt.

لن يكون دور غلاف البلاتين في تحسين ناقلية الكترود فحسب، وإنما في خلق تماس شوتكي عند السطح البيئي مع أكسيد الزنك ZnO. ومن الناحية التجريبية يمكن لأي خليطة ناقلة للتيار أن تشكل الغلاف المعدني ما دامت تشكل حاجز شوتكي مع أكسيد الزنك. ويمكن للكترود المتعرج أن يؤدي دور مصفوفة متشكلة من عدة أطراف مستدقة متوازية لمجهر القوة الذرية. ولقد وضع الكترود، وجرى تمريره فوق مصنوعات السلك النانوي وعلى مسافة متحكم بها. ويتوقع أن تكون الكهرياء المولدة بواسطة الانحناء النسبي/أو الإزاحة النسبية بين الأسلاك النانوية والكترود من خلال توافر انحناء أو اهتزاز آخر، يُتوقع أن تكون هذه

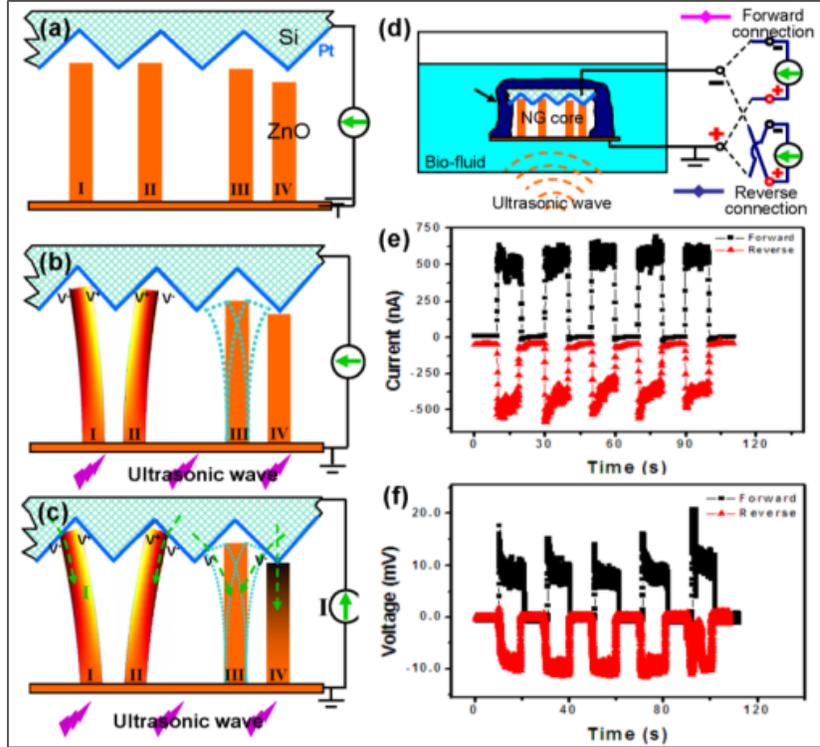
الكهرباء خرجاً بشكلٍ متزامنٍ ومستمر .



الشكل 1.6: (a) و (b) عملية توليد التيار من سلك نانوي كهروضغطي خاضع للتشوه (الانفعال) المحدث من قبل الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية. (c) و (d) فكرة إدخال الالكترود المتعرج (الزكزاك) من خلال تتبع الآلية الموضحة في الشكلين (a و b) لدى النقاط (تحصيل) الكهرباء المتولدة بواسطة الملايين من الأسلاك النانوية.

6.1.2. آلية العمل

يُبين (الشكل c-a2.6) أربعة تشكيلات ممكنة لإحداث التماس بين السلك النانوي والالكترود المتعرج (زكزاك). يجري حني الأسلاك النانوية I و II من الجانبين الأيسر والأيمن بالترتيب من خلال استخدام هذا الالكترود المتعرج. وبغض النظر عن اتجاهات الانحناء، فإن التيارات الناتجة عن كل من السلكين النانويين I و II، تضاف لبعضها البعض. أما السلك النانوي الثالث III، فقد جرى اختياره للتعامل مع الاهتزاز المُحرض من قبل الموجة فوق الصوتية كما هو موضح في (الشكل c2.6)، وذلك عندما يكون الجانب المضغوط للسلك النانوي الثالث III في وضع التماس مع الالكترود، وستحدث عملية التفريغ نفسها كما حدث في السلك النانوي الأول I، مما يسبب تدفق التيار من الالكترود إلى السلك النانوي. أما السلك النانوي الرابع IV، الذي يتمتع بارتفاع قصير، فإنه يخضع لانفعال ضغط من قبل الالكترود، دون أن يحدث أي انحناء في هذا السلك. وفي مثل هذه الحالات، يكون التوتر الكهروضغطي المتولد في أعلى السلك النانوي سالباً. وهكذا، يتشكل حاجز شونكي المنحاز إيجابياً عبر السطح البيئي المتشكل بين الالكترود - أكسيد الزنك، وعندئذٍ يمكن للالكترونات أن تتدفق بحرية عبر هذا السطح البيئي. وفي النتيجة، تتدفق الالكترونات من السلك النانوي إلى الالكترود المتعرج العلوي لدى حدوث الانفعال. وإذا ما عُدَّت عملية التفريغ هذه ذات مغزى، فإنها يمكن أن تشكل مساهمةً في التيار المقاس. ويكون تيار الخرج عبارة عن مجموع تيارات تلك الأسلاك النانوية، التي تسهم بشكل فعال في توتر الخرج، مع العلم أن توتر المولد النانوي يتم تحديده من خلال التوتر لسلك نانوي مفرد، ذلك لأن جميع الأسلاك النانوية تكون موصولة على التفرع.



الشكل 2.6: آلية عمل المولد النانوي المقاد بموجة فوق صوتية. (a) المخطط التوضيحي لكل من الالكتروود المتعرج (الزركازك) والنماذج الأربعة الممثلة لتشكيلات الأسلاك النانوية. (b) الكمون الكهروضغطي المتولد عبر السلكين النانويين I و II الخاضعين للدفع/ والانحناء من قبل الالكتروود لدى قيادته بالموجة فوق الصوتية، ولكن دون أن يحدث أي تدفق للتيار بسبب وجود حاجز شوتكي المنحاز عكسياً في السطح البيني المتشكل بين الالكتروود - السلك النانوي. ويكون السلك النانوي الثالث III في حالة اهتزاز تحت تأثير الموجة فوق الصوتية. أما السلك النانوي الرابع IV، فيكون خاضعاً لانفعال الضغط دون أن يتعرض لأي انحناء. (c) لدى تلامس الأسلاك النانوية لسطوح الأسنان المتاخمة لها، يكون حاجز شوتكي الموجود في السطح البيني المتشكل بين الالكتروود - السلك النانوي، يكون هذا الحاجز منحازاً إلى الأمام، وعندها سيحدث التفريغ الكهروضغطي فاسحاً المجال لمراقبة تدفق التيار في الدارة الخارجية. (d) رسم تخطيطي لكل من مولد نانوي يعمل داخل سائل حيوي ونموذجي التوصيلات، التي جرى استخدامها بهدف توصيف أداء المولد النانوي. وتمثل المنحنيات باللونين الأزرق والأزرق الإشارات المقاسة في حالة التوصيل الأمامي لمقياس التيار/التوتر (I/V) وحالة التوصيل العكسي لمقياس التيار/التوتر (I/V) بالترتيب. (e) و (f) تيار دارة القصر وتوتر الدارة المفتوحة، اللذان جرى قياسهما بواسطة نموذجي التوصيل، وذلك عندما جرى وصل الموجة فوق الصوتية بشكلٍ دوري وفصلها.

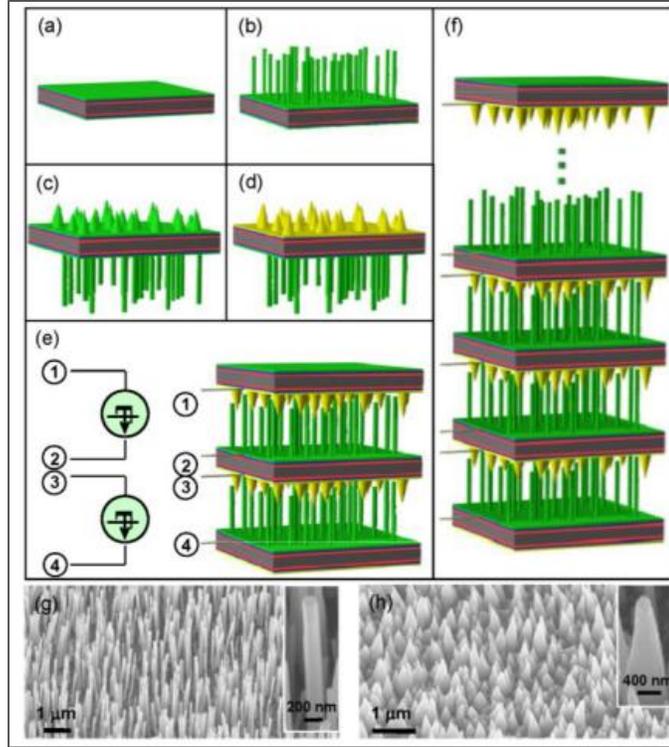
6.1.3. الخرج عندما يكون التردد 50 كيلو هرتز

جرى وضع المولد النانوي المغلف داخل حمام مائي بغية إجراء القياس لكل من تيار الدارة المغلفة وتوتر الدارة المفتوحة. طبقت الموجة فوق الصوتية ذات التردد 41KHz لكل 15 ثانية بشكلٍ دوري. ويبين (الشكل e2.6) تيار الدارة المغلفة عند وصل الموجة فوق الصوتية وفصلها. وتشير البيانات المستنبطة بوضوح إلى أن تيار الخرج يبدأ بالتولد من قبل المولد النانوي نتيجة للتحريض، الذي تقوم به الموجة فوق الصوتية، بينما يتزامن تولد التوتر مع دورة التشغيل لمولد الموجة فوق الصوتية. ولقد تمت مشاهدة النموذج نفسه لخرج توتر الدارة المفتوحة أيضاً، وكما هو موضح في (الشكل f2.6). ويبيدي خروج كلا التيار والتوتر مستويات عالية لهذا النوع من المولدات النانوية، إذ تصل قيمة التيار إلى نحو 500nA، ومقدار التوتر إلى نحو 10mV. وإذا أخذت بالحسبان المساحة الفعالة للمولد النانوي، والتي تساوي 6mm²، فإن ذلك يكافئ كثافة توليد للتيار تصل إلى نحو 8.3μA/cm².

وهنا لا بد من الإشارة إلى أن تشغيل المولد النانوي لا يرتبط بظاهرة الطنين resonance الميكانيكي كما هو مطلوب من بعض تقانات تجميع الطاقة، إذ جرى التعويض عن هذه الظاهرة من خلال إنشاء عملية التشغيل هذه على قاعدة الانحناء الميكانيكي. ويسمح مثل هذا التصميم للمولد النانوي بأن يعمل ضمن مجالٍ واسعٍ من الترددات، وذلك بدءاً من التردد لبضع هرتزات إلى مثيله بالكيلوهرتز KHz، حتى إلى الميغاهرتز MHz. وتوسّع هذه القابلية العالية للتكيف (التأقلم) عند المولد النانوي من مجالات استخدامه في تجميع الطاقة الميكانيكية المختلفة.

6.2. عملية التكامل بين الطرف النانوي – إلى – السلك النانوي

وكما جرى عرضه في المقطع السابق من هذا الفصل، يؤدي الالكتروود المتعرج (الزركازك) دور مصفوفة لأطراف مدمجة على التفرع بغية الحصول على توليد مستمر للكهرباء من قبل الأسلاك النانوية الفعالة، وتجميع هذه الكهرباء وتوفير خرجها. ولقد أظهر التصميم المعروف في هذا المقطع أنه وعلى الرغم من أن الأسلاك النانوية تتمتع بارتفاعات غير منتظمة وتوزع عشوائي على الركازة، إلا أن ذلك لم يحل دون إمكانية منع القسط الأكبر من هذه الأسلاك النانوية من المساهمة في عملية تحويل الطاقة. وتتمتع تقانة التغليف بأهمية خاصة بغية المحافظة على مسافة فراغ محددة بالضبط بين الالكتروود المتعرج (الزركازك) ومصفوفات السلك النانوي، بحيث تكون هذه المسافة كبيرة لدرجة أنها تعدّ كافيةً للسماح للأسلاك النانوية لأن يتم حنيها/أو انحرافها بحرية، لكن هذه المسافة يجب أن تكون صغيرة بما فيه الكفاية بغية التأكد من تحقيق تماس بين الأسلاك النانوية والالكتروود. نعرض في هذا المقطع نهجاً جديداً للمولد النانوي، حيث يتألف من زوج من المسابر النانوية المدمجة صنّعت من معدن على شكل هرم، وجرى تغليف رأس الهرم بكلّ من مصفوفات طرف نانوي من أكسيد الزنك على شكل هرم أيضاً (NTP) ومصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك على شكل مشور سداسي [4,3]، والتي جرى نسجها باستخدام طريقة كيميائية، وعند درجة حرارة أقل من 100°C على سطحين من الركازة المشتركة بالترتيب. فإذا جرى لصق إحدى القطع فوق قطعة أخرى لمثل هذه البنية، بحيث توضع هذه القطع على شكل قطعة تلو الأخرى لتشكّل فرشاة، تولّد تيار مباشر من خلال تحريض هذا البناء الطبقي باستخدام الموجات فوق الصوتية. ولقد جرى عرض مولد نانوي مدمج من أربع طبقات لتوليد استطاعة خرج تتمتع بكثافة مقدارها $0.11 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ وتوتر مقداره 62mV.



الشكل 3.6: إجراءات التصميم والتصنيع للمولدات النانوية متعددة الطبقات والنمو المنطقي لكل من سلك نانوي من أكسيد الزنك ومصفوفات طرف نانوي ذي شكل هرمي من أكسيد الزنك ZnONTp. (a) الركيزة المصنعة بعد تغطيتها بطبقة من بذور $ZnO(CH_3COO)_2$. (b) نمو مصفوفة سلك نانوي ذي شكل منشور سداسي بطريقة كيميائية رطبة على أحد جانبي السلك. (c) نمو مصفوفات لطرف نانوي ذي شكل هرمي NTP على الجانب الآخر للسلك. (d) تلبس مصفوفات الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي بطبقة من الذهب Au بطريقة الرشاشة بالبلازما المغنترونية. (e) مولد نانوي مؤلف من طبقتين صُنعت من خلال لصق ثلاث طبقات من بنيات رقايقية (رقاقات) الموضحة في الشكل (d). حيث تقابلت مصفوفات الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المغلف بالذهب وتداخلت مع مثيلاتها لسلك نانوي عارٍ (غير مغلف). ويُعد الجانب الأيمن الرمز التصميمي لتمثيل المولدات النانوية. (f) مولد نانوي متعدد الطبقات وثلاثي الأبعاد، جرى دمجه من خلال لصق عدة طبقات من بنيات رقايقية (رقاقات). (g) صورة لمصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك ذي شكل المنشور السداسي، حيث جرى التقاط هذه الصورة بالمجهر الإلكتروني الماسح بزواوية ميل تساوي 60° ، وجرى إنماء هذه المصفوفات بطريقة كيميائية. (h) صورة لمصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك ذي الشكل الهرمي، حيث جرى التقاط هذه الصورة بالمجهر الإلكتروني الماسح بزواوية ميل 60° ، وجرى إنماء هذه المصفوفات بالطريقة الكيميائية. وتبين مجموعة الأشكال الداخلية على أنها صور جرى التقاطها بالمجهر الإلكتروني بتكبير عالٍ لكل من السلك النانوي المفرد والطرف النانوي ذي الشكل الهرمي.

6.2.1 طريقة التصنيع

جرى في البداية تصنيع المولدات النانوية باستخدام طريقة إنماء منطقية لمصفوفات أكسيد الزنك، حيث جرى التحكم بكل من شكل نمو هذه المصفوفات واتجاهها على رقايق سليكونية Si مصقولة ومزدوجة الجانب. عُلفت الرقايق بفيلم من أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 ثخانتها 100nm باستخدام طريقة الترسيب الطبقي الذري، الذي يؤدي دور الطبقة العازلة بهدف تأمين استقلالية العمليات المتعلقة بالمولدات النانوية، وبغية إنشاء هذه المولدات على شكل طبقات متاخمة لبعضها لبعض. بعد ذلك يُرسب على الرقايق طبقة من معدن الكروم Cr ثخانتها 20nm باستخدام طريقة الرشاشة بالبلازما المغنترونية ذات التيار المستمر، حيث يتم الترسيب على السطحين العلوي والسفلي ما عدا السطح الجانبي. ثم ألحق ذلك بترسيب طبقة من أكسيد الزنك ثخانتها 50nm بواسطة الرشاشة المغنترونية بالتردد الراديوي، حيث جرى ترسيب هذه الطبقة على طبقات الكروم السابقة في السطحين العلوي والسفلي ما عدا السطح الجانبي. ولا تؤدي طبقة الكروم دور اللاصق لضم كل من طبقة أكسيد الألمنيوم وطبقة أكسيد الزنك معاً فحسب،

وإنما تشكل إلكتروداً مشتركاً لتجميع الشحنات ونقلها عبر كلٍ وأي من الوصلات النشطة، التي يُدمج فيها السلك النانوي/والطرف النانوي ذو الشكل الهرمي NW/NTP.

جرى إنماء مصنوعات متراسة من أكسيد الزنك بواسطة طرائق كيميائية على جانبي الرقاقة السيلكونية مع تعديل بسيط بغية الوصول إلى أشكال منطقية ومرغوب بها. جرى غسل الرقاقة من الجانبين بمحلول الإيثانول ذي درجة الحرارة 4°C وتركيزه 0.5 ميلي مول/لتر من أسيتيت الزنك $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ، بعد ذلك جرى تحميص هذه الرقاقة في درجة الحرارة 350°C لمدة 15 دقيقة لتشكيل طبقة منسوجة من بذور أكسيد الزنك في المستوى (0001)، التي تقود إلى إنماء كل من الأسلاك النانوية والأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي من أكسيد الزنك. ويمكن أن تتباين كثافة بذور أكسيد الزنك فيما بينها من خلال استخدام تراكيز مختلفة لأسيتيت الزنك في محلول الإيثانول. ويمكن أن يتأثر شكل مصنوعات أكسيد الزنك من خلال استخدام درجات حرارة إنماء مختلفة وفترات زمنية متباينة لهذه المصنوعات. عموماً، إذا جرى النمو في درجات حرارة منخفضة وفترات نمو طويلة، تشكلت الأسلاك النانوية الموضحة في (الأشكال g,b3.6)، في حين إذا جرى هذا النمو في درجات حرارة عالية نسبياً وفترات نمو قصيرة. نمت الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي الموضحة في (الأشكال h,c3.6). جرى الحصول على شكل نمو متحكم به لمصنوعات سلك نانوي/وطرف نانوي ذي الشكل الهرمي NW/NTP ZnO على جوانب مختلفة لرقاقة السيلكون من خلال جعل الركازة تطفو على سطح محلول مغذٍ خلال عملية النمو، والذي يتكون من 5mM من نترات الزنك $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ وهيكساميثالين تترامين بنسبة 1 إلى 1 من كليهما. ولهذا، يمكننا تطبيق شروط نمو مختلفة (مثلاً، جرى تسخين المحلول المغذي لدرجة الحرارة 100°C لمدة 24 ساعة لإنماء الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي، أو إلى الدرجة 70°C لمدة 48 ساعة، لإنماء أسلاك نانوية ذات شكل الموشور السداسي)، حيث تمت عملية الإنماء بشكل مستقل لكل جانب. وختاماً، جرى تغليف الجانب الذي يحوي الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي، بشكل منتظم بطبقة ثخينة من الذهب 100nm بواسطة الرشاشة بالبلازما المغنطرونية لتشكيل مصفوفة الطرف المعدني.

صنع المولد النانوي من خلال لصق رقاقتين نانويتين ناميتين معاً، ومع اختراق جزئي للأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي المغلفة بالذهب إلى داخل الأسلاك النانوية كما هو موضح في (الشكل e3.6)، وبالطريقة نفسها جرى دمج مولد نانوي متعدد الطبقات، وذلك من خلال لصق طبقات عدة من مثل هذه البنيات، بحيث تكون الطبقة تلو الأخرى (الشكل f3.6). وتؤدي الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي المغلفة بالذهب، دور الأطراف المستدقة لمجهر القوة الذرية، حيث تعبر هذه الأطراف برفقٍ إلى داخل الفراغ الواقع تحت الأسلاك النانوية، تماماً كما لو أن وجهي الفرشاة متقابلان مع توافر زاوية صغيرة من التداخل المتطابق عند النهايات. ولا يتمتع مثل هذا التصميم بشرطٍ معين نحو تماثل الارتفاع للأسلاك النانوية، ولا يحتاج لترك فجوة خاصة تتمتع ببعيدٍ بين الطبقات، مما يُسهل التحكم بتغليف هذه الطبقات. ولقد جرى عزل كل طبقة من الطبقات المتاخمة لها بواسطة فيلم رقيق من أكسيد الألمنيوم. وبعد إجراء التوصيل إلى أسلاك الخرج، جرى إغلاق البنية بكاملها وتغليفها بمادة صمغية مرنة من الإيبوكسي، وذلك بهدف منع تسرب أي سائل إلى داخل هذه البنية. وخلال عملية توليد التيار، شكل الجانب الذي يحوي مصنوعات سلك أكسيد الزنك النانوي العاري، شكل هذا الجانب الإلكتروني الموجب، في حين كان القطب السالب عبارة عن الجانب الذي يحوي مصنوعات الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المغلف بالذهب.

6.2.2. آلية التشغيل

يمكن للعديد من الظواهر أن تنحصر في عملية توليد الطاقة: أي كهرباء الاحتكاك (تريبو الكتريك) الناتجة عن الاحتكاك، والكهرباء الحرارية (بيرو الكتريك) الناتجة عن تغير في درجة الحرارة، والكهرباء الضغطية (بيزو الكتريك) الناتجة عن إحداث

الانفعال في المادة. أما المساهمة من كهرياء الاحتكاك، فقد أُلغيت من موقعنا الإلكتروني المباشر (in-situ)، إذ جرى إجراء التصوير الضوئي لعملية المراقبة بمجهر القوة الذرية لتوليد الطاقة من سلك نانوي مفرد، وأجريت قياساتنا باستخدام أسلاك من كلٍ من أكسيد التنغستن WO_3 والسيلكون Si وأنايب الكربون النانوية. وكذلك الحال بالنسبة لظاهرة الكهرياء الحرارية، إذ كانت درجة داخل حجرة الأمواج فوق الصوتية (والتي يعادل حجمها تقريباً غالوناً واحداً one gallon~)، كانت درجة الحرارة منتظمة بدقة، وليس هناك بالتأكيد أي تدرج حراري عبر المولد النانوي الذي لا يتعدى مقاسه بضع ميليمترات.

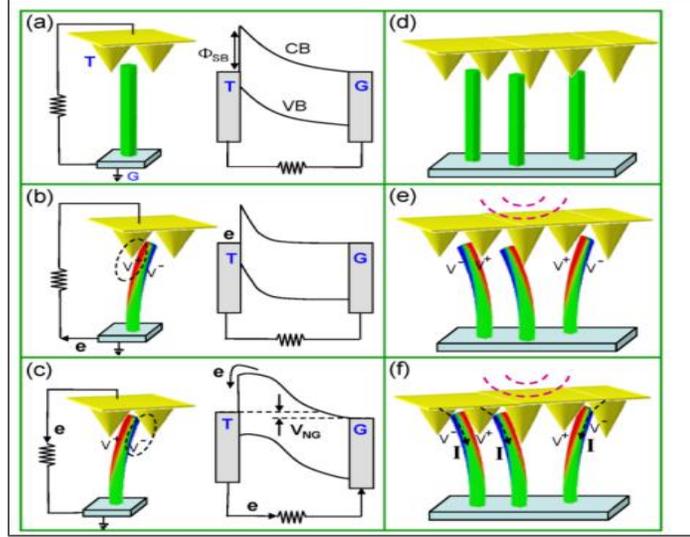
يمكن فهم تحويل الطاقة من خلال التغير الحاصل في بنية النطاق الموضعي المحرّض بواسطة الكمون الكهروضغطي، والذي يُعدُّ غير متناظر عبر السلك النانوي، حيث يتمتع الأخير بجانب ممتد (مشدود) موجب وجانب مضغوط سالب. ولما كان معدن الذهب Au يتمتع بتابع تشغيل من مرتبة 4.8eV، والذي يُعدُّ أكبر من التجاذب الإلكتروني لأكسيد الزنك (والذي هو من مرتبة 4.5eV)، تشكل حاجز شوتكي (يرمز لارتفاعه بالرمز ϕ_{SB}) في السطح البيئي (الشكل 4.6a). ويوجد حاجز شوتكي حالاً وعندما يكون الطرف النانوي ذو الشكل الهرمي في وضع التماس مع السلك النانوي، وعندما يدفع الطرف النانوي ذو الشكل الهرمي السلك النانوي ببطء ينشأ حقل انفعال عبر عرض السلك النانوي، بحيث يكون سطحه الخارجي خاضعاً لانفعال شد، ومثيله الداخلي خاضعاً لانفعال ضغط. ويولد هذا الانفعال غير المتناظر كموناً كهروضغطياً غير متناظر عبر عرض السلك النانوي، بحيث يكون هذا الكمون سالباً V^- في السطح المضغوط وموجباً V^+ في مثيله الممتد (المشدود)^{12,3}. وبعد ذلك مهماً كي نلاحظ أن الكمون الكهروضغطي يجري توليده بواسطة الأيونات داخل البلورة عندما يكون السلك النانوي خاضعاً لانفعال ميكانيكي، والذي يمنعها من الحركة بحرية. ويمكن لهذه الأيونات أن تُحجب جزئياً داخل السلك النانوي من قبل الحوامل الحرة، ولكن لا يمكن تعديلها أو إلغاؤها بشكل كامل¹³. وهذا يعني أن الكمون الكهروضغطي يبقى محتفظاً بوجوده ولو أخذ بالحسبان وجود عوامل معتدلة للشحنات الحرة داخل السلك النانوي من أكسيد الزنك. وعندما يكون الطرف النانوي ذو الشكل الهرمي في وضع التماس مع السطح المشدود من السلك النانوي، الذي يتمتع بكمون موضعي أعلى من مثيله للطرف النانوي ذي الشكل الهرمي، يقوم حاجز شوتكي المنحاز عكسياً (ϕ_{SB}) بمنع تدفق الإلكترونات عبر السطح البيئي (الشكل 4.6b). ولما كان الكمون الضغطي يرتفع مقداره بسرعة عالية جداً داخل السلك النانوي¹³ ما دام الطرف النانوي ذو الشكل الهرمي يدفع السلك النانوي، وفي كل لحظة خلال عملية الدفع، وستكون كامل المنظومة في حالة توازن. وبكلمات أخرى، إذا أخذنا لقطات لكل لحظة من هذه العملية، على سبيل المثال (الشكل 4.6b)، تكون المنظومة في حالة توازن. ويحدث ذلك لأن سرعة تدفق الشحنات أعلى بقليل من سرعة المسح للطرف النانوي. ولدى ازدياد درجة انحناء الأسلاك النانوية، يمكن للجانب المضغوط من السلك النانوي أن يصل إلى الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المتاخم له. وهكذا، يؤدي الكمون الكهروضغطي الموضعي السالب V^- داخل السلك النانوي إلى حدوث تعديل موضعي في الشكل لنطاق التوصيل للسلك النانوي بالقرب من الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي (الشكل 4.6c).

يمتد الكمون الكهروضغطي تقريباً عبر كامل طول السلك النانوي، وذلك وفقاً للحسابات النظرية، ويكون أكثر تعديل أهمية في شكل النطاق واقعاً بالقرب من منطقة تماس شوتكي، وذلك بسبب ازدياد الارتفاع للنطاق الموضعي. وإذا كان الارتفاع في قيم طاقة الكمون الموضعي كبيراً بما فيه الكفاية، وكما هو محدد من خلال درجة انحناء السلك النانوي، تستطيع الحوامل من النمط n (n-type)، المترابطة موضعياً داخل السلك النانوي، تستطيع أن تتدفق بسرعة عبر منطقة التماس إلى داخل الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي، والتي تولّد تدفقاً دائرياً للإلكترونات داخل الدارة الخارجية، على سبيل المثال تولّد تيار الخرج. ومن ناحية توافر زوج وحيد من كلٍ من الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي والسلك النانوي، تكون هذه العملية عابرة. ولكن إذا ركزنا على المجالات الإحصائية لآلاف الأزواج من كلٍ من الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي والسلك النانوي، فإن هذه العملية ستكون في حالة استقرار مع توافر خرج للتيار يكون مستمراً ومستقرّاً. وأما الدور، الذي أداه حاجز شوتكي، فيمكن في منع تدفق

الالكترونات من الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي إلى داخل السلك النانوي، والذي يشكل البنية الأساس للحفاظ على الكمون الكهروضغطي وإزالة الالكترونات الحرة المتجهة من السلك النانوي إلى داخل الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي. وأما الدور المؤدى من قبل الكمون الكهروضغطي، فيمكن في دفع الالكترونات من السلك النانوي لأكسيد الزنك للتغلب على طاقة العتبة عند السطح البيئي الواقع بين الذهب وأكسيد الزنك، وتعتبر إلى داخل الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المعد من الذهب. ولن يستطيع الكمون الكهروضغطي أن يحدد بشكل مباشر مقدار توتر الخرج.

من أجل عمل المولد النانوي المقاد بالموجة فوق الصوتية، فإن هناك الآلاف إلى الملايين من الأسلاك النانوية، التي تشكل الخرج الكهربائي ضمن طور عشوائي. وعلى الرغم من أن كل سلك نانوي يؤخذ بالحسبان على أنه في حالة عدم توازن/أو في حالة عابرة، إلا أن المعدل الإحصائي للآلاف من هذه الأسلاك يمكن عدّه وكأنه في حالة استقرار ويتمتع بخرج مستمر ومتوازن، ويمثل العملية الحاصلة في الخلايا الشمسية، التي يمكن لفوتون واحد أن تخلق فيها الكتروناً واحداً فقط أو بضعة الكترونات، والتي يمكن أن تشكل نبضة كهربائية، ولكن يمكن ان يتشكل تيار مستمر إذا اصطدمت آلاف الفوتونات بالخلية ضمن طور عشوائي. وتطبق هذه الفكرة بغية فهم توتر الخرج للمولد النانوي. وكما هو موضح في (الشكل c4.6)، إذ كلما ازداد عدد الالكترونات، التي جرى ضخها إلى داخل الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المغلف بالذهب AuNTP، ارتفع سطح فيرمي الموضوعي من خلال الالكترونات المتراكمة مع الأخذ بالحسبان المساهمة الإحصائية من جميع الأسلاك النانوية، وكما تمت مناقشته أعلاه. لذا، يتم إملء توتر الخرج النظري من خلال الفارق بين طاقات فيرمي للطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المغلف بالذهب في أعلى السلك النانوي من أكسيد الزنك وفي أسفله، وكما هو موضح بالرمز V_{NG} في (الشكل c4.6). ومن الناحية العملية، يؤخذ بالحسبان كل من مقاومة منطقة التماس وسعة المنظومة وتسريبات التيار الممكنة، والتي جميعها تعمل على خفض خرج التوتر ليتم قياسه.

لدى تعرض المولدات النانوية لتحريض موجة فوق الصوتية داخل حمام مائي، تسبب هذه الموجة فوق الصوتية اهتزازاً شاقولياً أو جانبياً لرقائق السيلكون و/أو أن تسبب اهتزازاً لأسلاك أكسيد الزنك النانوية، وبالتالي انحناء/أو انحراف نسبيين للأسلاك النانوية لكونها أُجبرت على ذلك من قبل الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي المغلفة بالذهب (الشكل e3.6). وتعتمد درجة الانحناء/أو الانحراف على كثافة الموجة فوق الصوتية. لذا، سوف يسبب التباين في الموجة فوق الصوتية تغيراً في إشارة الخرج، والذي تمت دراسته من قبل مجموعتنا، وسوف يتم نشره لاحقاً. لقد كانت الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي، وبشكل واضح، أثن وأمتن من الأسلاك النانوية (الشكل h,g3.6). وبغض النظر عن كون الأسلاك النانوية قد انحنى لجهة اليسار أو اليمين، فإن التيارات المتولدة من قبل جميع هذه الأسلاك النانوية، يُضاف بعضها إلى بعض بشكل مفيد، وكما هو محدد من خلال كل من حاجز شوتكي والنمو غير المحوري للأسلاك النانوية (الشكل f,e3.6)، بينما يتم تحديد توتر الخرج من خلال أداء السلك النانوي المفرد. يستمر وجود التيار الثابت المستقر مباشرة للخرج ما دام تطبيق الموجة فوق الصوتية مستمراً.

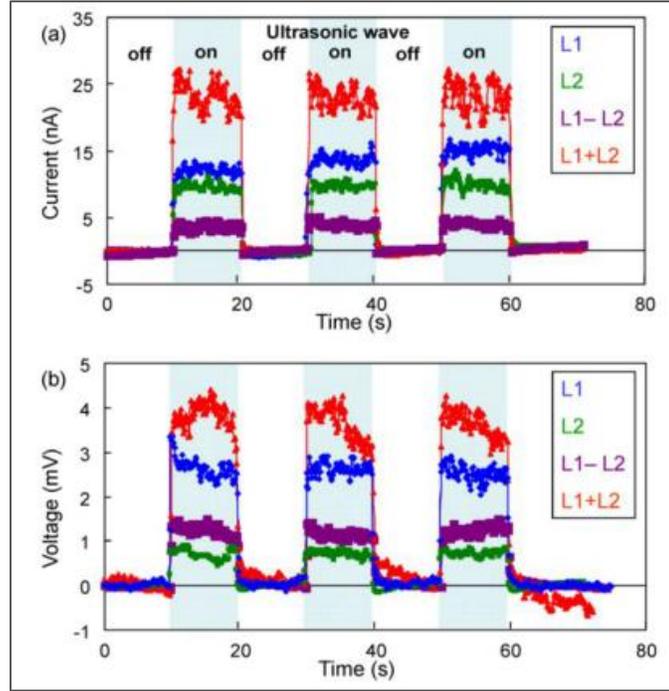


الشكل 4.6: المبدأ الفيزيائي لمولد نانوي يتمتع بطبقة فريدة، مع الأخذ بالحسبان مخططات النطاق، الذي جرى اعتباره من الحدود اليسرى/اليمنى للسلك النانوي. (a) المخطط التمثيلي لمولد نانوي ومخطط النطاق لطاقة الإلكترون الموافقة، حيث يرمز الحرف "T" للطرف النانوي ذي الشكل الهرمي المغلف بالذهب، ويرمز الحرف "G" للسلك النانوي المؤرض. (b) خضوع السلك النانوي للتحريض بالموجة فوق الصوتية، إذ يُلاحظ حركة نسبية (في الاتجاهين الشاقولي والجانبى) بين الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي والسلك النانوي. ونتيجةً لذلك، ينحني السلك النانوي، ويتعرض سطح التماس للتمدد (للشد). ويولد الكمون الكهروضغطي الموضعي الموافق حاجز شوتكي المنحاز عكسياً. ويمثل هذا المخطط حالة التوازن لمنطقة التماس الواقعة بين الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي والسلك النانوي. (c) عندما تكون الحركة النسبية، بين الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي والسلك النانوي، قوية بما فيه الكفاية، ينحني السلك النانوي بما فيه الكفاية أيضاً، بحيث يلامس الطرف النانوي ذا الشكل الهرمي المتاخم له بجانبه المضغوط. وعندئذٍ، يجعل الكمون الكهروضغطي الموضعي (السالب) حاجز شوتكي منحازاً إلى الأمام، ويدفع بتدفق الإلكترونات من السلك النانوي إلى داخل الطرف النانوي ذي الشكل الهرمي. وإذا أخذنا بالحسبان المساهمة الإحصائية لآلاف الإلكترونات المنبعثة من عدة أسلاك نانوية، تشكل لدينا تيار مستقر. ويمثل هذا المخطط حالة التوازن لمخطط الطاقة كون العديد من الأسلاك النانوية تسهم في توليد الطاقة. (d) المخطط التمثيلي لعدة مناطق تماس بين السلك النانوي والطرف النانوي ذي الشكل الهرمي مع وجود تغير خفيف في التوزع لمناطق التماس العلوية ومثلتها الجانبية. (e) إذا جرى تجاهل الأسلاك النانوية، وهي تنحني نحو اليسار أو اليمين، فإن سطوح التماس الأولى مع الأطراف ستكون سطوحاً مشدودة وتتمتع بكمون كهروضغطي موجب. (f) التيارات الكهربائية المتولدة بواسطة القوة الدافعة من قبل الكمون الكهروضغطي، وذلك عندما تمس السطوح المضغوطة للأسلاك النانوية سطوح الأطراف المتاخمة لها. ويمكن لهذه التماسات أن تكون مترامنة أو تتمتع ببعض التأخير، ولكن جميع التيارات العابرة المتولدة سوف تتدفق في الاتجاه نفسه، الذي هو عبارة عن الاتجاه من الأطراف النانوية ذات الشكل الهرمي إلى المولدات النانوية.

6.2.3. الأداء المُحسَّن

تبدي المولدات النانوية ذات الطبقات المدمجة الواحدة ثلو الأخرى ازدياداً في قيم كلٍّ من توتر الخرج وتياره [3]. فإذا ما جرى توصيل طبقتين مستقلتين من مولد نانوي على التفرع، مثلاً، توصيل الالكتروود ذي الرمز ① مع مثيله ذي الرمز ③، والالكتروود ② مع مثيله ④، كما موضَّح في (الشكل e3.6)، شكل تيار الخرج مجموع التيارات الصادرة عن كلا المولدين النانويين. وكما هو موضح في (الشكل a5.6) أعطت الطبقة الفريدة ذات الرمز NG L1 تيار الخرج من دائرة قصر مقداره تقريباً 12nA، وتعطي الطبقة الأخرى ذات الرمز NG L2 تياراً مقداره تقريباً 10nA وفي الشروط نفسها. وبعد وصل هاتين الطبقتين على التفرع، ازداد تيار الخرج ليصل معدله إلى 22nA (الشكل a5.6، المنحني الأحمر). وكان تيار الخرج الكلي مساوياً فقط 3nA (الشكل a5.6، المنحني البنفسجي)، والذي شكل الفارق بين تيارات الخرج الفريدة، وكما يُبين (الشكل a5.6) تكون إشارة الخرج في الحالة L1 + L2 غير مستقرة بعض الشيء مقارنةً مع الحالة L1 - L2. ويعود ذلك إلى تلك الحقيقة، والتي تكمن في أن الحالة L1 + L2 تعمل

على مضاعفة عدم الاستقرار الناجم عن كل من كثافة منبع الموجة فوق الصوتية وتردده، بينما تضعف الحالة L1 - L2 عدم الاستقرار هذا.



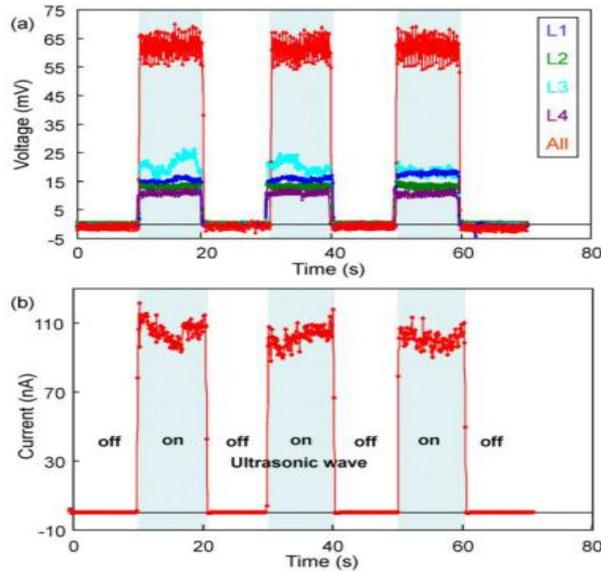
الشكل 5.6: إشارات تيار الخرج وتوتره لدى توصيل مولدين نانويين، يتمتع كلٌ منهما بطبقة مفردة، حيث جرى توصيلهما على التفرع ومثيله المعاكس، وعلى التسلسل ومثيله المعاكس، ويوضح في هذا الشكل الدمج (التكامل) ثلاثي الأبعاد للمولدات النانوية بهدف رفع قيم استطاعة الخرج. (a) تيار الخرج لدارة قصر، جرى قياسه من المولدات النانوية، التي جرى وصلها على التفرع ومثيله المعاكس. (b) توتر الخرج لدارة مفتوحة، جرى قياسه من المولدات النانوية، التي جرى وصلها على التسلسل ومثيله المعاكس. ولقد جرى تحديد المناطق في حالة تطبيق الموجة فوق الصوتية وفصلها. وكانت مساحة السطح لكل مولد نانوي مساوية 6mm^2 .

جرى وبطريقة مماثلة، توصيل على التسلسل لطبقتين من المولدات النانوية، مثلاً توصيل الالكتروود ② مع مثيله ③ في (الشكل e1)، حيث كان توتر الخرج مساوياً لمجموع توترات الخرج لكلتا الطبقتين الفريدتين. وكما هو موضح في (الشكل b5.6) أعطت الطبقة L1 توتر خرج مقداره تقريباً 2.6mV ، بينما أعطت مثيلتها L2 توتر خرج مقداره 0.8mV . وعندما جرى توصيل هاتين الطبقتين للمولد على التسلسل، جرى اختبارهما في الشروط نفسها، وكان معدل توتر الخرج مساوياً تقريباً 3.5mV (المنحني الأحمر في الشكل b5.6)، وكان عبارة عن مجموع توترات الخرج الفريدة لهاتين الطبقتين. أضف إلى ذلك، إذا قمنا بتوصيل هاتين الطبقتين على التسلسل المتعكس، مثلاً، توصيل الالكتروود ② مع مثيله ④ في (الشكل e1)، كان توتر الخرج مساوياً بالضبط 1.5mV (المنحني البنفسجي في الشكل b5.6)، والذي كان عبارة عن الفارق بين توترات الخرج الفردية لهاتين الطبقتين. إذا جرى دمج (تكامل) عدة طبقات لمولد نانوي، فإن الأخير يتمتع بكمونٍ عالٍ من أجل رفع توتر الخرج. فإذا كان توتر الخرج عالياً بما فيه الكفاية لتشغيل جهاز إلكتروني، مثل الصمام الثنائي "الديود"، فإن طاقة الخرج الكهربائية من المولدات النانوية، يمكن تخزينها للاستخدام المستقبلي. وبغية إيضاح الإمكانية التقانية لطريقتنا هذه، قمنا بتوصيل عدة مولدات نانوية على التسلسل. وكما هو موضح في (الشكل a6.6)، فقد جرى توصيل على التسلسل لأربع طبقات فردية من المولدات النانوية، هي L3، L4، L5، L6، وتتمتع بتوترات خرج لدارة مفتوحة، هي على الترتيب: 11mV ، 14mV ، 16mV و 20mV . ولقد كان توتر

الخرج الكلي مساوياً تقريباً 62mV كما كان متوقعاً. وكان تيار الخرج الموافق لدارة القصر نحو 105nA (الشكل 6.6b). وتم في الشكل S3 إدراج منحنيات خاصة التيار – التوتر ($I-V$) للطبقات L3، L4، L5 و L6 من المولدات النانوية. ويُظهر كل من هذه المنحنيات خواص شوتكي النموذجية. ولقد تبين أن الموجة فوق الصوتية ذات التردد 41KHz تستطيع أن تنفذ أكثر عمقاً، لهذا، لن يكون أثر التخميم هو المشكلة الرئيسية. وقد بلغت الاستطاعة العظمى لخرج الطبقات الأربع المدمجة لمولد نانوي المقدار 6.5nW لمساحة سطح تساوي 6mm^2 . ولقد جرى الحصول على كثافة استطاعة مقدارها $0.11\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

6.3 المولدات النانوية المدمجة (المتكاملة) بنهايات موصلة جيداً

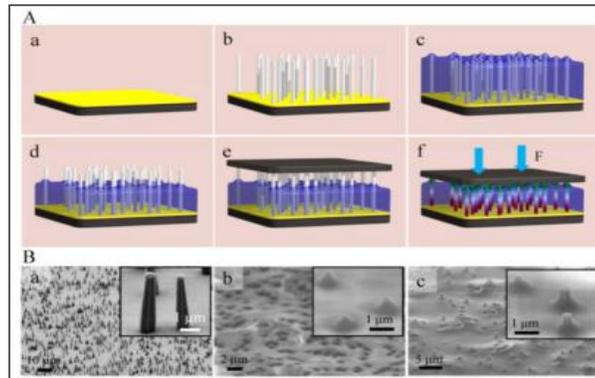
نورد فيما يلي نهجاً مبتكراً وأكثر تطوراً باتجاه الحصول على استطاعة خرج عالية لمولد نانوي ذي تيار متناوب (AC-NG)، حيث أُسس هذا المولد على مصنوفات مترابطة شاقولياً لسلك نانوي من أكسيد الزنك، والتي تشكل رباطاً صلباً/وتماساً عند نهايتها مع الالكترودات [6,5]. ويُطبق على أسلاك أكسيد الزنك النانوية انفعالاً دوريّ وذو تردد منخفض وغير محوري من خلال إحداث صدمة ميكانيكية خارجية بواسطة الالكترود العلوي، مما يُولد كموناً كهروضغطياً على طول الأسلاك النانوية، حيث ينجم هذا الكمون من داخل خرج كهربائي متناوب، وذلك عندما يوجد تماس شوتكي في إحدى النهايتين على الأقل. ويؤدي دمج (تكامل) ثلاث طبقات لمثل هذه المولدات النانوية ذات التيار المتناوب إلى ازدياد قيم توتر الخرج لها، لتصل إلى 0.243V ، وذروة كثافة الاستطاعة نحو $2.7\text{mW}/\text{cm}^3$. ولقد أظهرت عملية دمج (تكامل) المولد النانوي ذي التيار المتناوب مع سلك نانوي من أكسيد الزنك، المبني على حساسات نانوية لمقياس pH أو حساسات نانوية للأشعة فوق البنفسجية UV، أظهرت عملية الدمج هذه بوضوح منظومة نانوية "ذاتية التغذية"، حيث أنشئت هذه المنظومة حصراً باستخدام أسلاك أكسيد الزنك النانوية، والتي تبدي إمكانية للعمل على شكل وحدة مستقلة وموثوق بها ودائمة وتعمل ضمن بيئات يتوافر فيها انفعال/أو إجهاد ضغط ديناميكي يؤثر في هذه المنظومة، مثل بطانة الحذاء وإطارات السيارات وأسفل السجادة/أو الأرضية.



الشكل 6.6: توتر الخرج لدارة مفتوحة وتيار الخرج لدارة قصر، جرى قياسهما لمولد نانوي مدمج (متكامل) من أربع طبقات موصولة على التسلسل. (a) توتر الخرج لدارة مفتوحة، جرى قياسه من كل طبقة بشكل منفرد، ومن الطبقات الأربع الموصولة على التسلسل لمولد نانوي مدمج (متكامل). (b) تيار الخرج لدارة قصر، جرى قياسه من الطبقات الأربع الموصولة على التسلسل لمولد نانوي مدمج (متكامل). ولقد حُددت المناطق في حالة تطبيق الموجة فوق الصوتية وفي حالة فصلها. وكانت مساحة السطح للمولد النانوي مساوية 6mm^2 .

6.3.1. تصميم البنية

يمكن المفتاح إلى منظومة نانوية ذاتية التغذية في تصنيع مولد نانوي يُؤمّن كلاً من توتر الخرج/ واستطاعته عاليتي القيم. ويُبين (الشكل 7.6) مخطط مراحل تصنيع المولدات النانوية ذات التيار المتناوب AC-NGS ثلاثية الأبعاد المدمجة (متكاملة) والمغلقة. جرى إنماء مصفوفات مترابطة شاقولياً لمولد نانوي من أكسيد الزنك على سطح مستوٍ مغلف بالذهب من خلال استخدام الطريقة الكيميائية الرطبة (المقطع A في دعم المواد على الانترنت "SOM"). وباختصار، قمنا في البداية بترسيب أفلام رقيقة من التيتانيوم Ti والذهب على التوالي على رقاقة من السيلكون باستخدام الرشاشة المغنطونية (الشكل A7.6(a))، حيث جرى وعلى هذه الرقاقة إنماء أسلاك نانوية من أكسيد الزنك ذات القطر نحو 300nm والطول نحو 4µm عند درجة حرارة أقل من 100°C (الشكل A7.6(b) و B7.6(a)). وكان لابد من ضبط كثافة أسلاك أكسيد الزنك النانوية وأطوالها تماماً، وذلك من خلال ضبط معاملات التفاعل الكيميائي الموافقة (13). وبعد نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية، نُسجت طبقة من بولي ميثيل-ميثاكريليت (PMMA) لتغلف الأسلاك النانوية ولتَملأ الفراغات بين الأسلاك النانوية بشكل كامل (الشكل A7.6(c) و B7.6(b)). غُلقت أسلاك أكسيد الزنك النانوية بشكل كامل، ومن القمة إلى القاعدة بواسطة فيلم من المادة PMMA. ولقد حَسَّنت هذه العملية بشكلٍ كبيرٍ كلاً من استقرار كامل البنية ومتانتها الميكانيكية، ومنعت إمكانية حدوث تماس لدارة قصر بين الركازة والالكترود العلوي. وبغية كشف نهايات الأسلاك النانوية خارج الفيلم المُعدّ من PMMA، أُجريت عملية التتميش بواسطة بلازما الأكسجين، وباستطاعة ذات تردد راديوي مقدارها 10W لمدة 20 دقيقة، وذلك بهدف إزالة الفيلم PMMA من قمم الأسلاك النانوية (الشكل A7.6(d) و B7.6(c))، ولتترك خلفها أطراف من أسلاك أكسيد الزنك النانوية غضة ونظيفة وبنية ذات سطح خشن للفيلم PMMA أيضاً (الشكل B7.6(c) الشكل الداخلي المكبر). بعد ذلك جرى وضع قطعة من رقاقة السيلكون مغلفة بفيلم من البلاتين ثخانته نحو 300nm بتماسٍ مباشرٍ مع أسلاك أكسيد الزنك النانوية (الشكل A7.6(e))، حيث جرى توليد تماس شوتكي في السطح البيني. صُنعت وصلات كهربائية رصاصية قبل تغليف كامل البنية وتعبئتها بمواد طرية. وأجري القياس داخل قفص فارادي Faraday cage باستخدام محرك تحريض خطي لتوليد انفصال ميكانيكي بسرعة صدم تساوي 0.1m/s.



الشكل 7.6: (A) مخطط مراحل تصنيع مولد نانوي ذي تيار متناوب. (a) على رقاقة من السيلكون مغلفة بالذهب. (b) مصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك نمت عند درجات حرارة منخفضة بطريقة التحلل الحراري المائي (الهيدروحراري). (c) غلاف منسوج من PMMA يُغلف كلا الجزعَين السفلي والعلوي من مصفوفات السلك النانوي. (d) بعد إجراء عملية التتميش ببلازما الأكسجين، تكون نهايات الأسلاك النانوية مكشوفة غضة ونظيفة، لكن الجسم الرئيس للأسلاك النانوية وقيعانها لا تزال مغلفة بشكل كامل، مما يُحسن كثيراً من متانة البنية. (e) وضع إلكترود مستو مغلف بمعدن البلاتين Pt في أعلى الأسلاك النانوية بغية تشكيل تماس شوتكي المحكم. وعند تطبيق إجهاد غير محوري على الإلكترود العلوي، تضغط الأسلاك النانوية حالاً، ويؤدي انفصال الأسلاك النانوية المترابطة بلورياً إلى توليد كمون كهروضغطي ماكروي (جهرى) على طول المحور C باتجاه نمو الأسلاك النانوية. (B) صور بالمجهر الإلكتروني الماسح. (a) مصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك نمّاة على الركازة. (b) بعد تغليفها بالتغليف المنسوج من مركب PMMA. (c) بعد عملية التتميش ببلازما الأكسجين.

6.3.2. مبدأ العمل

يمكن مبدأ العمل للمولد النانوي ذي التيار المتناوب في دمج الخواص الكهروضغطية ونصف الناقلية أسلاك أكسيد الزنك النانوية. ولقد أظهرت الدراسات التي أجريت من قبل مجموعات عدة، أن الأسلاك النانوية التي تتمتع ببنية وزنتيت Wurtzite، تنمو محورياً وموازية للمحور C [9,8,7]. ويعني التراص البلوري للأسلاك النانوية أن التراص الكهروضغطي هو عبارة عن استجابة الأسلاك النانوية للإجهاد الخارجي. وتحت تأثير الانفعال المحوري، جرى فصل مراكز الشحنة المتأينة الساكنة داخل شبيكات (هياكل شبكية) لذرات الزنك – أكسجين المنتظمة على شكل رباعي وجوه، ويُسفر هذا الفصل لمراكز الشحنة عن وجود تدرج في الكمون الكهروضغطي على طول المحور C للسلك النانوي (الشكل A7.6(f)). ولما كانت الأسلاك النانوية نمت على الركيزة ومحاورها C متراسة على التوازي، فإن الكمونات الكهروضغطية، المتولدة على طول كل سلك نانوي، تتمتع بقابلية التوزيع نفسها، لهذا تتمتع هذه الكمونات بضغط بسلك ماكروي مُحسن. وعندما يُطبق إجهاد محوري على الالكترود العلوي، تكون الأسلاك النانوية واقعة تحت تأثير ضغط محوري مع توافر كمون كهروضغطي سالب عند طرف السلك، وهو عبارة عن جانب تماس شوتكي، وتوافر كمون كهروضغطي موجب عند أسفل السلك، وهو عبارة عن جانب التماس الأومي. وبغية تبسيط التحليل والمناقشة هنا، نفرض أنه ليس هناك أي مركبة لإجهاد القص، وما يؤثر بالاتجاه المحوري، لكلّ وأي سلك نانوي، هو عبارة عن ضغط صافٍ. ويرفع الكمون الكهروضغطي السالب من مكانة كل من نطاق التوصيل ومستوى فيرمي في الجانب العلوي للسلك النانوي مقارنة مع الجانب السفلي لهذا السلك. وسوف تتدفق الالكترونات من الجانب العلوي إلى مثيله السفلي عبر الدارة الخارجية. وعلى كل حال، يقوم حاجز شوتكي، الموجود في الجانب العلوي للسلك، بمنع الالكترونات من الانتقال عبر السطح البيني. لذا، تكون هذه الالكترونات محجوزة ومتراكمة حول الجانب السفلي للأسلاك النانوية. وبناءً على ذلك يرتفع مستوى فيرمي في الجانب السفلي من خلال الالكترونات المتراكمة حتى "يُحجب" الكمون الكهروضغطي بشكل كامل، وتصل مستويات فيرمي لكلا الجانبين إلى توازنٍ جديد مرة أخرى. وخلال هذه العملية، يُكشف عن تدفق الالكترونات عبر الدارة الخارجية على أنه نبضة تيار. وعند إزالة القوة الخارجية عن الالكترود العلوي وإزالة إجهاد الضغط عن الأسلاك النانوية، ينعدم الكمون الكهروضغطي داخل هذه الأسلاك. وعندها فإن تلك الالكترونات، المتراكمة في الجانب السفلي للسلك، سوف تتدفق عكسياً، ودون شك، عبر الدارة الخارجية إذا كان التسريب مهماً، مما يولد نبضة تيار في الاتجاه المعاكس.

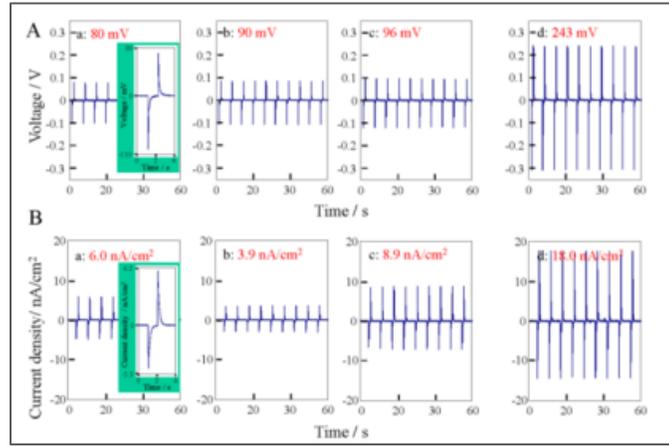
خلال كامل العملية، يماثل الدور، الذي يؤديه حاجز شوتكي، دور بوابة عازلة من طبقة أكسيدية، وتكون نحيفة لدرجة أنها تسمح بحدوث تفاعل متبادل بين الحقل الكهروضغطي داخل الأسلاك النانوية والالكترونات حرة الحركة، ولكنها تمنع الشحنات المتحركة داخل الدارة الخارجية من الذهاب عبر السطح البيني في منطقة تماس السلك النانوي – المعدن. يعمل الكمون الكهروضغطي على شكل "مضخة شحن" تدفع الالكترونات للتدفق. وبالأسلوب نفسه، تحدث الظاهرة نفسها إذا وقع حاجز شوتكي في الجزء الأسفل من الأسلاك النانوية أو في جانبيها. ويُعد وجود تماس شوتكي، وعلى الأقل في إحدى نهايتي الأسلاك النانوية، أساسياً لعمل المولد النانوي ذي التيار المتناوب.

6.3.3. الخرج المحسن

يمكن تحسين كل من توتر الخرج وتياره بشكل كبير من خلال إجراء عملية دمج (تكامل) خطي لعدد من المولدات النانوية ذات التيار المتناوب بعضها مع بعض. ولقد جرى توصيل على التسلسل ثلاثة مولدات نانوية ذات التيار المتناوب تتمتع بتوتر خرج منفرد مساوٍ 80 و 90 و 96 ميلي فولط على التوالي، وكان توتر الخرج مساوياً المقدار 0.243 V (الشكل 8.6 a)، والذي عدّ مساوياً تقريباً للمجموع العددي لتلك التوترات الثلاثة الفردية. وبشكل مماثل، كانت كثافة تيار الخرج المنفردة للمولدات النانوية

الثلاثة ذات التيار المتناوب مساويةً على التوالي: 6.0 و 3.9 و 8.9 nA/cm²، حيث جرى وصل هذه المولدات الثلاثة على التفرع، وكانت كثافة تيار الخرج لهذه المجموعة من المولدات على التفرع مساوية 18.0 nA/cm² (الشكل 8.6 b)، والتي عُدت مساويةً تقريباً للمجموع العددي لتلك الكثافات الثلاث الفردية.

يمكن تقدير الكثافة العظمى لاستطاعة المولد النانوي ذي التيار المتناوب من خلال استخدام قيم الذروة لكل من توتر الخرج وتياره لهذا المولد. من (الشكلين A 6.8 و B 6.8 c)، حيث: مقياس المولد النانوي ذي التيار المتناوب كان مساوياً تقريباً 4~ mm²، وتوتر الخرج = 96 mV، وتيار الخرج = 96 mV، وكان القطر الوسطي للسلك النانوي D = 400 nm، وطوله L = 4 μm، وعدد الأسلاك النانوية الكلي التي جرى إنشاؤها داخل المولد النانوي كانت نحو 75,000~، وهذا يعادل كثافة عدد الأسلاك في واحدة المساحة مساويةً (1.9 × 10⁶/cm²). وبافتراض متحفظ، أن 1/3 من هذه الأسلاك النانوية لديها فعلاً كهرباء في عملية متزامنة بشكل مثالي، فُدِّرت كثافة الاستطاعة بنحو 2.7 mW/cm³، والتي تساوي 6-11 ضعفاً من كثافة الاستطاعة المتولدة من الدعامة PZT (23 و 24).

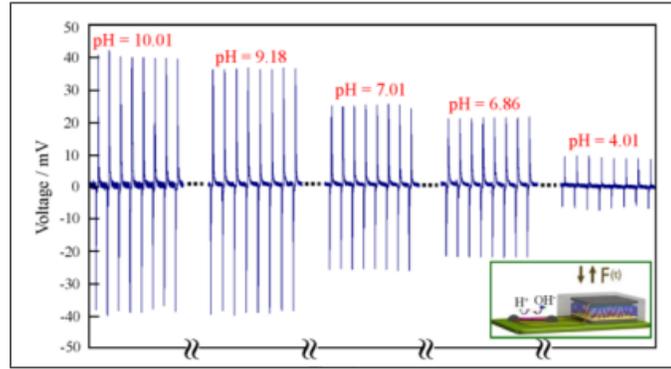


الشكل 8.6: (A) تحسين توتر الخرج لمولدات نانوية ذات تيار متناوب من خلال دمجها (تكاملها) على التسلسل. يعطي المولد النانوي ذو التيار المتناوب المنفرد توتر خرج مقداره (a) 80mV، (b) 90mV، (c) 96mV، (d) على التوالي. عند وصل المولدات النانوية الثلاثة ذات التيار المتناوب على التسلسل، يرتفع مقدار التوتر ليصل إلى 243mV، (B) التطابق الخطي لتيار الخرج عند وصل المولدات ذات التيار المتناوب على التوازي (التفرع). يعطي المولد النانوي ذو التيار المتناوب المفرد كثافة تيار خرج مقدارها (a) 6.0nA/cm²، (b) 3.9nA/cm²، (c) 8.9nA/cm² على التوالي. (d) لدى توصيل هذه المولدات النانوية الثلاثة ذات التيار المتناوب على التفرع، تزداد كثافة تيار الخرج لتصل إلى المقدار 18.0nA/cm². تُبين الصور الداخلية في الشكلين A(a) و B(a) مناظر مكبرة للنبضة المنفردة الوحيدة.

6.3.4. حساس نانوي ذاتي التغذية

جرى دمج (تكامل) مولد نانوي ذي تيار متناوب مع حساس نانوي مبني على سلك نانوي مفرد بغية إظهار منظومة نانوية ذاتية التغذية [5]. جرى وصل المولد النانوي ذي التيار المتناوب إلى حساس نانوي لقياس pH (27) مبني على سلك نانوي من أكسيد الزنك، أو حساس نانوي للأشعة فوق البنفسجية UV (28) مبني أيضاً على سلك نانوي من أكسيد الزنك، وجرى ضبط التوتر عبر الحساس النانوي (المقطع B من SOM). جرى إنشاء حساس قياس pH من خلال استخدام سلك نانوي من أكسيد الزنك مغلف بطبقة من نتريد السيلكون Si₃N₄ ثخانتها 10nm، وكانت نحيفة بما فيه الكفاية لتأمين التفاعل المتبادل الكهروساكن بين السطح الممتز للشحنات والحوامل داخل السلك النانوي. ولدى تغذية حساس قياس pH من خلال استخدام مولد نانوي ذي تيار متناوب، والذي يُولّد توتر خرج مقداره نحو 40mV~، تمت ملاحظة وجود حساسية واضحة لتغيير قيم pH الموضوعية (الشكل

(A9.6) وعندما كان محلول العزل قاعدياً (أي تتمتع pH بقيم عالية)، فإن الأيونات، المسيطرة على سطح الحساس النانوي، هي مجموعة أيونات الأكسجين O^- . ونجم عن مجموعات الشحن السالبة تلك مناطق نضوب عند سطح الحساس النانوي من أكسيد الزنك ذي النمط n، والتي زادت من مقاومة السلك النانوي من أكسيد الزنك. لذا، كان هبوط التوتر على السلك النانوي من أكسيد الزنك نسبياً مرتفعاً. لدى تغير محلول العزل من قاعدي إلى حمضي (أي تغير قيم pH من عالية إلى متدنية)، تغير سطح الحساس النانوي بالتدرج من مجموعات الأيونات O^- إلى المجموعات OH_2^+ . لذا، تنعدم مناطق النضوب في سطح السلك النانوي من أكسيد الزنك، مما يؤدي إلى انخفاض مقاومة السلك النانوي من أكسيد الزنك. ولدى قيامنا بتغيير قيم pH لمحلول العزل الاختباري من القيمة 10.01 إلى 9.18 ثم 7.01 إلى 6.86 وأخيراً إلى القيمة 4.01 (حيث بلغت دقة قياس pH المقدار ± 0.01 باستخدام أجهزة HANNA)، تغير هبوط التوتر على حساس قياس pH وفقاً لذلك (الشكل A9.6).



الشكل 9.6: عملية دمج (تكامل) لمولد نانوي ذي تيار متناوب (مقاسه 4 cm^2) مع حساسات نانوية بغية إظهار فقط المنظومة النانوية "ذاتية التغذية"، التي أساسها سلك نانوي. طبقت الصدمات الميكانيكية ذات التردد 0.16 Hz ، حيث نجم عن كل دورة صدم إشارة خرج مزدوجة موجبة - سالبة لكل من التوتر/التيار. ويكون هبوط التوتر عبر حساس قياس pH المبني على سلك نانوي مفرد، والذي يُغذى من مولد نانوي ذي تيار متناوب يتمتع بتوتر خرج مقداره نحو $\sim 40 \text{ mV}$ ، ويبدو هبوط التوتر تدريجياً عبر الحساس النانوي كتابع لقيم pH الموضعية. ولقد غُلف السلك النانوي من أكسيد الزنك بطبقة رقيقة جداً من نتريد السيلكون Si_3N_4 ، وأجري الاختبار في غضون ساعة واحدة، لهذا، كان تأثير التتميش من المحلول مهماً.

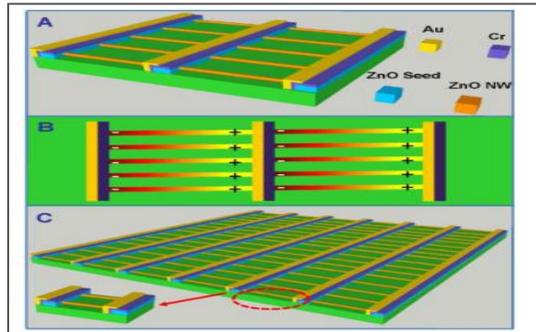
تتمتع المولدات النانوية ذات التيار المتناوب المصممة حديثاً من قبلنا، تتمتع بكل من الاستقرار الميكانيكي الكبير والمتانة العالية، وذلك يمكن تنفيذه من خلال إجراء عملية دمج (تكامل) ثلاثي الأبعاد لطبقات واحدة تلو الأخرى بغية استخدامها في التطبيقات في تلك الأمكنة التي يكون فيها إجهاد الضغط الديناميكي/أو انفعال الضغط الديناميكي متاحاً، مثل بطانة الحذاء وإطارات السيارة وتحت السجاد/والأرضية.

6.4. المراجع

- [1] Z.L. Wang, J.H. Song, *Science* **312**, 242 (2006).
- [2] X. D. Wang, J. H. Song, J. Liu, Z. L. Wang, *Science* **316**, 102 (2007).
- [3] S. Xu, Y. G. Wei, J. Liu, R. Yang, Z. L. Wang, *Nano Lett.* **8**, 4027 (2008).
- [4] Y. Qin, X.D. Wang, Z.L. Wang, *Nature* **451**, 809 (2008).
- [5] Xu, S.; Qin, Y.; Xu, C.; Wei, Y.; Yang, R.; Wang, Z. L. *Nature Nanotech.* **5**, 367 (2010).
- [6] D. Choi, M.Y. Choi, W.M. Choi, H.J. Shin, H.K. Park, J.S. Seo, J. Park, S.J. Chae, Y.H. Lee, S.W. Kim, J.Y. Choi, S.Y. Lee, J.M. Kim, *Adv. Mater.* **22**, 2187 (2010).
- [7] S. Y. Bae, H. W. Seo, D. S. Han, M. S. Park, W. S. Jang, C. W. Na, J. Park, C. S. Park, *J. Cryst. Growth* **258**, 296 (2003).
- [8] J. Jasinski, D. Zhang, J. Parra, V. Katkanant, V.J. Leppert, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 093104 (2008).
- [9] C. Liu, Z. Hu, Q. Wu, X.Z. Wang, Y. Chen, H. Sang, J.M. Zhu, S.Z. Deng, N.S. Xu, *J. Am. Chem. Soc.* **127**, 1318 (2005).

الفصل السابع: المولدات النانوية عالية الخرج – مصنوعات السلك النانوي الجانبية

استخدم في تصميم المولد النانوي ذي التيار المتناوب AC-NG المبني على سلك نانوي مفرد، الوارد في الفصل الرابع، استخدم سلك كهروضغطي يتمتع بتماسٍ صارمٍ في كلتا نهايتيه مع الالكترودات المعدنية، وهذا السلك محزماً جانبياً وجرى تغليفه على ركازة مرنة، إذ يمكن حني هذا السلك بواسطة تحريض ميكانيكي متوافر في بيئتنا المعاشية. ويظهر المولد ذو السلك المفرد نهجاً قوياً لتجميع طاقة ذات تردد منخفض تتولد بواسطة حركة الإنسان أو الحيوان. وعلى أية حال، تبقى طاقة الخرج للمولد النانوي ذي التيار المتناوب، المبني على سلك نانوي مفرد، تبقى محدودة جداً. ولما كانت التطبيقات العملية تستوجب رفع وتيرة التصميم للمولدات النانوية ذات التيار المتناوب AC-NGs، بحيث يمكننا دمج (تكامل) الاسهامات، التي تصنعها ملايين الأسلاك النانوية، بهدف تعزيز طاقة الخرج لهذه المولدات [1, 2, 3, 4]. وبغية عرض التصميم المتبع للمولدات النانوية المدمجة، فإننا نوضح في البداية مبدأ المولد النانوي ذي التيار المتناوب من خلال استخدام سلك نانوي مفرد، ولما كان قطر السلك النانوي أصغر بكثير من ثخانة فيلم الركازة، فإن هذا السلك سيخضع لانفعال شدة صافٍ عندما تكون الركازة في حالة تمدد (شد)، مما يؤدي إلى تولد هبوط في الكمون الكهروضغطي على طول السلك النانوي، بينما يشير محور C الموجب من اتجاه البلورة إلى الجانب ذي الكمون الكهروضغطي الأعلى. ويؤدي حاجز شوتكي، المتشكل على الأقل في إحدى نهايتي تماس السلك النانوي، يؤدي دور "البوابة"، التي تمنع تدفق الالكترونات عبر السطح البيئي الواقع بين السلك النانوي والمعدن NW-metal، لهذا تتراكم هذه الالكترونات في المنطقة المتاخمة لمنطقة التماس. وتعد هذه العملية عملية الشحن. وعندما تُحرر الركازة من تأثير الانفعال، يزول الانفعال عن السلك النانوي، ومن ثم يختفي الكمون الكهروضغطي المطابق لذلك الانفعال. وسوف تتدفق الالكترونات المتراكمة بالاتجاه المعاكس عبر الحمل الخارجي. وتُعد هذه العملية بعملية إزالة الشحنة (التفريغ). ويؤدي الكمون الكهروضغطي داخل السلك النانوي دور "مضخة شحن"، هي التي تدفع بالاتجاهين الأمامي والعكسي تيارات الالكترونات في الدارة الخارجية، وذلك وفقاً لإخضاع السلك النانوي للانفعال وإزالته عنه (تحريره منه). فإذا كان باستطاعتنا أن نجعل عمليات الشحن والتفريغ متزامنة للعديد من الأسلاك النانوية، يمكن لتوترات التيار المتناوب AC، المتولدة في هذه الحالة أن يُضاف بعضها لبعض بشكلٍ ما منتجةً خرجاً عالياً.



الشكل 1.7: تصميم مصفوفة مولد نانوي مدمج جانبياً (LING) من أسلاك نانوية. (a) مخططات بنية مولد نانوي مدمج جانبياً، حيث استخدم معدنا الذهب Au والكروم Cr لخلق كل من تماس شوتكي ومثله الأومي عند نهايتي المولد النانوي بالترتيب. (b) آلية عمل LING عند خضوعه لتشوه (انفعال) ميكانيكي. وتدل الإشارات (+) و(-) على قطبية الكمون الكهروضغطي الموضعي المتولد داخل الأسلاك النانوية. (c) مخططات مصفوفة LING صُنعت من عدة صفوف لأسلاك نانوية.

7.1. المولد النانوي المدمج (المتكامل) جانبياً (LING) [5]

هناك عدة عوامل يجب أن تؤخذ بالحسبان لإجراء عملية الدمج البتء لخروج (جمع خرج) العديد من المولدات النانوية المبنية على سلك مفرد. أولاً: يجب أن تكون مناطق التماس المعدني عند نهايتي مصفوفات السلك النانوي غير متناظرة بغية توليد تماس شوتكي في أحد الجانبين والتماس الأومي في الجانب الآخر (الشكل 1.7 b). وذلك يستوجب تتبع الآلية المعروضة أعلاه. ثانياً، يجب أن تكون التماسات عند كلتا النهايتين للأسلاك النانوية راسخة (متينة)، ويمكن تحقيقها من خلال إغلاق كاملٍ لنهايات الأسلاك النانوية مع المعدن المرسَّب، بحيث يمكن للتشوه (الانفعال) الميكانيكي أن يصبح نقله أكثر فعالية من الالكتروونات إلى الأسلاك النانوية. ثالثاً، لا بد لجميع أسلاك أكسيد الزنك النانوية ZnONWs، أن تتمتع بالاتجاه البلوري نفسه للتأكد من أن القطبيات للكومات الكهروضغطية، المتولدة داخل جميع الأسلاك النانوية، أن تكون متراسة. ولما كان السلك النانوي من أكسيد الزنك ينمو بشكلٍ عام موازياً للمحور C، ومع الأخذ بالحسبان عدم تجانس بنية فورترزيت لهذا السلك وخطيبته على كامل المحور [8, 6]C، فإن الأسلاك النانوية تحتاج لأن تنمو مباشرة على الركازة، وبمعدل نمو أكبر بكثير من مثيله من خلال عملية التجميع الكيميائي، إذ يعطي هذا الأخير ترصاً بالتوجيه، ولكنه لا يعطي ترصاً في القطبية البلورية. تولد الأسلاك النانوية المتراسة قطبياً كموناً كهروضغطياً ماكروياً. وخلافاً لذلك، يمكن للأسلاك النانوية، الموجهة بشكل عشوائي وفقاً للمحور C، أن تسفر عن حذف التيارات الكهربائية المتولدة. وختاماً، لا بد لجميع أسلاك أكسيد الزنك النانوية أن تكون ممتدة (مشدودة) ومحركة من هذا الشد بأسلوب مترامن، بحيث تتمتع القطبيات للكمون الكهروضغطي، المتولد من قبل جميع الأسلاك النانوية، تتمتع بالاتجاه نفسه وفي الوقت نفسه (الشكل 1.7 c)، مسفرةً عن وجود توتر خرج أعظم.

7.1.1. تصنيع الجهاز

جرى إنجاز التصنيع المفصل للمولد النانوي المدمج جانبياً LING بإتباع الإجراءات المتخذة من خلال الخطوات الخمس التالية (الشكل 2.7 a). تكمن الخطوة الأولى في تصنيع شرائط من أكسيد الزنك منمذجة ومغلقة بطبقة من معدن الكروم في جزئها العلوي، حيث تُصنع هذه الشرائط كطبقة بذور. وجرى تنظيف فيلم كابتون Capton ذي الثخانة $125 \mu\text{m}$ بكل من الأسيوتون وكحول الإيزوبروبيل والإيثانول باستخدام الأمواج فوق الصوتية، واستخدم هذا الفيلم ليكون ركازة. وتمت تغطية الفيلم بنسيج مقاوم للضوء بسرعة بلغت 3000rpm دورة في الدقيقة لمدة 40 ثانية. بعد ذلك جرى تحميص الفيلم لمدة 10 دقائق عند درجة الحرارة 110°C . جرى في البداية قولبة الفيلم باستخدام صف من الأفنعة. بعد ذلك، رُسبت طبقة من أكسيد الزنك ثخنها 300nm وأخرى من معدن الكروم 5nm. وختاماً، وبعد تطوير العملية والإقلاع بها، جرى تصنيع نموذج ذي شكل شريطي من أكسيد الزنك يتمتع بطبقة علوية من معدن الكروم (الشكل 2.7 a(1)).

وتكمن الخطوة الثانية بترسيب معدن الكروم فقط على أحد جانبي شريطة أكسيد الزنك، بينما ترك الطرف الآخر مكشوفاً. قمنا بمد الغلاف لكامل البنية بواسطة طبقة من المقاومة الضوئية، بعدها استخدم قناع لتغطية جانب واحد من شريطة أكسيد الزنك ومن خلال التحكم بالمكان المقابل. تلا ذلك إجراء الطباعة الحجرية من خلال توسيع جانب واحد فقط مكشوف من الشرائح. بعد ذلك جرى رشاشة طبقة من الكروم ثخنها 10 nm. وبيّن (الشكل 2.7 a(2)) بنية المنتج النهائي.

وفي الخطوة الثالثة، وكما هو مبين في (الشكل 2.7 a(3)) أنجز نمو مصفوفات لسلك نانوي من أكسيد الزنك من خلال استخدام محلول كيميائي عند درجة الحرارة 80°C . وبعد إخضاع هذا الفيلم لعملية التعتيق داخل المحلول لمدة 12 ساعة، انقلب لون سطح الفيلم إلى الأبيض مشيراً إلى أن الشرائط قد تم تغليفها بمصفوفات لسلك نانوي من أكسيد الزنك. وفي النهاية، جرى تغطيس الشرائط عدة مرات في ماء مقطر وتحميصها عند درجة الحرارة 100°C لمدة ساعة. ويبيّن (الشكل 2b) صورة نموذجية

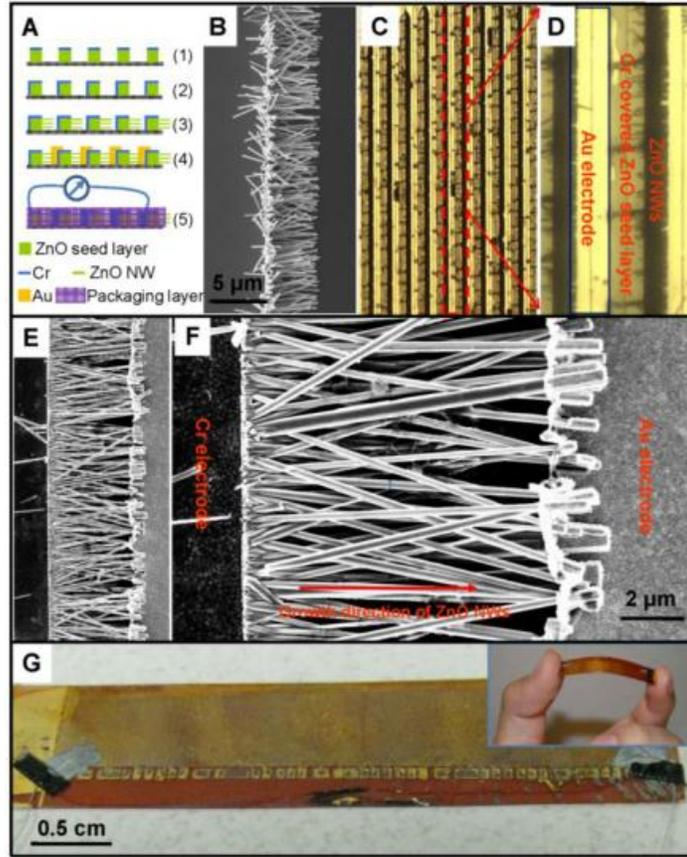
بالمجهر الإلكتروني الماسح لمصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك نمت أفقياً ولقد نمت غالبية أسلاك أكسيد الزنك النانوية أفقياً، بحيث كانت إحدى نهايتها مثبتة على طبقة البذور. ولقد وصل طول هذه الأسلاك النانوية إلى نحو 5 µm وقطرها إلى بضع مئات من النانومترات. وجرى التحكم بطول الأسلاك النانوية من خلال إعادة تأهيل محلول التعتيق وزيادة زمن عملية التعتيق هذه، بحيث تصل هذه الأسلاك بنموها إلى الالكتروود الآخر (الشكل 2.7.e).

وأما في الخطوة الرابعة، فقد جرى تصنيع الالكتروودات من ذهب من خلال استخدام تقنية الفناع، حيث جرى ترسيب الذهب عند الجانب، الذي تتوضع فيه طبقة الكروم (الشكل 2.7.a(4)). وجرى التحكم بثخانة طبقة الذهب بغية تحقيق توصيل جيد بين الأسلاك النانوية والالكتروودات (الشكل 2.7.f).

وختاماً، يمكن تغليف كامل البنية من خلال استخدام بوليمير عازل طري، مثلاً: استخدام مقاومة ضوئية من النوع (MicroChem PMMA 950K A2) – (الشكل 2.7.a(5)). وتقوم طبقة التغليف هذه بتثبيت أسلاك أكسيد الزنك النانوية بشكل راسخ إلى الركيزة، وتجعل الأسلاك النانوية متزامنة في التمدد (الشد) الميكانيكي وإزالته مع السطح الخارجي لفيلم كابتون. ويُعدُّ الشكلان c2 و d2 صوراً ملقطة بالمجهر الضوئي لمولد نانوي مدمج (متكامل) جانبياً جرى تصنيعه بشكل كامل. ولقد جرى وصل مصفوفات السلك النانوي من أكسيد الزنك بعضها مع بعض، أي نهاية الواحدة مع الأخرى، وذلك من خلال استخدام الكترودات نموذجية. ويبين (الشكلان 2.7.f,e) صوراً ملقطة بالمجهر الإلكتروني الماسح لبنية مولد نانوي مدمج جانبياً، جرى تصنيعه بشكل كامل. ويبين الشكل g2 مقياساً كبيراً للمولد النانوي المدمج جانبياً والمغلف بشكل كامل، أما الصورة المكبرة الجانبية ضمن هذا الشكل، فتظهر بوضوح مدى المرونة، التي يتمتع بها هذا المولد.

صُممت الإجراءات التجريبية التالية بشكل منطقي بهدف تصنيع مولد نانوي مدمج جانبياً يلبي جميع الشروط المطلوبة، كما هو موضح في (الشكل 1.7)، وتكمن الخطوة الأولى في تنمية مصفوفات سلك نانوي متراسة بلورياً من خلال استخدام طريقة كيميائية عند درجة حرارة أقل من 100°C (الشكل 2.a)[9]. ولقد جرى في البداية ترسيب مصفوفة شرائط لطبقات بذور أكسيد الزنك على ركيزة بوليميرية. وبعد تغليف أحد جانبي شرائط البذور وقمتها بمعدن الكروم بهدف منع النمو الموضعي لهذه الشرائط، نمت أسلاك أكسيد الزنك النانوية مباشرةً من طبقة البذور المكشوفة في الجانب الآخر من خلال استخدام طريقة كيميائية على طول الاتجاه، الذي غالباً ما يكون موازياً للركيزة (الشكل 2.7.b). ويتم التحكم بأطوال الأسلاك النانوية وفقاً لفترة نموها، وذلك حتى تقترب هذه الأسلاك من الجانب الآخر للالكتروود وتلامسه. بعد ذلك، جرى ترسيب طبقة من الذهب باستخدام تقنية الفناع المتراص بغية توصيل نهايات أسلاك أكسيد الزنك النانوية مع الالكتروود الذهبي (الشكلان 2.7.c,d) وتعدُّ دالة العمل للذهب أعلى من طاقة الألفة (التقارب) لإلكترون أكسيد الزنك، والتي (أي الطاقة) تدفع عادة لوجود توصيل شونكي بين أسلاك أكسيد الزنك النانوية ZnO NWs والالكتروود الذهبي. تشكل التماس الأومي بين أكسيد الزنك ومعدن الكروم عند النهاية الأخرى. وإذا جرى ترسيب فيلم ثخين من الذهب، اقتربت النهايات الطرفية للأسلاك النانوية بشكلٍ كاملٍ من الالكتروود الذهبي، وتماسكت معه، بحيث تصبح الأسلاك النانوية متمتعة بالمماناة الكافية في مواجهة التشوه (الانفعال) الميكانيكي دون أن تفقد تماسها مع الالكتروود (الشكلان 2.7.f,e).

يُولد الشد الميكانيكي للركيزة انفعالاً في الأسلاك النانوية، والذي يُؤدُّ كموناً كهروضغطياً ماكروبياً على طول الأسلاك النانوية، وذلك تبعاً للتراص البلوري لهذه الأسلاك النانوية. ولقد جرى دمج صفوف عدة من المولدات النانوية لتشكيل شريحة مرنة (الشكل 2.7.g).



الشكل 2.7: عملية تصنيع المولد النانوي المدمج جانبياً وتوصيف بنية هذا المولد. (a) مخططات النمو التدريجي لمصفوفات سلك نانوي مترابطة، واتجاهها موازٍ لسطح الركازة (انظر المقطع التجريبي في هذا الفصل للتعرف على التفاصيل). (b) صورة ملتقطة بالمجهر الإلكتروني الماسح لمصفوفة سلك نانوي من أكسيد الزنك نمت جانبياً. (c) و (d) صور ملتقطة بالمجهر الضوئي لبنية مولد نانوي مدمج جانبياً، استخدم في إنشائه عدة صفوف من مصفوفات السلك النانوي. (e) و (f) صور ملتقطة بالمجهر الإلكتروني الماسح لبنية لمولد نانوي مدمج جانبياً من صف مفرد. (g) صورة ضوئية منخفضة التكبير لمولد نانوي مدمج جانبياً، وعرض موضح لمرونة هذا المولد (الشكل الضمني المكبّر).

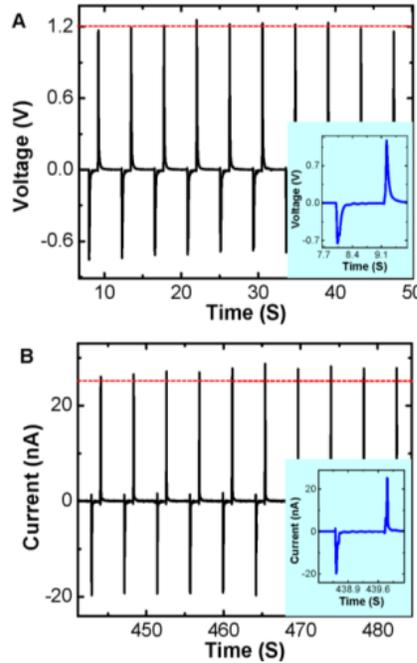
7.1.2. قياسات الخرج

بغية قياس مدى الأداء، الذي يتمتع به المولد النانوي المدمج جانبياً في تجميع الطاقة، استخدمت قوة خارجية بشكل دوري لإحداث تشويه (انفعال) في ركازة كابتون (Kapton)، بحيث يجرى من خلالها إخضاع الأسلاك النانوية لانفعال شد – إزالة شد بشكل دوري. ولما كانت ثخانة ركازة كابتون أكبر بكثير من قطر الأسلاك النانوية، فإن أي قوة دفع للركازة في مقطعها العرضي الأوسط بواسطة محرك ميكانيكي، سينجم عنها شد (تمدد) في السطح الخارجي لهذه الركازة، والذي يحدث انفعالاً شديداً صافياً عبر صفوف المولدات النانوية المنشأة في القمة. ولقد جرى حساب مثل هذا الانفعال بالاعتماد على كل من مدى التقوس الحاصل في فيلم الركازة المحني وثخانة هذا الفيلم (انظر موقع المواد الإضافية على شبكة الانترنت SOM). لقد قمنا من خلال تجاربنا بدفع ركازة كابتون، وذلك بإخضاعها لمعدل انفعال سريع نسبياً، ولكننا أبقينا على هذا الانفعال لمدة ثانية واحدة قبل إزالته. بعد ذلك، انتظرنا لمدة ثانيتين قبل إجراء عملية الدفع مرة أخرى. ويجري تحديد مستوى التشوه (الانفعال)، الذي تلقاه المولد النانوي المدمج جانبياً، من خلال معرفة المتانة التي تتمتع بها بنية هذا المولد النانوي.

يؤدي دمج الكثير من أسلاك أكسيد الزنك النانوية إلى تحسين التوصيل الداخلي بين الالكترودات وأسلاك أكسيد الزنك النانوية

وإلى ازدياد انفعال هذا الأسلاك، ذلك لأن معدل الانفعال يُعدُّ ضرورياً لتعزيز كلِّ من توتر الخرج وتياره للمولد النانوي المدمج جانبياً. ويُبين (الشكل 3.7) كلاً من توتر الخرج وتياره لمولد نانوي مدمج جانبياً، حيث يُظهر هذا المولد أن توتر خرجة يساوي تقريباً $1.2V$ عندما يكون معدل انفعاله مساوياً $2.13\%/S$ في الثانية وانفعال مساوٍ 0.19% . تُشكّل المولد النانوي المدمج جانبياً من 700 صفٍّ من الأسلاك النانوية، ويحوي كل صف نحو $20,000$ سلكٍ نانويٍّ. وعند تعريض فيلم كابتون للانفعال الميكانيكي كان مقدار نبضة التوتر الموجب المقاسة مساوياً $1.2V$ ومقدار نبضة التيار المقاسة أيضاً مساوياً 26 nA (الشكل 3.7 a,b). لاحظ، أن مقادير ذُرا (قمم) كل من التيار/التوتر تتباين بشكلٍ طفيف بين حالتي الشد وإزالته للمولد النانوي المدمج جانبياً، وذلك بسبب تباين معدل الانفعال في المولد بين هاتين الحالتين، إذ إن حالة الشد للمولد كانت بسبب تأثير قوة خارجية عليه، أما حالة إزالة الشد فهي طبيعية.

تُبين الأشكال، المُتضمنةً داخلياً والمكبَّرة، كلاً من توتر خرج الدارة المفتوحة V_{OC} وتيار خرج دارة القصر خلال دورة انفعال واحدة. يؤدي تمدد (شد) أسلاك أكسيد الزنك النانوية إلى توليد كمون كهروضغطي على طول السلك النانوي من أكسيد الزنك في جانب السلك المماس للإلكترود الذهبي، مما يسبب دفع الإلكترونات في الدارة الخارجية لأن تتدفق من الجانب ذي الكمون المنخفض إلى مثيله ذي الكمون المرتفع وتتراكم في السطح البيني للتماس. وبعد ثانية واحدة، أُزيل الشد عن المولد النانوي، مما أدى إلى اختفاء الكمون الكهروضغطي، وذلك بما يتوافق مع كمية الإلكترونات المتدفقة بالاتجاه المعاكس.



الشكل 3.7: أداء المولد النانوي المدمج جانبياً. (a) توتر خرج الدارة المفتوحة. (b) تيار خرج دارة القصر، جرى قياسهما من بنية المولد النانوي المدمج جانبياً، حيث صُنعت هذه البنية من 700 صفٍّ من مصفوفات السلك النانوي. ولقد وصلت الذروة (القمة) العظمى لتوتر الخرج إلى المقدار $1.26V$. الصورة المكبَّرة ضمن الأشكال هي عبارة عن كل من توتر الخرج وتياره خلال دورة انفعال ميكانيكي واحدة. ولقد جرى إخضاع المولد النانوي المدمج جانبياً لانفعال دوري، حيث بلغ معدل الانفعال المطبق $2.13\%/S$ وانفعال أعظم مقداره 0.19% .

لقد كان متوسط ذُرا (قمم) توتر الخرج أكبر من المقدار $1.2V$ (المشار إليه بخط أحمر متقطع في الشكل 3.7 a)، ووصل مقدار التوتر الأعظم إلى $1.26V$. ولقد أوضحت هذه النتيجة إمكانية رفع سوية توتر الخرج من خلال إجراء دمج تسلسلي لعدة صفوف من الأسلاك النانوية. وكانت غالبية ذرا تيار الخرج أكبر من 25 nA (المشار إليها بخط أحمر متقطع في الشكل 3.7 b)،

والقيمة العظمى لذروة التيار تساوي 28.8 nA. وبفرض أن ثلث الأسلاك النانوية قد أسهمت فعلياً في تيار الخرج، فإن متوسط التيار المتولد من سلك نانوي مفرد، قُدِّرَ بالقيمة 4.3 pA، والتي تعد متوافقة مع تيار الخرج ذي القيمة 10 pA ~ عندما جرى قرح السلك النانوي بالطرف المستدق لمجهر القوة الذرية AFM. وإذا استبعدنا المساحة، التي تشغلها الالكترودات، كانت ذروة كثافة استطاعة الخرج مساويةً نحو 70 nw/cm^2 ، والتي جرى الحصول عليها.

لقد تجلت بنية المولد النانوي المدمج جانبياً من خلال دورها في تعزيز التوتر الكلي لخرج المولدات النانوية بدمجها جانبياً. ويُعدُّ ذلك علامة تطور كبير باتجاه التطبيقات للمولدات النانوية. وترجع محدودية تيار الخرج، على الأرجح، إلى الأسباب التالية. أولاً: لم يكن التراص الموجَّه للأسلاك النانوية المنمَّاة مثالياً، وبالتالي فإن العديد من هذه الأسلاك شكل بروزات (أو نتوءات) بعيدة قليلاً عن الالكترود، ولذلك لم يبقَ سوى جزء من هذه الأسلاك في وضع التماس مع الالكترود الذهبي. ومن بين الأسلاك النانوية، التي كانت في وضع التماس، شارك جزءٌ منها فقط فعلياً في كهرياء الخرج، لذلك تدعى هذه الأسلاك النانوية بالفعَّالة، بينما الأسلاك النانوية غير الفعَّالة، التي لم تسهم في تيار الخرج، تؤدي دور السعة، التي تقوم بخفض توتر الخرج [10]. ثانياً، إن الرباط بين الالكترود الذهبي وأكسيد الزنك لم يكن محكماً، والذي يمكن أن يصبح رخواً خلال تطبيق الشد الميكانيكي المتكرر، وذلك يمكن أن يمنع من تطبيق انفعال كبير على الأسلاك النانوية. ولقد كان مقدار الانفعال الأعظم، الذي استطعنا تطبيقه في تجاربنا، مساوياً فقط 0.19%. وتشير المحاكاة النظرية إلى مقدار انفعال الشد الأعظم، والذي يستطيع السلك النانوي من أكسيد الزنك تحمله قبل أن ينكسر يساوي 6% [11]. وختاماً لقد تراوحت قيم المقاومة الداخلية لشريحة كاملة الاندماج بين (1-10 MΩ)، وهذا ما أدى إلى خفض المقدار الكلي لتيار الخرج.

7.2. المولد النانوي المرن عالي الخرج [12]

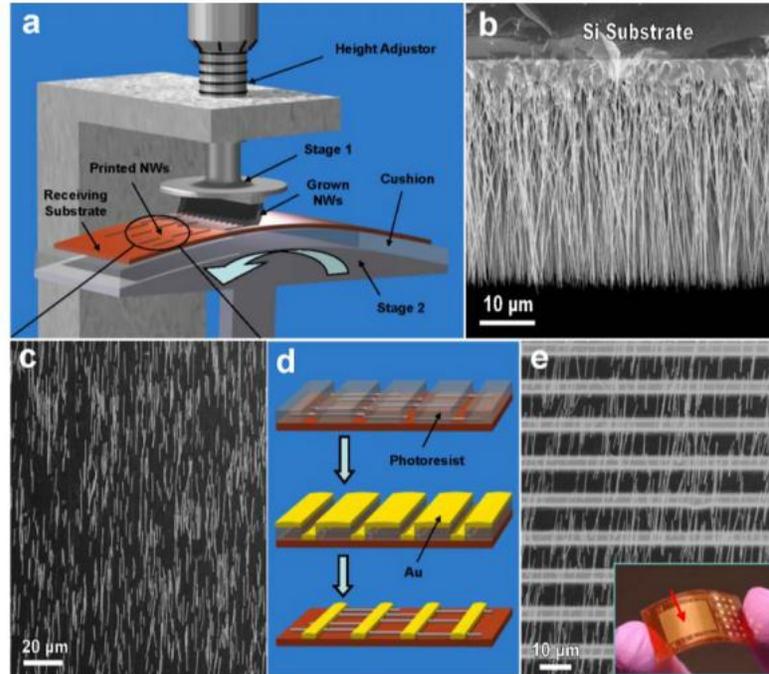
نورد في هذا المقطع طريقة مبسطة وفعَّالة، تُسمى طريقة الطباعة واسعة الانتشار ومتغيرة القياس، وذلك بهدف تصنيع مولد نانوي عالي الخرج (HONG) ومرن، والذي يمكنه وبشكلٍ فعالٍ، حصاد الطاقة الميكانيكية لقيادة مُركَّبة الكترونية تجارية صغيرة. ويتألف المولد النانوي عالي الخرج من خطوتين رئيسيتين، إذ يجري في الخطوة الأولى تحويل أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراصة - شاقولياً، إلى ركازة استقبال بهدف تشكيل مصفوفات متراصة - أفقياً. بعد ذلك، يجري ترسيب نموذج من الالكترودات على شكل شرائح متوازية بغية وصل جميع الأسلاك النانوية بعضها مع بعض. ولدى استخدام طبقة مفردة من بنية مولد نانوي عالي الخرج، ارتفعت قيمة توتر الدارة المفتوحة لتصل إلى 2.03V، وذروة الكثافة لاستطاعة الخرج إلى نحو 11 mW/cm^3 . ولقد جرى وبشكلٍ فعَّالٍ، تخزين الطاقة الكهربائية المتولَّدة، من خلال استخدام مكثفات، إذ أمكن استخدام هذه الطاقة المخزَّنة بنجاح في إنارة ديود باعث للضوء LED تجاري، الذي يعد تطوراً هائلاً نحو بناء أجهزة ذاتية التغذية من خلال تجميع الطاقة من الوسط المحيط. ويفتح هذا البحث المجال لإجراء تطبيقات عملية على السلك النانوي، والذي يشكل أساساً للمولدات النانوية الكهروضغطية لبناء أنظمة نانوية ذاتية التغذية.

7.2.1. المبدأ والتصنيع

جرى في الفصل الرابع مناقشة تفاصيل آلية تحويل الطاقة الميكانيكية بواسطة سلك نانوي مفرد من أكسيد الزنك مثبت جانبياً إلى الركازة. ونظراً لتمتع السلك النانوي بقطر أصغر بكثير من ثخن الركازة، فإن إخضاع الأخيرة لانحناء خارجي يُحرِّض انفعال شد محوري في السلك النانوي. ولما كان السلك النانوي من أكسيد الزنك يتمتع بالخاصية الكهروضغطية، فإن تعرض هذا السلك للإجهاد (أو الانفعال) سوف يُسفر عن تشكل حقل كهروضغطي على طول هذا السلك، يؤدي إلى تدفق شحنة عابرة في الدارة الخارجية. ويمكن لتماس شوتكي، الموجود في النهايات المتماسكة، أن يُنظم تدفق الشحنة. وفي النتيجة تؤدي عملية الانحناء

وإزالتها لمولد نانوي ذي سلك مفرد إلى ازدياد التدفق المتناوب للشحنات في الدارة الخارجية. ولقد جرى في هذا العمل قياس طاقة الخرج عن طريق دمج مئات الألوف من الأسلاك النانوية المتراسة - أفقياً، والتي جرى صنعها باستخدام طريقة الطباعة واسعة الانتشار - متغيرة القياس، والتي تعدُّ طريقة بسيطة وفعالة من حيث الكلفة وذات كفاءة عالية.

تتألف هذه الطريقة من خطوتين رئيسيتين. يجرى في الخطوة الأولى تحويل الأسلاك النانوية المتراسة شاقولياً إلى ركازة استقبال بغية تشكيل مصفوفات متراسة شاقولياً. وتكمن المكونات الرئيسة لتنظيم عملية التحويل هذه في منصّتين (الشكل a 4.7). تتمتع المنصّة الأولى بسطحٍ مستوٍ موجهٍ نحو الأسفل يمسك بالأسلاك النانوية المتراسة شاقولياً، أما المنصّة الثانية، فتتمتع بسطحٍ منحنٍ يمسك بركازة الاستقبال. ويُستخدم الفيلم، المعد من مركب بولي ديميثيل سيلوكسين PDMS والمتوضع على سطح المنصّة الثانية، يُستخدم على شكل وسادة تسند ركازة الاستقبال وتعزز من تراص الأسلاك النانوية، التي جرى تحويلها. ويساوي نصف قطر السطح المنحني للمنصّة الثانية طول القضيب الداعم لهذه المنصّة، حيث يكون هذا القضيب حر التحرك ضمن حركة دوارنية. أما في الخطوة الثانية، فيجرى ترسيب الالكترونودات لتأمين توصيل جميع الأسلاك النانوية بعضها مع بعض.

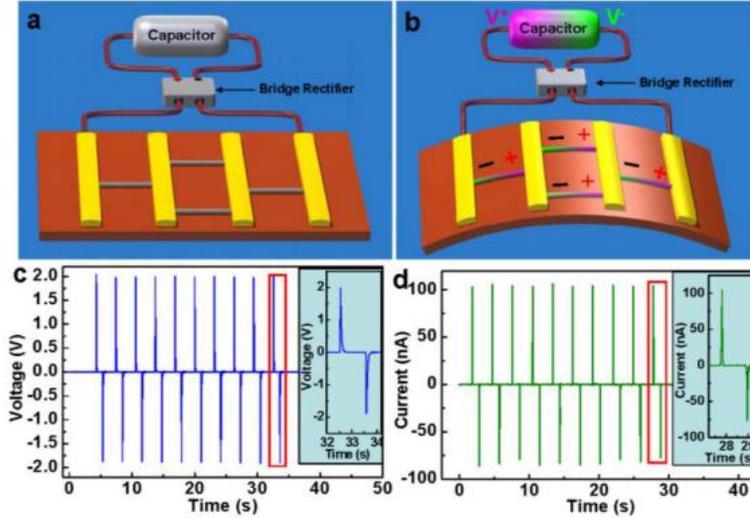


الشكل 4.7: طريقة التصنيع وتوصيف البنية للمولد النانوي عالي الخرج HONG المرنة. (a) المراحل التجريبية لتحويل أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراسة شاقولياً إلى ركازة مرنة بغية صنع مصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك متراص أفقياً ويتمتع بتراص بلوري. (b) صورة التقطت بالمجهر الالكتروني الماسح لكيفية نمو أسلاك أكسيد زنك النانوية المتراسة شاقولياً من خلال استخدام طريقة ترسيب فيزيائية بالبخار على ركازة من السيلكون Si. (c) صورة ملتقطة بالمجهر الالكتروني الماسح لكيفية التحويل إلى أسلاك أكسيد زنك النانوية المتراسة أفقياً على ركازة مرنة. (d) طريقة تصنيع الالكترونودات من معدن الذهب على مصفوفات متراسة أفقياً لسلك نانوي من أكسيد الزنك، حيث تتضمن هذه الطريقة كلاً من مرحلة الطباعة الحجرية الضوئية ومرحلة التغطية بالمعدن ومرحلة الإقلاع. (e) صورة التقطت بالمجهر الالكتروني الماسح لمصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك محزّمة بالالكترونودات الذهبية. الصورة المكبرة الداخلية ضمن الشكل: عرض لمولد نانوي عالي الخرج جرى تصنيعه. ويشير رأس السهم إلى منطقة التشغيل الفعال من المولد النانوي عالي الخرج.

نُسجت أسلاك نانوية من أكسيد الزنك متراسة شاقولياً على ركازات من السيلكون Si باستخدام الطريقة الفيزيائية للترسيب بالبخار. وتتمتع الأسلاك النانوية الكثيفة والمنظمة بطول يصل إلى نحو $50\mu\text{m}$ وقطر يصل إلى نحو 200 nm ، ويكون اتجاه نموها على طول المحور C (الشكل 4.7 b). ويكفل اتجاه النمو نفسه للأسلاك النانوية تراص الكمونات الكهروضغطية في جميع الأسلاك النانوية، ويكفل زيادة ناجحة في مستوى الخرج، والذي سيجري التعرض له لاحقاً. رُكبت قطعة صغيرة من ركازة السيلكون، مع أسلاك نانوية من أكسيد الزنك المنمّاة، رُكبت فوق المنصة الأولى (الشكل 4.7 a). بينما جرى إرفاق قطعة من فيلم كابتون ذي التخلانة $125\mu\text{m}$ بالمنصة الثانية (الشكل 4.7 a). ولقد جرى التحكم بدقة بالمسافة الواقعة بين ركازة الاستقبال والأسلاك النانوية بغية تشكيل تماسٍ رخوٍ بينهما. بعد ذلك، أُديرت ركازة الاستقبال بعكس دوران عقارب الساعة عبر مصنوعات الأسلاك النانوية الشاقولية، التي جرى فصلها عن الركازة السيلكونية ورصها على ركازة الاستقبال على طول اتجاه الكسح نظراً لتطبيق قوة قاصة (الشكل 4.7 a). وتعرض الأسلاك النانوية التي جرى تحويلها في (الشكل 4.7 c)، حيث يُقدر معدل كثافة هذه الأسلاك في واحدة المساحة $1.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$. يُعزى التباين في طول هذه الأسلاك، وعلى الأرجح، إلى الحقيقة التي تكمن في أن ليس جميع الأسلاك النانوية قد جرى اقتلاعها من جذورها.

بعد ذلك، حُدد في البداية نموذج الالكترود متساوي البعد عن الأسلاك النانوية في الفراغ الكائن فوق هذه الأسلاك، وذلك باستخدام الطباعة الحجرية الضوئية، تلاها عملية رشاشة لفيلم من الذهب بتخلانة تساوي 300 nm (الشكل 4.7 d). وبعد نزع المقاومة الضوئية، جرى تصنيع 600 صفّاً من الالكترودات الذهبية شريطية الشكل، جرى توضيعها فوق مصنوعات الأسلاك النانوية الأفقية، مع ترك فراغ بين هذه الالكترودات مساوٍ $10\mu\text{m}$ (الشكل 4.7 e). وتشكل هذه الالكترودات تماسات شوتكي مع أسلاك أكسيد الزنك النانوية، التي تعد أساسية لتشغيل المولد النانوي. ويساوي عدد الأسلاك النانوية، الموجودة ضمن مساحة تشغيل فعّالة مقدارها 1 cm^2 ، يساوي تقريباً $3.0 \times 10^5 \text{ NWs}$ ، وكما هو مشار إليه برأس أسهم في الشكل المكبر ضمن (الشكل 4.7 d)، وتكون هذه الأسلاك في وضع التماس مع الالكترودات في كلتا نهايتها. وختاماً، يمكن أن يؤدي تغليف كامل البنية بمركب بولي ديميثيل سيلوكسين PDMS إلى تعزيز أكثر للمتانة الميكانيكية للجهاز وحمايته من المواد الكيميائية المخرشة.

جرى توضيح مبدأ عمل المولد النانوي عالي الخرج من خلال المخططات البيانية في (الشكل 4.7 a, b). يؤدي توصيل الأسلاك النانوية على التفرع إلى جعل هذه الأسلاك تسهم معاً في تيار الخرج، وإذا ما جرى توصيل الأسلاك النانوية، الموجودة في صفوف مختلفة، على التسلسل، فإن ذلك سيؤدي إلى تحسن ملموس في توتر الخرج. ومن الجدير بالذكر أن كلاً من اتجاه النمو نفسه لجميع الأسلاك النانوية وطريقة الطباعة الجارفة (الكاسحة) تؤكد أن الاتجاهات البلورية للأسلاك النانوية الأفقية تتراص على طول اتجاه الجرف (الكسح). وفي النتيجة، ستكون قطبية الكمون الكهروضغطي المحرّض متراسة أيضاً، مما يقود إلى كمون ماكروبي (جهري) يسهم بشكل بناء من خلال جميع الأسلاك النانوية (الشكل 4.7 b)



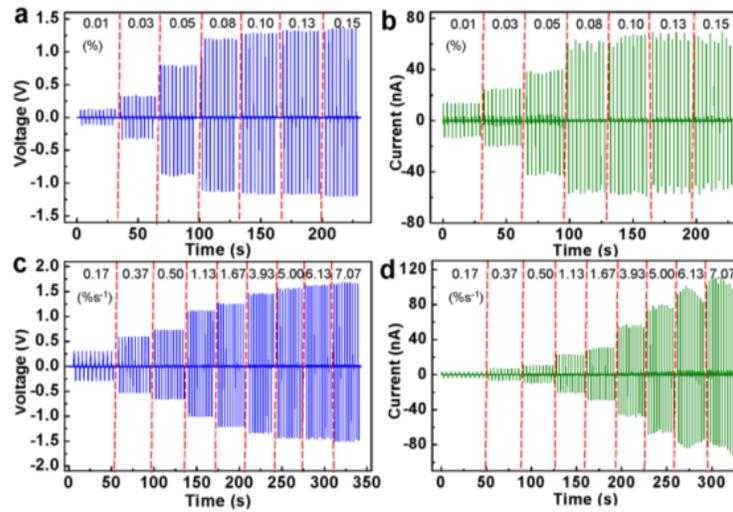
الشكل 5.7: مبدأ العمل وقياس الخرج للمولد النانوي عالي الخرج. (a) مخطط تمثيلي لبنية مولد نانوي عالي الخرج دون تعريض هذه البنية لانفعال ميكانيكي، وجرى فيها استخدام معدن الذهب بغية تشكيل تماسات شوتكي مع مصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك. (b) عرض توضيحي لقياس تغير الخرج عند توافر تحريض ناجم عن انفعال ميكانيكي، حيث تدل الإشارات "+/-" على قطبية الكمون الكهروضغطي المتولد داخل الأسلاك النانوية. (c) قياس توتر الدارة المفتوحة للمولد النانوي علي الخرج. (d) قياس تيار دارة القصر للمولد النانوي عالي الخرج. جرى إجراء القياس عند تطبيق انفعال مقداره 0.1% ومعدل هذا الانفعال $5\%S^{-1}$ وتردد الانفعال 0.33 هرتز. الصورة المكبرة الداخلية عبارة عن منظر مكبّر للمنطقة المعلبة عند تعرضها لدورة انفعال واحدة.

7.2.2. قياسات الخرج

بغية البحث في أداء المولد النانوي عالي الخرج، استخدم محرك خطي لإحداث تشويه (انفعال) دوري في المولد النانوي عالي الخرج، بحيث يكون هذا الانفعال الدوري على شكل اهتزاز شد - إرخاء دوري لهذا المولد (ويتردد مقداره 0.33 HZ). ولقد جرى قياس كل من توتر الدارة المفتوحة (V_{oc}) وتيار دارة القصر (I_{sc}) بحدز بغية إلغاء أية آثار صناعية ممكنة¹⁹. وعندما وصلت قيمة الانفعال المؤثر في المولد النانوي إلى 0.1% ومعدل الانفعال إلى $5\%S^{-1}$ ، وصلت ذروة كل من التوتر والتيار إلى 2.03V و 107 nA بالترتيب. ويفرض أن جميع الأسلاك النانوية المدمجة تسهم بشكل فعال في الخرج، فإن التيار المتولد من سلك نانوي مفرد، سيصل معدله إلى نحو 200 pA، ومعدل التوتر، الصادر عن كل صف من المولدات سيصل إلى نحو 3.3 mV. وإذا أخذ بالحسبان أن مقياس مساحة تشغيل المولد النانوي تساوي 1cm^2 (الشكل المكبر في 4.7 e)، فإن ذروة كثافة استطاعة الخرج ستصل إلى ما يقارب $0.22\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ، والتي تزيد بمقدار عشرين ضعفاً مقارنةً مع آخر تقرير قدمناه مبني على تصميم أكثر تعقيداً من هذا التصميم. فإذا كانت الأسلاك النانوية تتمتع بقطر يساوي تقريباً 200 nm فإن الكثافة الحجمية للاستطاعة ستصل إلى المقدار $11\text{mW}/\text{cm}^3$.

يُتوقع زيادة استطاعة الخرج إلى حدٍ أبعد مما ذكر كي تكون ممكنة من الناحية التقنية. فإذا أمكن تغليف أسلاك نانوية بشكل كثيف ومنظم على هيئة طبقة وحيدة تغطي كامل مساحة العمل، ويمكن لجميع هذه الأسلاك أن تسهم، وبشكل فعال، في الخرج، يُتوقع أن تصل كثافة الاستطاعة العظمى في واحدة المساحة إلى ما يقارب $22\mu\text{W}/\text{cm}^2$. ويُنتظر أن تتحسن قيم الكثافة الحجمية للاستطاعة، لتصل إلى ما يقارب $1.1\text{W}/\text{cm}^3$. فإذا ما جرى تكديس 20 طبقة لمثل هذه المصفوفات من سلك نانوي بعضها مع بعض، سترتفع قيم كثافة الاستطاعة في واحدة المساحة لتصل إلى ما يقارب $0.44\text{mW}/\text{cm}^2$.

يتأثر أداء المولد النانوي عالي الخرج بكل من مقدار الانفعال المطبق عليه ومعدل هذا الانفعال. فإذا بلغ معدل الانفعال المطبق على هذا المولد المقدار ($5\%S^{-1}$)، فإن أي زيادة في مقدار الانفعال، ستقود إلى مقدار خرج أكبر (الشكل 6.7 a,b). وبشكل مماثل، إذا كان مقدار الانفعال المطبق ثابتاً ويساوي 0.1% ، فإن مقدار الخرج يتناسب طردياً مع معدل الانفعال (الشكل 6.7 d,c). وإذا ما جرى تجاوز القيم المؤكدة لكل من الانفعال ومعدله، ستحدث حالة إشباع في هذه القيم، وعلى الأرجح سيكون ذلك عائداً إلى توافر ظاهرة الكمون الكهروضغطي المعاكس، التي تكمن في أن الانفعال، المتولّد بواسطة الكمون الضغطي، سيكون معاكساً للانفعال المُحرّض الخارجي. ولقد لوحظ أن الانفعال الذي مقداره 1% ، كافٍ لتحريض خرج فعّال، وهو أصغر بكثير من 6% من مقدار انفعال الكسر (أو الانهيار) المتوقع نظرياً للسلك النانوي من أكسيد الزنك [6].



الشكل 6.7: توصيف أداء المولد النانوي عالي الخرج مع ازدياد كل من الانفعال الخاضع له هذا المولد ومعدل الانفعال.

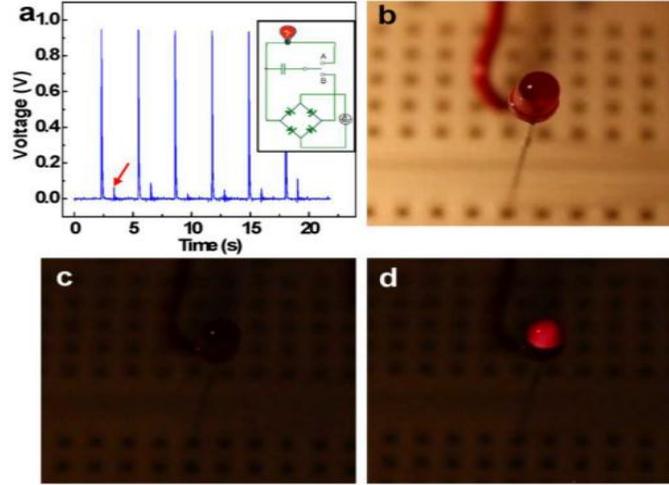
(a) قياس توتر الدارة المفتوحة لمولد نانوي عالي الخرج مع ازدياد الانفعال المؤثر في المولد، بحيث يكون معدل هذا الانفعال ثابت القيمة ويساوي $5\%S^{-1}$. (b) قياس تيار دائرة القصر لمولد نانوي عالي الخرج مع ازدياد الانفعال المؤثر في المولد، بحيث يكون معدل هذا الانفعال ثابت القيمة ويساوي $5\%S^{-1}$. (c) قياس توتر الدارة المفتوحة لمولد نانوي عالي الخرج مع ازدياد معدل الانفعال والمحافظة على انفعال ثابت القيمة ويساوي 0.1% . (d) قياس تيار دائرة القصر لمولد نانوي عالي الخرج مع ازدياد معدل الانفعال والمحافظة على انفعال ثابت القيمة ويساوي 0.1% . أُجريت جميع القياسات آنفة الذكر بعد ضبط تردد الانفعال الميكانيكي عند المقدار 0.33 Hz .

7.2.3. تخزين الطاقة المودّعة

يُعدُّ كلُّ من تخزين الطاقة المودّعة وقيادة الأجهزة العملية خطواتٍ في غاية الأهمية باتجاه التطبيقات العملية للمولد النانوي. ولقد جرى في هذا العمل استكمال بناء هذه المولدات من خلال استخدام دائرة شحن - وتفريغ تتمتع بخطوتين متعاقبتين (الشكل 7.7). ويتم تحديد وظيفة هذه الدارة تبعاً لوضعية القاطع (الشكل المكبر في 7.7 a). يكون القاطع في الوضعية A لتخزين الطاقة، التي جرى الحصول عليها من خلال شحن المكثفات. ولدى الانتهاء من عملية الشحن، يجرى نقل القاطع إلى الوضعية B لتخلص من الطاقة وتغذية الجهاز المراد تشغيله، مثل الديود الباعث للضوء.

يُعدُّ تحقيق الفائدة الكاملة من الخرج المتناوب مفتاح التخزين الناجح والفعال للطاقة. لهذا جرى توصيل جسر تقويم مدمج كامل الموجة بين المولد النانوي عالي الخرج والمكثفات. ويقاس خرج المولد النانوي عالي الخرج بعد تعريض الجسر للإشارات الموجبة فقط (الشكل 7.7 a). ويجرى الحصول على تقويم لموجة كاملة بواسطة جسر يؤمن تخزين الطاقة بمرود عالٍ، على الرغم من أن الإشارة المقوّمة (المشار إليها برأس السهم في الشكل 7.7 a) قد انخفض مقدارها بشكلٍ ملحوظٍ بسبب تسرب التيار

العكسي من الديودات الموجودة في الجسر، وأكثر ما يُلاحظ ظاهرة الانخفاض هذه عندما يكون تيار الخرج صغيراً، وبغية تسهيل عملية الشحن، ضُبط تردد الخرج للمولد النانوي عالي الخرج عند القيمة 3Hz، وذلك من خلال تخفيض عدد أدوار تطبيق الانفعال الميكانيكي. جرى توصيل عشر مكثفات على التفرع، بحيث يمكن شحنها بشكل متزامن، ويصل مقدار التوتّر عبر المكثف الواحد إلى 0.37V بشكلٍ نهائي.



الشكل 7.7: تطبيق الطاقة الكهربائية المتولّدة بواسطة مولد نانوي عالي الخرج لقيادة ديود باعث للضوء تجاري. (a) الخرج الكهربائي، وقد جرى قياسه بعد تخطي جسر التقويم الموجة كاملةً. ألغيت إشارات توتر الخرج في الشكل الصادرة عن الإشارات السالبة في الدارة، وقد تمت الإشارة إلى ذلك بواسطة رأس السهم. ويبين الشكل المضمّن داخلياً مخطط دارة الشحن – التفريغ للطاقة المخزّنة والمحررة بالترتيب، والتي جرى توليدها بواسطة المولد النانوي عالي الخرج. (b) صورة لديود باعث للضوء تجاري جرى اعتماده في الدارة. (c) صورة لديود باعث للضوء بخلفية معتمة قبل إنارته. (d) صورة الديود الباعث للضوء بخلفية معتمة، وفي اللحظة التي تمت فيها إنارته بواسطة الطاقة المتولدة من المولد النانوي عالي الخرج.

جرى تحديد مردود توليد الطاقة الفعّالة على أنه النسبة بين الطاقة المخزنة بواسطة المكثفات ودخل طاقة الانفعال لجميع الأسلاك النانوية الفعّالة، مع الأخذ بالحسبان أداء العناصر الالكترونية داخل الدارة. ويمكن حساب الطاقة الكهربائية الكلية المخزنة بواسطة المكثف بالعلاقة التالية:

$$W_{stored} = CU^2n / 2 = 1.37 \text{ J}$$

حيث: C سعة مكثف مفرد، U التوتّر عبر المكثف، n عدد المكثفات.

ولما كان انفعال الشد هو الانفعال المسيطر في أسلاك أكسيد الزنك النانوية، ومع إهمال انفعال القص، يمكن تقدير طاقة الانفعال الكلية بالعلاقة:

$$W_{strain} = \pi D^2 L_0 E \varepsilon^2 f t n_0 / 8 = 30 \text{ J}$$

حيث: D قطر السلك النانوي 200 nm، L_0 الطول الأصلي للسلك 10 μm ، والذي يُنبت من خلال فراغ الالكتروود، E موديل يونغ ويُقدر بـ 30 GPa، ε مقدار انفعال الأسلاك النانوية 0.1%، f تردد الانفعال 3 Hz، n_0 عدد الأسلاك النانوية المدمجة $13.300,000$ ويكون مقدار مردود توليد الطاقة الفعّالة نحو 4.6%~. وتعدّ هذه القيمة، وبشكل طبيعي أخفض من مردود تحويل الطاقة لسلك نانوي مفرد/سلك ميكروي مفرد، ومقداره تقريباً 7%~، والذي يجري تحديده على أنه النسبة بين الطاقة الكهربائية المتولّدة

$$W_{generated} = \int V I dt$$

حيث: V توتر الخرج و I تيار الخرج. وطاقة الانفعال الميكانيكي في الدخل. ويُعزى ذلك في الأساس إلى تبدد الطاقة في كلٍ من جسر التقويم والمكثفات.

7.3. تغذية صمام ثنائي (ديود) باعث للضوء

بعد إنهاء الشحن، جرى تغيير توصيل المكثفات من حالة الوصل على التفرع إلى الحالة التسلسلية، ونجم عن ذلك منبع توتر كلي يساوي 3.7V. واستخدمت الكهرباء المخزنة في قيادة ديود باعث للضوء LED تجاري (الشكل 7.7 b)، والذي يتمتع بطيف إشعاع مركزه عند 635 nm. ويساوي كلٌ من توتر التوصيل ومقاومة الانحياز الأمامي 1.7V و 450Ω بالترتيب. بدأت عملية التفريغ مسببةً وجود تيار تفريغ أعظم مقداره 4.5 mA، وبالتالي إنارة الديود الباعث للضوء. استمر انبعاث الضوء خلال زمن قدره 0.1s-0.2s، وجرى التقاطه بوضوح ضمن خلفية قاتمة (معتمة) (الشكل 7.7 d,c)، يتوافر فيديو للمعلومات الإضافية). ولم يشارك أي منبع طاقة آخر خلال كامل عملية الشحن – والتفريغ. وتصبح الدارة الكلية عبارة عن منظومة ذاتية التغذية بشكل كامل، حيث تتألف هذه المنظومة من ثلاثة عناصر (ثلاث مركبات) هي: مُجمَع الطاقة (وهو عبارة عن المولد النانوي عالي الخرج) ووحدات تخزين للطاقة (عبارة عن المكثفات) وجهاز التشغيل (عبارة عن الديود الباعث للضوء).

باختصار، نجحنا بتصنيع مولدات نانوية مرنة وعالية الخرج باستخدام طريقة الطباعة الجارفة (أو الكاسحة) ونجحنا أيضاً بتحويل أسلاك أكسيد الزنك النانوية المنمّاة شاقولياً إلى ركازة مرنة والحصول على مصفوفات سلك نانوي متراص أفقياً، وتتمتع هذه المصفوفات بتراص بلوري، والذي شكّل الأساس في التصميم المبتكر لمولد نانوي عالي الخرج وتصنيع هذا المولد. ولقد حقق الخرج الكهربائي للمولد النانوي عالي الخرج ذروة توتر مقداره 2.03 V وذروة تياره مقداره 107 nA، وبلغت الذروة لكثافة الاستطاعة المقدار 11 mW/cm^3 ، والتي تفوق بمقدار 12-22 ضعفاً مثيلاتها الناجمة عن ذراع مُجمَع للطاقة مصنوع من خليطة تيتانيوم زركونيوم بلاتين.

عُرض مردود توليد الطاقة الفعال، إذ بلغ القيمة 4.6%. أما الطاقة الكهربائية المؤدّة باستخدام مولد نانوي عالي الخرج، فقد جرى تخزينها بشكل فعال من خلال استخدام مكثفات، حيث استخدمت هذه الطاقة المخزنة في إضاءة ديود باعث للضوء تجاري. وزيادة على ذلك، لدى أمثلة كثافة الأسلاك النانوية على الركازة، وباستخدام الدمج متعدد الطبقات، وصلت ذروة الكثافة لاستطاعة الخرج إلى المقدار 0.44 Mw/cm^2 ، ووصلت الكثافة الحجمية إلى المقدار 1.1 W/cm^3 .

ويُعدُّ ذلك خطوة رئيسة تسمح بإدخال تقانة المولدات النانوية ذاتية التغذية في حياة الناس اليومية، مع تطبيقات محتملة في كلٍّ من الأجهزة الالكترونية المحمولة والمراقبة الصحية والتنبؤ البيئي ومنظومة المتابعة للنقل البحري ورصد البنى التحتية حتى في تقانة الدفاع.

7.4. المراجع

- [1] C. Chang, V.H. Tran, J. Wang, Y. Fuh, L. Lin, *Nano Lett.* **10**, 726 (2010).
- [2] Y. Qi, N. T. Jafferis, K. Lyons, Jr., C. M. Lee, H. Ahmad, and M.C. McAlpine, *Nano Lett.*, **10**, 524 (2010).
- [3] M.Y. Choi, D. Choi, M.J. Kim, I. Kim, K.H. Kim, J.Y. Choi, S.Y. Lee, J.M. Kim and S.W. Kim, *Adv. Mater.*, **21**, 2185 (2009).
- [4] S.N. Cha, J.S. Seo, S.M. Kim, H.J. Kim, Y.J. Park, S.W. Kim, J.M. Kim, *Adv. Mater.* **22**, 4726 (2010)
- [5] S. Xu, Y. Qin, C. Xu, Y.G. Wei, R.S Yang, Z.L. Wang *Nature Nanotechnology*, **5**, 366 (2010).
- [6] J. Jasinski, D. Zhang, J. Parra, V. Katkanant, V. V.J. Leppert, *Appl. Phys. Lett.* **92**, (2008).
- [7] S.Y. Bae *et al.*, *J. Crys. Grow.* **258**, 296 (2003).
- [8] S.H. Lee *et al.*, *Nano Lett.* **8**, 2419 (2008).
- [9] Y. Qin, R.S. Yang, Z.L. Wang, *J. Phys. Chem. C* **112**, 18734 (2008).
- [10] J. Liu, P.X. Gao, W.J. Mai, C.S. Lao, Z.L. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 063125 (2006).
- [11] R. Agrawal, B. Peng, H.D. Espinosa, *Nano Lett.* **9**, 4177 (2009).
- [12] G. Zhu, R.S. Yang, S.H. Wang, Z.L. Wang, *Nano Letters*, **10**, 3151 (2010).

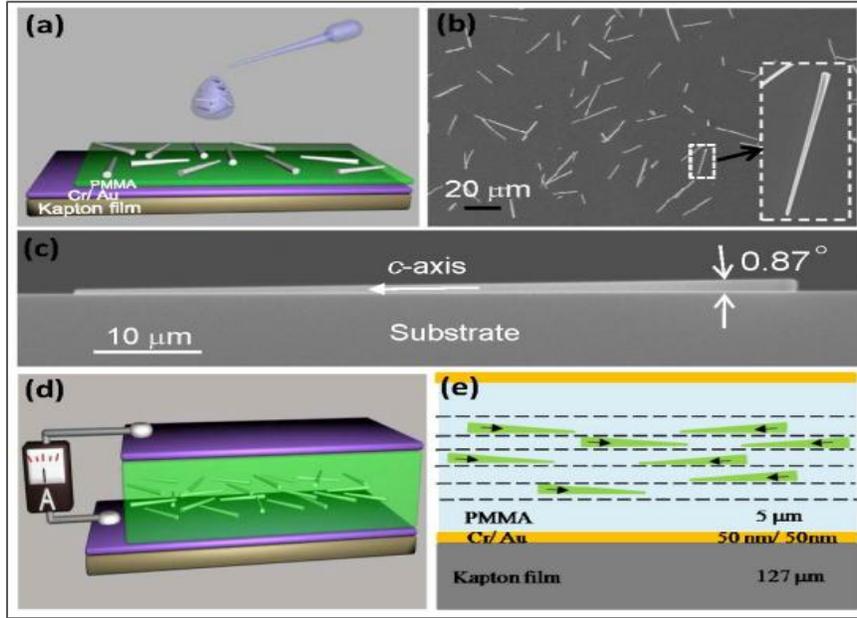
الفصل الثامن: المواد النانوية عالية الخرج – الأسلاك النانوية اللاتمسية

نعرض في هذا الفصل منهجاً سهلاً قليل الكلفة وقابلاً للتطبيق بهدف تصنيع مولد نانوي يتمتع باستطاعة خرج عالية وكافية للتشغيل المستمر لشاشة عرض تجارية ذات البلورات السائلة [1]LCD. وبغية الاستفادة من الشكل المخروطي لأسلاك أكسيد الزنك ZnO النانوية المُنمّاة، يُصنّع المولد النانوي من خلال إتباع طريقة نثر (بعثرة) سهلة لهذه الأسلاك على فيلم بوليميري مستوٍ لتشكيل بنية "مركبة" معقولة. وتجدر الإشارة إلى أن الشكل الهندسي الناجم عن توافر أسلاك نانوية – مخروطية ومجمّعة لتشكيل قطباً أحادياً داخل مثل هذه البنية المركبة، يُسفر عن وجود كمون كهروضغطي ماكروي (جهري) عبر ثخانة هذه البنية، وذلك من خلال إخضاع هذه الأخيرة لتشوه (انفعال) ميكانيكي، يمكن أن يكون مسؤولاً عن قيادة تدفق الشحنات المحرّضة بين أعلى الالكترود وأسفله، ويُسبب كل من انفعال الضغط ذي المقدار 0.11% ومعدل الانفعال ذي المقدار $3.67S^{-1}$ ، بسببان توافر توتر خرج يصل إلى المقدار 2V (والذي يُعدُّ مكافئاً لتوتر دائرة مفتوحة مقداره 3.3V). ويعد ذلك عبارة عن تقانة عملية وممتنوعة لتغذية الالكترنيات الشخصية صغيرة الحجم.

8.1. التصميم الأساس

تتألف البنية الأساس للمولد النانوي NG من فيلمين معدنيين لفاً على شكل شطيرة مركبة، إذ يُصنع هذان الفيلمان من أسلاك نانوية مخروطية ومجمّعة لتشكيل قطباً أحادياً يُرشح (يتم رشحه) بمحلول بولي ميثيل ميثاكريلات PMMA [1]. أولاً، يتم توزيع طبقة من معدني الكروم/ذهب (بثخانة قدرها 50nm/50nm لكل منهما) على فيلم كابتون (ذي الثخانة 127nm) من إنتاج Dupont™ 500HN، وذلك باستخدام طريقة التبخير بالحزمة الإلكترونية، حيث جرى تغليف الفيلم المعدني بطبقة من مركب بولي ميثيل ميثاكريلات PMMA (ثخنها $\sim 2\text{nm}$) ولم يتجاوز الانحراف في رتبة فيلم البولي ميثيل ميثاكريلات PMMA المقدار (1nm)، إذ جرى قياس هذا الانحراف باستخدام التصوير بمجهر القوة الذرية. لقد جرى إنماء الأسلاك النانوية NWS، المستخدمة في تجاربنا، على ركازة صلبة، باستخدام طريقة الترسيب البخاري، حيث تجاوزت أطوال هذه الأسلاك المقدار (30nm). وتتمتع الأسلاك النانوية NWS بنهاية مخروطية نظراً لأن نموها كان سريعاً على طول المحور C وبطيئاً جداً على مستوي الركائز. ولقد أثبتت هذه النهاية المخروطية أهميتها الحيوية بالنسبة للمولد النانوي المعروف في هذا الفصل الذي سيجري إعداده لاحقاً. بعد ذلك، نُفّعت الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s مع الركازة داخل سائل الإيثانول. ومن خلال تطبيق الموجة فوق الصوتية، جرى وبشكل فعّال اجتزاز الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s عن الركازة، وتشكل بذلك محلولاً تكون فيه الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s معلقة بشكل حر. ومن خلال تشتيت قطيرة (قطرة صغيرة) من محلول الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s على الفيلم المعدن من PMMA، توزّعت هذه الأسلاك بشكل منتظم على سطح الركازة، بحيث كانت الاتجاهات الجانبية لهذه الأسلاك عشوائية (الشكل 8.1.a,b). ولقد كانت كثافة الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s في واحدة المساحة من الركازة منخفضة (أي كانت هذه الكثافة 1400~1500 سلكاً نانويماً في كل mm^2)، وذلك بهدف منع حدوث التجمعات والتداخلات بين هذه الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s. ولقد تم، وبشكل متناوب، إنجاز طبقة رقيقة منسوجة الغلاف (ثخنها نحو 100nm) من PMMA، وأُسقط عليها محلول السلك النانوي المخروطي المعدن من أكسيد الزنك ZnO CNW، بحيث تشكلت بنية "مركبة" جرى تصميمها بشكلٍ منطقي ومعقول. وبعد أن تم، وبالتناوب ولخمس أدوار، ترسيب كل من طبقة PMMA وطبقة أسلاك أكسيد الزنك النانوية المخروطية ZnO CNW_s، رُسبت طبقة من PMMA أكثر ثخناً (ثخانتها نحو $\sim 2\mu\text{m}$)، وعلى هذه الطبقة رُسب فيلم معدني من

الكروم والذهب ثخنه (50nm/50nm)، بحيث تؤدي هذه الطبقة دور الإلكترود (الشكل 1.8d). وبغية توليد الكهرباء، جرى تثبيت المولد النانوي NG المصنَّع على ركازة مرنة من البوليسترين (ثخنها نحو 1mm)، ومن ثم طُبِق على الوجه الخلفي للركازة قوة خارجية بهدف إحداث انفعال في هذه البنية المجمعّة. لهذا، يتعرض المولد النانوي NG لانفعال ضغط عند هزه ميكانيكياً، وهكذا وقعت الأسلاك النانوية المخروطية CNWs تحت تأثير انفعال ضغط كما جرى افتراضه في الحسابات اللاحقة.



الشكل 1.8: تصنيع المولد النانوي. (a) مخطط تمثيلي يُظهر طريقة تصنيع المولد النانوي. (b) صورة ألتقطت بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM تُظهر كيف توزعت الأسلاك النانوية المخروطية CNWs بشكلٍ منظم تماماً على سطح الركازة، بحيث كانت الاتجاهات الجانبية لهذه الأسلاك عشوائية وتُظهر الصورة الداخلية المكبّرة الشكل المخروطي للسلك النانوي. (c) صورة ألتقطت بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM تبين شكل المقطع لسلك نانوي مخروطي متوضع على ركازة مستوية. ولقد جرى تثبيت سطح الجانب السفلي للسلك النانوي بقوة على الركازة، وشكلت زاوية المخروط للسلك النانوي 0.87°. ويشير رأس السهم الأبيض إلى أن المحور C للسلك النانوي يشير إلى الأسفل باتجاه الركازة. (d) صورة تمثيلية لبنية الجهاز المصنَّع. (e) مخطط تمثيلي يُظهر الفكرة الأساس في تصميم البنية المقترحة وآلية عملها (انظر النص).

8.2. آلية العمل

يُتَرح أن يكون مبدأ عمل المولد النانوي NG المجمع ناتجٌ عن تركيب أحادي القطب لأسلاك نانوية مخروطية [1]. توضع الأسلاك النانوية المخروطية CNWs في الأسفل متمتعةً بتوجيه جانبي عشوائي (الشكل 1.8b)، بينما تُثبت بشدة سطوح الجانب السفلي لهذه الأسلاك على السطح المستوي للركازة (الشكل 1.8c). ويعد الأخذ بالحسبان أن اتجاه نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية المخروطية ZnO CNWs، والمتمتع بإشارات الاتجاه [0001]، هو من يمثل الاتجاه القطبي للسلك النانوي NW، ويُفسر الشكل المخروطي للأسلاك النانوية عن وجود تراسٍ بناءً في الاتجاهات القطبية المُسقطّة، ولجميع الأسلاك النانوية المتجهة عمودياً على الركازة، والمشيّرة إلى الأسفل باتجاه هذه الركازة، كما هو موضح في (الشكل 1.8e)، حيث يُشير الخط المنقطع في هذا الشكل إلى توضع أسلاك نانوية مخروطية CNWs خلال دورة ترسيب (توضيح) واحدة. ولقد جرى تمثيل كلٍّ من الأسلاك النانوية مخروطية الشكل والمحاور C المتطابقة مع هذه الأسلاك برؤوس أسهم، والتي تشكل محاور تناظر للأسلاك النانوية. واستناداً إلى الشكل الهندسي، تكون مركبة المحور C لكل سلك نانوي عمودي الاتجاه على الركازة، عبارة عن $C \sin(\alpha/2)$ ، حيث α هي زاوية المخروط للسلك النانوي المخروطي CNW. وتضاف المركبات المسقطّة لجميع الأسلاك النانوية المخروطية،

وعلى طول الاتجاه الشاقولي، يُضاف بعضها إلى بعض، مما يشكل مصدراً للاستقطاب الكهروضغطي. عبر التخلية للبنية المركبة بغية توليد كمون كهروضغطي وعلى الأرجح، سيكون التركيب (التجميع) أحادي القطبية مفتاحاً لتوليد كمون كهروضغطي ماكروي (جهري) وفقاً للاتجاه الناظم على الركازة.

أجرينا الآن حساب الكمون المتولد عبر الالكتروادات العلوية والسفلية من خلال استخدام نموذج مبسط كما هو موضَّح في (الشكل a.2.8). وعُدَّت البنية الكاملة على أنها حزمة منتصبة بشكلٍ حرٍ، بحيث تكون إحدى نهايتها مثبتة، بينما تطبق على حافة نهايتها العليا قوة عرضانية بشكلٍ دوري. ولقد أُجري حساب هبوط التوتر عبر كلٍّ من الالكتروادات العليا والسفلى. وفي حالة تجارنا هذه، ينمو السلك النانوي المخروطي، المعد من أكسيد الزنك ZnO، على طول المحور C. وعند هبوط الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s على الركازة، تمتعت هذه الأسلاك بتوجه عشوائي، وكانت موازيةً للركازة. وعندما وُجد انفعال خارجي على طول المحور Z، وبشكلٍ موازٍ للركازة (انظر نظام الإحداثيات في الشكل 1.8)، كان لدينا إحصائياً أن 50% من هذه الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s، التي مساقط المحور C لها موازٍ للمحور Z، كانت على طول المحور Z⁺ الموجب، بينما كان النصف الآخر من هذه الأسلاك على طول المحور Z⁻ السالب. وبغية تمثيل هذا النوع من التشكيل في نموذج مبسط ضمن حساباتنا، اخترنا زوجاً من الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s، المتمعة بتوجهات موجبة للمحور C على الركازة، وموازيةً للمحور Z. ونظراً لأن كثافة هذه الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s كانت منخفضة، كان الاقتران (الترايط) بين هذه الأسلاك ضعيفاً جداً، فقد قمنا بوضعها بالاتجاه الموازي المعاكس ضمن الخلية الواحدة المصمَّمة لإجراء الحسابات، كما هو موضح في (الشكل e.1.8).

إذا أخذ بالحسبان كثافة الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s المتوسطة على الركازة، فإن كل زوج من هذه الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s قد تمتع بحجم في المتوسط ليشغله. وإذا أخذنا بالحسبان كلاً من التوجه العشوائي للأسلاك النانوية المخروطية CNW_s على الركازة وطول مسقطها على المحور Z، صُرب المعامل 2/P بالكثافة الحقيقية بغية إجراء حساب هذا التأثير المكافئ. لهذا، جرى تمثيل الحجم الفعَّال، الذي يجب أن يُشغل في المتوسط من قبل زوج من الأسلاك النانوية المخروطية CNW_s، جرى تمثيله من خلال صندوق مستطيل، يتمتع بعرضٍ مساوٍ 50µm وارتفاعٍ مساوٍ 5µm. ولقد شكل كلٌّ من نصف قطر السلك النانوي المخروطي CNW وطوله وزاويته شبه المخروطية المقادير التالية: 500nm و 45µm و 0.4° بالترتيب. وكان مقدار إجهاد القص المطبق من الخارج مساوياً 40MPa (وهذا يكافئ قوة كلية مقدارها F = 0.01N طبقت على الحافة العلوية للسلك). وتولَّد هذه القوة المطبقة انفعال ضغط مقداره 0.12% عند النهاية المثبتة للسلك النانوي المخروطي، وذلك بالمقارنة مع الظروف التجريبية. وكانت ثوابت المادة المستخدمة في الحسابات كما يلي:

ثوابت المرونة متباينة الخواص، هي:

$$c_{11}=207 \text{ GPa}, c_{12}= 117.7 \text{ GPa}, c_{13} = 106.1 \text{ GPa}, c_{33} = 209.5 \text{ GPa}, c_{44} = 44.8 \text{ GPa}, c_{55} = 44.6 \text{ GPa}$$

والثوابت الكهروضغطية، هي:

$$e_{15} = -0.45 \text{ C/m}^2, e_{31} = -0.51 \text{ C/m}^2, e_{33} = -1.22 \text{ C/m}^2,$$

وثوابت العازلية النسبية لأكسيد الزنك ZnO، هي:

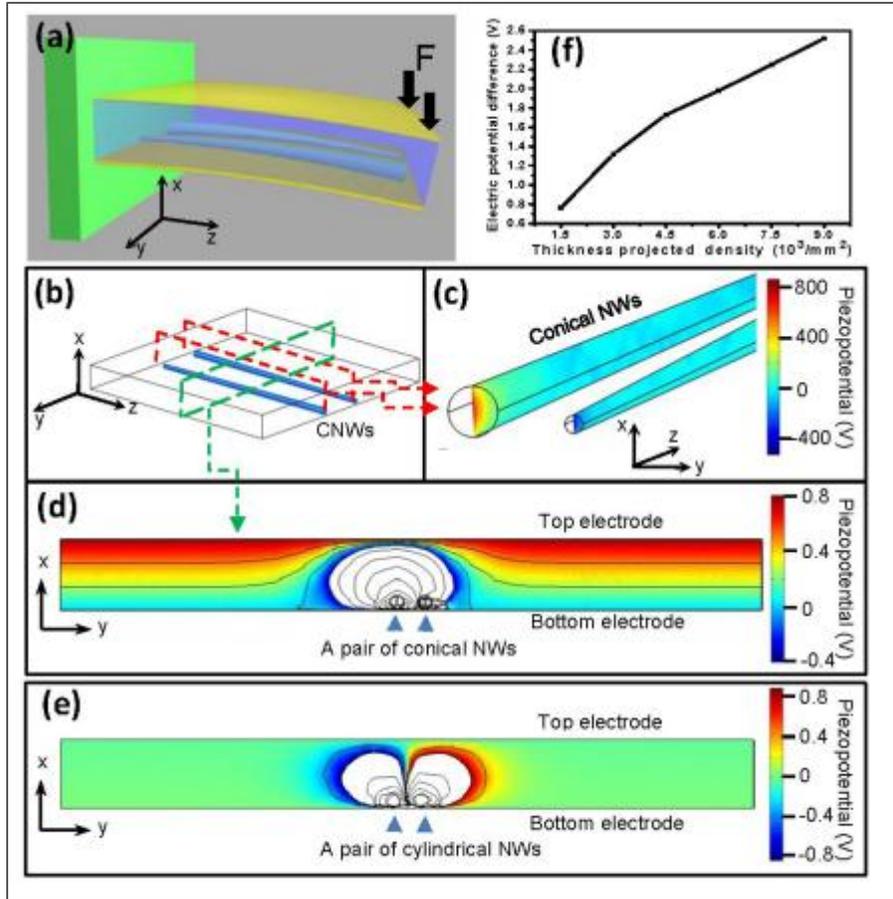
$$k_1 = 7.77, k_{11} = 8.91$$

موديل يونغ لـ PMMA، ومعدل بواسون وثوابت العازلية النسبية، هي: $E = 3 \text{ GPa}$ ، $\nu = 0.4$ و $k = 3.0$ بالترتيب. ولقد أجرينا جميع الحسابات باستخدام حزمة البرمجيات COMSOL.

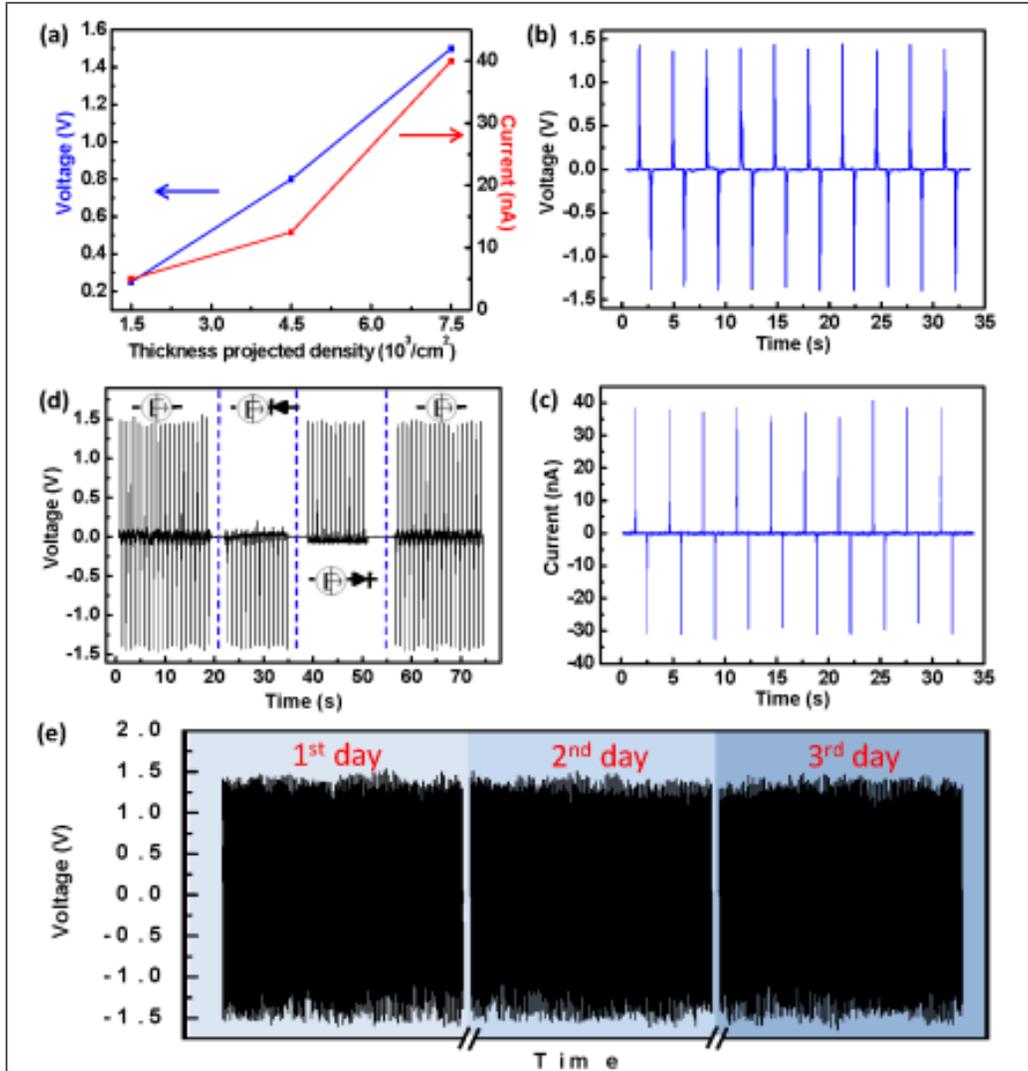
يُبين الشكل (1e) أن جانب البنية الأيسر كان مثبتاً والجانب الأيمن لهذه البنية حرّاً، حيث جرى تطبيق إجهاد قص شاقولي عند سطح النهاية العليا لهذا الجانب. تُشكّل الالكترودات السطوح العليا والسفلى، لهذا يكون السطحان العلوي والسفلي عبارة عن مستويين يتمتّعان بكمون متكافئ. يكون إلكترود السطح السفلي مؤرّضاً. وفي الدارة المفتوحة، يكون مجموع الشحنات، في السطحين العلوي والسفلي، مساوياً للصفر.

إن النموذج، المعدّ من قبلنا، عبارة عن بنية مكثف على شكل صفيحة، حيث تشكّل هذه الصفيحة مع كلّ من أسلاك أكسيد الزنك النانوية المخروطية و PMMA بنية مركبة تتمتّع بوسط "عازلية". ومن خلال تثبيت إحدى نهايتي الصفيحة، وتطبيق قوة ميكانيكية عرضانية (الشكل a2.8)، جرى في البداية حساب التشوه (الانفعال) الميكانيكي في بنية الصفيحة. ولقد أدى خضوع هذا التركيب لمثل هذا الانفعال إلى حدوث توزع للحقل الكهروضغطي في الأسلاك النانوية المخروطية CNWs²¹، وذلك من خلال افتراض أن نموذجاً لزوج من سلك نانوي مخروطي CNW ستم مناقشته لاحقاً. قمنا عمداً بتوضيح الأسلاك النانوية المخروطية CNWs ضمن منطقة كانت تخضع لانفعال ضغط بغية عكس الحالة التجريبية، التي يكون فيها كامل المولد النانوي NG خاضعاً لانفعال ضغط مع الأخذ بالحسبان أن ركازة الجانب الخلفي قد استخدمت لإجراء القياسات. وختاماً، أُجري حساب الشحنات التحريضية عند السطحين العلوي والسفلي داخل صفائح الالكترود مع الأخذ بالحسبان الشروط الحدية بحسب الأصول، والتي من خلالها جرى الحصول على فارق الكمون الكهربائي بين الصفيحتين.

وبغية إجراء التقريب من المرتبة الأولى، أهملت حساباتنا الاقتران (التربط) بين الحقل الكهروضغطي والشحنات التحريضية داخل الصفائح الكهربائية. ولقد افترض أن الأسلاك النانوية المخروطية من أكسيد الزنك يجب أن تكون نقية لا تحوي شوائب. وبغية الاستعراض الدقيق للتوزع العشوائي للأسلاك النانوية المخروطية CNWs على سطح فيلم من PMMA، جرى اختيار سلكين نانويين مخروطيين متعاكسين وفق المحور C بهدف إجراء محاكاة لهما، كما هو موضح في (الشكل b2.8). ويُعدّ نشوء فارق في الكمون الكهربائي المحرّض، عبر الالكترودين الصفائحيين، يُعدّ القوة الدافعة لتدفق الالكترونات في الحمل الخارجي. وعلى الرغم من أن مقدار الفارق في الكمون يعتمد، وبشكلٍ بسيطٍ، على مقدار العمق النسبي للأسلاك النانوية المخروطية داخل المولد النانوي NG بسبب التباين في الانفعال الموضعي، تبقى الصورة الفيزيائية المستعرضة صالحة. وما إن يتم سحب الإجهاد المطبق، حتى تتحرر الأسلاك النانوية المخروطية CNWs من الانفعال بداخلها، ويتحرر كذلك الحقل الكهروضغطي، وعندها لا بد للشحنات التحريضية داخل صفائح الالكترود من أن تتدفق عائدة. وتعدّ هذه عملية توليد تيار خرج متناوب [2].



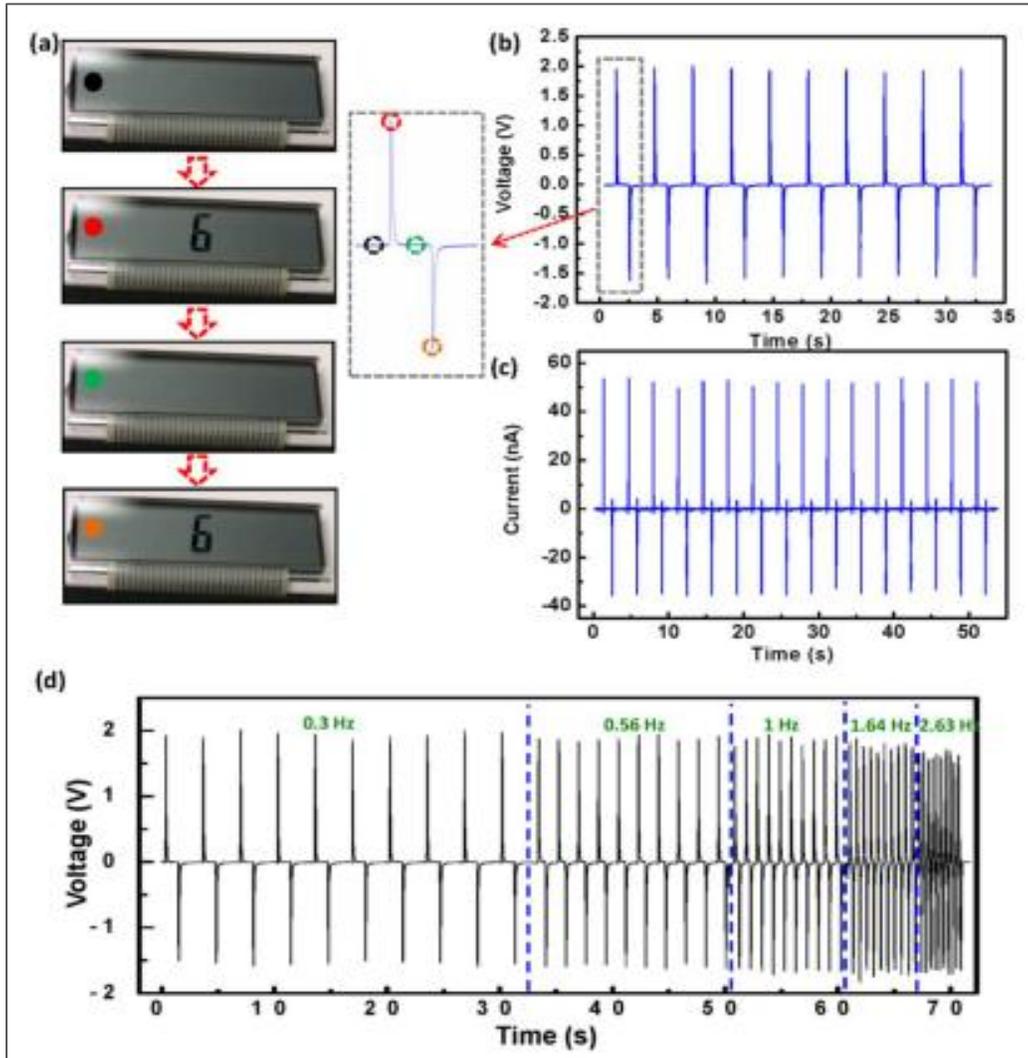
الشكل 2.8: (a) نموذج تخطيطي يُظهر الإعداد لقياس تحويل الطاقة. بغية توضيح العرض، لم يجر هنا إظهار كيفية استخدام ركازة من البوليسيترين لمسك المولد النانوي NG في جانبها العلوي، حيث يتم تطبيق القوة F . وتكون الأسلاك النانوية المخروطية CNWs خاضعة لانفعال ضغط أثناء تعرضها للتشوه (الانفعال). (b) خلية الوحدة والنموذج، اللذين جرى استخدامهما لإجراء حساب التوزيع الكموني عبر الالكترودات العليا والسفلى داخل المولد النانوي مع وجود زوج من الأسلاك النانوية المخروطية، حيث أُشير إلى المقاطع العرضية الموافقة، التي تتوافر عندها التوزيعات الكمونية، أُشير إليها بخطوط متقطعة، والنتائج مُبينة في الشكلين (c) و (d) بالترتيب. ونظراً لتوافر تباين كمي كبير في التوزيع الكموني عبر المقطع العرضي، نستخدم كلاً من التدرج اللوني وخطوط الكمون المكافئ بغية إظهار الكمون الموضعي. وتعدُّ المنطقة الفارغة المتاخمة للأسلاك النانوية المخروطية هي تلك المنطقة، التي تكون فيها قيم الكمون الضغطي المحسوب أصغر من -0.4V ، وهذا ما يقع خارج نطاق المجال، الذي اختير للإشارة إليه بالألوان. وبغية إظهار التفاصيل في هذه المنطقة، استخدمنا فقط خطوط الكمون المكافئ لإظهار تلك المنطقة. لقد توضع الأسلاك النانوية المخروطية بالقرب من أسفل خلية الوحدة في الشكل (b) للتأكد من أن هذه الأسلاك واقعة تحت تأثير الانفعال الضغطي ما دام جرى تطبيق قوة عرضانية بغية إيجاد توافق مع الحالة التجريبية. (e) لقد قمنا أيضاً بحساب الكمون المحرّض بواسطة أسلاك نانوية أسطوانية مثالية (أي أن الزاوية المخروطية تساوي الصفر). وتشير النتائج إلى عدم وجود فارق في قيم الكمون المتولد عند الالكترودين. ويمثل الشكل المعروض خرج المقطع العرضي للكمون الضغطي المحسوب بشكلٍ مماثل كما هو مدرج في (الشكل d.2.8). (f) فارق الكمون المحسوب بين النهايتين العليا والسفلى للالكترودات المولد النانوي، حيث يمثل هذا الفارق تابعاً للتخانة التي يتمتع بها مسقط كثافة السلك النانوي. ولقد تمت المحافظة على المسافة بين النهايتين العليا والسفلى للالكترود ثابتة القيمة وتساوي $5\mu\text{m}$. ويُعدُّ المقدار $90,000/\text{mm}^2$ الكثافة اللازمة لإحداث تغليف للركازة أحادي الطبقة كاملٍ ومنظم.



الشكل 3.8: أداء المولد النانوي المَعْلَب. (a) الخرج المقاس للمولد النانوي NG كتابع لثخانة الكثافة المسقطة للأسلاك النانوية المخروطية CNWs. (b) توتر الخرج المقاس و (c) تيار الخرج المقاس لمولد نانوي صنع من أسلاك نانوية مخروطية تتمتع بثخانة لمسقط كثافتها، التي تتراوح بين 7000-7500/mm². (d) توتر الخرج للمولد النانوي قبل تطبيق الديود وبعده بغية تقويم التيار المتولد. (e) جرى اختبار المولد النانوي لمدة 3 أيام لبيان مدى استقراره. عمل المولد النانوي بشكل مستمر لمدة 3 ساعات عند تردد مقداره 1.64Hz لكل يوم.

بغية تبسيط التصور عن الكمون المحسوب، يمكن من خلال الإحداثيات الثلاثية (x, y, z)، وكما هو مبين في الأشكال الموافقة لذلك، يمكن إدراج الرابطة بين كلٍّ من علاقة التوجيه بين النموذج الحقيقي للقياس (الشكل a2.8) ومثيله المستعرض في (الشكل b2.8) لتلك المقاطع العرضية، والتي أبدت توزعاً للكمون عندها (الأشكال c2.8 و d2.8). يتمتع الكمون الضغطي بقيم عالية داخل الأسلاك النانوية المخروطية، لذلك جرى إدراجه على انفراد في (الشكل c2.8). واستناداً لكلٍّ من الشكل المخروطي للأسلاك النانوية وتوضعها بعكس اتجاه المحور C، يكون الكمون الضغطي معاكساً بالإشارة لزوج من الأسلاك النانوية المخروطية الخاضعة لانفعال ضغط، ولكن مع توافر تفريق بسيط في مراكز الشحنات وفقاً للاتجاه الناظم على سطح الركازة، والذي يُعدُّ الآلية الأساس لخلق الشحنات التحريضية عند أعلى الالكترودات وأسفلها. فإذا جرى ضبط مقاس شاشة العرض للكمون الضغطي في الفراغ الواقع خارج الأسلاك النانوية المخروطية، فإن فارق الكمون التحريضي عبر الالكترودين،

وذا القيمة $0.8V$ ، يظهر بشكل جلي في (الشكل 2.8d)، إذ يتولد هذا الفارق في الكمون من خلال تطبيق انفعال ضغط مقداره 0.12% على النهاية المثبتة للسلك النانوي المخروطي (الانفعال الأعظم). ويُعد ذلك القوة الدافعة للمولد النانوي ذي التيار المتناوب. وبغية التأكد من أن الشكل المخروطي للسلك النانوي NW يعدُّ مفتاح الكمون الضغطي في تصميمنا هذا، فقد أظهر الحساب، الذي أُجري على الأسلاك النانوية الأسطوانية، والتي تتمتع بزاوية مخروطية مساوية للصفر، أظهر هذا الحساب عدم توافر أي فارق للكمون عبر الالكترودين (الشكل 2.8e) ولقد تثبتت حساباتنا أيضاً بأن التوتر عبر أعلى الالكترويدات وأسفلها يتناسب، وبشكلٍ تقريبي، مع ثخانة مسقط الكثافة للأسلاك النانوية المخروطية في حال كان شكل التوزيع الكامل لهذه الأسلاك يقل عن طبقة واحدة (الشكل 2.8f).



الشكل 4.8: قيادة ديود باعث للضوء LCD تجاري من قبل مولد نانوي. (a) أربع صور التقطت لدورة قيادة كاملة للديود باعث للضوء LCD بواسطة مولد نانوي NG عند تردد 0.3Hz . (b) و (c) قيم كل من التوتر والتيار المقاسة عند خرج المولد النانوي NG. يتضمن الجزء الأيمن من الشكل (a) الإشارة المكبَّرة لدورة خرج للمولد النانوي. استخدمنا دائرة منقطة بألوان مختلفة بغية إظهار وميض الديود باعث للضوء LCD، وذلك بما يتوافق مع كل ذروة للخرج المتناوب AC صادرة عن المولد النانوي NG، أما الديود باعث للضوء، فهو مأخوذ من آلة حاسبة. لم يُغذ المولد النانوي سوى جزءٍ صغير فقط من مساحة شاشة العرض الكلية. (d) الاستقرار الجيد لخرج المولد النانوي عند ازدياد تردد القيادة لهذا المولد.

8.3. الخرج العام

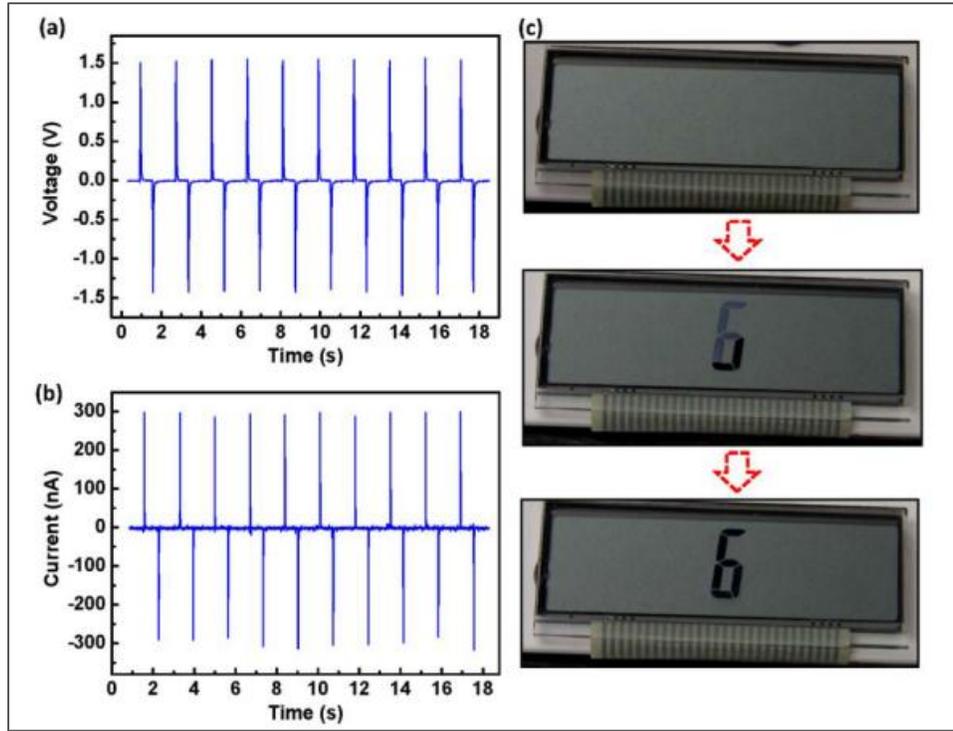
أجرينا في البداية اختبار المولد النانوي الحاوي سلكاً نانويًا مخروطياً من أكسيد الزنك جرى ترسيبه خلال دورة ترسيب واحدة، وذلك بما يتوافق مع توفير كثافة لهذه الأسلاك في وحدة المساحة تعادل $1400-1500\text{CNWs/mm}^2$. لاحظ أن كثافة الترسيب لهذه الأسلاك النانوية المخروطية منخفضة جداً مقارنةً مع مثيلتها لتلك الأسلاك النانوية المخروطية المشكلة لطبقة وحيدة كاملة ومغلقة، إذ تعادل كثافة الأخيرة في وحدة المساحة $90,000/\text{mm}^2$. بلغ توتر الخرج المقاس نحو 0.25V ، وتيار الخرج حوالي 5nA ، وذلك عند وصول الانفعال المطبق إلى 0.11% ومعدله إلى $3.67\%S^{-1}$. يكون خرج المولد النانوي NG، وبشكلٍ تقريبي، متناسباً خطياً مع ثخانة مسقط الكثافة للأسلاك النانوية المخروطية (الشكل a3.8)، وهذا ما يتفق مع التنبؤ النظري (الشكل f2.8). وبعد زيادة عدد دورات ترسيب الأسلاك النانوية المخروطية إلى 5 دورات، وبما يتوافق مع وصول ثخانة مسقط الكثافة إلى $7000-7500\text{CNWs/mm}^2$ ، ارتفعت قيمة توتر الخرج لتصل إلى 1.5V ، والتيار إلى $30-40\text{nA}$ (الشكلان c-b3.8). يمكن أن يتم تقويم تيار الخرج من خلال استخدام ديود (الشكل d3.8) وتخزين هذا التيار لاستخدامه لاحقاً. ولقد أظهر الجهاز استقراراً جيداً بعد ثلاثة أيام من اختباره (الشكل e3.8).

8.4. قيادة جهاز إلكتروني تقليدي

تُعدُّ استطاعة الخرج لمولد نانوي NG كافية لتغذية شاشة عرض لديود باعث للضوء LCD. ويُعدُّ الديود باعث للضوء جهازاً بلا أقطاب، ويمكن تغذيته مباشرة بواسطة استطاعة تيار متناوب ما دام كمون خرجة تجاوز بقيمه قيمة توتر العتبة للديود. وكانت شاشة عرض الديود باعث للضوء LCD، المستخدمة لإجراء هذا الاختبار، كانت قد أُخذت من آله حاسبة من نوع شارب. ولقد اختيرت مجموعة توصيل مناسبة بهدف الحصول على خرج ذي الرقم "6" على اللوحة الأمامية. وتتمتع المساحة المضاءة تقريباً بالمقاس نفسه، الذي يتمتع به المولد النانوي. ولقد جرى وصل شاشة الديود باعث للضوء مباشرةً إلى المولد النانوي ودون تدخل أية مصادر خارجية أو أجهزة قياس. و(الشكل a4.8) عبارة عن سلسلة من الصور التقطت لدورة تغذية كاملة للديود باعث للضوء من قبل المولد النانوي وتتردد مقداره 0.3Hz ، حيث يظهر وميض الديود باعث للضوء، وذلك بما يتوافق مع كل ذروة لخرج التيار المتناوب للمولد النانوي. قيس توتر الخرج، وكان مقداره 2V (وهذا مكافئ لتوتر دارة مفتوحة مقداره 3.3V) ومقدار تيار الخرج 50nA (الشكلان c-b4.8). وهكذا، أعطت شاشة عرض الديود باعث للضوء وميضاً عندما تُطبق على المولد النانوي انفعال ميكانيكي دوري، حيث كان مقدار الانفعال 0.11% ومعدله $3.67\%S^{-1}$. لم يتأثر خرج المولد النانوي بشكل واضح عند ازدياد تردد التغذية (الشكل d4.8)، ولقد كان بمقدور استطاعة الخرج، وعند كل ذروة، أن تُغذي الديود باعث للضوء LCD.

يستطيع المولد النانوي أن يُنير باستمرار الديود باعث للضوء. وتُعدُّ شاشة عرض الديود باعث للضوء جهازاً سعويًا يمكنه التخلص من شحنات الدخل خلال فترة وجيزة من الزمن، والتي يستمر الديود خلالها بالإضاءة إذا كان الحقل الكهربائي، المولّد بواسطة الشحنات المخزنة المتبقية، يتمتع بقيم أعلى من العتبة. ويُعدُّ ذلك ممكناً إذا كان زمن تفريغ الديود باعث للضوء أطول من الفترة الزمنية بين تأثيرين متعاقبين للانفعال الميكانيكي، وزمن شحنة أقصر من زمن الاستجابة للعين البشرية. يُبين (الشكلان b-a5.8) أداء المولد النانوي NG المتمتع بتوتر خرج مقداره 1.5V وتيار خرج مقداره 300nA . كانت المقاومة الداخلية المكافئة للمولد النانوي نحو $5.3\text{M}\Omega$ ، وحُصبت استطاعة الخرج العظمى لتصل إلى نحو 118nW . وعندما جرى تغذية شاشة عرض الديود باعث للضوء من قبل المولد النانوي، أبدت هذه الشاشة إضاءة مستمرة (الشكل c5.8). من الفيديو المسجل، يمكننا أن نرى أن الشاشة أعطت وميضاً في البداية، وبعد ذلك، أُنير جزءٌ من شرائحها بشكل مستمر.

وختاماً، وبعد عدة أدوار، تصل الشاشة إلى وضع إضاءة متوازن لكامل الحرف، مما يعني أن المولد النانوي المعد من قبلنا، يمكن أن يولد استطاعة كافية للتغذية المستمرة للديود الباعث للضوء.



الشكل 5.8: التغذية المستمرة لديود باعث للضوء LCD تجاري من قبل مولد نانوي خاضع لانفعال ميكانيكي عند تردد مقداره 0.56Hz. (b,a) القيم المقاسة لكل من توتر الخرج وتياره للمولد النانوي، حيث كان مقدار ذروة التوتر مساوياً 1.5V، وذروة التيار 300nA. (c) ثلاث صور التقطت للديود الباعث للضوء عندما كان المولد النانوي خاضعاً لانفعال دوري عند تردد مقداره 0.56Hz، حيث يظهر أن جزءاً من الحرف "6" قد تمت إضاءته في البداية، وفيما بعد تمت إضاءة جميع أجزاء هذا الحرف بشكلٍ كاملٍ ومستمر.

8.5 ملخص

هناك مزايا عدة تتمتع بها الأسلاك النانوية لاستخدامها في تجميع الطاقة بدلاً من الأفلام الرقيقة: أولاً، يحتاج نمو فيلم رقيق من أكسيد الزنك ZnO أحادي البلورة، يحتاج درجة حرارة عالية (نموذجياً، تكون هذه الدرجة أكبر من 400°م²⁷⁻²⁵)، إذ تحدُّ هذه الدرجة من اختيار الركائز، وخاصةً تلك المستخدمة في الإلكترونيات المرنة. لدى استخدام الأسلاك النانوية، وعلى الرغم من أنها تحتاج كي تنمو درجة حرارة عالية نسبياً، إلا إن تحويل الأسلاك النانوية من ركازة نامية إلى أية ركازة أخرى تُعدُّ عمليةً سهلة وبسيطة إذا جرى استخدمت تقنية "إسقاط القطرات" المعدَّة من قبلنا (انظر الشكل a1). ثانياً، تُعدُّ البنية المركبة من أكسيد الزنك والبولي ميثيل ميثانتراليت PMMA أكثر مرونةً من الفيلم الرقيق من أكسيد الزنك. وبغية اختبار مرونة الفيلم الرقيق من أكسيد الزنك، قمنا بعملية الرشاشة لفيلم من أكسيد الزنك ثخنه 100nm على ركازة كابتون، وكانت مغلقة بـ PMMA. يُبين الشكل S11 صوراً، التقطت بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM، لفيلم من أكسيد الزنك قبل أن يُجهد هذا الفيلم وبعد إجهاده، وذلك من خلال إخضاعه لانفعال ضغط مقداره 0.1%. يمكننا أن نرى أن هناك الكثير من خطوط التصدع في الفيلم عمودية على اتجاه الانحناء، بينما لا يتوافر أي شق في البنية المركبة من الأسلاك النانوية من أكسيد الزنك و PMMA، وذلك بعد إخضاع هذه البنية المركبة لانفعال للدرجة نفسها ولعدة أيام.

بالمقارنة مع نهجنا المعروف سابقاً^{16,13}، تتمتع طريقتنا الجديدة بالمزايا الفريدة التالية: أولاً، تكون الأسلاك النانوية المخروطية مغلقة تماماً بالبوليمير دون أن يكون لها أي تماس مباشر مع الالكترودات. وربما يكون هذا التصميم اللاتماسي قادراً على عرض مولد نانوي متين ويتمتع باستقرارٍ عالٍ. ثانياً، ومن خلال استعراض عملية التصنيع المدرجة في الشكلين 1 و S1، يُلاحظ أن إجراءات تصنيع المولد النانوي بسيطة فعالة وغير مكلفة. وختاماً، تتمتع هذه الطريقة بكمونٍ قابلٍ للتطبيق، وربما تكون قابلةً لإدخالها في عمليات الإنتاج بالجملة.

باختصار، بغية الاستفادة من الشكل المخروطي الذي تتمتع به أسلاك أكسيد الزنك النانوية، جرى تصنيع مولد نانوي من خلال رشاشة هذه الأسلاك على فيلم مستوٍ مُعدٍّ من PMMA بغية تشكيل بنية "مركبة" معقولة. ويمكن أن يقود السطح المستوي لـ PMMA إلى توافر مسقط على المحور C لتجمع - أحادي القطبية للأسلاك النانوية المخروطية وفقاً لاتجاه عمودي على الركازة، والذي يُولد كموناً كهروضغطياً ماكروبياً عبر ثخانة البنية لدى إخضاعها لانفعال ميكانيكي.

أقترح أن التيار المتناوب الملحوظ ناتجٌ عن التدفق الديناميكي للشحنات التحريضية بين أعلى سطح الالكترودات وأسفله من البنية، التي تخضع مرة واحدة لانفعال ميكانيكي ديناميكي. أما بالنسبة للمولد النانوي، الذي يتمتع بثخانة لمسقط كثافة السلك النانوي معادلة $7000/\text{mm}^2$ وأبعاده الفيزيائية $1.5 \times 2 \text{mm}^2$ ، ويخضع لانفعال ضغط مقداره 0.11% ومعدل انفعال مقداره $3.67S^{-1}$ ، فإن هذا المولد يعطي توتر خرج مقداره 2V (وهذا يكافئ توتر لدارة مفتوحة مقداره 3.3V)، والذي أبدى أن بإمكانه أن يمدّ بالتغذية المستمرة شاشة عرض ذات البلورات السائلة LCD تجارية. والمهم، أن المولد النانوي، المستخدم في تغذية شاشة العرض ذات البلورات السائلة LCD، يتمتع بمقاسٍ مماثلٍ لذلك المقاس للمساحة المضاعة، لهذا، يمكن أن يجري دمج هذا المولد النانوي في خلف شاشة العرض LCD، مشيراً إلى إمكانية قيامه بالتغذية الدائمة لشاشة عرض مرنة. ويُعدُّ المولد النانوي المعدُّ من قبلنا، عبارة عن تقانة بسيطة فعالة وقليلة الكلفة وقابلة لتغير القياس بغية استخدامها في تصنيع الالكترونيات الشخصية والأنظمة ذاتية التغذية.

8.6. المراجع

[1] Y.F. Hu, Y. Zhang, C. Xu, G. Zhu and Z.L. Wang, *Nano Letters* **10**, 5025 (2010).

[2] R.S., Yang, Y. Qin, L.M. Dai, Z.L. Wang, *Nature Nanotech.* **4**, 34 (2009).

الفصل التاسع: المولدات النانوية ذات الأساس الليفي

يمكن أن تُصنَّع المولدات النانوية على مجموعة من الركائز، إذ تنتوع هذه الركائز بدءاً من البوليميرية ونصف الناقلة إلى المعدنية، وبتدءاً من الركيزة المستوية حتى الركيزة ذات الأساس الليفي، ذلك لأن الأسلاك النانوية من أكسيد الزنك ZnO يمكن أن تنمو عند درجة حرارة منخفضة، وعلى أية ركيزة، ومهما كان شكل الأخيرة، إذ يجري هذا النمو عبر محلول. وسوف نركّز في هذا الفصل على المولدات النانوية المصنّعة حول ليفٍ ناعمٍ لدرجة أنه كان كالشعرة [1].

9.1. البنية الهجينة من ليفٍ ميكروي وسلك نانوي

9.1.1. تصنيع البنية

جرى إنماء أسلاك أكسيد الزنك النانوية ZnONWs قطعياً حول ألياف من النوع Kevlar129، وذلك باستخدام الطريقة الهيدروحرارية (الحرمائية). بعد ذلك، ضُمت هذه الأسلاك النانوية كيميائياً إلى سطح ليفي، إضافة إلى ضمها بعضها إلى بعض، وذلك من خلال تغليفها بمركب تترائيثوكسيلين (TEOS). جرى تجميع المولد النانوي NG مزدوج الليف من خلال تشبيك الليف، المغطى بالأسلاك النانوية NWs المنمّاة، حول ليفٍ آخر مغلف بالأسلاك النانوية المكسوة بالذهب. ولدى الإمساك بنهايتي أحد الليفين، وزلق الليف الآخر إلى الأمام والخلف، فإن حركة الفرشنة النسبية (كفرشاة) بين هذين الليفين تولّد تيار خرج بسبب اقتران (ترابط) الخواص الكهروضغطية ونصف الناقلة في هذه الحالة. ولقد جرى تسجيل كلٍّ من تيار الدارة المفتوحة ومثيله للمغلقة، وذلك عند زلق أحد الليفين بالنسبة للآخر.

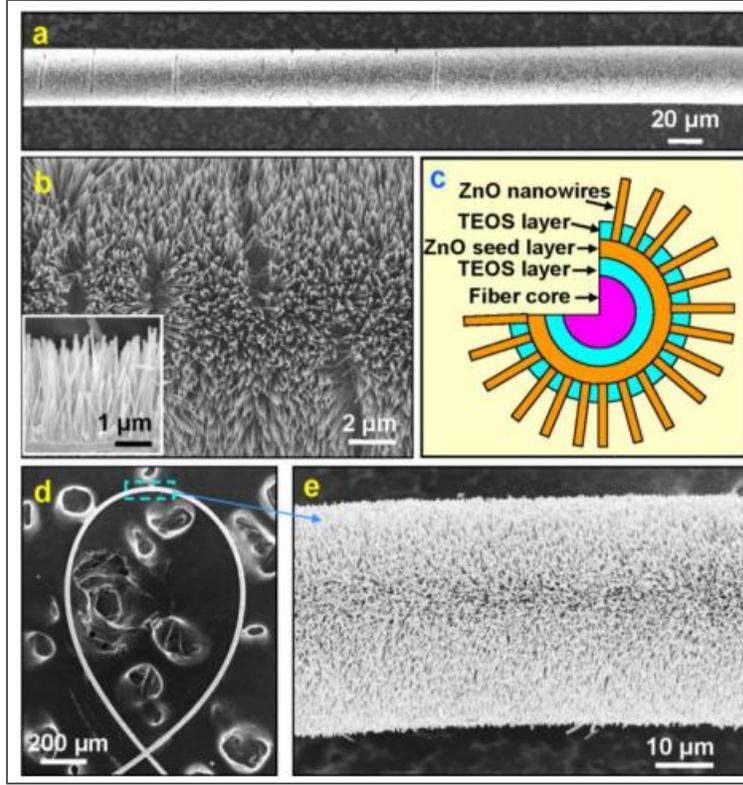
كانت الألياف المستخدمة في تجاربنا هي الألياف من النوع كيفلر 129 ذات القطر $14.9 \mu\text{m}$. أولاً، جرى تنظيف هذه الألياف بالأسيتون، ثم بالإيثانول، وذلك من خلال تغطيس الألياف لمدة 5 دقائق في كلٍّ منهما. أُلقت طبقة من بذور أكسيد الزنك، ثخنها 100 nm، بشكل منتظم حول الليف، وذلك باستخدام طريقة الرشاشة المغنترونية. بعد ذلك، جرى إنماء أسلاك أكسيد الزنك النانوية قطعياً على سطح الليف بواسطة الطريقة الهيدروحرارية (الحرمائية)، وذلك من خلال تغطيس هذه الألياف في محلول فعّال عند درجة الحرارة 80°C . ولقد حُضّر هذا المحلول الفعّال من خلال إذابة 0.1787g من نترات الزنك المائية $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و 0.08819g من هيكساميثيلين تيترامين (HMTA) في 250 mL من الماء المقطر وعند درجة حرارة الغرفة. ولقد كان تركيز كل منهما في المحلول مساوياً في 0.025 مول/ل. وبعد تعتيق الألياف داخل المحلول لمدة 12 ساعة، يتحول لونها إلى الأبيض، مما يدل على أن هذه الألياف قد تمت تغطيتها بكثافة بأسلاك أكسيد الزنك النانوية. وختاماً، جرى غمسها بالماء المقطر لعدة مرات، ومن ثمّ تحميتها لمدة ساعة عند درجة الحرارة 150°C . غمرت الألياف، المغلفة بنسيج من أسلاك أكسيد الزنك النانوية، لمدة 2-3 دقائق في محلول يحوي 99.9% من (TEOS). ونظراً لاحتواء طبقة بذور أكسيد الزنك المرسّبة على بعض الشقوق بشكلٍ طبيعي، وذلك بسبب عدم تأقلم هذه الطبقة مع الليف، يمكن للقوة الشعرية أن تجذب TEOS لتتساب عبر الشقوق وصولاً إلى السطح البيني الواقع بين طبقة بذور أكسيد الزنك والليف، إضافةً إلى وصولها إلى جذور الأسلاك النانوية. وبهذا الشكل، تشكلت طبقتان من TEOS، إذ تقع إحدهما فوق طبقة بذور أكسيد الزنك الأخرى وأسفلها.

يُبين (الشكل 1.9 a) صورة نموذجية، التقطت بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM، لليف كيفلر المغلف بسلك نانوي من أكسيد الزنك. تتمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية على كامل الطول الليفي، مشكلةً غطاءً منتظماً جداً، ومحافظةً بشكل جيد على شكلها الأسطواني. ويمكن مشاهدة بعض التصدعات في مصفوفات السلك النانوي (الشكل 1.9 b)، التي تنتج بسبب نمو هذه المصفوفات الناجم عن توافر التوتر السطحي داخل طبقة البذور. وتكون جميع أسلاك أكسيد الزنك النانوية على شكل بلورة أحادية، وتتمتع

بمقطع عرضي على شكل موشور سداسي، ويتراوح قطرها ضمن المجال 50-200 nm~، ويصل طولها النموذجي إلى 3.5 η m. وتكون السطوح العلوية والجانبية لهذه الأسلاك ناعمة ونظيفة، مما يدل على أن هذه الأسلاك قادرة على تشكيل وصلات موثوقة من المعدن - ونصف الناقل لزوم تصنيع المولد النانوي. ويكون الفراغ بين الأسلاك النانوية من مرتبة بضعة مئات من النانومتر، إذا يُعدُّ هذا الفراغ كبيراً بما فيه الكفاية لإخضاع هذه الأسلاك للانحناء بغية توليد الكمون الكهروضغطي [2]. وتكون قمم الأسلاك النانوية منفصلة الواحدة عن الأخرى بسبب زوايا ميلها الصغيرة ($\pm 10^\circ$)، ولكن نهاياتها السفلى تكون موصولة بشكل محكم (الصورة الداخلية في الشكل 1.9 b). وفي النتيجة، تؤدي استمرارية فيلم أكسيد الزنك عند جذور الأسلاك النانوية، تؤدي هذه الاستمرارية دور الالكترود المشترك لمخرج وحيد. ولقد أظهرت نتائجنا السابقة أن استخدام مجهر القوة الذرية AFM لمعالجة السلك النانوي لأكسيد الزنك، والذي ينمو داخل المحلول، أن يُنتج توتر خرج يصل مقداره إلى 3.45 mV [3].

بغية المحافظة على تمتع الليف بمرونة عالية بعد نمو كلٍّ من الفيلم والأسلاك النانوية، جرى إدخال إستراتيجية الغطاء السطحي لتحسين الأداء الميكانيكي وتوفير الانحناء للأسلاك النانوية. وكما هو موضَّح في (الشكل 1.9 c)، رُشحت طبقتان من (TEOS)، لتتوضعا في أعلى طبقة بذور أكسيد الزنك وأسفلها، ولتؤدي دور المحفز للانحناء. وتكون روابط السيلكون-أكسجين Si-O داخل TEOS شديدة التفاعل مع المجموعات OH⁻ على سطح أكسيد الزنك، وتكون سلاسله العضوية مربوطة بإحكام مع جسم الليف المعدّ من البوليميد العطري. وفي النتيجة، حُزمت كلُّ من طبقة البذور ونواة الليف بعضها مع بعض بإحكام بواسطة طبقة رقيقة من TEOS.

وعلاوةً على ذلك. ولما كانت TEOS يمكنها أن تشكل بسهولة سلاسل ربطٍ عابرة، فإن الأسلاك النانوية قد جرى جمعها وحزمها معاً عند جذورها، وتثبيتها على طبقة بذور أكسيد الزنك، مما يشكل نجاحاً في منع الأسلاك النانوية من تعرضها للاحتكاك/أو النزح أثناء تعرضها لعمليتي التمشيط/أو الانزلاق الميكانيكيتين. حتى عندما جرى حني الليف على شكل دائرة قطرها نحو 1 mm~، لم يلاحظ وجود أي شقوق في طبقة الغطاء للسلك النانوي من أكسيد الزنك، أو فقدان أجزاء من هذه الطبقة، أو نزعها (الشكل 1.9 d). وفي منطقة الانحناء بقي التراص القطري للأسلاك أكسيد الزنك النانوية محافظاً، وبشكل جيد، على طبيعته (الشكل 1.9 e)، مما يدل، وبشكل واضح، على متانة هذا التراص القطري للأسلاك عند تعرضها لانفعال ميكانيكي وانحناء.



الشكل 1.9: ألياف كيفلر المغطاة بسلك نانوي من أكسيد الزنك. (a) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM لليف كيفلر مغلف بمصفوفات لسلك نانوي من أكسيد الزنك على طول الاتجاه القطري. (b) صورة بتكبير عالٍ للليف، وصورة داخلية مكبرة لمقطعه العرضي، التقطنا بالمجهر الإلكتروني الماسح. وتبين الثانية كيفية توزع الأسلاك النانوية. (c) مخطط يُبين بنية المقطع العرضي للليف المعزَّز بـ TEOS، والمصمَّم لتحسين الأداء الميكانيكي. (d) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح للليف حلقي، والتي تبين كلاً من مرونة طبقة السلك النانوي وانحنائها الشديد. (e) مقطع مكبَّر للليف حلقي، يُظهر كيفية توزع أسلاك أكسيد الزنك النانوية عند منطقة الانحناء.

9.1.2. تصنيع المولد الليفي

جرى تجميع مولد نانوي NG مزدوج الليف باستخدام ليفيين مغلفين بأسلاك أكسيد الزنك النانوية، طول كل منهما 3 سم، أحدهما مغطى بالذهب Au، والآخر كما جرى إنمائه (أي دون تغطية). ولقد تمت التغطية بطبقة الذهب من خلال استخدام منظومة رشاشة بالتيار المستمر. وخلال عملية الرشاشة، تُبث الليف من إحدى نهايتيه على المنصة، وتُرك جسمه قائماً حراً. لهذا، جرى الحصول على تغطية منتظمة بالذهب على كامل الليف، وذلك من خلال تدوير المنصة المثبت عليها النموذج. وعموماً، كانت ثخانة التغطية بالذهب مساوية 300 ± 20 nm، تمت قراءتها بواسطة جهاز قياس الثخانة من النوع الكوارتزي، الموجود داخل منظومة الرشاشة. ولدى تجميع المولد النانوي مزدوج الليف، تُبثت كلتا نهايتي ليف السلك النانوي من أكسيد الزنك، الذي جرى إنمائه، تُبثت على ركازة زجاجية، بحيث جرى تأريض إحدى النهايتين ووصلها كهربائياً إلى دارة قياس خارجية، وليشكل هذا الليف مصعد الخرج للمولد النانوي. ولقد جرى وصل إحدى نهايتي الليف المغطى بالذهب إلى نابض صغير، كان مثبتاً على الركازة، بينما وُصلت النهاية الأخرى إلى نابض جذب، وبهذا الشكل يستطيع هذا الليف أن يتحرك بحرية إلى الأمام والخلف. وجرى وصل الليف المغطى بالذهب كهربائياً إلى دارة خارجية، وليشكل مهبط الخرج للمولد النانوي. ولقد شكل الطول الفعّال للمولد النانوي الليفي 4-5 nm، واحتوى تسعة أدوار بشكل نموذجي، حيث شكل طول الدور الواحد نحو $500 \mu\text{m}$.

تُبث المولد النانوي مزدوج الليف على منصة ساكنة، بينما وُصل الليف المتحرك المغطى بالذهب إلى قضيب شد. وكان هذا

القضيب مقادراً بمحرك، جرى التحكم بسرعته، ومزوداً بنتوءٍ على محور دورانه، قام بتحويل الحركة الدورانية إلى حركة ترددية أمامية – خلفية لقضيب الشد، وعند تردد جرى اختياره مسبقاً. وخلال كل شوط، تحرك الليف المغطى بالذهب في البداية باتجاه الشد، وذلك عند رفع قضيب الشد للأعلى، وبعدئذٍ تمت إعادته إلى وضعه الطبيعي بواسطة الناibus الموصول إلى النهاية الأخرى. ولقد جرى التوصل إلى حركة التمشيط الأمامية-الخلفية بين الليفين، وعند ترددٍ مُتحكم به.

وبغية عرض مقدر الألياف المغطاة بسلك نانوي من أكسيد الزنك، على توليد الطاقة، صُممت منظومة نموذج مزدوج الليف كما هو مبين في (الشكل 2.9 a) مؤلفة من ليفين أحدهما مغطى بطبقة من الذهب ثخينها 300 nm، والآخر كما جرى إنمائه دون تغطية، بحيث جرى تشبيكهما معاً لتشكيل نواة لتوليد الطاقة. ولقد تمت نمذجة عملية التمشيط النسبي بين الليفين من خلال إجراء شد/وارتخاء لناibus بواسطة دوار خارجي ذي تردد متحكم به. جرى وصل الليف المغطى بالذهب إلى دارة خارجية، ليشكل هذا الليف مهبط الخرج للمولد النانوي. ولقد تضمنت قوة السحب تلامساً جيداً بين الليفين، كما هو موضح بالصورة الملتقطة بالمجهر الضوئي في (الشكل 2.9 b).

في هذا التصميم، أدت أسلاك أكسيد الزنك النانوية المغطاة بالذهب، دور أطراف مستدقة معدنية ماسحة، وحزمت أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتجزرة عند الليف الآخر، ولقد أسفرت الخاصية الكهروضغطية ومثيلتها نصف الناقل عن كل من توليد الشحنات وتراكمها وتحريرها. تُغلف التغطية بالذهب أسلاك أكسيد الزنك النانوية بشكل كامل، وتشكل طبقة مستمرة على كامل الليف. ولقد جرى التأكد من التغطية الناجمة من خلال دراسة خاصية التيار – توتر المعدنية لهذه التغطية (الشكل S1). ولدى تشابك الليفين معاً بحزم، توغلت قليلاً بعض الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب إلى الفراغات الموجودة بين الأسلاك النانوية غير المغطاة والمتجزرة عند الليف الآخر، وذلك كما هو واضح من خلال صورة السطح البيئي في (الشكل c2). وهكذا، وعند توافر انزلاق/انحراف نسبي بين هذين الليفين، أدى انحناء أسلاك أكسيد الزنك النانوية غير المغطاة إلى توليد كمون كهروضغطي عبر عرض الليفين، وأدت الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب دور الالكترود المتعرج (على شكل زكراك)، وذلك كما هو الحال في مولدات التيار المستمر النانوية لتراكم الشحنات ونقلها.

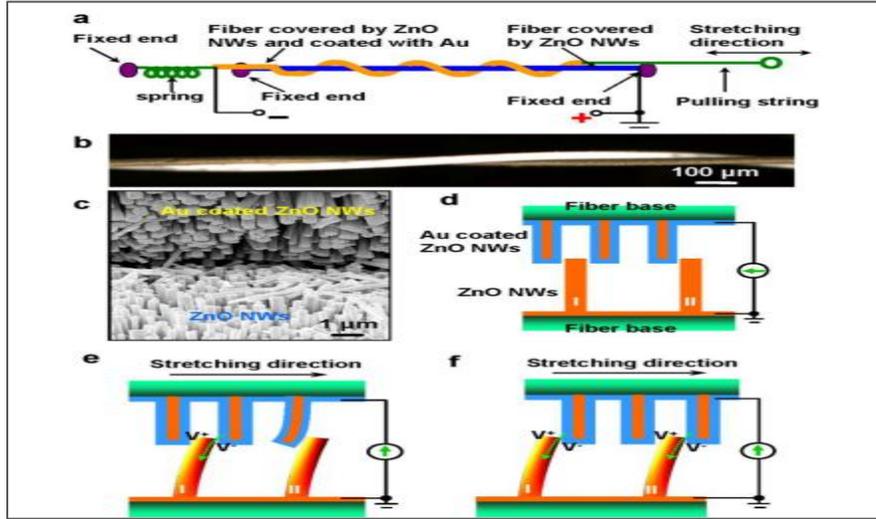
9.1.3. آلية العمل

توضح (الأشكال 2.9 f-d) آلية توليد الشحنة من قبل المولد النانوي الليفي. بشكل مماثل لتلك الحالة، التي جرى فيها حني السلك النانوي بواسطة الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية AFM، فعندما يتحرك الليف العلوي إلى الجانب الأيمن مثلاً، تقوم الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب بحني مثيلاتها غير المغطاة إلى الجانب الأيمن (ولتبسيط الوصف، نفترض أن الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب صلبة جداً وتخضع لانحناء أقل)، وهكذا يتولد كمون كهروضغطي عبر السلك النانوي غير المغطى بسبب تمتعه بالأثر الكهروضغطي، بحيث يكون هذا الكمون مع السطح المشدود موجباً (V^+) ومع السطح المضغوط سالباً (V^-) [4]. يتمتع جانب الكمون الموجب بتماس شوتكي المنحاز عكسياً مع الذهب، ولهذا يمنع تدفق التيار، بينما يتمتع جانب الكمون السالب بتماس شوتكي المنحاز إلى الأمام مع الذهب، ويسمح للتيار بالتدفق من الذهب إلى السلك النانوي. ولما كانت كثافة الأسلاك النانوية عالية (انظر الشكل 1.9 b)، فمن المحتمل جداً أن يلامس السلك النانوي المحني، والمتجزر عند الليف غير المغطى، يلامس السلك النانوي الآخر المغطى بالذهب، وذلك بعد إخضاعه للانحناء (كما هو الحال في السلك النانوي NWI في الشكل 2.9 e).

ففي هذه الحالة، يلامس سطح الكمون السالب، للسلك النانوي من أكسيد الزنك، يلامس طبقة الذهب لذا ينحاز حاجز شوتكي، الموجود عند السطح البيئي، ينحاز إلى الأمام مسفراً عن حدوث تدفق للتيار من طبقة الذهب إلى داخل السلك النانوي من أكسيد الزنك. بعد ذلك، وعندما يحافظ الليف العلوي على حركته بعيداً باتجاه الجانب الأيمن (الشكل 2.9 f)، تقوم الأسلاك النانوية

المغطاة بالذهب بالمسح عبر طرف أسلاك أكسيد الزنك النانوية، ولتصل إلى جانبها المشحون سلباً NW_{II} و NW_I في (الشكل f 2.9). ولهذا، سوف يتحرر تيار أكبر عبر حاجز شوتكي المنحاز إلى الأمام (الشكل 2.9 f). وهذا يعني أن التيارات الصادرة عن جميع الأسلاك النانوية، سوف يُضاف بعضها إلى بعض بشكلٍ بناء دون النظر لاتجاه انحراف السلك النانوي، حتى لو جرى هذا الانحراف خلال دور السحب نفسه. ويجري تحديد توتر الخرج من خلال خاصية أحد الأسلاك النانوية، ولن تتغير إشارة التوتر استجابة لشكل انحراف السلك النانوي بسبب توافر أثر التقويم لحاجز شوتكي عند السطح البيئي الواقع بين الذهب - أكسيد الزنك Au-ZnO.

ويمكن توقع الأثر نفسه إذا كان الليف العلوي مدفوعاً ليعود باتجاه الجانب الأيسر. ونظراً لتمتع أعلى الأسلاك النانوية، وأسفلها بخواص ميكانيكية متشابهة، يمكن أن يجري أيضاً حني الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب بواسطة الأسلاك النانوية المتجدرة عند الليف غير المغطى، ولكن ذلك لن يؤثر في الآلية الموضحة في (الشكل 2.9). أما بالنسبة لليف المغطى بالذهب، فإن جميع الأسلاك النانوية تكون مغلقة بشكل كامل بطبقة ثخينة من الذهب، ويمكن لهذه الأسلاك أن تؤخذ بالحسبان وكأنها إلكتروكود كمون مكافئ موصول إلى دارة قياس خارجية. وهكذا، يقتصر الدور، الذي تؤديه أسلاك أكسيد الزنك النانوية $ZnONW_s$ ، على أنه دورٌ عارضى لتدعيم التغطية بالذهب، ولم يُحتفظ بأية شحنات كهروضغية داخل هذه الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب.



الشكل 2.9: تصميم مولد نانوي ذي أساس ليفي وآلية عمله، وذلك عند قيادته بقوة سحب /أو احتكاك/ أو اهتزاز خارجية ذات تردد منخفض. (a) كيفية إعداد المخطط التجريبي لمولد نانوي ذي الأساس الليفي. (b) صورة ميكروية بالمجهر الضوئي لزوج من الألياف المتشابكة بعضها مع بعض أحدهما مغطى بالذهب (ذو الانعكاس تباين مظلم). (c) صورة التقطت بالمجهر الإلكتروني الماسح SEM، لسطح بيئي "سن إلى سن" لليفين مغلقتين بالأسلاك النانوية، حيث تمت تغطية الليف العلوي بالذهب. وتقوم الأسلاك النانوية المغطاة بالذهب، وبالذات في أعلاها، تقوم بدور "أطراف" توصيل، إذ تقوم بحرف/أو حني الأسلاك النانوية الموجودة في الأسفل. (d) مخطط توضيحي للجمع "سن إلى سن" بين ليفين مغلقتين بالأسلاك النانوية.

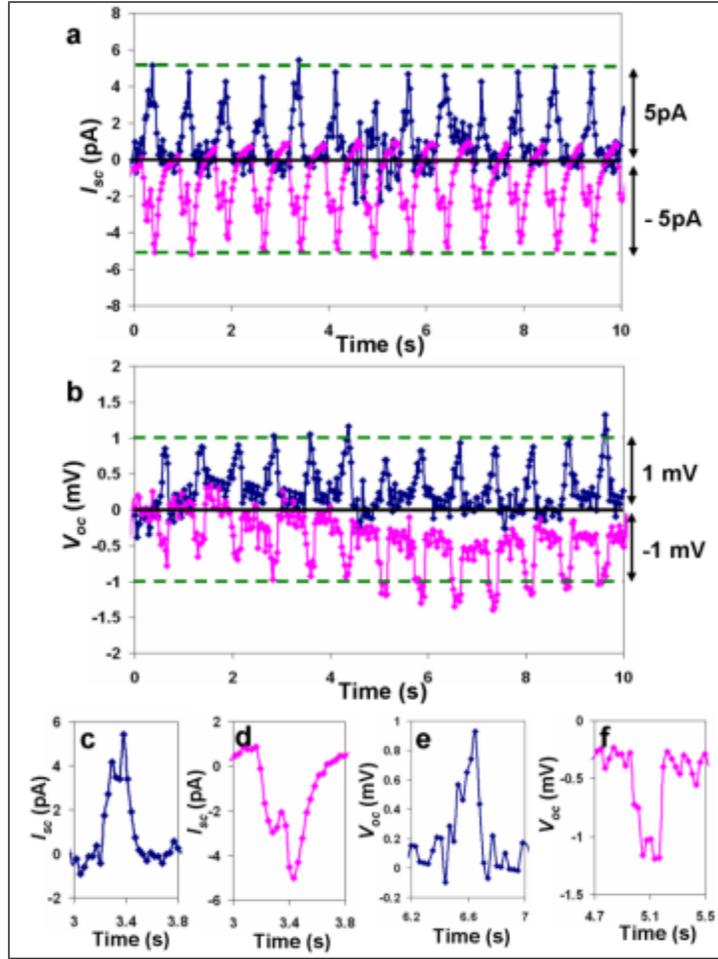
(e) الكمون كهروضغتي المتولد عبر السلكين النانويين NW_{II} و NW_I ، وذلك عند سحب الليف العلوي بواسطة قوة خارجية. لا يسمح الجانب، المتمتع بكمون كهروضغتي موجب، بتدفق التيار بسبب وجود حاجز شوتكي ذي الانحياز العكسي. تم، ولمرة واحدة، دفع السلك النانوي، لينحني هذا السلك لمسافة كافية تمكنه من الوصول إلى السلك الآخر المغطى بالذهب، وسوف يجري دفع الإلكترونات، الموجودة في الدارة الخارجية، لتتدفق عبر سلك نانوي غير مغطى بسبب توافر حاجز شوتكي، ذي الانحياز الأمامي، عند السطح البيئي. (f) عندما يجري دفع الليف العلوي بعيداً، يمكن للأسلاك النانوية المغطاة بالذهب أن تؤدي دور فرشاة عبر الأسلاك النانوية غير المغطاة. ولمرة واحدة، وفي اللحظة الأخيرة، وعندما يكون كلا نوعي الأسلاك النانوية موجودين في تماس نهائي، يكون السطح البيئي عبارة عن حاجز شوتكي المنحاز عكسياً، والذي يُسفر عن وجود المزيد من خرج التيار الكهربائي، وكما يشار إليه برؤوس الأسهم. ويساوي تيار الخرج مجموع ما تسهم به جميع الأسلاك النانوية من تيارات خرج.

9.1.4. قياسات الخرج

جرى قياس كل من تيار دائرة القصر (I_{sc}) وتوتر الدارة المفتوحة (V_{oc}) بغية توصيف أداء المولدات النانوية الليفية. ولقد أنجزت عملية السحب وإزالته لليف المغطى بالذهب بواسطة محرك يعمل عند تردد متحكم به. ولقد جرى الكشف عن إشارات التيار المتولد عندما كانت سرعة الدوران للمحرك مساوية 80rpm دورة في الدقيقة (وكل 60 دورة في الدقيقة تعادل 1Hz)، وكما هو موضح في (الشكل 3.9 a). طبقت طريقة اختبار "تبديل القطبية" خلال كامل عملية القياس بغية حذف آثار تصنيع منظومة القياس في القيم المقاسة. فعندما وُصل جهاز قياس التيار بشكل أمامي إلى المولد النانوي، الذي يعني أن المسابر الموجبة والسالبة لجهاز قياس التيار قد جرى وصلها إلى المآخذ الموجبة والسالبة للمولد النانوي بالترتيب، وكما هو موضح في (الشكل 2.9 a)، جرى الكشف عن وجود نبضات تيار موجبة مقدارها نحو 4 pA، وذلك خلال كل عملية سحب وإزالته (المنحني الأزرق في الشكل 3.9 a). أما نبضات التيار السالبة، والمتمتعة بالسعة نفسها، فقد جرى الحصول عليها عندما وُصل جهاز قياس التيار بشكل عكسي، والذي يعني أن المسابر الموجبة والسالبة لجهاز قياس التيار قد جرى وصلها إلى المآخذ السالبة والموجبة للمولد النانوي بالترتيب (المنحني ذو اللون الزهري في الشكل 3.9 a). ويعود السبب الرئيس في صغر قيم تيار الخرج (نحو 4 pA) إلى وجود فاقد كبير في التيار أثناء مروره في الليف بسبب تمتع الأخير بمقاومة داخلية عالية جداً ($R_i \approx 250 \text{ M}\Omega$). ومن المحتمل أن يكمن سبب تمتع المولد النانوي ذي الأساس الليفي بمقاومة كبيرة في وجود شقوق في طبقة بذور أكسيد الزنك، التي تكون متاخمة مباشرة لليف، ويعود سبب وجود هذه الشقوق إلى كل من عدم التوافق في البنية لليف وطبقة البذور واختلاف كبير في معاملات التمدد الحراري بينهما. ويُعدُّ خفض قيم المقاومة R_i للمولد النانوي الليفي طريقة فعالة لتحسين مردود استطاعة الخرج لهذا المولد، الذي يجري إدراجه في (الشكل 4 b). ولقد أكدت إشارات تيار الخرج العكسي أن التيار قد جرى توليده فعلاً من قبل المولد النانوي الليفي. جرى تكبير أشكال نبضة التيار الموجبة والسالبة وإظهارها في (الشكلين 3.9 d, c) بالترتيب، ويبدو فيها واضحاً توافر ذروة (قمة) مزدوجة عند كل دورة سحب لليف.

لقد جرى أيضاً قياس توتر الدارة المفتوحة من خلال استخدام طريقة تبديل القطبية. وجرى الحصول على إشارات التوتر الموجبة والسالبة الموافقة، وذلك عند وصل جهاز قياس التوتر بشكل أمامي أو عكسي إلى المولد النانوي الليفي بالترتيب (الشكل 3.9 b). وكانت سعة (أو مطال) إشارات التوتر في هذه الحالة بحدود 1-3 mV (انظر أيضاً إلى الشكل 4S). وكما هو الحال في إشارة التيار، فلقد جرى الكشف أيضاً عن توافر ذروة (قمة) مزدوجة في إشارات التوتر الموجبة والسالبة، وكما هو موضح في (الشكلين 3.9 e, f).

تتعلق الذرة (القمم) المزدوجة في إشارة الخرج (الأشكال 3.9 f-c) بالحركة الدورية لليف. فعندما جرى سحب الليف إلى الجانب الأيمن، وخلال تعرضه للتمدد، ومن ثم عودته للانكماش بواسطة النابض عند إزالة السحب عن هذا الليف، تبقى الآلية نفسها الموضحة في (الشكل 2.9). وعلى الرغم من أن اتجاهي الحركة متعاكسان، فإن التيارات المولدة تتدفق بالاتجاه نفسه، وبشكل مقدار التأخير نحو 0.2 ثانية في الذرة (القمم) المزدوجة الناتجة، الواحدة بالنسبة للأخرى، وذلك لكل من التيار والتوتر الناتجين. ويُعدُّ ذلك ظاهرة عامة، تتوافر في كل نبضة خرج بغض النظر عن قطبيته، ويمكن أن يتعلق هذا الفارق البسيط في مطال الذروة المزدوجة بالسرعة التي يجري فيها سحب الليف وتركه حرّاً.

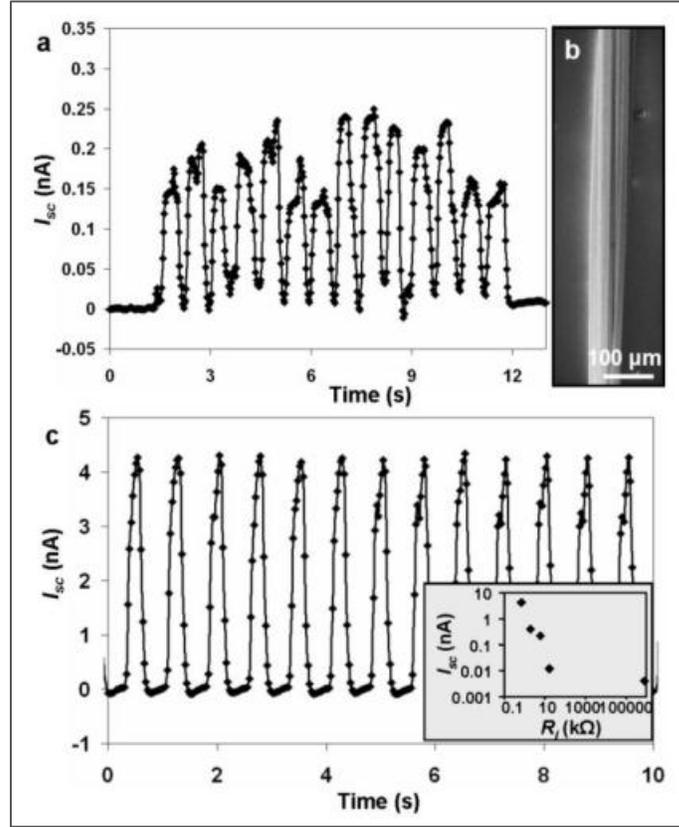


الشكل 3.9: الخرج الكهربائي لمولد نانوي مزدوج الليف. (a) تيار الخرج لدارة القصر (I_{sc}) و (b) توتر الخرج للدارة المفتوحة (V_{oc}) لمولد نانوي مزدوج الليف، جرى قياسهما لدى تطبيق قوة سحب خارجية عند تردد 80 دورة في الدقيقة. جرى تمثيل إشارات الخرج من خلال المنحني ذي اللون الزهري، وذلك عندما جرى وصل دارة القياس بالشكل الأمامي إلى المولد النانوي، والذي يعني أن المسابر الموجبة والسالبة لجهاز القياس قد جرى وصلها إلى المآخذ الموجبة والسالبة للمولد النانوي بالترتيب. ولقد جرى تمثيل إشارة الخرج من خلال المنحني ذي اللون الأحمر الوردي، وعند عكس قطبية التوصيل لمآخذ الخرج للمولد النانوي، فقد جرى تمثيل إشارات الخرج باللون الأزرق. (c) و (d) تيار الخرج المكبّر و (e) و (f) توتر الخرج المكبّر، وذلك من أجل دورة سحب وحيدة لليف. تمت إزالة الخلفية المدخلة من قبل دارة القياس، من منحنيات شاشة العرض.

9.1.5 تحسين الأداء

بعد عرض مبدأ توليد الكهرباء، جرى البحث في بضعة أساليب بغية زيادة كل من توتر الخرج وتكامل النموذج الأولي. ويهدف إجراء عملية النمذجة (أو المحاكاة) لنسيج عملي مؤلف من خيوط الغزل، تمت صناعة خيط مفرد مؤلف من 6 ألياف، وجرى اختباره، بحيث كانت ثلاثة ألياف من هذه الستة مغلقة بالأسلاك النانوية ومغطاة بالذهب، بينما تركت الألياف الثلاثة الأخرى مغلقة بالأسلاك النانوية فقط. جُعلت الألياف المغطاة بالذهب قابلة للحركة خلال الاختبار (الشكل 4.9 b). وبعد إخضاعها لتردد مقداره 80 دورة في الدقيقة، جرى الحصول على تيار بمعدل وسطي نحو 0.2 nA ، والذي يُعدُّ أكبر بمقدار 30-50 ضعفاً من إشارة الخرج الصادرة عن مولد نانوي ذي الليف الأحادي، والسبب في ذلك يرجع إلى الاتساع الكبير الحاصل في منطقة التماس السطحي بين هذه الألياف. وعلى ما يبدو، فقد جرى توسيع عرض النبضة بسبب الحركة غير المتزامنة والتأخير النسبي في تيار الخرج فيما بين الألياف.

وُجد أن خفض المقاومة الداخلية لكل من الليف والأسلاك النانوية يُعدُّ أسلوباً فعالاً لتحسين تيار الخرج. فلدى ترسيب طبقة موصلة بشكلٍ مباشرٍ على الليف، وقبل ترسيب بذور أكسيد الزنك، تنخفض المقاومة الداخلية للمولد النانوي من $1\text{ G}\Omega$ إلى نحو $1\text{ K}\Omega$ ، ولهذا ازداد مقدار تيار الخرج لدارة القصر I_{sc} للمولد النانوي مزدوج الليف من المقدار 4 pA إلى المقدار 4 nA (الشكل 4.9 c) وبشكل تقريبي يتناسب مقدار التيار I_{sc} عكسياً مع قيمة المقاومة الداخلية للمولد النانوي (الشكل الداخلي ضمن الشكل 4.9 c). وتظهر هذه الدراسة أن هناك أسلوباً فعالاً لزيادة تيار الخرج. وإضافةً لما ذكر، إذا جرى توصيل المولدات النانوية على التسلسل أو على التفرع، ازدادت بالمقابل قيم كلٍّ من توتر الخرج وتياره بالترتيب.



الشكل 4.9: تحسينات الخرج. (a) تيار الخرج في دارة قصر I_{sc} لمولد نانوي متعدد الألياف يخضع لتردد مقداره 80 دورة في الدقيقة. لوحظ ازدياد عرض ذرا (قمم) تيار الخرج بسبب توافر الحركة غير المتزامنة فيما بين الألياف. (b) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لمولد نانوي متعدد الألياف، ومكون من ثلاثة ألياف مغطاة بالذهب، والثلاثة الأخرى مغلقة بأسلاك أكسيد الزنك النانوية ZnONWs. وهذا ما يُظهر أنه بالإمكان دمج الأسلاك النانوية على شكل حزمة كما في خيوط الغزل بغية تعزيز تيار الخرج. (c) تعزيز تيار الخرج لمولد نانوي من خلال خفض قيم المقاومة الداخلية لهذا المولد. فإذا جرى في البداية تغطية سطح الليف بطبقة موصلة، وتبعها توضع طبقة من بذور أكسيد الزنك، انخفضت قيم المقاومة الداخلية للمولد النانوي بعدة مراتب. ولقد جرى التخلص من الخلفية، التي أدخلتها دارة القياس، في الأشكال المعروضة على الشاشة.

9.1.6. الملخص

أبدى المولد النانوي، ذو الأساس من الألياف المنسوجة، التطورات الإبداعية التالية مقارنة مع تلك المولدات النانوية ذات التيار المستمر والمدرجة آنفاً في هذا الكتاب. أولاً: عند استخدام أسلاك أكسيد الزنك النانوية المنمّاة على الألياف، من الممكن تصنيع مصدر للطاقة، مهما كان شكله، يتمتع بكلٍّ من المرونة والمتانة والقابلية للطي وغير قابل للتلف (أي يعمل على شكل قميص مُصدر للطاقة). ثانياً: يمكن تعزيز كهرباء الخرج بشكل كبير من خلال استخدام حزمة ألياف على شكل خيط، والذي يُعدُّ الوحدة الأساس للتصنيع. ويمكن تقدير الكثافة المثلى لاستطاعة الخرج الناتجة عن هذا النسيج المصنع استناداً إلى مجموعة

البيانات التي حصلنا عليها آنفاً، إذ يُتوقع أن تتراوح قيم كثافة الخرج بين 4-20 mV لكل متر مربع من النسيج المصنع (انظر المواد الإضافية على الانترنت). ثالثاً: يعمل المولد النانوي عند ترددٍ منخفضٍ واقعٍ ضمن مجال الاهتزاز الميكانيكي التقليدي، إذ يمكن لكلٍ من خطوات القدم وضربات القلب أن تزيد وبشكلٍ كبير، مجال استخدام المولدات النانوية. وختاماً، ولما كانت مصفوفات السلك النانوي لأكسيد الزنك قد جرى إنمائها من خلال استخدام تراكيب كيميائية عند درجة حرارة 80°م على ركازة بغض النظر عن طبيعة المواد المستخدمة ودرجة تقوسها (أو انحنائها)، فقد اتسعت مجالات التطبيق للمولدات النانوية ودمجها مع هذه المجالات. ويكمن الهدف على المدى القريب في أمثلة كلٍ من البنية والتصميم بغية تحسين المردود والحصول على استطاعة خرج كاملة.

9.2. المولدات النانوية الليفية المرنة المقادة بالضغط

يُعدُّ ضغط الهواء معلمة مادية شائعة جداً تؤثر بنواحٍ عدة في حياتنا اليومية. ويؤدي تدفق الهواء/أو السائل إلى حدوث تغير في الضغط الديناميكي، الذي يمكن أن يدفع العديد من الأشياء. وتعدُّ كيفية استخدام الطاقة، الناجمة عن ضغط الهواء/أو تدفقه، التقانة التي تكتسب أهمية في هذه الأيام لإنتاج الطاقة. غالباً ما يُعدُّ التذبذب، الحاصل في ضغط الهواء، ظاهرة غير منتظمة تتمتع بدرجة عالية من التغير في كل من المطال والتردد، مما يجعل من الصعب جداً عملية تجميع الطاقة بشكلٍ مباشر من خلال استخدام التقانات التقليدية. فإذا جرى أخذ أسلوب الذراع الكهروضغطي مثلاً، فإن هذه الذراع ستتمتع بقيمة عظمى لمردود تجميع الطاقة في حال التوافق بين تردد التحفيز الميكانيكي الخارجي وتردد الطنين لهذا الذراع. فإذا كان تردد التحفيز منخفضاً، فلا بد أن يكون مقياس المرنان كبيراً، ويمكن له أن يحصد الطاقة (يجمعها) فقط في حال كان مقدار القوة المطبقة كافياً. أما إذا كان التردد المطبق عالي القيم، فلا بد أن يكون مقياس المرنان صغيراً، ولكن الإشارات الميكانيكية عالية التردد ليست شائعة في بيئتنا المعاشية كما هو الحال في الإشارات منخفضة التردد، وخاصةً في الأنظمة الحيوية كالتنفس وضربات القلب.

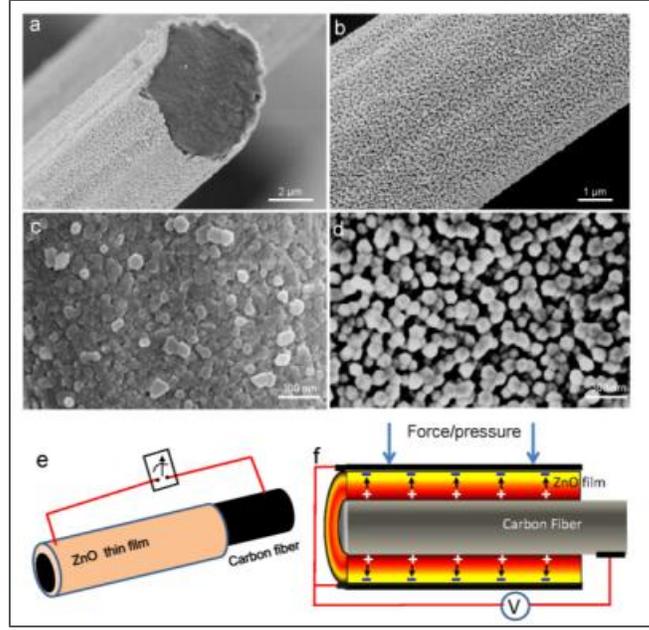
قدمنا في هذا الجزء من الكتاب طريقة جديدة لتصنيع مولد نانوي ليفي FNG مرن يمكن استخدامه في كل من القمصان الذكية والالكترونيات المرنة والتطبيقات الطبية [5]. يُبنى المولد النانوي الليفي على ألياف كربونية مغلقة بشكلٍ أسطواني بنسيج من أفلام أكسيد الزنك الرقيقة. وفور إخضاع هذا المولد لضغط أحادي، وقع الفيلم الرقيق من أكسيد الزنك، ذو الشكل الأسطواني، تحت تأثير انفعال ضغط، مما يُسفر عن وجود كمون ضغطي ماكروي (جهري) عبر السطوح الداخلية والخارجية لهذا الفيلم نظراً لثمة هذا الأخير ببنية نسيجية، وسوف يشكل هذا الكمون الكهروضغطي القوة الدافعة لتوليد تيار كهربائي في الحمل الخارجي. ولقد نجم عن استخدام مثل هذه البنية ذروة (قمة) لتوتر الخرج مقدارها 3.2 V ومعدل وسطي لكثافة التيار مقداره $3.2 \mu\text{Acm}^{-2}$. ويعتمد المولد النانوي الليفي على ضغط الهواء، لذا يمكنه العمل في تلك الحالات التي لا يتوافر فيها أي تماس مثل الدولاب الدوار وتدفق الهواء/أو السائل وحتى التدفق داخل الأوعية الدموية. يؤدي الضغط المؤثر على المولد النانوي الليفي من خلال استخدام إبرة حقن (سيرينغ)، إلى توافر كمون لتجميع الطاقة داخل الأوعية الدموية أو في أنبوب غاز أو في أنبوب نفض ما دامت توافرت في هذه الأوعية أو الأنابيب تذبذبات في الضغط (أو حدوث حركة دوامية turbulence داخل هذه الأوعية أو الأنابيب). يمكن أن تؤدي نبضات القلب التي تقود المولد النانوي الليفي، إلى دور حساس عالي الدقة بغية إظهار سلوك قلب الإنسان، الذي يمكن تطبيقه عند إجراء التشخيص الطبي على شكل حساس أو أدوات قياس.

9.2.1. نمو الفيلم الرقيق المنسوج قطرياً من أكسيد الزنك على الألياف

بُنِي تصميمنا للمولد النانوي الليفي FNG على فيلم رقيق منسوج قطرياً من أكسيد الزنك، وينمو حول ألياف كربونية (الشكل 5.9 a). ويمكن من حيث المبدأ استخدام أي ليف موصل لهذه الغاية. ولا يجري استخدام الليف على شكل ركازة ناعمة ومرنة لإنماء الفيلم الرقيق من أكسيد الزنك عند درجة حرارة عالية فحسب، وإنما ليؤدي دور الالكترود الناقل للشحنة أيضاً. وتكمن النقطة الرئيسية في طريقتنا هذه في أن تقنيتنا تُنتج فيلماً منسوجاً يُصنع من أسلاك نانوية مترابطة بكثافة وفقاً للاتجاه [0001]، والتي تلتف حول الليف لتشكل بنية ذات نسيج قطري وأسطواني. ويمكن التحكم بكثافة الأسلاك النانوية وفقاً لشروط التجربة دون استخدام بذور أكسيد الزنك.

كانت المواد الأولية المستخدمة لإنماء فيلم من أكسيد الزنك على ليف من الكربون، عبارة عن كل من مسحوق أكسيد الزنك (ألفا أيزر Alfa Aesar بدرجة نقاوة 99.9% و 200 mesh) وجزئيات من الكربون الفعّال (ألفا أيزر منشطة بالبخار ومغسولة بالأسيد) بنسب متماثلة بالكتلة، بحيث تتوضع جميعها في مركز فرن أنبوبي مع أنبوب من الكوارتز للحفاظ على الليف الكربوني وتأمين دليل لجريان الغاز.

جرى تعليق الألياف الكربونية (1k, T600, Tsinghua Univ.) بشكل حر داخل الأنبوب في مجرى الغاز الحامل، الذي يتوضع على مسافة نحو 10 cm من نهاية الأنبوب. وجرى إعداد الغاز الحامل من الأكسجين والنيتروجين (درجة النقاوة 99.9%)، (Georgia Tech) بنسبة 1:4 وبمعدل جريان مقداره 40sccm سنتمر مكعب لكل دقيقة. وكانت درجة حرارة النمو مساوية 960°C. تمت عملية الإنماء للفيلم الرقيق من أكسيد الزنك، الذي يُغلف سطح الليف الكربوني بشكل أسطواني، تمت باستخدام طريقة الترسيب بالبخار الفيزيائي (الشكل 5.9 b). ويتألف هذا الفيلم الرقيق، الذي جرى إنماؤه، من قضبان أكسيد الزنك النانوية المترابطة تقريباً بشكل متوازٍ، ولتشكل فيلم منسوج (ثخائنه تقريباً 250 nm)، ويتمتع باتجاه عامودي على طول الاتجاه [0001]. ويمكن مشاهدة ذلك بوضوح من خلال الصورة الملتقطة بالمجهر الالكتروني الماسح والمدرجة في (الشكل 5.9 c)، إذا تظهر هذه الصورة بوضوح قضبان أكسيد الزنك النانوية المكتظة والمتمتعة بنهايات عليا مستوية على شكل مواشير سداسية. وتتمتع هذه القضبان النانوية بتوجه عشوائي في مستوى الفيلم، ولكن ترابصها الجيد بالاتجاه العمودي يجعل كامل الفيلم يتمتع ببنية أحادية القطب على طول المحور C. ويمكن أن يظهر بوضوح توزع القضبان النانوية حول الليف إذا لم تكن كثافة هذه القضبان النانوية عالية (الشكل 5.9 d). وتُظهر دراستنا السابقة، التي استخدمنا فيها طريقة انعراج الأشعة السينية (XRD)، أن أكسيد الزنك يميل لأن يشكل أفلاماً رقيقة منضدة عرضياً على أية سطوح مثل البوليمير والسيلكون. وهذا ما يوفر ميزة فريدة من نوعها، لا تكمن في استيعاب الانحناء، الذي يحدده شكل الركيزة المعدة من الألياف فحسب، وإنما يوفر أيضاً تواجد بنية أحادية القطب للتطبيقات الكهروضغية.



الشكل 5.9: أفلام أكسيد الزنك الرقيقة المنسوجة جرى إنمائها حول ليف كربوني. (b,a) صور بتكبير منخفض بالمجهر الإلكتروني الماسح لبنية أكسيد الزنك/حول الليف الكربوني. (c) فيلم أكسيد الزنك، معدّ من قضبان الزنك النانوية المكتنزة، والمتمتع باتجاه أحادي المحور وفقاً للمحور C. (d) فيلم أكسيد الزنك، معدّ من قضبان أكسيد الزنك النانوية قليلة التراص فيما بينها وموازية جميعها للمحور C. (e) بنية المولد النانوي الليفي أساسه فيلم رقيق من أكسيد الزنك يغطي ليفاً من الكربون. مخطط المولد النانوي. (f) مبدأ عمل المولد النانوي الليفي، حيث تدل الإشارات (+)/(-) على الكمون الكهروضغطي الموضعي المتولّد على السطحين الداخلي والخارجي للفيلم الرقيق من أكسيد الزنك[5].

9.2.2. مبدأ عمل المولد النانوي الليفي

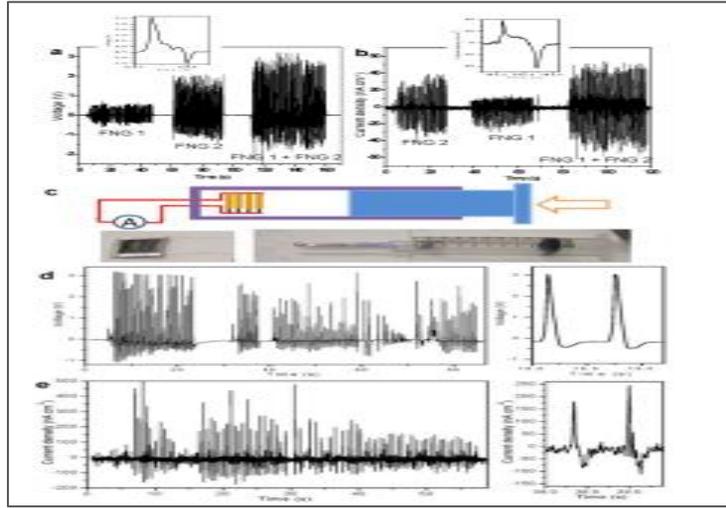
بغية تصنيع المولد النانوي الليفي، جرى إجراء عملية تنميش (تخريش) موضعي لأحد جانبي الفيلم الرقيق لأكسيد الزنك الملاصق لليف الكربوني من خلال استخدام محلول ماءات الصوديوم NaOH، وذلك بهدف تعرية الألكترود الليفي لصنع منطقة تماس (أو وصل)، بينما جرى وصل الألكترود الآخر للمولد النانوي الليفي مع السطح العلوي لفيلم أكسيد الزنك، باستخدام شريط/أو معجون من الفضة (الشكل 5.9 e). وكما يتضح من كلٍّ من الشكل 5.9 ودراستنا السابقة[6]، تُشكل بنية فورتزيت لقضبان أكسيد الزنك النانوي، تُشكل فيلماً رقيقاً مكتنظاً بهذه القضبان المترابطة وفقاً للاتجاه القطبي، حيث يدل الاتجاه القطبي على شعاع متجه إلى الخارج. لقد جرى بناء المولد النانوي الليفي من خلال إجراء تراس على التوازي للألياف الكربونية المغطاة بأكسيد الزنك، بحيث جرى وصل أحد الألكترودين إلى الألياف الكربونية، بينما جرى وصل الألكترود الآخر إلى السطح العلوي لفيلم أكسيد الزنك. ولقد جرى استخدام ركازة لدنة لتدعيم الألياف المترابطة، وجرى تثبيت جميع هذه الألياف على الركازة.

يكن مبدأ عمل المولد النانوي الليفي فيما يلي: بغية التبسيط، يمكن معالجة الفيلم المنسوج وكأنه "بلورة - مفردة" من أجل عمل المولد النانوي الليفي. فعندما يخضع هذا الفيلم لانفعال ضغط من خلال تطبيق ضغط خارجي بواسطة الهواء/أو السائل، فإن عملية الانفعال بين مراكز الشحنات المتأينة الساكنة، داخل الشبكات (الهياكل الشبكية) لذرات الزنك - أكسجين Zn-O، التي هي عبارة عن أشكال رباعية، فإن هذه العملية تسفر عن وجود تدرج كموني كهروضغطي على طول المحور C. وتسفر البنية النسبجية للفيلم الرقيق عن وجود كمون كهروضغطي ماكروي (جهري) عبر ثخانة هذا الفيلم (الشكل 5.9 f). فإذا كان المحور C يشير باتجاه الخارج للركازة الليفية، فإن الجانب السالب للكمون الكهروضغطي هو عبارة عن السطح الخارجي للفيلم، الذي يزيد من كل من نطاق التوصيل ومستوى فيرمي عند الألكترود[16]، ومجبراً الألكترودات بأن تتدفق من هذا الجانب إلى

الالكترود الآخر عبر الحمل الخارجي نظراً لوجود حاجز شوتكي عند السطح البيئي حتى تتحقق حالة التوازن. ولدى إزالة كل من القوة الخارجية وانفعال الضغط، ينعدم وجود الكمون الكهروضغطي داخل الفيلم. وتتدفق الإلكترونات المتراكمة عند الكترود الآخر عائداً من خلال الدارة الخارجية، ومولدة نبضة كهربائية بالاتجاه المعاكس. ويكمن دور حاجز شوتكي في منع تلك الشحنات الناقلة من المرور عبر السطح البيئي الواقع بين الفيلم والمعدن. ويعمل الكمون الكهروضغطي وكأنه "مضخة شحن"، تقوم بدفع الإلكترونات لأن تتدفق [7]. ويُسفر الانفعال الدوري، المحرّض داخل الفيلم بواسطة الضغط المطبق الخارجي، يُسفر عن وجود خرج لتيار متناوب. ويكمن الدور الرئيس لليف في الاستخدام الفعّال للضغط ومن جميع الاتجاهات.

جرى من الناحية التجريبية استخدام محرك خطي بغية إخضاع المولد النانوي الليفي لتشوه (انفعال) دوري من خلال تطبيق عملية إثارة دورية في هذا المولد على شكل شد - إزالة هذا الشد. ولقد جرى قياس كل من تيار دارة القصر (I_{sc}) وتوتر الدارة المفتوحة (V_{oc}) بغية توصيف أداء هذا المولد. فعندما جرى وصل جهاز قياس التيار بشكل أمامي إلى المولد النانوي الليفي، جرى ضبط نبضة تيار موجبة أثناء إخضاع الركازة لعملية شد سريع (انظر SI)، وضبط نبضة سالبة موافقة لعملية إزالة هذا الشد عن الركازة (حيث تعني "سريع" الحني الزاوي للركازة بمعدل انحناء مقداره تقريباً 260°sec^{-1} ونصف قطر انحناء لهذه الركازة مقداره 2 cm). ولدى تصنيع مولد نانوي ليفي من 150 ليفاً كربونياً، قطر الواحد منها تقريباً $10\ \mu\text{m}$ وطوله نحو $20\ \text{mm}$ ، جرى الحصول على توتر خرج مقداره 2.0-2.2 V وتيار خرج مقداره 60-120 nA.

وعلى الرغم من أن ارتفاعات ذُرا (قمم) التيار قد بدت متباينة بين حالتَي الشد وإزالته، والتي هي على الأرجح ناتجة عن التباين في معدلات الانفعال، بقيت المساحات، الموجودة تحت هذه الذرا، متمتعاً بالقيمة نفسها وهي بحدود 5%. ولقد جرى إجراء تجارب مماثلة عندما كان المولد النانوي الليفي خاضعاً لانفعال ضغط.



الشكل 6.9: مولدان نانويان ليفيان يعملان بشكل طبيعي عند إخضاعهما لتجربة "التراكب الخطي" لكل من كثافة تيار الخرج (a) وكثافة توتر الخرج (b) لهذين المولدين. يساوي توتر الخرج للمولدين النانويين الليفيين ($FNG_1 + FNG_2$) مجموع توتر الخرج لكلا المولدين FNG_1 و FNG_2 عند وصلهما على التسلسل. أما كثافة تيار الخرج لهذين المولدين، فقد أُضيف بعضها إلى بعض أيضاً عند وصلهما على التفرع. وتبيّن الأشكال الداخلية تفاصيل إشارات الخرج. عملية دمج (تكامل) لمولد نانوي ليفي ودراسة أدائه عندما يكون مقادراً بضغط الهواء. (c) مخطط مولد نانوي ليفي مقاد بضغط الهواء عند وضعه داخل إبرة حقن (سيرينغ). يجرى إحداث التغييرات في مقدار ضغط الهواء بواسطة المكبس الموجود داخل إبرة الحقن. جرى قياس كل من توتر خرج الدارة المفتوحة (d) وتيار خرج دارة القصر (e) لبنية مولد نانوي ليفي مكون من 100 ليف كربوني. وصلت ذروة (قمة) توتر الخرج العظمى إلى المقدار 3.2V. وتبيّن الأشكال الداخلية في الجانب الأيمن دوراً وحيداً لكل من توتر الخرج وتياره [5].

9.2.3. مولد نانوي ليفي مقاد بضغط الهواء

إن الهواء يستطيع أن يؤثر في كل جزء من جسم معرض لهذا الهواء دون اتجاه معين، لذلك قمنا بتعليب الألياف الكربونية المغطاة بفيلم من أكسيد الزنك ووضعها طليقةً (دون تثبيت) على ركازة مرنة كما في (الشكل 6.9 c)، ويتبعها التوصيل المبيّن في (الشكل 5.9 e). فإذا جرى تسليط ضغط أحادي الشعاع، وذلك من خلال تسليط ضغط الهواء على جميع أنحاء الليف، يتولد كمون كهروضغطي كما هو مبين في (الشكل 5.9 f). ويؤدي التغير الديناميكي في قيم الضغط المطبق إلى خلق عملية انضغاط - واسترخاء في فيلم أكسيد الزنك ذي الشكل الأسطواني، وتبعاً لذلك يقوم الكمون الكهروضغطي المتولد، والموافق لهذه العملية بقيادة تدفق الإلكترونات ذهاباً وإياباً في الحمل الخارجي، وذلك استجابة للتقلبات الحاصلة في قيم ضغط الهواء.

عند وضع المولد النانوي الليفي داخل إبرة الحقن (الشكل 6.9 c) وتطبيق ضغط دوري من خلال ضغط المكبس داخل إبرة الحقن، جرى الحصول على خرج لتيار متناوب (الشكل 6.9 d). ولن يكون خرج الكهرياء المتولد متناظراً تماماً، ذلك لأن قيم كل من الضغط المطبق ومعدل هذا الضغط تباينت بين حالتي ضغط المكبس وإزالته عنه. ولقد ارتفع مقدار الذروة (القمة) لتوتر الخرج، ليصل إلى 3.2 V، بينما وصل المعدل الوسطي لكثافة التيار إلى المقدار $0.15 \mu A cm^{-2}$. جرى حساب مساحة السطح على أنها مساحة الألياف الكربونية العاملة في المولد النانوي. ولقد كان الخرج أعلى بكثير من مثيله الوارد في تقاريرنا السابقة، ويمكن أن يكون سبب ذلك عائداً إلى عدم وجود مواد تغليف لتغطية المولد النانوي الليفي، لذا فإن الضغط يؤثر مباشرة في فيلم أكسيد الزنك دون أن يحدث فيه أي تخادم من قبل مادة التغليف أو الركازة.

9.2.4. مولد نانوي ليفي / حساس مقاد بالزفير

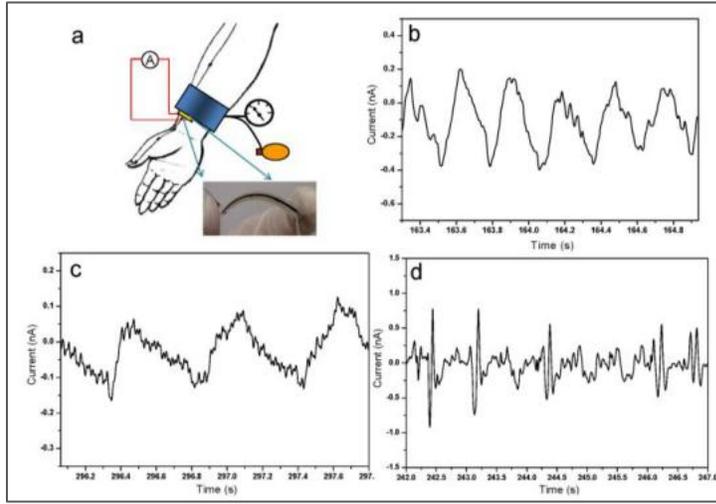
يتمتع تدفق الهواء الناعم بالخواص التالية: أولاً، من غير الممكن التنبؤ باتجاه التغيرات الحاصلة في تدفق هذا الهواء. ثانياً، تكون القوة الناجمة عن فعل تدفق الهواء في جهاز صغير ضعيفة جداً لدرجة أنها قد لا تكون قادرة على قيادة (أو تشغيل) مولد إذا تمتعت مادة التغليف لهذا المولد بخاصتي الصلابة والتخميد العاليتين جداً. وختاماً، يتغير التردد لتدفق هذا الهواء أيضاً. وبغية تعزيز فعالية التنفس اللطيف في قيادة المولد النانوي الليفي، استخدمنا أليافاً كربونية تتمتع بأطوال ومرونة كافية لتحقيق استجابة هذه الألياف لهواء التنفس، وكما هو موضح في الصورة الداخلية ضمن (الشكل 3 a). جرى تثبيت مولد نانوي ليفي، على شكل حلقة، على ركازة زجاجية. ولقد جرى وصل أحد المأخذين إلى الألياف الكربونية، ووصل المأخذ الآخر إلى الفيلم المعد من أكسيد الزنك. فعند النفخ على المولد النانوي الليفي بهواء الزفير الناعم، فإن هواء التنفس جعل المولد النانوي الليفي أن يغير شكله ويهتز، مسفراً عن وجود خرج كهربائي في المولد (الشكل 7.9). ولدى تكرار عملية الزفير هذه، أسفرت عن وجود خرج لتيار متناوب. ولقد بلغ المعدل الوسطي لتوتر الخرج المقدار 1.5 mV، ومتوسط تيار الخرج 0.5 nA. ويمكن أن يكون السبب في الخرج المنخفض عائداً إلى ضعف الانفعال المتولد في الفيلم من الزفير. ويمكن أن لا يكون هذا الخرج المنخفض مفيداً لتجميع الطاقة، ولكن يمكن استخدامه كحساس تنفس في كل من الطب الحيوي وتطبيقات العناية بالصحة.

9.2.5. المولد النانوي المقاد بنبض المعصم كحساس ضغط

يُعدُّ ضغط النبض (pp) أحد إشارات الخرج لمنظومة القلب البشري، التي هي عبارة عن تركيبة لإشارات تتعلق بالزمن وغير خطية، وتعكس الذنبية الحاصلة في كل من حركة الفرد حالته الصحية [8]. ويوفر القياس الكمي لإشارة النبض معلومات مهمة للمراقبة الطبية، وخاصة في حالات التشخيص الطبي [9]. وتُعدُّ أصول ضغط النبض معقدة، لأنها تصف بما فيه الكفاية كلاً من خرج القلب والمقاومة الكلية للأطراف. ويتزايد الاعتراف في الأدبيات [10] على أن ضغط النبض يُعدُّ عاملاً خطراً للإصابة بأمراض القلب والشرايين ولأمراض أخرى أيضاً. وتكمن تجربتنا الأولى في استخدام النبض عند معصم الإنسان لتشغيل مولد نانوي ليفي.

صُنِعَ هذا المولد النانوي الليفي باستخدام ألياف طويلة نسبياً بحدود 4 cm، حيث جرى ضم هذا المولد إلى المعصم مع شريط من القماش الرياضي. وُضِعَ المولد النانوي الليفي فوق نقطة النبض كما هو موضح في المخطط المدرج في (الشكل a 8.9). وبغية الحصول على الإشارة الأصلية لضغط الدم في الوضع الطبيعي، جرى تثبيت مقياس ضغط الدم القابل للتطبيق الطبي على الجزء العلوي من المولد النانوي الليفي. جرى تسجيل خرج المولد النانوي الليفي استجابةً لسلوك ضربات القلب. وتبين (الأشكال 8.9 a,b,c) ثلاثة نماذج خرج مختلفة لضربات القلب، وذلك كما جرى قياسها بواسطة تيار الخرج للمولد النانوي الليفي. وتتضمن هذه المنحنيات معلومات حول ديناميكية نبضات القلب. ويمكن أن يؤدي تطبيق تقنية تحليل البيانات إلى الحصول على بعض الميزات حول الحالة الصحية المحتملة للإنسان.

تكمّن الطريقة التقليدية للشعور بالنبض في الطب الصيني من خلال أخذ ثماني وعشرين نبضة لبيان معظم حالات النبض السريرية[11]. ويجب أن تشبه موجة الضغط النبضي الطبيعية تلك المدرجة في (الشكل 8.9 b). يكون للإنسان الشاب نبضة سلسلة كما هو مبين في (الشكل 8.9 c)، أما الإنسان كبير السن فتكون نبضاته مشابهة لتلك المدرجة في (الشكل 8.9 d).



الشكل 8.9: مولد نانوي ليفي مقاد نبضات القلب بغية تجميع الطاقة أو أن يؤدي دور حساس انفعال. (a) مخططات تبين كيفية الإعداد للتجربة. (b) و (c) و (d) ثلاث نبضات قلب نموذجية ولدت خروج (جمع خرج) لتيار كهربائي من قبل مولد نانوي ليفي، والذي لا يُظهر تحول الطاقة من حركة جسمية صغيرة فحسب، وإنما يؤدي دور حساس - انفعال - حيوي أيضاً

9.2.6. الملخص

قدمنا نهجاً جديداً لتصنيع مولد نانوي مبني على الليف المرن، ويمكن استخدامه للقمصان الذكية والالكترونيات المرنة. يُبنى المولد النانوي على الألياف الكربونية المغلفة بشكل أسطواني بفيلم رقيق منسوج من أكسيد الزنك. وفور تعرض المولد لضغط أحادي الاتجاه من خلال تطبيق ضغط عليه، يُصبح الفيلم الرقيق أسطواني الشكل المُعد من أكسيد الزنك، واقعاً تحت تأثير انفعال ضغط، مما يُسفر عن وجود كمون ضغطي ماكروي (جهري) عبر السطوح الداخلية والخارجية لهذا الفيلم، إذ يشكل هذا الكمون القوة الدافعة لتوليد تيار كهربائي في الحمل الخارجي. وينجم عن استخدام مثل هذه البنية توتر خرج أعظم مقداره 3.2 V ومعدل وسطي لكثافة التيار مقداره 0.15 μA .

يتمتع المولد النانوي NG المعروض بالعديد من المزايا مقارنةً بتلك المولدات النانوية المبنية على مصفوفات لسلك نانوي متراس شاقولياً أو جانبياً. أولاً يستخدم المولد النانوي أليافاً مرنة، لذا فإنه يتمتع بكمون يمكن دمجها صناعياً مع القمصان الذكية. ثانياً، لا يحتاج المولد النانوي لحمايته بطبقة ثخينة من البوليمير، والتي عادةً ما تثبط من قيمة الأثر الميكانيكي، وهكذا يكون

توتر الخرج عالي القيم.

وختاماً، يعتمد التصميم على ضغط الهواء، لذا يمكنه أن يعمل وفقاً لنمط اللاتماس على كامل المساحة المتاحة من سطحه، ويمكن أن يؤدي دور حساس ثلاثي الأبعاد أيضاً، وذلك في حالة دوّلاب دوار أو عند تدفق الهواء/ أو السائل، حتى في الأوعية الدموية. يبدي المولد النانوي المقاد بالضغط داخل إبرة حقن، أن بمقدوره تجميع الطاقة داخل الأوعية الدموية وأنابيب الغاز والنفط ما دام هناك تذبذب في الضغط (أو وجود حركة دوامية turbulence). ويمكن استخدام الطاقة المولدة لمراقبة حالة السائل/أو الغاز وتشغيلهما. يمكن للمولد النانوي المقاد بنبضات القلب، أن يؤدي دور حساس فائق الحساسية لمراقبة سلوك قلب الإنسان، والذي يمكن استخدامه في التشخيص الطبي.

9.3. المراجع

- [1] Y. Qin, X. D. Wang, Z. L. Wang, *Nature* **451**, 809 (2008)
- [2] Y.F. Gao, Z.L. Wang, *Nano Lett.* **7**, 2499 (2007).
- [3] P.X. Gao, J.H. Song, J. Liu, Z.L. Wang, *Adv. Mater.* **19**, 67 (2007).
- [4] Z.L. Wang, J.H. Song, *Science* **312**, 242 (2006).
- [5] Z.T. Li, Z.L. Wang, *Adv. Mater.* **23**, 84 (2011).
- [6] J. Hong, J. Bae, Z.L. Wang, R. Snyder, *Nanotechnology* **20**, 085609 (2009).
- [7] R. Yang, Y. Qin, L. Dai, Z.L. Wang. *Nat.Nanotechnol.* **4**, 34 (2009).
- [8] A.M. Dart, B.A. Kingwell, *J. Am. Coll.Cardiol.* **37**, 0735 (2001).
- [9] J.J. Shu, Y. Sun, *Complement. Ther. Med.* **15**, 190 (2007).
- [10] A. Mahmud, J. Feely, *Hypertension* **41**, 183 (2003).
- [11] M.F.ORourke, A. Pauca, X.J. Jiang, *Br. J. Clin. Pharmacol.* **51**, 507 (2001).

الفصل العاشر: الخلايا الهجينة لتجميع أنواع متعددة من الطاقات

تتمتع بيئتنا المعاشية بوفرة من مصادر الطاقة على شكل ضوء وحرارة وطاقة ميكانيكية (مثلاً: الاهتزازات والموجة الصوتية و طاقة الرياح والمياه) والطاقة المغنطيسية والكيميائية والحيوية. ويُعدُّ تجميع هذه الأنواع من الطاقة مسألة في غاية الأهمية، وذلك بهدف تلبية احتياجات الطاقة طويلة الأمد وتحقيق التنمية المستدامة في العالم. وعلى مر السنين، جرى تطوير كل من المواد الهندسية والتقانات بهدف تحويل كلِّ من الطاقة الشمسية ومثلتها الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. هناك بعض الطرائق لتصنيع الخلايا الكهروضوئية مثل الوصلات اللاعضوية نصف الناقلية من النمط pn [1] والأفلام الرقيقة العضوية [3,2] والوصلات العضوية – اللاعضوية غير المتجانسة [5,4]. جرى تصميم مولدات الطاقة الميكانيكية اعتماداً على مبادئ كلِّ من التحريض الكهرومغنطيسي والتأثير الكهروضغطي [7,6] ولقد جرى تطوير هذه الأساليب القائمة وكأنها تقانات وكيانات مستقلة، ويجرى تصميمها اعتماداً على مبادئ فيزيائية متباينة بشكل كبير وأساليب هندسية متنوعة، وذلك بغية تجميع نوع خاص من الطاقة.

تعمل الخلية الشمسية فقط عندما تكون الخلايا الهجينة لتجميع أنواع متعددة من الطاقات معرضة لإثارة كافية ويكون مولد الطاقة الميكانيكية قابلاً للتطبيق إذا توافرت حركة ميكانيكية/ أو اهتزاز ميكانيكي مُعتبرين (ذاتي قيمة).

لا بد من تطوير أساليب (طرائق) مبتكرة بغية تحقيق تجميع لعدة أنواع من الطاقة في الوقت نفسه، وذلك من خلال استخدام إما بنية مدمجة (متكاملة)/أو مادة مدمجة، بحيث يكون متاحاً الاستثمار الفعال والمتكامل لمصادر الطاقة، وذلك في كلِّ من الزمان والمكان، اللذين تتوافر فيهما أحد هذه المصادر أو جميعها. ويكمن هذا الفصل من الكتاب في عرض لبعض الطرائق، التي قمنا بتطويرها بغية تحقيق تجميع في الوقت نفسه للطاقات الشمسية والميكانيكية والكيميائية.

على نطاق ضيق، يُعدُّ تطوير منظومة لاسلكية ذاتية التغذية، بحيث تقوم هذه المنظومة بتجميع الطاقة اللازمة لتشغيلها من الوسط المحيط، يُعدُّ ذلك ذا أهمية كبيرة واقتراحاً جذاباً بهدف تطوير تقانات كلِّ من أجهزة التحسس والالكترونيات الشخصية والتقانات الدفاعية. ولقد جرى حديثاً ابتكار أسلوب جديد في تقانات الطاقة، وذلك بتجميع أنواع متعددة من الطاقة من خلال استخدام جهاز وحيد. وكان أول جهاز لتجميع أنواع متعددة من الطاقة قد جرى عرضه هو الجهاز الذي يقوم بتجميع الطائقتين الشمسية والميكانيكية في الوقت نفسه [9]. ولقد جرى حديثاً تطوير خلية هجينة لتحقيق تجميع مختلط (هجين) من الطائقتين الكيمياءحيوية والميكانيكية في الوقت نفسه، وذلك بغية استخدامها (أي الخلية) في التطبيقات داخل الجسم الحي [10]. ويتمتع هذا الجهاز بتجميع أنواع متعددة من الطاقة، يتمتع بالمقدرة على تحقيق الاستفادة الكاملة من طاقة الوسط المحيط، التي تحت تأثيرها ستكون هذه الأنواع من الأجهزة في حالة التشغيل.

10.1 الخلية الهجينة لتجميع الطاقة الشمسية والميكانيكية

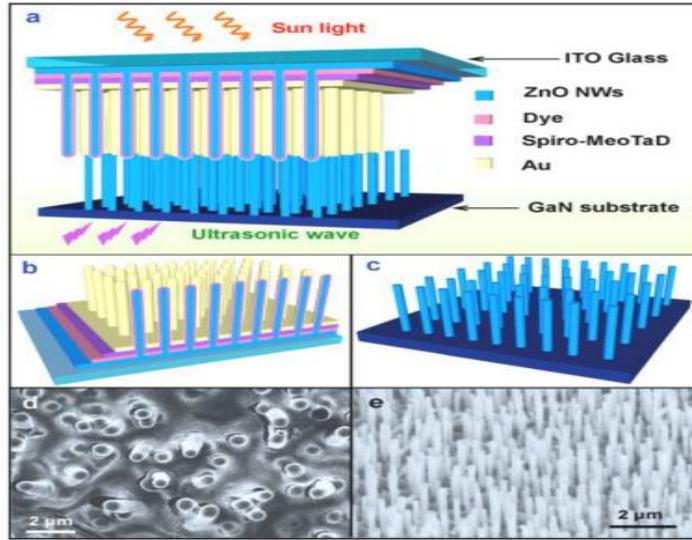
إن أول نموذج للخلية الهجينة المبنية على سلك نانوي، التي جرى عرضها بهدف تجميع كلِّ من الطائقتين الشمسية والميكانيكية، هي تلك الخلية التي استخدم فيها كلُّ من الخلية الشمسية الحساسة صبغياً (DSSC) Dye Sensitized Solar Cell [11,12] ومولد نانوي كهروضغطي [13]. جرى استخدام كل من مصفوفات متراسة لسلك نانوي من أكسيد الزنك، تم إنشاؤها على سطوح من ركازة مستوية، وخلية شمسية حساسة صبغياً مدمجة (متكاملة) مع مولد نانوي كهروضغطي. يقوم الأول بتجميع الطاقة الشمسية الساقطة على السطح العلوي، بينما يقوم الآخر بتجميع طاقة الموجة فوق الصوتية الصادرة من الوسط المحيط. ويمكن لأسلوبي تجميع الطاقة هذين أن يعمل معاً أو بشكل منفرد، ويمكن دمجهما على التفرع أو على التسلسل بهدف رفع قيم تيار الخرج وتوتره بالترتيب، إضافة إلى رفع قيم استطاعة هذا الخرج.

سوف نقوم في هذا الجزء من الفصل بإدراج أسلوب مبتكر يشمل خلية شمسية حساسة صبغياً في حالتها الصلبة ومولد نانوي كهروضغطي مقاد بموجة فوق صوتية ضمن بنية مضغوطة وحيدة بغية تجميع الطاقنتين الشمسية والميكانيكية في الوقت نفسه. ولقد صُنفت هذه البنية معتمدة كأساس لها مصفوفات شاقولية لسلك نانوي من أكسيد الزنك مع إدخال كل من محلول كهربائي صلب

Solid electrolate والتغطية بالمعدن. جرى تسليط إنارة خفيفة على شكل محاكاة لانبعاث شمسي (100 mW/cm^2) ، مما أدى إلى تعزيز الاستطاعة المثلى بمقدار 6%، وذلك بعد دمج المساهمة التي قدمها المولد النانوي. ويحدد هذا البحث منصة الانطلاق نحو تحقيق تجميع طاقة متعددة الأنماط واعتبارها مصادر طاقة عملية.

10.1.1. تصميم البنية

لقد كان تصميم الخلية الهجينة المركبة (CHC) Compacted hybrid cell يهدف إلى الالتفاف على الوظائف التي تؤديها مصفوفات السلك النانوي لتتجز في الوقت ذاته وظائفها من خلال مولد نانوي و خلية شمسية حساسة صبغياً (DSSC)[14]. ولقد صنعت بنية الإطار الرئيس من مجموعتين من مصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك، بحيث توضع على شكل سن – يقابل سن (الشكل 1.10 a)، جرى عرضه سابقاً للمولد النانوي ذي الأساس الليفي (انظر الفصل التاسع). وتتبع الخلية الشمسية الحساسة صبغياً (DSSC) النموذج المقدم من قبل مصفوفات السلك النانوي في الجزء العلوي، التي تكون مغطاة نهائياً بطبقة من المعدن لتشكيل الكترود للمولد النانوي، بينما تؤدي مصفوفة السلك النانوي في الجزء السفلي دور البنية الكهروضغطية بغية تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية. وتقوم الطاقة الشمسية بإضاءة الجهاز من الأعلى، بينما يجري تطبيق الموجة فوق الصوتية¹⁶ من الأسفل.

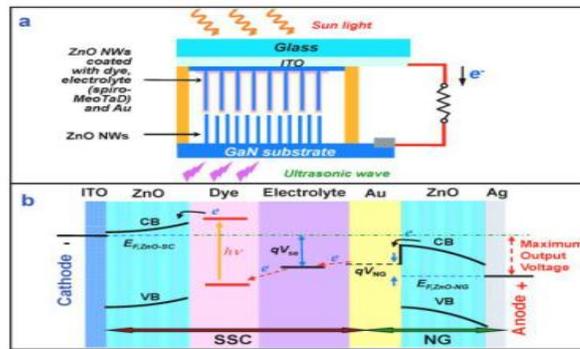


الشكل 1.10: تصميم بنية الخلية الهجينة المركبة CHC، والمكونة من خلية شمسية حساسة صبغياً (SC) ومولد نانوي (NG). (a) مخطط توضيحي لخلية هجينة مركبة CHC، نضاء من الأعلى بضوء الشمس، وتحرض من الأسفل بالموجة فوق الصوتية. جرى تحديد طبقة أكسيد القصدير أنديدم ITO، المتوضعة على جزء من الخلية الشمسية الحساسة صبغياً، والركازة المعدة من نتريد الغاليوم GaN، لتمثلا المهبط والمصعد بالترتيب في الخلية الهجينة المركبة. (b) مخطط توضيحي للخلية الشمسية الحساسة صبغياً في حالتها الصلبة. (c) مخطط توضيحي لمصفوفة سلك نانوي من أكسيد الزنك مترصعة شاقولياً، جرى إنماؤها على ركازة من نتريد الغاليوم. (d) صورة منظر من أعلى الخلية الشمسية الحساسة صبغياً، جرى التقاطها بالمجهر الالكتروني الماسح. (e) صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لمصفوفة سلك نانوي من أكسيد الزنك، حيث جرى توضعها للمولد النانوي بواسطة طريقة الترسيب البخار ذي درجة الحرارة العالية.

بغية تصنيع خلية شمسية حساسة صبغياً في حالتها الصلبة، جرى إنماء أسلاك أكسيد الزنك النانوية المتراسة شاقولياً على ركازة من الزجاج المغطى بأكسيد القصدير إنديوم (ITO (CB-40IN-0107, 4-8Ω، تقانات دلنا، شركة ذات مسؤولية محدودة)، وذلك باستخدام الطريقة الحرمائية (الهيدروحرارية). جرى في البداية تنظيف الركازة بمحلول نظامي من الأسيتون /الإيثانول/ بالماء المعرّض للأمواج فوق الصوتية، بعدها جرى توضع فيلم رقيق من أكسيد الزنك ثخانتته 200 nm باستخدام طريقة الرشاشة المغنترونية ذات التردد الراديوي RF. بعد ذلك، جرى نسج أسلاك أكسيد الزنك النانوية من خلال جعل الركازة تطفو على سطح محلول مغدّ يتكون من 5 mM من نترات الزنك $Zn(NO_3)_2$ وهيكسا ميثيلين تترامين بنسبة 1:1، وذلك عند درجة الحرارة $80^\circ C$ لمدة 24 ساعة. وبعد رشاشة الأسلاك النانوية بالأسيتون جرى غمرها بمحلول حساس مكون من 0.5 mmoleL^{-1} من $(Bu_4N)_2Ru(dcbpyH)_2(NCS)_2$ (N719 dye) في الإيثانول لمدة ساعة من أجل تحميل الصبغيات. بعد ذلك جرى نسج مادة عضوية لابلورية ناقلة للفجوات (OMeTAD) 9,9'-spirobifluorene (OMeTAD) 2,2',7,7'- tetrakis (N,N-di-p-methoxyphenyl-amine) على أسلاك أكسيد الزنك النانوية الحساسة صبغياً مع تدوير بسرعة 2000 دورة في الدقيقة لمدة 60 ثانية وتحميصها عند درجة حرارة $100^\circ C$ بغية التخلص من المحلول العضوي. وكما يُبين الشكل التخطيطي (b 1.10)، جرى إنشاء توليد سطح يتمتع بالشكل المخروطي. ويُسفر وجود تغطية فيلم رقيق من الذهب ثخانتته 60 nm، عن تشكل الكترود ذي شكل مخروطي، وكما هو مطلوب للمولد النانوي، الذي سيجرى وصفه لاحقاً. ويُبين (الشكل d 1.10) تصويراً، جرى بالمجهر الالكتروني الماسح، لسطح ذي شكل مخروطي، حيث تبدو المسافة بين كل قمعين متتالين نحو $1-2 \mu m$ في العرض.

بغية تصنيع مولد نانوي، جرى إنماء أسلاك أكسيد الزنك النانوية (الشكل c1.10)، اللازمة لهذا المولد، على السطح (0001) من نتريد الغاليوم باستخدام طريقة التوضع بالبخار عالي درجة الحرارة بهدف تحقيق قطبية منتظمة. وبلغت أطوال هذه الأسلاك النانوي نحو $2-3 \mu m$ ، وشكل الفراغ البيني بين الأسلاك النانوية 400-700 nm. وبإجراء تراص لمجموعتين من مصفوفات السلك النانوي، وذلك بتشابكها وجهاً لوجه، فإن الالكترود ذا الشكل المخروطي والمغطى بالذهب يؤدي دور الكترود متعرج (زكزاك) بغية إحداث إثارة ميكانيكية للأسلاك النانوية المتوضعة في الأسفل (الشكل a 1.10). ويُعدّ هذا المولد النانوي مولداً وظيفياً مقادراً بالموجة فوق الصوتية.

يُبين (الشكل a 2.10) عملية التوصيل على التسلسل للخلية الشمسية الحساسة صبغياً والمولد النانوي لتشكيل خلية هجينة مركبة. وفي هذه التركيبة يؤدي أكسيد القصدير إنديوم ITO دور المهبط، بينما تؤدي لصاقة الفضة المتماسة مع الركازة المعدّة من نتريد الغاليوم، دور المصعد. وبعد إجراء التوصيل مع أسلاك الخرج، تغلف الخلية الهجينة المركبة بكاملها وتُغلب براتنج الإيبوكسي لمنع تسرب أي سائل ما عدا النافذة الموجودة في الخلية الشمسية الحساسة صبغياً.



الشكل 2.10: التصميم والمبدأ الفيزيائي للخلية الهجينة المركبة. (a) المخطط البنوي للخلية الهجينة المركبة. (b) مخطط نطاق طاقة الالكترونات للخلية الهجينة المركبة، والذي يُبين أن التوتر الأعظم للخروج عبارة عن مجموع توترات الخرج المتولدة من قبل كل من الخلية الشمسية الحساسة صبغياً والمولد النانوي. الرموز هي: (CB) نطاق التوصيل، (VB) نطاق التكافؤ، (EF) مستوي فيرمي [14,9].

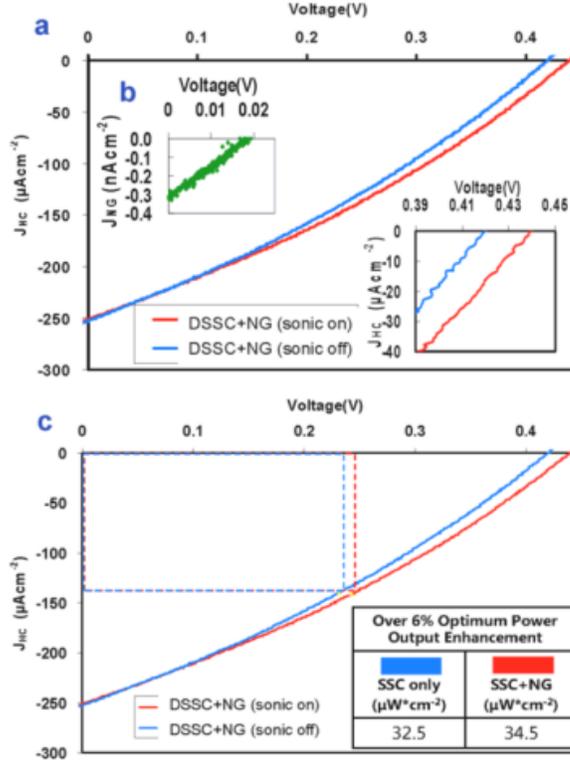
10.1.2. مبدأ العمل

جرى عرض مبدأ عمل الخلية الهجينة من خلال مخطط نطاق طاقة الالكترونات (الشكل 2.10 b). جرى تعزيز دفع الالكترونات من قبل كل من الكمون الكهروضغطي ومثيله الكهروضوئي، وعلى التوالي، عبر الجهازين [14,9]. ويساوي التوتر الأعظم للخروج، والذي يمكن تحقيقه، يساوي الفارق بين مستوى فيرمي لأسلاك أكسيد الزنك النانوية في الخلية الشمسية الحساسة صبغياً (E_F , ZnO-SC) ومثيله (أي مستوى فيرمي) لأسلاك أكسيد الزنك النانوية في المولد النانوي (E_F , ZnO-NG). وهذا هو مجموع توترات الخرج لكل من المولد النانوي والخلية الشمسية الحساسة صبغياً. وداخل المقطع العرضي للمولد النانوي، حددت الثغرة، الموجودة بين مستوى فيرمي لأسلاك أكسيد الزنك النانوية في مقطع هذا المولد (E_F , ZnO-NG) ومثيله من الذهب، حددت خرج التوتر الأعظم للمولد النانوي (V_{NG}). وتشكل الوصلة، ما بين الذهب وأكسيد الزنك، تشكل تماس شوتكي²⁴، ذلك لأن الذهب يتمتع بتابع تشغيلي مقداره 4.8eV، والذي يُعد أكبر من التجاذب الالكتروني لأكسيد الزنك ومقداره (4.5 eV)، مما يجعل هذا التابع يؤدي دور "البوابة"، التي تعترض سبيل التدفق العكسي للالكترونات. وعندما يقوم الالكتروود الذهبي بالدفع البطيء للسلك النانوي، وكما هو الحال في الطرف المستدق لمجهر القوة الذرية AFM¹، تولّد حقل انفعال عبر عرض السلك النانوي، بحيث كان السطح الخارجي لهذا السلك النانوي خاضعاً لانفعال شد، بينما خضع مثيله الداخلي لانفعال ضغط. ويجعل الكمون الكهروضغطي للجانب المضغوط من السلك النانوي، يجعل تماس شوتكي وكأنه منحاز أمامياً، ويدفع الالكترونات لتعبّر الوصلة ما بين الذهب وأكسيد الزنك. وخلال عملية عبور الالكترونات تستمر حوامل الشحنات هذه بالنقل داخل المحلول الكهربيائي (الكتروليت) في حالته الصلبة إلى داخل الخلية الشمسية الحساسة صبغياً. وفي المقطع العرضي للخلية الشمسية الحساسة صبغياً (المبين في الشكل 2.10 b)، يجري تحديد خرج التوتر الأعظم (V_{SC}) لهذه الخلية من خلال الفارق بين مستوى فيرمي لأكسيد الزنك (E_F , AnO-SC) والكمون الكهروكيميائي للمحلول الكهربيائي. ويؤدي امتصاص الضوء المرئي من قبل الحساس الصبغى إلى إثارة الالكترونات لتعبّر إلى نطاق التوصيل لأكسيد الزنك. ويتبع الحقن الالكتروني من قبل الحساس المثار إلى داخل أكسيد الزنك، يتبع هذا الحقن إعادة توليد لحساس صبغى بواسطة الالكترونات القادمة من المركب أوميثاد ($C_{81}H_{68}N_4O_8$ OMeTAD). ولقد جرى فصل الالكترونات الموجودة في نطاق التوصيل لأكسيد الزنك، والثقوب الموجودة داخل المحلول الكهربيائي، وبالتالي نقلها إلى الالكتروودات المتناسمة.

10.1.3. توصيف الخرج

تستطيع كلتا وحدتي الخلية الهجينة المركبة CHC، وهما عبارة عن الخلية الشمسية الحساسة صبغياً والمولد النانوي، أن تعمل بشكل منفرد أو مجتمعة. ولقد جرى توصيف الخلية الهجينة المركبة من خلال تثبيتها على سطح مائي داخل تجويف لمولد أمواج فوق الصوتية، بحيث يواجه الجانب الشفاف من الخلية الشمسية الحساسة صبغياً منبع الضوء الشمسي، ويكون جانب المولد النانوي في تماس مباشر مع الماء في الأسفل، إذ جرى تطبيق مولد الأمواج فوق الصوتية، المتمتع بتردد مقداره نحو 41 KHz، من الجانب السفلي (الشكل 1.10 a). وجرى تسجيل منحنيات التيار – التوتر J-V لكل من الخلية الهجينة المركبة والخلية الشمسية الحساسة صبغياً والمولد النانوي بالترتيب. قيس تيار دائرة القصر من خلال ربط الخلية الهجينة المركبة على التسلسل مع مولد وظيفته التوليف من النوع DS345 30MHz (أنظمة ستانفورد للأبحاث) ويتمتع بمقاومة مقدارها 50 أوم مساحة توتراً يتراوح مقداره بين -1V و 1V وتمثل حملاً خارجياً. وقيست إشارة التيار باستخدام جهاز تضخيم من النوع DL 1211 (أجهزة من النوع DL). جرى تحويل جميع الإشارات من تمثيلية إلى رقمية عبر جهاز تحويل من النوع BNC-2120 (أجهزة وطنية)، وجرى تسجيل هذه الإشارات على الحاسب. جرى في البداية توصيف الأداء الكهروضوئي للخلية الشمسية الحساسة صبغياً في الخلية الهجينة المركبة، وذلك من خلال محاكاة إضاءة تمثل ضوء الشمس (استخدام جهاز AM 1.5G يحاكي ضوء الشمس ويتمتع باستطاعة

مقدارها 300 W، ونوعه (New port, 91160)، وجرى ذلك كله دون تطبيق أمواج فوق الصوتية. وبلغ توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية (U_{OC-SC}) المقدار 0.42 V، وكثافة تيار دارة القصر لهذه الخلية (J_{SC-SC}) المقدار $0.25 \mu A cm^{-2}$ (الشكل 3.10 a). ووصلت قيمة معامل الملء للخلية الشمسية الحساسة صبغياً إلى 30.6%، وهذا يوافق مردود تحويل كامل الطاقة ذا المقدار 0.03%، والذي يماثل ذلك المردود، الذي جرى الحصول عليه من الخلية الشمسية الحساسة صبغياً في حالتها الصلبة المبنية على أكسيد الزنك.



الشكل 3.10: أداء الخلية الهجينة المركبة CHC. (a) مقارنة خاصة التيار – توتر، للخلية الهجينة المركبة، وذلك عند إضاءتها بضوء الشمس المحاكى وتحريكها بواسطة إثارتها بالأمواج فوق الصوتية (المنحني باللون الأحمر)، ودون تحريك (المنحني باللون الأزرق). ويُعبّر الشكل الداخلي عن الخرج الممتد لنقاط توتر الدارة المفتوحة U_{OC} حول نقطة العبور المحورية، مظهراً ازدياد توتر الدارة المفتوحة U_{OC} بنحو 19 mV بعد إثارة الخلية الشمسية بالأمواج فوق الصوتية.

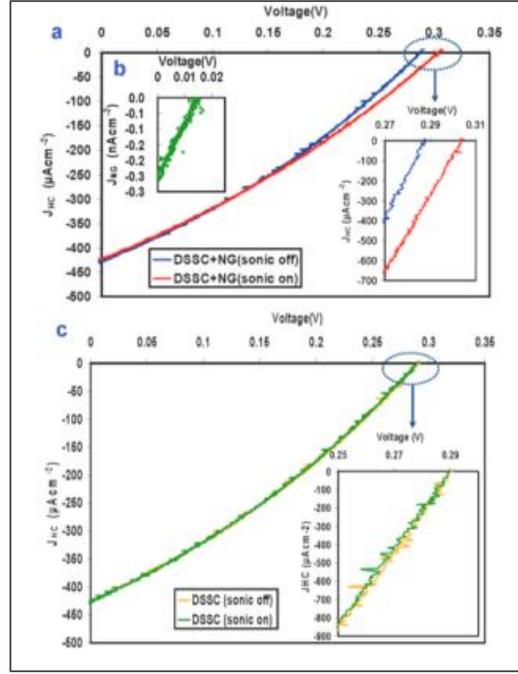
(b) خاصة التيار – توتر للمولد النانوي عند إخضاعه لإثارة (أو تحريض) بالأمواج فوق الصوتية، ولكن دون إضاءة شمسية. (c) مقارنة خاصة التيار – توتر لخرج الاستطاعة للخلية الهجينة المركبة. وتمثل المساحة المستطيلة خرج الاستطاعة المثلى للخلية الهجينة المركبة. جرى توصيف المولد النانوي من خلال إدخال الأمواج فوق الصوتية عبر الوسط المائي دون تطبيق الإضاءة الشمسية، حيث أظهرت خاصة التيار – توتر الموافقة لذلك أن توتر الدارة المفتوحة للمولد النانوي U_{OC-NG} كان تقريباً 0.019 V وكثافة التيار I_{NG} بحدود $0.3 \mu A cm^{-2}$ (الصورة المكبرة في الجانب الأيسر من الشكل 3.10 a). أُدرج منحني خاصة التيار – توتر للمولد النانوي في (الشكل 4.10 a)، وذلك عندما طبقت الإضاءة الشمسية وبعد فصلها. ولقد أظهرت قيم توتر الدارة المفتوحة للمولد النانوي U_{OC-NG} الموافقة لذلك، أظهرت أنه ليس هناك من تغير في قيم هذا التوتر، مما دلّ على عدم وجود مساهمة من قبل الخلية الشمسية SC مع المولد النانوي عندما جرى توصيف هذا الأخير وحده. وعلاوة على ذلك، جرى إدراج منحني خاصة التيار – توتر للمولد النانوي أيضاً في المنطقة القريبة من نقطة الصفر عندما كان الجهاز في حالة الظلام دون تطبيق أمواج فوق الصوتية. وكما يُظهر (الشكل 4.10 b) اخترق المنحني نقطة الصفر إلى اليمين. تؤكد هذه المعطيات أن كلاً من وحدتي

الخلايا الشمسية الحساسة صبغياً والمولد النانوي، داخل الخلية الهجينة المركبة، يمكن أن يعمل بشكل منفرد عند توافر نموذج واحد فقط من منابع الطاقة. لقد كان اختيار الخلية الشمسية الحساسة صبغياً والمبنية على أكسيد الزنك وفي حالتها الصلبة، كان هذا الاختيار متعمداً، ذلك لأن خرج هذه الخلية الشمسية الحساسة صبغياً قابل للمقارنة مع مثيله للمولد النانوي. ولكن يمكن تحسين هذا الخرج بشكل كبير من خلال استخدام الخلية الشمسية الحساسة صبغياً في حالتها الصلبة والمبنية على أكسيد التيتانيوم TiO_2 .

بغية إبراز قابلية التنفيذ من الناحية التقانية للخلية الهجينة المركبة، وذلك من أجل تحقيق تجميع الطاقتين الشمسية والميكانيكية في الوقت نفسه، قمنا بقياس منحني خاصية التيار – توتر للخلية الهجينة المركبة عند ظروف تشغيل مختلفة. فعندما طُبّق منبع الضوء الشمسي كاملاً، وفُصل منبع الأمواج فوق الصوتية، أبدت الخلية الهجينة المركبة توتراً للدارة المفتوحة مقداره 0.415 V وكثافة تيار دارة القصر J_{sc} مقدارها $252\ \mu\text{Acm}^{-2}$ (المنحني الأزرق في الشكل 3.10 a). وعندما طُبّق كلا المنبعين للأمواج فوق الصوتية وضوء الشمس، وصلت قيم توتر الدارة المفتوحة إلى 0.433 V ، بينما بقيت قيم كثافة تيار دارة القصر دون تغيير ومساوية $252\ \mu\text{Acm}^{-2}$ (المنحني الأحمر في الشكل 3.10 a). وأبدى توتر الخرج للخلية الهجينة المركبة فارقاً في التوتر مقداره 19 mV ، وذلك في حالتي وصل منبع الأمواج فوق الصوتية وفصله، وذلك كما هو مبين في الرسم الداخلي من الجانب الأيمن في (الشكل 3.10 a) لتوتر الدارة المفتوحة، والذي يُعد بالضبط توتر الخرج للمولد النانوي في حال فصل ضوء الشمس (الشكل 3.10 b).

وبغية التأكيد أكثر على أن ازدياد مقدار توتر الدارة المفتوحة آتٍ في الحقيقة من وحدة المولد النانوي، أُجري القياس لمجموعة من منحنيات خاصية التيار – توتر بين المهبط والمصدر لوحدة الخلية الشمسية الحساسة صبغياً دون ضم وحدة المولد النانوي في دارة القياس. ولقد جرى إدراج أداء الخلية الهجينة المركبة ضمن منحنيات خاصية التيار – توتر (الشكل 4.10 a)، وإدراج أداء المولد النانوي في (الشكل 4.10 b). وغالباً ما أبدت منحنيات خاصية التيار – توتر أثراً مماثلاً، وذلك عند وصل منبع الأمواج فوق الصوتية وفصله (الشكل 5.10 c). وخاصة، بقي توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية عند النقطة نفسها، وذلك كما هو موضح في الرسم الداخلي المكبر لتوتر الدارة ضمن (الشكل 4.10 c).

ويهدف الرؤية بالعين المجردة لخرج الاستطاعة المثلى من منحني خاصية التيار – توتر، جرى حساب جداء كثافة التيار والوتر. ومثلت مساحة المستطيل كثافة استطاعة الخرج المثلى. وبمقارنة فارق المساحات يمكننا أن نخبر أن الخلية الهجينة المركبة تعزز أداء تجميع الطاقة أكثر من أي من الأجهزة المستخدمة. فعندما يكون عنصر الخلية الشمسية الحساسة صبغياً فقط في حالة التشغيل ومعرضاً لإضاءته من قبل ضوء شمس كامل ووحيد، فقد وُجد أن كثافة استطاعة الخرج المثلى (المستطيل الأزرق) تساوي $32.5\ \mu\text{Wcm}^{-2}$ ، وكثافة تيار دارة القصر تساوي $140\ \mu\text{Acm}^{-2}$ ، وتوتر الدارة المفتوحة يساوي 0.231 V . وعندما يكون كلٌّ من الخلية الشمسية الحساسة صبغياً والمولد النانوي في وضع التشغيل في الوقت نفسه، وموصولين على التسلسل، فإن كثافة الاستطاعة المثلى الموافقة لذلك كانت مساوية للمقدار $34.5\ \mu\text{Wcm}^{-2}$ ، وكثافة تيار دارة القصر مساوية للمقدار $141\ \mu\text{Acm}^{-2}$ ، وتوتر الدارة المفتوحة 0.243 V (المستطيل الأحمر). وهكذا، جرى تحقيق ازدياد في قيم كثافة الاستطاعة (ΔP_{HC}) للخلية الهجينة بمقدار $2\ \mu\text{Wcm}^{-2}$ ، وذلك بعد تطبيق منبع الأمواج فوق الصوتية على هذه الخلية، والذي أدى إلى تعزيز بمقدار 6% من قيم الاستطاعة المثلى. ومع ذلك، فإنه وإضافة إلى توتر الدارة المفتوحة، جرى بنجاح دمج خروج (مجموع خرج) الاستطاعة الكلية من كلا المصدرين الشمسية والمولد النانوي.



الشكل 4.10: الأداء المتحكم به للخلية الهجينة المركبة CHC. (a) خاصية التيار – توتر لخلية هجينة مركبة أخرى، وذلك عندما جرى إضاءة جانب من الخلية الشمسية من خلال المحاكاة لضوء الشمس وتطبيق الأمواج فوق الصوتية (المنحني الأحمر) وبعد فصل هذه الأمواج (المنحني الأزرق). (b) خاصية التيار – توتر لعنصر المولد النانوي عند تعريضه لموجة إثارة فوق صوتية ودون تعريضه لضوء الشمس. (c) خاصية التيار – توتر للخلية الشمسية الحساسة صغياً دون أن تُضم وحدة المولد النانوي في دارة القياس، وذلك عند إضاءة هذه الخلية الشمسية بضوء شمس مُحاكي مع تطبيق أمواج فوق الصوتية (المنحني الأخضر) وبعد فصل هذه الأمواج (المنحني البرتقالي). ويبيّن الشكل المكبر اتساع دائرة التعرض حول نقاط توتر الدارة المفتوحة، مُبدياً أنه في الأغلب لم يحدث أي تغيير في قيم U_{oc} بعد تطبيق الأمواج فوق الصوتية. لم تتأثر نقطة توتر الدارة المفتوحة من خلال تطبيق الموجة فوق الصوتية، ببساطة جرى التحكم بالمساهمة المقدمة من خلال إحداث تغير في مقاومة المولد النانوي في أداء الخلية الشمسية.

10.2. الخلية الهجينة لتحقيق التجميع المتزامن لكل من الطاقة الكيمياحيوية والميكايحيوية

ربما تكون الطاقة، التي جرى تجميعها من الوسط المحيط، كافية لتغذية التجهيزات النانوية المستخدمة في التشغيل الدوري، وذلك نظراً للاستهلاك المنخفض جداً للطاقة وصغر مقاسات هذه الأجهزة. فمثلاً، الجهاز المزروع، الذي يُبلغ لاسلكياً عن تركيز السكر الموضوعي بغية معالجة مرضى السكر، أو الذي يُظهر درجة حرارة المريض الموضوعية بعد إجراء العمل الجراحي، أو يُبين فارق الضغط داخل المنظومة العصبية المركزية و/أو حدوث خثرة دموية: كل ذلك يمكن التنبؤ به على شكل تطبيقات للكومون، والذي يحتاج إلى مصادر مزروعة للطاقة. ويمكن تحقيق التغذية لمثل هذه الأجهزة من خلال إجراء التجميع المتزامن للطاقة من مصادر عدة، بما في ذلك جسم الإنسان، الذي يحوي كلاً من الطاقة الكيمياحيوية ومثيلاتها الكيمياحيوية لزيادة عدة المدخرات أو الاستعاضة عنها. وعلى كل حال، تُعدّ تغذية الأجهزة النانوية القابلة للزرع بغية أدائها لدور حساس حيوي، وذلك من خلال استخدام هذه الأجهزة لتقانة تجميع الطاقة/أو حصادها، تُعدّ تحدياً بعيد المدى، ليس لأن الطاقة المتوافرة داخل الجسم الحي هي فقط الطاقة الميكانيكية والكيمياحيوية، ومن الممكن الطاقة الكهرومغناطيسية، في حين لا يمكن تجميع الطاقة الحرارية، نظراً لعدم وجود تدرج حراري كاف، والطاقة الشمسية غير متوافرة للأجهزة المزروعة داخل الجسم الحي.

سوف نعرض في هذا الجزء من الكتاب جهازاً هجيناً لتجميع الطاقة بغية استخدامه في التطبيقات المحتملة داخل الجسم الحي. ويتكون هذا الجهاز الهجين من كل من مولد نانوي كهروضغطي متعدد الألياف النانوية (من النوع فلورايد فينيلدين) بغية إجراء تجميع الطاقة الميكانيكية، كالتالي تأتي من عملية التنفس أو من دقات القلب، وخلية وقود حيوي إنزيمية مرنة بهدف إجراء

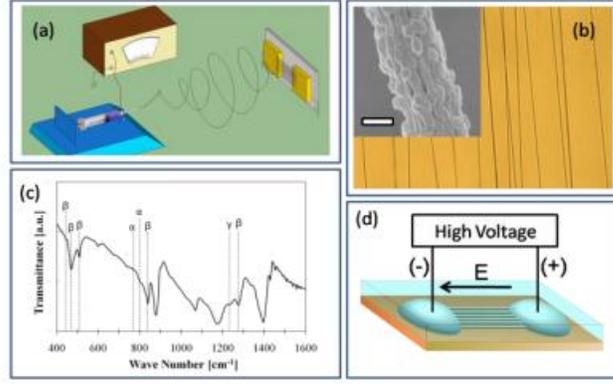
تجميع للطاقة الكيمياحيوية (الغلوكوز/والأكسجين) داخل السائل الحيوي، وهي عبارة عن نوعين من الطاقة المتوافرة داخل الجسم الحي. ويمكن لهاتين الطريقتين لتجميع الطاقة أن تعملًا بشكل متزامن أو منفرد، وبالتالي ترفع من قيم الخرج وتطيل عمر الاستخدام. ومن خلال استخدامنا للجهاز الهجين، قمنا بعرض منظومة نانوية "ذاتية-التغذية"، وذلك من خلال تغذية حساس للضوء فوق البنفسجي مُعدّ من سلك نانوي لأكسيد الزنك.

10.2.1. مولد نانوي مبني على البوليفينيل ديغلورايد (PVDF)

لقد جرى في البداية، ومن قبل مجموعتنا⁵، عرض مولد نانوي بُني على سلك نانوي مفرد لأكسيد الزنك، والذي حُرِّم جانبياً إلى ركازة بوليميرية. واستناداً إلى كلٍّ من الآلية والتصميم المماثلين لذلك، جرى حديثاً إدراج مولد نانوي من خلال استخدام ليف نانوي (NF) كهروضغطي مفرد ومتعدد الألياف النانوية مُعدّة من الفلورايد فيني ليدين (PVDE)[15]. ونستخدم في تصميمنا الهجين هذا مولداً نانويًا كهروضغطياً متعدد الألياف النانوية على شكل عنصر تشغيل بغية إجراء تجميع للطاقة الميكانيكية. استخدم الباحث Cheng وآخرون مغزلاً كهربائياً في حقل قريب بغية نسج ألياف نانوية لمولد نانوي كهروضغطي متعدد الألياف النانوية، حيث اقترح أن يقوم الحقل عالي الكهرباء، والمستخدم في رسم الليف النانوي، أن يقوم بإجراء التراص الطبيعي للأقطاب على كامل المحور الطولي للليف النانوي. ولقد استخدمنا مغزلاً كهربائياً تقليدياً يتمتع بتقنية المأخذين (الالكترودين)¹³ بغية إجراء نسج وترتيب مصفوفة الألياف النانوية المتراصة، وأُتبع بعملية لصق للأقطاب داخل مستوٍ (الشكل 5.10 a).

ولقد جرى شراء مسحوق PVDE (من النوع MW 534,000) من Sigma-Aldrich واستخدام كما جرى استلامه. جرى إذابة 1.5 غرام من مسحوق PVDE داخل مزيج من 3 mL DMF (VWR) و 7 mL Actione (VWR)، وجرى تسخينه عند درجة حرارة 60°C لمدة 30 دقيقة حتى يصبح المحلول متجانساً. نُقل المحلول اللزج الشفاف إلى داخل إبرة حقن هاملتون ذات السعة 1 mL لإجراء الغزل الكهربائي. استخدم كلٌّ من مضخة حقن من النوع Chemyx Fusion 200 ومنبع Betran للاستطاعة عالية التوتر ذات التيار المستمر، حيث طُبِّق توتر مقداره 12 KV على إبرة الحقن، واستخدم معدل تغذية مقداره 50 µL في الدقيقة. وجرى تجميع الألياف المنسوجة كهربائياً على قطعتين نحاسيتين مؤرضتين مع ترك فراغ بينهما يعادل 2 سم، وتوضعا على مسافة 15 سم من إبرة الحقن، وجرى ترصص الألياف بالكهرباء الساكنة عبر فجوة الالكترود.

تعرض الصورة الملتقطة بالمجهر الالكتروني الماسح (الصورة المكبرة في الشكل 5.10 b)، تعرض التشكل النسيجي على سطح الليف النانوي، والذي يُعد الناتج المحتمل من تشكل بلورات صغيرة. استخدم جهاز تحويل فورييه الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) بهدف توصيف الأطوار البلورية المتوافرة في الألياف النانوية الكهروضغطية متعددة الفيني ليدين فلورايد. وأدرج في (الشكل 7.10 c) طيف الانتقال من جهاز تحويل فورييه الطيفي بالأشعة تحت الحمراء للألياف النانوية الكهروضغطية متعددة الفيني ليدين فلورايد بعد أن جرى غزلها. تمت الإشارة إلى كلٍّ من الطور β والطورين α و γ غير القطبيين¹⁴. جرى ضبط اتجاه القطب العشوائي للطور β القطبي من خلال صندوق الجهاز ضمن صندوق مُعدّ من البوليفينيل سيلوكسان PDMS وتطبيق حقل توتر عالٍ (نحو 0.2 MV/cm) ضمن المستوى القطبي لمدة تصل إلى 15 دقيقة (الشكل 5.10 d).

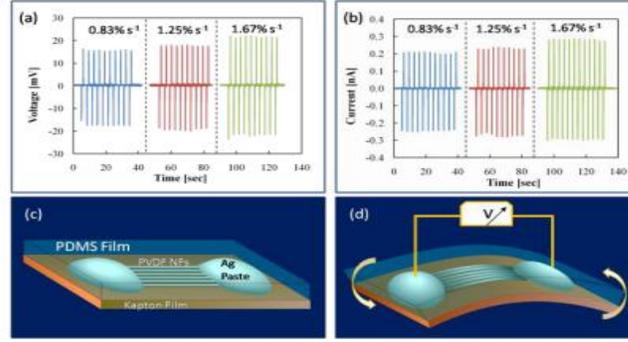


الشكل 5.10: (a) مخطط عملية الغزل الكهربائي بهدف الحصول على الألياف النانوية متعددة الفيني ليدين فلورايد المتراسة PVDF NFs. صورة ضوئية للألياف النانوية متعددة الفيني ليدين فلورايد المتراسة والمتوضعة على فيلم كابتون، وتكبير عالٍ بالمجهر الإلكتروني الماسح لمورفولوجية (شكل) سطح الليف النانوي مُوضح في الصورة المكبرة الداخلية 400 nm. (c) طيف الانتقال لتحويل فورييه الطيفي بالأشعة تحت الحمراء للألياف النانوية متعددة الفيني ليدن فلورايد. (d) مخطط الحقل العالي في مستوى الأقطاب للألياف النانوية متعددة الفيني ليدين فلورايد.

يعتمد مبدأ تشغيل المولد النانوي الكهروضغطي متعدد الألياف النانوية على خاصية العزل عند الليف النانوي الكهروضغطي متعدد الفيني ليدين فلورايد، وتوليد حقل كهروضغطي داخلي من خلال تطبيق انفعال شد. ولما كان الجهاز سوف يخضع لانفعال (تشوه) تحت تأثير كلٍّ من الضغط المتناوب وقوة الشد (الشكل 6.10 c-d)، فإن الليف النانوي يؤدي دور كل من "المكثف" و"مضخة الشحن"، ويدفع بتدفق الإلكترونات بالاتجاهين العكسي والأمامي عبر الدارة الخارجية. وتُسفر عمليات الشحن والتفريغ هذه عن وجود مصدرٍ للطاقة.

بغية صنع مولد نانوي، جرى استخدام فيلم رقيق أبعاده $1\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ على شكل ركازة داعمة، وذلك وفقاً لتعليمات موقع كابتون (Kapton@Dupont). وبهدف تشكيل الكترودين، جرى توضع طبقة الذهب ثخنها 50 nm على ركازة كابتون، تاركين فجوة غير مغطاة مقاسها 1 mm في الوسط من خلال استخدام قناع. وجرى بعناية نقل الألياف المغزولة كهربائياً عبر الالكترودات الذهبية ولفها كهربائياً باستخدام طلاء فضي (من النوع Ted Pella). وجرى توضع طبقة ثخنها 0.5 mm من البولي ديميثيل سيلوكسان فوق الجهاز لحماية العزل الكهربائي وتحمل الوسط الحيوي. وجرى غمس الجهاز النهائي داخل زيت البارافين، وطُبق توتر مقداره 20 KV بين الالكترودين لمدة 15 دقيقة. وبعد إجراء الاستقطاب، عُرض الالكترودان للقصر الكهربائي لمدة تزيد على 12 ساعة.

يُبين (الشكل 6.10 a-b) اعتماد معدل الانفعال على كلٍّ من توتر الدارة المفتوحة وتيار دارة القصر المتولد بواسطة الليف النانوي الكهروضغطي متعدد الفيني ليدين فلورايد الخاضع لحمل ميكانيكي دوري. جرى تثبيت الانفعال المحثوث عند المقدار -0.05% ، وطبق لفترات تزيد على كل من 0.06 ثانية و0.04 ثانية و0.03 ثانية. وبزيادة معدل الانفعال فوق هذا المجال، ازداد توتر الحلقة المفتوحة من 15mV إلى 20 mV وازدادت شدة تيار دارة القصر من 0.2 nA إلى 0.3 nA، التي تتوافق مع النظرية الكهروضغطية¹⁵. يُحدد توتر الخرج بواسطة السلك النانوي المفرد، بينما يساوي تيار الخرج مجموع تلك التيارات الصادرة عن جميع الأسلاك النانوية الفعالة، ويمكن تحسين خرج المولد النانوي الكهروضغطي متعدد الألياف النانوي من خلال استبدال البولي ديميثيل سيلوكسان PDMS بمادة تتمتع بتوتر انهيار أعلى، لذا يمكن تطبيق حقول قطبية أعلى بغية الحصول على استقطاب متبقي أعلى^{17,16} وإضافةً لذلك، يمكن دمج مئات الألياف النانوية كموئياً بعضها مع بعض ووصلها على التسلسل/أو التفرع بهدف تحسين استطاعة الخرج بشكلٍ أكبر.



الشكل 6.10: (a) توتر الدارة الكهربائية المفتوحة. (b) تيار دائرة القصر للمولد النانوي الكهروضغطي متعدد الفيني ليدين فلورايد كتابع لمعدل الانفعال، وعند انفعال أعظم مقداره 0.05%. (c) يتوضع الليف النانوي متعدد الفيني ليدين فلورايد على ركازة كابتون، حيث جرى لف كلتا النهايتين لهذا الليف بلصاقة فضية، وجرى تغليب كامل الجهاز بتغليفه بمادة البولي ديميثيل سيلوكسان. (d) يولد الانحناء الميكانيكي للركازة انفعال شد، ويرافقه توليد حقل كهروضغطي على طول الليف، والذي يقوم بدفع الالكترونات عبر الحمل الخارجي بالاتجاهين العكسي والأمامي. متتبعاً بذلك التأثير الميكانيكي الدوري.

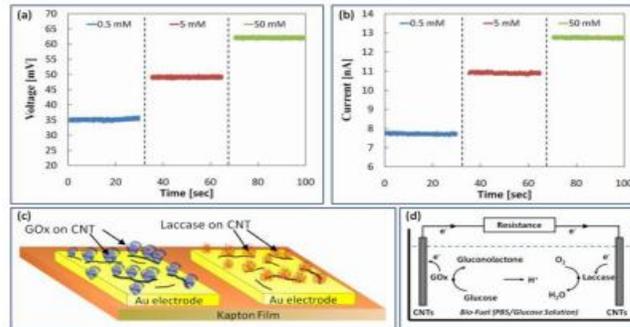
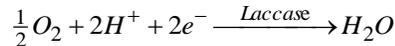
10.2.2. تجميع الطاقة الكيمياحيوية بواسطة خلية وقود حيوي

جرى استخدام خلية وقود حيوي (بيو) أنزيمية بغية تحويل الطاقة الكيميائية لكل من الغلوكوز والأكسجين داخل السائل الحيوي إلى طاقة كهربائية [16]. ويوضح (الشكل 7.10 c) نمط خلية الوقود الحيوي BFE المستخدمة في هذه الدراسة. نُقِشت الالكترونات على فيلم كابتون، وغطيت بأنابيب نانوية كربونية متعددة الجدران (MWCNTs)، وأُتبعَت بتثبيت كل من أكسيد الغلوكوز (GO_x) واللاكيز ليشكلا كلا من المصعد والمهبط بالترتيب (انظر الطرائق التجريبية للاطلاع على التفاصيل). وإضافةً إلى تثبيت الأنزيمات على الالكترونات، فقد جرى إظهار أن الأنابيب النانوية الكربونية CNTs تساعد على تعزيز انتقال الالكترونات ما بين الأنزيمات والالكترونات [17, 18, 19]. ويبين (الشكل 7.10 d) مبدأ العمل لخلية الوقود الحيوي. فعندما يكون الجهاز في وضع التماس مع السائل الحيوي الحاوي الغلوكوز (مثلته في ذلك مثل الدم)، فإن العمليات الكيميائية الموافقة لذلك، والتي تأخذ مكاناً عند كلا الالكترونات هي [20]:

يُعدُّ الغلوكوز مؤكسد كهربائي للغلوكونولاكتون gluconolactone عند المصعد، كما يلي:



ويُعدُّ الأكسجين المنحل خافضاً كهربائياً للماء عند المهبط، وذلك كما يلي:



الشكل 7.10: (a) توتر الدارة الكهربائية المفتوحة. (b) تيار دائرة القصر لخلية الوقود الحيوي BFC كتابع لتركيز الغلوكوز داخل محلول العزل الفوسفاتي PBS. (c) مخطط توضيحي لجهاز خلية الوقود الحيوي المُصنَّع. (d) مخطط مُبسَّط لآلية عملي خلية الوقود الحيوي.

جرى شراء كل من أكسيد الجلوكوز (GO_x من Aspergillusnger من النموذج X-S) ومسحوق اللاكيز (من Trametes versicolor)، جرى شراؤها من Sigma-Aldrich، وجرى شراء الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران من Hanha Nanotech (أقطارها 3-9 nm، ودرجة نقاوتها < 95%)، وشراء محلول العزل الفوسفاتي (PBS, pH 7.0) من Fluka. ولقد جرى استخدام جميع هذه المركبات الكيميائية كما استلمت. ولقد أُذيبت الأنابيب النانوية الكربونية داخل الإيثانول، وجرى تفتيتها بالموج فوق الصوتية لمدة ساعة لتشكيل محلول معلق (مشتت) من رذاذ هذه الأنابيب بمعدل 2 g/L. وجرى تحضير كل من محلول بمعدل 4 g/L من أكسيد الكلوكوز في محلول العزل الفوسفاتي، ومحلول بمعدل 4 g/L من اللاكاز داخل محلول العزل الفوسفاتي. وجرى تحضير فيلم كابتون مع الالكترودات الذهبية كما جرى توصيفها سابقاً، ومن ثم جرى تبييضها وغسلها بالماء المقطر قبل الاستخدام. جرى توضيع $2 \mu\text{L}$ من المحلول المعلق (المشتت) للأنابيب النانوية الكربونية CNT على كلا الالكترودين، ومن ثم جرى غسلها بالماء المقطر بعد تجفيفها. وجرى ترسيب $2 \mu\text{L}$ من محلول GO_x على أحد الالكترودين الذهبين/ المرسب عليه الأنابيب النانوية الكربونية بغية تشكيل المصعد، وجرى ترسيب $2 \mu\text{L}$ من اللاكاز على الالكترود الآخر بغية تشكيل المهبط. بعد ذلك جرى تخزين الجهاز عند درجة الحرارة 4°C لمدة 4 ساعات على الأقل قبل وضعه في الاستخدام. ويهدف استخدام الالكترودين بشكل أفضل، يجري غسلها بمحلول العزل الفوسفاتي النقي.

تبين (الأشكال 7.10 a, b) كلاً من توتر الدارة الكهربائية المفتوحة وتيار دارة القصر، التي جرى توليدها بواسطة خلية الوقود الحيوي العاملة داخل محلول العزل الفوسفاتي (PBS, pH7.0) مع تركيز للجلوكوز مقداره 0.5 mM و 5 mM و 50 mM. ولقد تبين أن كلا التيار والتوتر تزداد قيمتهما بازدياد تركيز الجلوكوز. يتمتع دم الإنسان بتركيز جلوكوز يتراوح بين 4-6 mM، ويتمتع بدرجة الحموضة pH تتراوح قيمتها بين 7.35-7.45%. ولقد وُجد أنه من أجل تركيز للجلوكوز مقداره 5 mM، يكون توتر الدارة المفتوحة مساوياً 50 mV ، وشدة تيار دارة القصر 11 nA. وتعتمد كثافة الاستطاعة لخلية الوقود الحيوي على موانمة الحمولة، ولقد وُجد أنه عندما كان الحمل أعظماً ومقداره $10 \text{ M}\Omega$ ، فإن كلاً من كثافة الاستطاعة الموافقة لهذا الحمل تساوي تقريباً 2.2 nW/cm^2 وكثافة التيار تساوي نحو 58 nA/cm^2 (للاطلاع على المعلومات الداعمة لذلك).

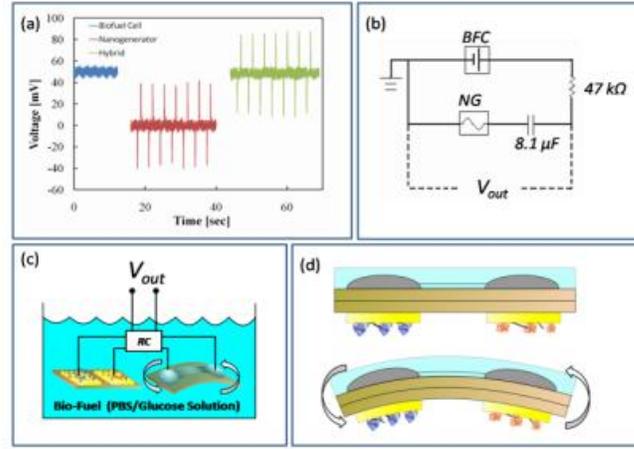
إن أعلى توتر نظري يمكن الحصول عليه من خلية الوقود الحيوي المبنية على أكسيد الجلوكوز/واللاكاز، ووفقاً لعلم الديناميك الحراري، يساوي تقريباً 1 فولط^9 . وللحصول على هذا التوتر لابد من أمثلة عوامل عدة، ولكن المعامل الأهم من بينها يكمن في التفاعلات الداخلية في السطح الإنزيمي. ومن خلال إجراء وصلات متقاطعة مترابطة أو مثيلاتها "السلكية" تتحول الإنزيمات المؤكسدة الجامدة إلى هلام مائي مؤكسد، وعندها يمكن لخرج خلية الوقود الحيوي أن يكون أكثر أمثلة في المستقبل^{23,21}. وإضافة لذلك، يمكن لخلايا الوقود المتعددة أن تُدمج (تتكامل) معاً بغية زيادة استطاعة الخرج.

10.2.3. المولدات النانوية الكيمياحيوية والميكاحيوية الهجينة

يُعرض في (الشكل 8.10 a, c) التشغيل المستقل والدمج (المتكامل) لكل من المولد النانوي، المعد من ألياف نانوية كهروضغطية متعددة الفيني ليدين فلورايد، وخلية الوقود الحيوي والمولد النانوي ذي خلية الوقود الحيوي الهجين [21]. ويهدف دمج التوتر المتناوب AC للمولد النانوي، المعد من ألياف نانوية كهروضغطية متعددة الفيني ليدين فلورايد، مع التوتر المستمر DC لخلية الوقود الحيوي، جرى استخدام مرشح تمرير بسيط عالي المقاومة RC (الشكل 8.10 b)، ويقوم فعلياً بحجب التوتر المستمر لخلية الوقود الحيوي باتجاهٍ وحيد، بينما يُمرر التوتر المتناوب للمولد النانوي. ومن خلال دمج الجهازين، تضاعف تقريباً توتر الذروة من المقدار 50 mV إلى المقدار 95 mV . ويسمح تعليب (صندقة) المولد النانوي، المعد من ألياف نانوية كهروضغطية متعددة الفيني ليدين فلورايد، تعليبه بمادة البولي ديميثيل سيلوكسان، يسمح هذا التعليب لتشغيل المولد داخل سائل حيوي وداخل أوساط (بيئات) في الجسم الحي. وإضافةً لذلك، يُتيح استخدام ركازة من فيلم كابتون المرن في إعداد خلية الوقود الحيوي، يُنتج

الفرصة أمام هذه الأجهزة لتُدمج ظهراً لظهر (back-to-back) كما هو موضح في (الشكل 8.10 d). ويُعد ذلك مهماً ليشير إلى أن هدفنا هنا لا ينحصر في الوصول إلى القيمة العظمى لخرج خلية الوقود الحيوي فحسب، ولكن عوضاً عن ذلك، فإننا نحافظ على أن يكون خرج خلية الوقود الحيوي ضمن المجال المقبول أيضاً، وهكذا يمكن وبوضوح عرض عملية التهجين لكل من خلية الوقود الحيوي والمولد النانوي.

تساوي استطاعة الخرج للمولد النانوي الهجين مجموع مثلثيتها لخلية الوقود الحيوي والمولد النانوي. يُرمز لتوتر الخرج لخلية الوقود الحيوي بالرمز V_{BFC} ، ولتوتر الخرج للمولد النانوي المتناوب بالرمز V_{NG} . وإذا أُخذ بالحسبان المقاومة الكبيرة اللانهائية للليف النانوي متعدد الفيني ليدين فلورايد، فإن توتر الخرج لمركب المولد النانوي هو المقدار $\pm V_{NG}$ حتى مع توافر حمل. وتكون المقاومة الداخلية لخلية الوقود الحيوي منخفضة جداً، ذلك لأنها مرتبطة بانتقال الإلكترونات بين كل من مركز الأنزيمات الفعّال والالكترودات المعدّة من الأنابيب النانوية الكربونية.



الشكل 8.10: (a) توتر الدارة الكهربائية المفتوحة لكل من التشغيل المستقل والمركب لخلية الوقود الحيوي والمولد النانوي، المعدّ من الألياف النانوية الكهروضغطية متعددة الفيني ليدين فلورايد. **(b)** مخطط الدارة المستخدمة لدمج الجهاز الهجين من المولد النانوي وخلية الوقود الحيوي. لاحظ أنه، ومع الأخذ بالحسبان المقاومة الداخلية للمولد النانوي، يكون الزمن اللازم لشحن المكثف أطول من الفترة الزمنية، التي جرى خلالها تطبيق الانفعال على المولد النانوي، ولهذا يكون توتر الخرج مساوياً لمجموع التوتورات الناتجة من قبل كل من خلية الوقود الحيوي والمولد النانوي. **(c)** مخطط لعملية دمج المولد النانوي، **(d)** التصميم المتوقع لجهاز هجين مكون من خلية الوقود الحيوي والمولد النانوي.

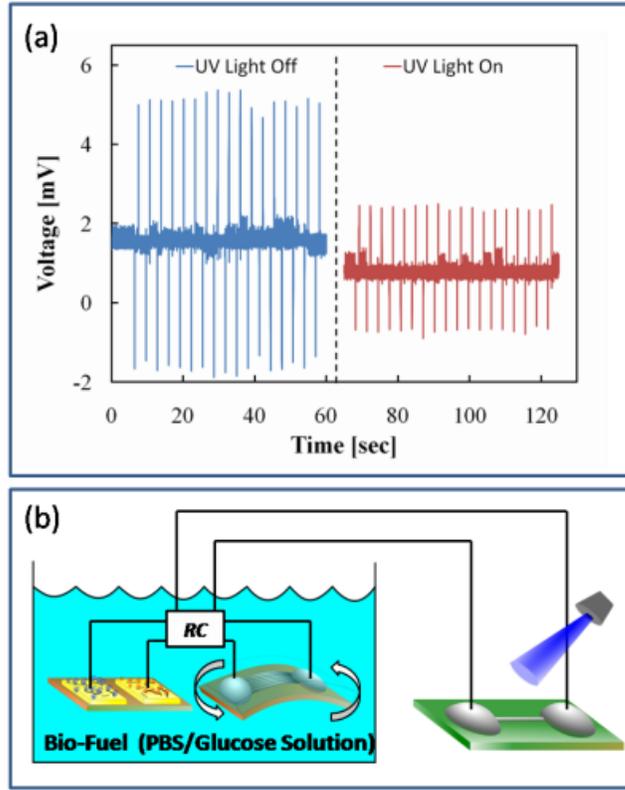
وفي مثل هذه الحالة، يكون التوتر المطبق على الحمل الخارجي R هو $V_{BFC} \pm V_{NG}$ ، والذي يعطي استطاعة خرج مقدارها

$(V_{BFC} \pm V_{NG})^2/R$. ويكون المعدل الوسطي لذروة استطاعة الخرج، ولكل دور من الفعل (أو التأثير) الميكانيكي، هو:

$$(V_{BFC} + V_{NG})^2/R + (V_{BFC} - V_{NG})^2/R = (V_{BFC})^2/R + (V_{NG})^2/R$$

وإضافةً لذلك، يمكن أخيراً تطوير طرائق تقويم الخرج للمولد النانوي المتناوب بغية الحصول على إشارة مستمرة ودمجها مع

الخرج المستمر لخلية الوقود الحيوي BFC لإعطاء خرجاً إجمالياً مستمراً ومعزراً.



الشكل 9.10: عملية دمج (تكامل) جهاز المولد النانوي الهجين ذي خلية الوقود الحيوي مع حساس نانوي للضوء فوق البنفسجي بغية عرض منظومة نانوية ذاتية التغذية. (a) هبوط التوتر عبر حساس للضوء فوق البنفسجي مبني على سلك نانوي من أكسيد الزنك، وذلك في حالتي فصل الضوء فوق البنفسجي وتسليطه. ولقد جرى عرض الإشارات المستقرة فقط لأهداف توضيحية. (b) مخطط توضيحي لمنظومة نانوية هجينة ذاتية التغذية.

10.2.4. تغذية الحساس النانوي بخلية هجينة

جرى أيضاً استخدام المولد النانوي ذي خلية الوقود الحيوي الهجين لقيادة عملية تشغيل حساس للضوء فوق البنفسجي مبني على سلك نانوي من أكسيد الزنك (الشكل 9.10 b). فعندما لم يتوافر ضوء فوق البنفسجي، كانت مقاومة السلك النانوي لأكسيد الزنك بحدود $\sim 7 \text{ M}\Omega$ (للاطلاع على المعلومات الداعمة)، وشكلت الذروة الموافقة لهبوط التوتر على الحساس النانوي بحدود $\sim 5 \text{ mV}$ ، وكما هو موضح في (الشكل 9.10 a). وعند التشعيع بالضوء فوق البنفسجي، هبطت مقاومة السلك النانوي إلى المقدار $\sim 800 \text{ K}\Omega$ ، وانخفضت ذروة هبوط التوتر عبر جهاز السلك النانوي، لتصل إلى المقدار $\sim 2.5 \text{ mV}$. وهذا ما يؤكد إمكانية التغذية الذاتية الكاملة لمنظومة نانوية من أجل تطبيقاتها داخل الجسم الحي.

10.3. المراجع

- [1] W.G. Pfann, W.J. Van Roosbroeck, *Appl. Phys.* **25**, 1422 (1954).
- [2] G. Yu, J. Gao, J.C. Hummelen, F. Wudl, A.J. Heeger, *Science* **270**, 1789 (1995).
- [3] J.J.M. Halls, C.A. Walsh, N.C. Greenham, E.A. Marseglia, R.H. Friend, S.C. Moratti, A.B. Holmes, *Nature* **376**, 498 (1995).
- [4] B. O'Regan, M.A. Grätzel, *Nature* **353**, 737 (1991).
- [5] W.U. Huynh, J.J. Dittmer, A.P. Alivisatos, *Science* **295**, 2425 (2002).
- [6] J.A. Paradiso, T. Starner, *IEEE Perv. Comp.* **4**, 18 (2005).
- [7] Z.L. Wang, J.H. Song, *Science* **312**, 242 (2006).
- [8] Z.L. Wang, *Sci. Am.* **298**, 82 (2008).
- [9] C. Xu, X.D. Wang, Z.L. Wang, *JACS* **131**, 5866 (2009).
- [10] B.J. Hansen, Y. Liu, R.S. Yang, Z.L. Wang, *ACS Nano*, 2010, Online.
- [11] B. Oregan, M. Gratzel, *Nature* **353**, 737 (1991).
- [12] M. Law, L.E. Greene, J.C. Johnson, R. Saykally, P.D. Yang, *Nat. Mater.* **4**, 455 (2005).
- [13] X.D. Wang, J.H. Song, J. Liu, Z.L. Wang, *Science* **316**, 102 (2007).
- [14] C. Xu, Z.L. Wang*, *Adv. Mater.* **23**, 873 (2011).
- [15] C. Chang, V.H. Tran, J. Wang, Y. Fuh, L. Lin, *Nano Letters* **10**, 726 (2010).
- [16] C. Pan, H. Wu, C. Wang, B. Wang, L. Zhang, Z. Cheng, P. Hu, W. Pan, Z. Zhou, X. Yang, J. Zhu, *Adv. Mat.* **20**, 1644 (2008).
- [17] A. Guiseppi-Elie, C. Lei, R.H. Baughman, *Nanotechnology* **13**, 559 (2002).
- [18] J.H.T. Luong, S. Hrapovic, D. Wang, F. Bensebaa, B. Simard, *Electroanalysis* **16**, 132 (2004).
- [19] C. Cai, J. Chen, *Analytical Biochemistry* **332**, 75 (2004).
- [20] A. Heller, *PCCP* **6**, 209 (2004).
- [21] B.J. Hansen⁺, Y. Liu⁺, R.S. Yang, Z.L. Wang, *ACS Nano*, **4**, 3647 (2010).

الفصل الحادي عشر: الأنظمة والحساسات ذاتية التغذية

يتحرك التطور الناشئ للتقانة النانوية في هذه الأيام من ابتكار مكونات فردية إلى نظام مدمج (متكامل)، يمكنه تنفيذ مهمة تصميمية واحدة أو أكثر، وذلك من خلال دمج مجموعة من الأجهزة النانوية مع تقانات ميكروالكترونية حديثة. ويكون النظام المدمج عموماً عبارة عن مجموعة من المكونات مثل: الحساسات (أجهزة الاستشعار) ومحولات الطاقة الالكترونية ومعالج البيانات ووحدة التحكم ومنظومة الاتصال. ولما كانت أبعاد الأجهزة تنقلص إلى مرتبة النانومتر أو الميكرومتر، فإن استهلاك الطاقة سيهبط إلى مستوى أدنى بكثير أيضاً. فإذا أخذنا سماعة الرأس (Bluetooth headset) التجارية مثلاً، علمنا أن استهلاكها للطاقة يقارب بالضبط عدة ميكرووات (أي أن معدل نقل البيانات نحو 500~ كيلوبايت في الثانية، واستهلاك الطاقة 10nW لكل بايت). وسيكون استهلاك الطاقة من قبل الجهاز النانوي أصغر من ذلك بكثير. فعند مثل هذا المستوى المنخفض لاستهلاك الطاقة، يمكن تماماً قيادة الأجهزة بواسطة الطاقة المجمعّة من مصادر متوافرة في الوسط المحيط لهذه الأجهزة، مثل: تدفق الهواء اللطيف والاهتزاز والموجة الصوتية والطاقة الشمسية ومثيلتها الكيميائية و/أو الطاقة الحرارية.

لقد قمنا بتطوير هذه "التقانة النانوية ذاتية التغذية" منذ عام 2005، هادفين لبناء نظام ذاتي التغذية، يعمل بشكل مستقل وعلى نحوٍ مستدامٍ ولاسلكياً ومن تلقاء نفسه دون استخدام مدخنة [2,1]. وسوف تؤدي الأنظمة ذاتية التغذية دوراً مهماً جداً في كلِّ من العمليات المستقلة والمستدامة وعديمة الصيانة للحساسات الحيوية المزروعة في الجسم، والحساسات البيئية ذات التحكم عن بعد والمتنقلة والروبوتات النانوية والأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية، حتى الالكترونيات الشخصية المحمولة التي يمكن ارتداؤها [3].

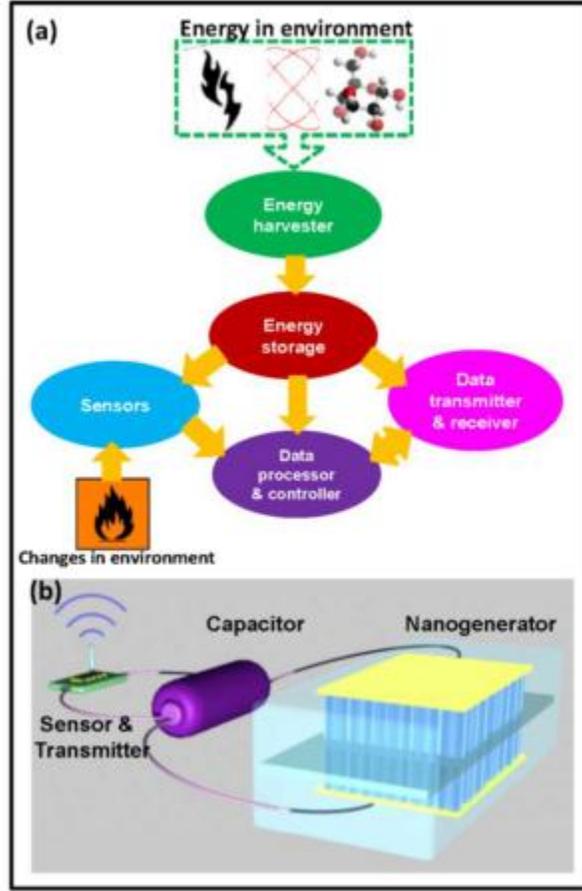
فمثلاً تكون الطاقة الميكانيكية متوافرة داخل البيئة التي نعيش فيها، ولكن هذه الطاقة غير منتظمة، تتمتع بتردد متغير (غالباً ما تكون ترددات منخفضة) ومطال متغير مثل: تدفق الهواء والضجيج والنشاط البشري، الذي يحد بشكل كبير من إجراء تطبيقات على مجمع الطاقة المبني على المرنان التقليدي، والذي يعمل على ترددات محدودة. لابد للتصميم المنطقي (أو العقلاني) أن يتحمل الظروف البيئية المتغيرة. ولهذا يجري تطبيق المولد النانوي، الذي يستخدم الأثر الكهروضغطي لأسلاك أكسيد الزنك النانوية، يجري تطبيقه على مثل هذه الأغراض.

11.1 مفهوم النظام ذاتي التغذية

يمكن ببساطة تمثيل النظام ذاتي التغذية المدمج في (الشكل 1.11a) [4]، حيث يتضمن مصدر الطاقة في هذا النظام كلاً من وحدات تجميع الطاقة وتخزينها. يقوم المجمع بالتقاط بعض أنواع الطاقة (الطاقة الشمسية والحرارية والميكانيكية و/أو الكيميائية) من الوسط المحيط وتخزينها في وحدة تخزين الطاقة. وهكذا تُستخدم الطاقة المجمعّة لقيادة أجزاء أخرى من النظام، حيث تكشف الحساسات التغيرات الحاصلة في الوسط المحيط، بينما يقوم كلُّ من معالج البيانات ونظام التحكم بتحليل المعلومات. بعد ذلك، تُرسل الإشارة من قبل مرسل البيانات، وبشكل متزامن يجري استلام الاستجابة. سوف نعرض في هذه الورقة العلمية نظاماً نموذجياً ذاتي التغذية مصنوعاً من كل من مولد نانوي لتجميع الطاقة الميكانيكية ومقوم جسري لكامل الموجة منخفض المفاهيم ومكثف الطاقة وكاشف ضوئي للأشعة تحت الحمراء وجهاز إرسال البيانات لاسلكياً (كما هو موضح في الشكل 1.11b). ويُعد التشغيل الناجح لهذا النظام الدليل الأولي على استخدام المولد النانوي في شبكة حساس لاسلكية ذاتية التغذية.

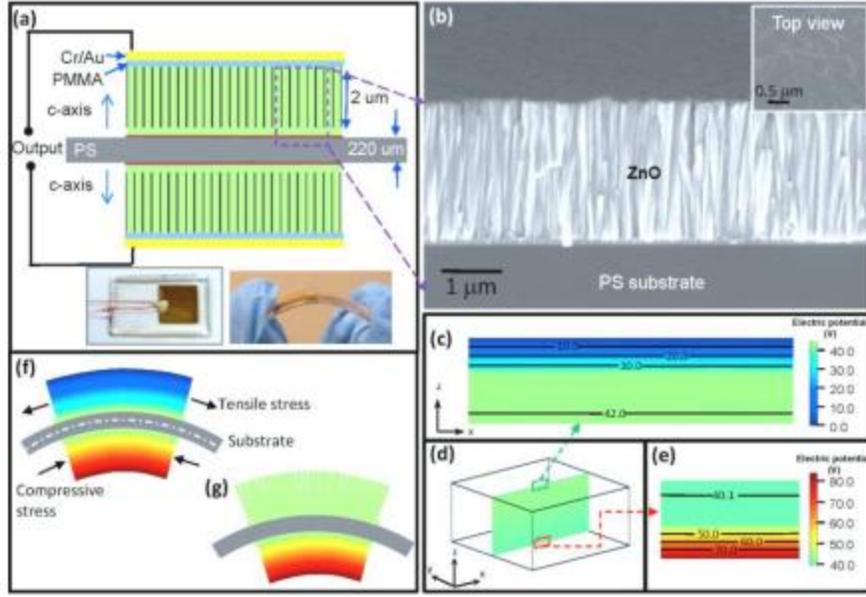
يعتمد المولد النانوي على الكمون الكهروضغطي المتولد داخل السلك النانوي، لأنَّ الأخير يخضع لانفعال ديناميكي تحت

تأثير قوة صغيرة جداً، ويُشكل التدفق العابر للالكترونات في الحمل الخارجي، لكون هذا التدفق مدفوعاً من قبل الكمون الضغطي بغية تحقيق التوازن في مستويات فيرمي عند نقاط التماس، يُشكل هذا التدفق الآلية الأساسية لعمل المولد النانوي. وقد لا تكون الطاقة المتولدة بواسطة المولد النانوي كافية للتشغيل المستمر للجهاز، لكن تراكم الشحنات، المتولدة خلال فترة من الزمن، سيكون كافياً لدفع الجهاز للعمل لبضع ثوانٍ. ويُعد ذلك مناسباً جداً لإجراء التطبيقات في ميادين التحسس (الاستشعار) وضبط البنى الأساسية وشبكات الحساسات. وتكمن الخاصية المشتركة لهذه التطبيقات في أن النظام يحوي العديد من الحساسات، ويُتوقع من كل حساس أن يعمل بشكل منفرد ولاسلكياً، إلا أن جميع هذه الحساسات يجري ربطها عبر شبكة الانترنت.



الشكل 1.11: مخطط تمثيلي لنظام ذاتي التغذية مدمج (متكامل). (a) نظام مدمج يمكن تجزئته إلى خمس وحدات: مُجمَع الطاقة ومخزن الطاقة والحساسات ومعالج البيانات ونظام التحكم ومرسل البيانات ومُستقبلها. (b) نموذج لنظام ذاتي التغذية مُدمج من خلال استخدام مولد نانوي كمجمع للطاقة.

ولا يُطلب من كل حساس أن يعمل بشكل مستمر ومتزامن، إذ عوضاً عن ذلك، يتمتع هذا الحساس بنموذج تشغيل "وميضي" مع حالة توقف وأخرى نشطة (فعّالة). وعادةً ما يكون نمط الوقوف أطول، بينما يكون النمط الفعّال أقصر. ويمكن استخدام الطاقة المجمعّة والمخزنة أثناء حالة التوقف لاستثمارها في النمط الفعّال للحساس، مما يعني أن هذه الحساسات تأخذ عينات من بيئة العمل بشكل دوري وتقوم بإرسالها خلال جزء من الثانية. نستطيع أن نستخدم المولد النانوي لتجميع الطاقة من الوسط المحيط وتخزين معظمها (أو جُلّها) عندما يكون الحساس في حالة التوقف. بعد ذلك، تستخدم الطاقة المجمعّة في كل من عملية قرح الحساس وتشغيله ونقل البيانات خلال النمط الفعّال لهذا الحساس.



الشكل 11.11: تصنيع المولد النانوي وآلية تشغيله. (a) عملية تصنيع المولد النانوي. تعدّ الأجزاء اليمنى السفلية من الشكل صوراً لمولد نانوي مصنّع بعد أن جرى تعليبه. ويظهر انحناء المولد النانوي تمتع هذا المولد بمرونة ميكانيكية جيدة. (b) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح للمقطع العرضي فيلم منسوج من سلك نانوي جرى إنمائه على الركيزة. والشكل الداخلي عبارة عن منظر علوي لفيلم السلك النانوي. (d) نموذج محاكاة لآلية تشغيل المولد النانوي. وهذا النموذج عبارة عن صندوق قائم الزوايا مؤلف من ثلاث طبقات، حيث يضم بداخله كلاً من الركيزة المرنة وأفلام أكسيد الزنك على السطحين العلوي والسفلي لهذا الصندوق. جرى عرض الكمونات الموضعية المحسوبة عبر كلٍّ من الالكترودين العلوي والسفلي في (الشكلين c و e) بالترتيب. (f) توزيع الكمون الضغطي داخل البنية المصممة في حال شكلت أسلاك أكسيد الزنك النانوية فيلماً صلباً مكتظاً بالأسلاك، ويسلك سلوكاً مشابهاً لوسط مستمر. ويشير الخط الأبيض المتقطع داخل الركيزة إلى المستوى الحيادي للانفعال. (g) توزيع الكمون الضغطي داخل البنية المصممة في حال شكلت أسلاك أكسيد الزنك النانوية فيلماً مكتظاً بالأسلاك، لكن مع إمكانية توافر ثغرات (أو فجوات) صغيرة أو حدوث انزلاق لسلك داخلي في هذا الفيلم، ولهذا، يمكن للأسلاك النانوية، الموجودة في الجانب من الركيزة، ألا تسهم بأي شيء في توتر الخرج، في حين تقوم الأسلاك النانوية في الجانب المضغوط عادةً بخلق هبوط في الكمون الضغطي.

11.2. تصميم المولد النانوي

يكون المولد النانوي المستخدم في النظام المدمج (المتكامل) عبارة عن حزمة على شكل عمود واقفٍ بشكل حر، حيث صنعت هذه الحزمة من بنية ذات خمس طبقات، وذلك باستخدام أفلام منسوجة من أسلاك أكسيد الزنك النانوية المكتظة داخل علبة (صندوق) [4]. ولقد صنّع المولد النانوي على ركيزة مرنة من البوليستر (PS) (تخن الركيزة $220 \mu\text{m}$ ، وهي من النوع Dura-Lar™) كما هو موضح في (الشكل 11.11 a). جرى في البداية وضع طبقة لاصقة من معدن الكروم ثخنها 5 nm ، تبعها ترسيب طبقة بذور أكسيد الزنك ثخنها 50 nm على المنطقة المستطيلة المختارة ذات الأبعاد $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ وموجودة على السطحين العلوي والسفلي للركيزة. وتستخدم طبقة بذور أكسيد الزنك لإنماء أسلاك أكسيد الزنك النانوية المكتظة، وذلك من خلال استخدام الطريقة الكيميائية الرطبة^{23,22}. ولقد كان المحلول المغذي، الذي استخدمناه في عملية النمو الكيميائي للأفلام المنسوجة من أسلاك أكسيد الزنك النانوية المكتظة، كان هذا المحلول عبارة عن محلول مائي يحوي جزيئات متكافئة من كل من نترات الزنك المائية $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ومادة هيكساميثيل نينيترايمين (HMTA). وكان تركيز هذا المحلول مساوياً 0.1 مول (حزينة). لقد جرى إنماء أفلام السلك النانوي على السطحين العلوي والسفلي بالتتابع، وذلك من خلال وضع الركيزة على أعلى المحلول المغذي، بحيث

يكون أحد وجهيها متجهاً نحو الأسفل. ونظراً لتوافر ظاهرة التوتر السطحي، فإن الركازة تطفو على سطح المحلول. وجرى إنماء أسلاك أكسيد الزنك النانوية داخل فرن حراري ميكانيكي (من نوع model Yamato DKN400, Santa Clara, CA) عند درجة الحرارة 95°C لمدة خمس ساعات. ويُمثل (الشكل 2.11 b) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لكيفية نمو أسلاك أكسيد الزنك النانوية على الركازة. وكانت أبعاد الأسلاك النانوية عبارة عن 150 nm في القطر و $2\ \mu\text{m}$ في الطول. وبالنظر عبر المقطع العرضي، يمكننا أن نرى أن أسلاك أكسيد الزنك النانوية قد نمت شاقولياً من الركازة، متمتعة بشدة اكتظاظها، وإن قيعان (جمع قاع) هذه الأسلاك قد تم لفها (حزمها) عبر طبقة بذور أكسيد الزنك. والصورة الداخلية في (الشكل 2.11 b) عبارة عن منظر من الأعلى يُبين كيف نمت أسلاك أكسيد الزنك النانوية. واستخدمت ملاقط لخدش السطوح العلوية لهذه الأسلاك النانوية بهدف التأكد من أن السطوح العلوية لهذه الأسلاك النانوية قد جرى لفها (حزمها) معاً بشدة لتشكيل فيلم منتظم. ولهذا، يمكن النظر إلى البنية الكاملة لأكسيد الزنك على أنها فيلم منسوج²⁴ يتكون من مصفوفات لسلك نانوي من أكسيد الزنك مملبةً بشكل كامل بين فيلمين متوازيين من أكسيد الزنك. وطبقاً لآلية النمو هذه، شكلت المحاور C، لهذه الأسلاك النانوية، اتجاه نموها، كما موضح في (الشكل 2.11 a). بعد ذلك، جرى نسج (أو غزل) طبقة رقيقة من البولي ميثيل كريليت (PMMA) MicroCHem 950 k11، على شكل غلاف لكلا سطحي الركازة بسرعة دوران وصلت إلى 3000rpm ، تلاها ترسيب طبقة من الكروم/والذهب على المساحة المستطيلة المركزية، ولتؤدي هذه الطبقة دور الالكترود للمولد النانوي. وختاماً، جرى تغليف كامل الجهاز بمادة البولي ديميثيل سيلوكسان (PDMS) بهدف تعزيز خاصتي المتانة والمرونة الميكانيكيتين لهذا الجهاز. وتظهر في الزاوية اليمنى السفلية من (الشكل 2.11 a) صورة للجهاز المصنوع. وكانت مساحة المنطقة الفعالة للمولد النانوي مساوية $1\text{cm} \times 1\text{cm}$. وجرى وصل سلكين إلى كل من أعلى الالكترودات وأسفلها على التوالي. وهنا لابد من الإشارة إلى درجة حرارة التشغيل (أو المعالجة) كانت أقل بكثير من 100°C ، مما يعني أن العملية برمتها ملائمة للالكترودات المرنة.

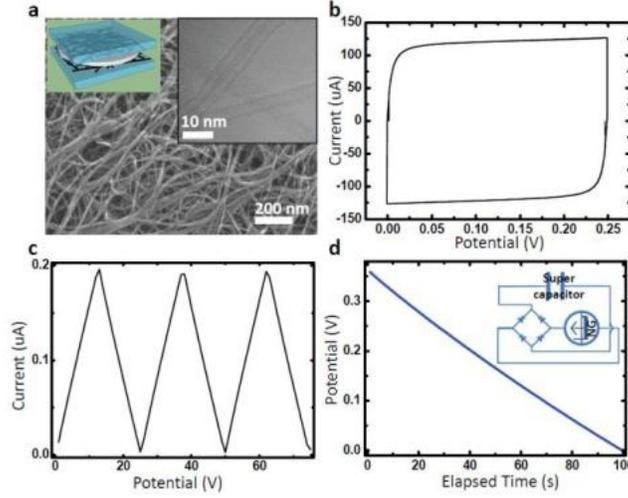
أجرينا في البداية حساب توزيع الكمون الضغطي داخل فيلم الأسلاك النانوية بهدف عرض آلية عمل هذا الفيلم. ولقد جرى تمثيل البنية الكاملة للمولد النانوي على شكل عمود من أفلام السلك النانوي المنسوجة على ركازة مشتركة. وتمتعت هذه الأفلام، وعند سطحها العلوي والسفلي، بنسج محوري من المرتبة [0001] بالترتيب. أجرينا حساب فرق الكمون الكهربائي عبر الالكترودين العلوي والسفلي، وذلك عندما كانت البنية كاملة في وضع الانحناء. وإذا أخذ بالحسبان أن مصفوفات السلك النانوي لأكسيد الزنك، التي نمت على الركازة، عبارة عن مصفوفات مكتظة، وتتمتع بنهايتين محزمتين في الأعلى والأسفل، وقد جرى تمثيل هذه المصفوفات من خلال فيلم رقيق بهدف تبسيط الحساب. وجرى تمثيل الجهاز من خلال صندوق قائم الزوايا $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ ، كما هو موضح في (الشكل 2.11 d). وهذا الصندوق عبارة عن بنية مؤلفة من ثلاث طبقات، وتحوي فيلمين رقيقين من أكسيد الزنك أحادي البلورة (ثخانة كل فيلم $2\ \mu\text{m}$)، حيث يتوضع الفيلم على السطحين العلوي والسفلي للركازة البوليميرية (ثخنها $220\ \mu\text{m}$)، (لاحظ أن ثخانة الالكترودات تساوي $100\ \text{nm}$ ، لهذا جرى إهمالها في العملية الحسابية). وتكون ثوابت مواد أكسيد الزنك المستخدمة في العملية الحسابية، هي نفسها الواردة في المرجع 25. فلقد كان كلٌّ من معامل يونغ ومعامل بواسون وثوابت العازلية النسبية للركازة كما يلي:

وَأجريت جميع الحسابات باستخدام حزمة البرمجيات COMSOL. جرى حساب توزيع الكمون الكهروضغطي من خلال تمثيل بنية الجهاز وكأنها عارضة عمودية تُثبت إحدى نهايتها (أي أن إحداثية المستوى $y = 0$ في الشكل 2.11 d)، وجرى تطبيق قوة عرضية بشكل دوري على الحافة العليا عند النهاية الأخرى لهذه العارضة العمودية (أي أن إحداثية المستوى $y = 500\ \mu\text{m}$ في الشكل 2.11 d). وكان توزيع الانفعال في العارضة غير منتظم. وجرى تطبيق الانفعال

الرئيس على العارضة بشكل موازٍ للركازة، وعلى طول المحور Y ، وكان مقدار هذا الانفعال مساوياً 0.2%. وبغية تمثيل الالكترويدات المعدنية في المولد النانوي، جرى تحديد السطحين العلوي والسفلي للبنية وكأنها مستويات كمونية متكافئة، مع جعل السطح السفلي مؤزجاً. وفي حالة الدارة المفتوحة، تكون الشحنة الكلية مساوية للصفر في السطحين العلوي والسفلي. ولقد افترض أن أفلام أكسيد الزنك هي أفلام فعليه دون احتوائها أية شوائب. ويتمتع الكمون الكهروضغطي بتغير كبير في كمية أفلام أكسيد الزنك. وبغية تحقيق تصور سهل عن مقدار الكمون المحسوب، جرى إدراج قيم الكمون الموضعي عبر كل من الالكترويدات العلوي (الشكل 2.11 c) ومثيله السفلي (2.11 e) للمولد النانوي الخاضع للانفعال، إضافةً إلى إدراج قيم الكمون داخل الجهاز (الشكل 2.11 d). كان متوقعاً من نتائج حساباتنا أن مقدار فرق الكمون التحريضي عبر الالكترويدات يساوي 83.8 فولط. ويُعد مثل هذا الهبوط الكموني عبر الالكترويدات العلوي والسفلي بمنزلة القوة الدافعة للتدفق العابر للالكترونات في الحمل الخارجي.

هناك سيناريوهان اثنان إذا أخذنا بالحسبان تلك الحقيقة، التي تكمن في أن فيلم أكسيد الزنك مصنوع من الأسلاك النانوية المكتظة. فعندما يكون المولد النانوي في وضع الانحناء، ونظراً لأن المستوى الحيادي للانفعال يتوضع عند مركز الركازة، كما هو مشاّر إليه بالخط الأبيض المتقطع في (الشكل 2.11 f)، فإن فيلم المولد النانوي الواقع في السطح المشدود من الركازة، يكون خاضعاً لإجهاد شد، بينما الفيلم الواقع في السطح المضغوط، يكون خاضعاً لإجهاد ضغط. فإذا كان الارتباط في البداية بين الأسلاك النانوية قوياً جداً، بحيث تشكل هذه الأسلاك فيلماً صلباً، ومع الأخذ بالحسبان أن اتجاه نمو الأسلاك النانوية يكون على طول المحور C (أي الاتجاه القطبي لأكسيد الزنك)، فإن إجهاد الشد العمودي على الأسلاك النانوية يُسفر عن وجود انفعال ضغط على طول اتجاه المحور C ، وبهذا الشكل يتولد هبوط كمون ضغطي ابتداءً من جذور الأسلاك النانوية حتى نهاياتها العليا، وكما هو موضح في (الشكل 2.11 f). وفي الوقت نفسه، فإن إجهاد الضغط المقابل، والذي يُطبق على الأسلاك النانوية عند السطح السفلي للركازة، يُسفر عن وجود انفعال شد على طول المحور C ، وهكذا، تتمتع النهايات العليا للأسلاك النانوية بكمون ضغطي أعلى من مثيله عند جذور هذه الأسلاك. ولهذا، تتمتع هبوطات الكمون الضغطي في أعلى أفلام أكسيد الزنك وأسفلها بالقطبية نفسها، حيث يجري جمع هذه الهبوطات بشكل بناء. وسوف يُقدم هذا التوزع للكمون الضغطي شحنات محثوثة في الالكترويدات العلوي والسفلي، وبالتالي توليد توتر الخرج.

ثانياً، في حال كان الترابط بين الأسلاك النانوية ضعيفاً جداً، مع إمكانية حدوث انزلاق لسلك داخلي/أو حدوث فجوات داخلية، فلن يتولد أي كمون كهروضغطي من قبل الفيلم الموجود في السطح العلوي للركازة، والذي يكون خاضعاً لإجهاد شد. لكن، ونظراً لأن الأسلاك النانوية معبأة بشكل كامل، ويمكن أن يحدث انضغاط فيما بينها، فإن هبوط الكمون الضغطي يستمر بالنشوء مع بعض التراجع في قيم هذا الهبوط من قبل الفيلم الموجود في السطح السفلي للركازة، والذي يكون خاضعاً لإجهاد ضغط (انظر الشكل 2.11 g). ولهذا، يتوقع أيضاً أن يحصل هبوط كمون بين الالكترويدات العلوي والسفلي، ولكن كمية هذه الهبوطات تكون أقل بمقدار النصف مقارنةً مع مثيلتها في الحالة الأولى. ولابد لشروط الترابط الحقيقي بين الأسلاك النانوية من أن تجمع بين الحالتين، اللتين جرت مناقشتها آنفاً. ومن المعروف أيضاً أن أسلاك أكسيد الزنك النانوية المنمّاة تحوي شوائب من النمط n ، ويمكن بشكل ملحوظ أن تحجب الجانب الأعلى للكمون الضغطي، لكن غالباً ما تترك الجانب الأدنى للكمون الضغطي دون تغيير²⁶. وهكذا، ستكون قيم توتر الخرج الملحوظ للمولد النانوي أصغر من القيمة المحسوبة نظرياً، وذلك للأسباب المدرجة أعلاه.



الشكل 3.11: خواص الأنابيب النانوية الكربونية متعدد الجدران المبني على كل من مكثف فائق التخزين واختبار التخزين باستخدام مولد نانوي. (a) مخطط تمثيلي وصور ملتقطة بكل من المجهر الإلكتروني الماسح/المجهر الإلكتروني النافذ TEM لمكثف فائق التخزين مبني على شبكة من الأنابيب النانوية الكربونية المبنية على مكثف فائق التخزين. (b) دورة كمون لمكثف فائق التخزين جرى تصنيعه. ولقد كان محال المسح التوتري بين المقدارين 0 و 250mV، ومعدلات مسح مقدارها 100 mVs^{-1} . (c) مخطط الشحن - والتفريغ الكموني الساكن للمكثف فائق التخزين. (d) مخطط التفريغ للمكثف فائق التخزين، الذي جرى شحنه من قبل مولدات نانوية متكاملة في عشر طبقات لمدة ساعة واحدة.

11.3. تخزين الشحنة بواسطة مكثف فائق التخزين

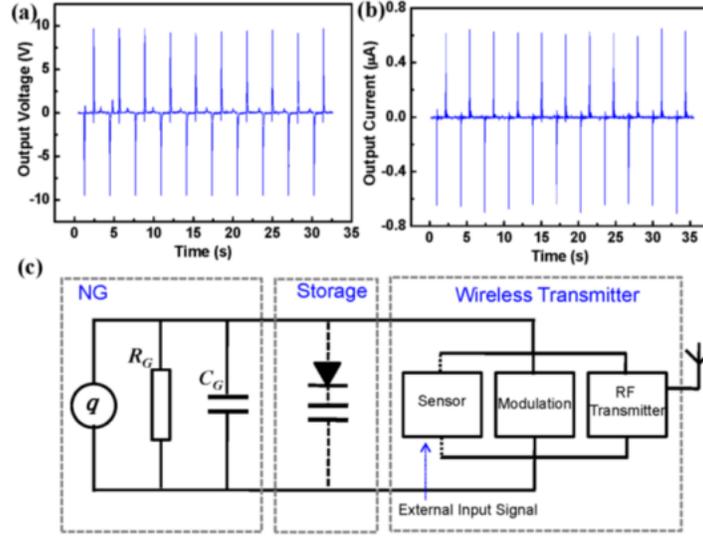
يمكن أن يشكل تكامل المولدات النانوية مع جهاز تخزين طاقة، كالمكثف فائق التخزين، يمكن أن يُشكل نموذجاً لخلية طاقة بغية إجراء التشغيل الدوري لأجهزة التحسس [5]. وخلال فترة السبات للحساس، يمكن للكهرباء المولدة من قبل المولد النانوي أن تكون قابلة للتخزين داخل مكثف التخزين. وعندما يحتاج الحساس لأن يعمل، فإن الطاقة المخزنة داخل المكثف فائق التخزين/أو مكثف عادي سوف توفر الطاقة الكهربائية للكشف عن الملوثات البيئية. وبغية تحقيق ذلك، قمنا أولاً بصنع مكثف فائق التخزين مبني على كل من الالكترودات المعدة من أنابيب نانوية كربونية CNT متعددة الجدران (MWNT) ومغطة بأكسيد الإنديوم - قصدير ITO، ومحلول كهربائي (الكتروليت) من البولي فينيل ألغول/وحمض الفوسفور $\text{PVA}/\text{H}_3\text{PO}_4$. طُبقت طريقة التغطية بالرشرة المباشرة بغية صنع طبقات من أنابيب نانوية متعددة الجدران منتشرة بانتظام على ركازة زجاجية من أكسيد الإنديوم قصدير (الشكل 3.11a). وتؤدي الركازات الزجاجية، المعدة من أكسيد الإنديوم - قصدير والمغطة بالأنابيب النانوية متعددة الجدران، تؤدي دور إلكترودات تشغيل وتعداد للمكثف فائق التخزين. استخدم شبه المحلول البوليميري، المعد من البولي فينيل ألغول/وحمض الفوسفور $\text{PVA}/\text{H}_3\text{PO}_4$ ، استخدم كمحلول كهربائي (إلكتروليت). ويبين الشكل المكبر الداخلي في الجزء العلوي الأيمن من (الشكل 3.11a) المخطط التمثيلي، الذي يصور بنية المكثف فائق التخزين المصنع من قبلنا. دُرست الخواص الكهروكيميائية للمكثفات داخل المحلول الكهربائي، المعد من $\text{PVA}/\text{H}_3\text{PO}_4$ ، دُرست من خلال استخدام جهاز الكمون الساكن/أو الجهاز الغلفاني الساكن (إنتاج برينستون للبحث التطبيقي Princeton Applied Research Versa Stat 3 F). ويعرض (الشكل 3.11b) دورة الكمون (الفولتامترية)، التي تُظهر أن الجهاز المعد من قبلنا يتمتع باستقرار كهروكيميائي وسعة جيدتين. وقع مجال المسح التوتري بين القيمتين 0 و 250 mV، ومعدلات مسح تساوي 100 mVs^{-1} . أُجرى أيضاً قياس الشحن - والتفريغ الكموني الساكن بغية توصيف الأداء الكهروكيميائي للمكثف فائق التخزين المبني على الأنابيب النانوية متعددة الجدران (الشكل 3.11c).

وبهدف تخزين الشحنات المولدة من قبل المولدات النانوية، جرى وصل كل من المكثف فائق التخزين ومولدات نانوية مكونة من عشر طبقات متكاملة مع جسر تقويم (الشكل الداخلي المكبر ضمن الشكل d3.11). جرى تقويم خروج (جمع خرج) التيار المتناوب المتولدة من قبل المولدات النانوية، وتحويلها إلى إشارات تيار مستمر مباشر، والتي أسفرت عن وجود عملية شحن مباشر للمكثف فائق التخزين.

11.4. حساس فوتوني ذاتي التغذية ونظامه

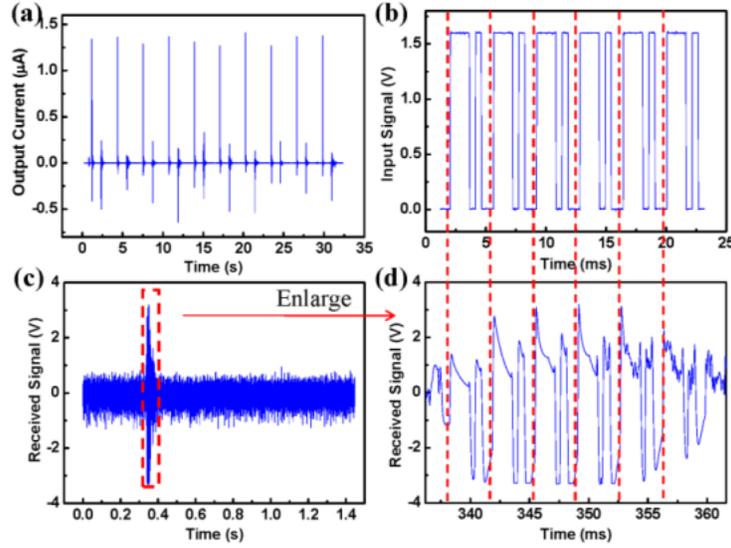
بغية إثبات نقل البيانات لاسلكياً، استخدمنا جهاز إرسال مفرداً مكوناً من ترانزستور ذي تردد راديوي (RF) لبث الإشارة الكهربائية، التي جرى الكشف عنها [4]. وجرى توليف (ضبط) تردد الذبذبة ليكون حول القيمة 90 MHz، واستخدم جهاز راديو محمول يعمل على الموجة AM/FM من النوع (CX-39, Coby) لاستقبال الإشارة المرسل. قمنا أولاً بإجراء الاختبار فقط للجزء المرسل من الدارة. فعندما اندلع الإرسال بواسطة الطاقة المخزنة، التي جرى جمعها من قبل المولد النانوي، كان هناك ضجيج مزعج من قبل الراديو (شاهد الفيديو ضمن المعلومات الداعمة). ونظراً لأن الاستطاعة المستهلكة من قبل جهاز الإرسال منخفضة ($< 1 \text{ mW}$)، فإن الطاقة المولدة والمخزنة خلال ثلاث دورات انفعال للمولد النانوي كانت كافية لنقل الإشارة. ولقد تجاوزت مسافة الإرسال القصوى لدى النظام الذي بنيناه خمسة الأمتار، وجرى تحديد هذه المسافة تبعاً لجودة المستقبل.

جرى بعد ذلك إضافة ترانزستور ضوئي ضمن مفتاح ضوئي مخصص من النوع (OPB 825, OPTEK Technology) للنظام، ليؤدي دور حساس كشف فوتوني بهدف إثبات أن النظام ذاتي التغذية يمكن أن يعمل بشكل مستقل ولاسلكياً. وتكوّن المفتاح الضوئي من كل من صمام ثنائي (ديود) باعث للأشعة تحت الحمراء (LED) وترانزستور ضوئي، من السليكون NPN، مركب داخل حجرة بلاستيكية سوداء منخفضة التكلفة، ويتوضع في الجوانب المعاكسة لأخدود عرضه 4mm. ولقد جرى قذح الديود الباعث للأشعة تحت الحمراء بواسطة مولد ذي مهمة توليفية من النوع (DS345, Stanford Research System) ضمن سياق توتر مبرمج بغية جعل هذا الديود يعمل على شكل مصدر تزويد بالضوء خارجي، ليشع على الترانزستور الضوئي. ولقد جرى إرسال إشارة التيار الضوئي، التي يولدها الترانزستور الضوئي، إلى الخارج بشكل دوري، وذلك من خلال استخدام الطاقة المخزنة داخل المكثف. ونظراً لكبر الاستطاعة المستهلكة من قبل الترانزستور الضوئي 100 mW، لزم أن تكون الطاقة محصورة من قبل مولد نانوي بعد إخضاعه لألف دورة انفعال (أداء المولد النانوي موضح في الشكل a 4.11) وذلك بهدف تغذية كل من الترانزستور الضوئي والمرسل بشكل متزامن (لاحظ أن زمن التشغيل تراوح بين 20-25 ms). وفي كل مرة، جرت فيها عملية القذح للديود، فإن الإشارة الملتقطة من قبل الترانزستور الضوئي عدلت إشارة الإرسال، وجرى استلام المعلومات من قبل الراديو، أما الإشارة غير المعدلة، فقد جرى تسجيلها من قبل سماعة الرأس. وبيبين (الشكل b 4.11) تسلسل التوتر المستخدم في عملية قذح الديود الباعث للأشعة تحت الحمراء. ولقد تضمن كل دور قذح للديود ما يلي: 16 ms للتوصيل/5 ms فصل و 5ms وصل/10 ms فصل. وبيبين (الشكل c 4.11) الإشارة غير المعدلة من قبل الراديو. ولقد جرى توليف الراديو، بحيث يعمل عند تردد محدد متجنباً لإشارات الراديو التجارية، التي تصل إلى نحو 90MHz. وعندما جرى قذح كل من الترانزستور الضوئي والمرسل، كان هناك نبضة كشفت عن ما وراء الضوضاء الخلفية. وإذا أجرينا تكبيراً لهذه النبضة، وجدنا أنها تحوي جزءاً من المعلومات، التي تتمتع بالغلظ الموجي نفسه، الذي يتمتع به تسلسل توتر القذح للديود الباعث للأشعة تحت الحمراء، وكما هو موضح في (الشكل d 4.11) مقارنة مع (الشكل c 4.11). وهذا يُشير إلى أن نقل البيانات لاسلكياً، قد جرى تحقيقه من خلال استخدام نظام ذاتي التغذية.



الشكل 4.11: أداء المولد النانوي وتصميم نظام مدمج (متكامل). (a) توتر الخرج. (b) تيار الخرج لمولد نانوي نموذجي. وصل التوتر إلى المقدار 10V، وتجاوز التيار المقدار $0.6\mu A$. (c) مخطط تمثيلي لنظام ذاتي التغذية جرى تصميمه. في الجزء، الذي يحوي المرسل اللاسلكي، استخدم الترانزستور الضوئي كحساس بغية كشف الضوء الصادر من الديود الباعث للأشعة تحت الحمراء LED. جرى نقل الإشارة الملتقطة من قبل الحساس، لاسلكياً بواسطة جهاز إرسال مكون من ترانزستور مفرد ذي تردد راديوي RF.

أما بالنسبة لبنية المولد النانوي، المعد من قبلنا، فإن هناك ثلاثة عوامل هامة لتحسين أداء خرج الاستطاعة، وهي: طول الأسلاك النانوية وثخانة الركيزة ومقدار التشوه الحاصل في المولد النانوي. ومن وجهة النظر التطبيقية، هناك نمطان لقدح المولد النانوي، وذلك تبعاً لشكل الطاقة الميكانيكية المجمعّة من قبل المولدات النانوية في الوسط المحيط بهذه المولدات. في تلك الحالات، التي يجري فيها قدح المولدات النانوية عند إخضاعها لإجهاد ثابت القيم، كتدفق الهواء مثلاً، فإن النتائج الحسابية تُبين أن الكمون الضغطي بين الالكترودين يزداد مع ازدياد طول الأسلاك النانوية أو مع نقصان ثخانة الركيزة. أما عندما يكون الانفعال المطبق ثابت القيم، مثلاً عندما يكون المولد النانوي مقادراً بواسطة الاهتزازات الصادرة عن جسر، حيث مصدر القدح لهذا المولد يكون جامداً، فإن تغيرات الكمون الضغطي في الاتجاه المعاكس تقارن مع الحالة السابقة. وهكذا، ومن خلال ضبط قيم المعاملين المتنافسين، أي ثخانة الركيزة وطول مصفوفات السلك النانوي، يمكن للجهاز أن يصبح مثالياً، وليعطي أقصى مردود للطاقة المجمعّة من أجل حالات تشغيل مميزة، ووفقاً لطبيعة الطاقة، التي سيجري جمعها من الوسط المحيط. وبزيادة مقدار الانفعال، يمكن أيضاً الحصول على زيادة كبيرة في توتر الخرج. وإضافة لذلك، يُعد أكسيد الزنك مادة ملائمة حيوياً وصديقة للبيئة. ويمكن لأفلام السلك النانوي أن تنمو عند درجة حرارة منخفضة جداً (أقل من $100^\circ C$) ومهما كان نوع الركيزة وشكلها. وتعدّ هذه المزايا حاسمة بالنسبة لأكسيد الزنك بغية استخدامه في التطبيقات الصناعية في كل من الالكترونيّات المرنة/والقابلة للشد والعديد من المجالات الأخرى.



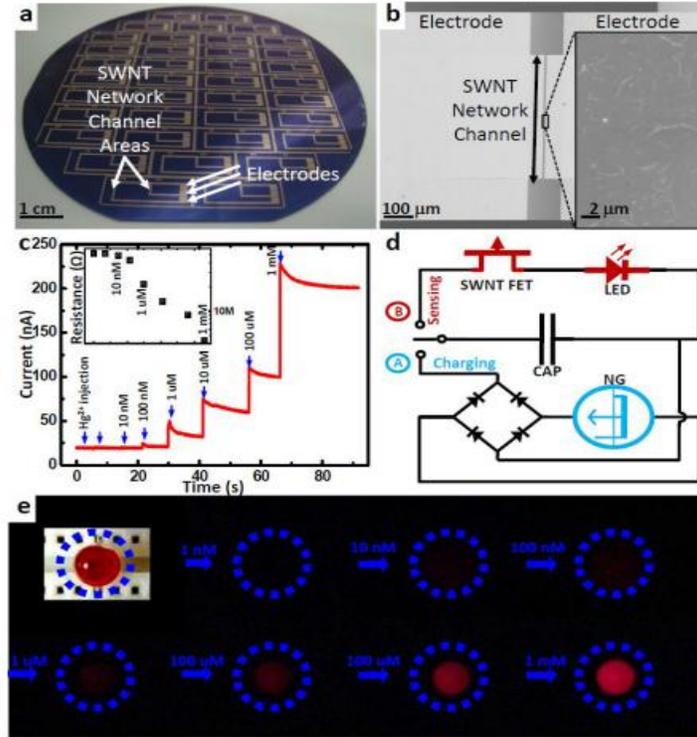
الشكل 5.11: نقل البيانات لاسلكياً. (a) أداء المولد النانوي المستخدم في الاختبار، الذي أجريناه لنقل البيانات لاسلكياً. (b) تسلسل التوتر المستخدم لفتح الديود الباعث للأشعة تحت الحمراء، والذي يمثل غلاف موجي لإشارة الدخل. (c) الإشارة المسجلة من قبل مأخذ السماع الرأسي للراديو، التي تم كشفها ونقلها بواسطة النظام المدمج ذاتي التغذية، المعد من قبلنا. (d) تكبير النبض الموجودة في الشكل (c). ويبين هذا الشكل جزءاً من النبضة يتمتع بالغلغاف نفسه لشكل الموجة، كالذي تتمتع به إشارة الدخل للتحريض الأولي. وتظهر الخطوط الحمراء المتقطعة التسلسل الزمني الموافق لما هو مدرج في الشكلين (b) و (d)

11.5. نظام تحسس بيئي ذاتي التغذية

كثيراً ما يكون مرغوباً الحصول على نظام تحسس لا يكون فقط لاسلكياً ومتحركاً وصغيراً جداً، وإنما يكون هذا النظام ذاتي التغذية ودائماً. وبغية تحقيق هذه المتطلبات قمنا بتصنيع حساس بيئي ذاتي التغذية، ويمكنه أن يكشف أيون الزئبق Hg^{2+} ، ويعطي الدلالة على تركيزه بواسطة كثافة الديود الباعث للضوء LED. قام كلٌّ من ترانزستور التأثير الحقلّي FET، المبني على أنبوب نانوي كربوني CNT وحيد الجدار SWNT، ومصفوفة سلك نانوي لأكسيد الزنك، قاما بتأدية دور كلٍّ من حساس أيونات الزئبق Hg^{2+} والجزء الذي يقوم بجمع الطاقة بالترتيب. ولقد جرى تصنيع مصفوفة الحساس المبنية على شبكة أنبوب نانوي وحيد الجدار، جرى تصنيعها على شريحة مقاسها 4 إنش، وذلك باستخدام طريقة الزخرفة الكيميائية، التي جرى إدراجها آنفاً [21-22، 17]. ويبين (الشكل 6.11a) صورة ضوئية لمصفوفة حساس جرى تصنيعها على شريحة من السيلكون مقاسها 4 إنش. يمكن لترانزستور التأثير الحقلّي FET، المبني على شبكة أنابيب نانوية وحيدة الجدار، يمكن أن يكون في وضع التحسين وفي وضع الاستنزاف نظراً لأن الشبكة مكونة من أنابيب نانوية وحيدة الجدار معدنية ونصف ناقلة. وفي الحساس المصنّع من قبلنا، كانت كثافة شبكات الأنابيب النانوية الكربونية وحيدة الجدار تميل لأن تكون منخفضة نسبياً (الشكل 6.11b)، ذلك لأن الشبكات المتمتعة بكثافة منخفضة، تميل لأن تكون في وضع التحسين [23]. جرى أولاً رصد تيار مصدر الاستنزاف للحساس ضمن تراكيز مختلفة لأيونات الزئبق Hg^{2+} في قطرة الماء، وذلك بهدف توصيف عملية التحسس. يُبين كل من (الشكل 6.11c) والشكل المكبر ضمنه التيار المقاس لمصدر استنزاف الحساس ومقاومة هذا الأخير، وذلك عند تراكيز مختلفة لأيونات الزئبق Hg^{2+} في قطرة الماء. مبدئياً، تمت فقط ملاحظة التيار الأدنى (قيمه أقل من 10^{-8} أمبير)، وذلك عندما اخترنا ترانزستور التأثير الحقلّي، المبني على أنابيب نانوية كربونية وحيدة الجدار، اخترناه في وضع التحسين. وعندما وصل تركيز المحلول إلى نحو 10 nM ، والذي يُشكل

الحد المسموح به لأيونات الزئبق Hg^{2+} في مياه الشرب وفقاً لما أقرته معظم الحكومات وهيئات حماية البيئة، بدى تغير ملحوظ في المقاومة (انظر الشكل المكبر ضمن الشكل 6.11 c). ولقد أدى الحقن المتتالي لأيونات الزئبق Hg^{2+} إلى تغيرات واضحة في المقاومة. ويمكن مبدأ عمل الحساس المعد من قبلنا في فارق الكون النظامي بين الأنابيب النانوية وحيدة الجدار ($E_{SWNT}^0 = 0.5 - 0.8$ V versus NHE) وأيونات الزئبق Hg^{2+} [26-24] ($E_{Hg_2}^0 = 0.8535$ V versus NHE).

يمكننا، ومن خلال تكامل المولدات النانوية مع حساس أيونات Hg^{2+} ، أن نبني جهازَ تحسس بيئياً ذاتي التغذية. ويبين (الشكل 6.11 d) مخطط الدارة. جرى وصل الديود الباعث للضوء مع الدارة ليكون بمنزلة مؤشر للكشف عن وجود أيونات الزئبق Hg^{2+} . وبغية إنجاز الجهاز ذاتي التغذية، الحساس للملوثات البيئية، مع المولدات النانوية، جرى تصميم دارة تتمتع بحفقتين مستقلتين. فأتداء عملية تجميع الطاقة، جرى وصل الدارة في الحلقة "A" (الشكل 6.11 d) مع كلٍّ من المولدات النانوية وجسر التقويم من الديود، وذلك بهدف تخزين الشحنات المتولدة إلى داخل المكثف (Nichicon-1000 μ F). وبعد إجراء عملية شحن كافية، جرى تبديل الوصل إلى الحلقة "B" في (الشكل 6.11 d)، وهكذا أصبحت الحلقة جاهزة للكشف عن أيونات الزئبق Hg^{2+} وإضاءة الديود الباعث للضوء عند كثافة معينة اعتماداً على تركيز الملوثات في قطرة الماء. وكدليل على هذا المفهوم قمنا بعرض دارة حساس بيئي مغذاة بشكل كامل من قبل مولدات نانوية، يمكنها أيضاً أن تعطينا نتيجة الكشف في الوقت نفسه دون الحاجة إلى أية معدات داعمة. ويبين (الشكل 6.11 e) صوراً ضوئية للديود الباعث للضوء، الذي تمت إضاءته تحت تأثير كل تركيز لأيونات الزئبق Hg^{2+} في قطرة الماء.



الشكل 6.11: مزايا حساس الأيون الزئبقي Hg^{2+} ذاتي التغذية، والمقاد بواسطة مولدات نانوية. (a) صورة ضوئية لمصفوفة حساس مصنع على رقاقة من السيلكون مقاسها 4 إنش. (b) صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لشبكة أنبوب نانوي كربوني وحيد الجدار داخل الحساس. (c) سلوك التحسس للحساس المصنع من قبلنا باختلاف تراكيز الأيونات الزئبقية Hg^{2+} داخل محلول مائي. يُظهر الشكل الداخلي المكبر مخطط المقاومة اعتماداً على أيون الزئبق المحقون. (d) مخطط دارة يوضح الحساس ذاتي التغذية المعد من قبلنا، والمكون من كل من المولد النانوي وجسر التقويم والمكثف وكاشف

أيون الزئبق Hg^{2+} وديود باعث للضوء مع مفتاح لاختيار إما عملية الشحن (a) أو عملية التحسس (b). (e) صور ضوئية لديود إشعاع ليزري لتمثيل تغيرات الكثافة تبعاً لتغيرات المقاومة في الكاشف اعتماداً على تركيز أيونات الزئبق Hg^{2+} في المحلول المائي. أجريت جميع القياسات بالطاقة المختزنة من قبل المولدات النانوية.

لقد جرى في هذه التجربة شحن ست مكثفات بشكل فردي لمدة تقارب الساعة باستخدام مولدات نانوية مدمجة من عشر طبقات (التردد 10 Hz، مسافة الاهتزاز من الذروة (القمة) إلى الذروة التي تليها تساوي 1.2 cm، إنتاج شركة الأعمال المخبرية Labworks Inc). وُصلت المكثفات المشحونة على التسلسل بغية تأمين التوتر الكافي 3V~ لتشغيل كل من الحساس، المبني على ترانزستور التأثير الحثي ذي الأساس من الأنابيب النانوية وحيدة الجدار، والديود الباعث للضوء معاً. لم يكن هناك أي مصدر طاقة كهربائية خارجي في النظام المعد من قبلنا. جرى حقن أيونات الزئبق Hg^{2+} في قطرة الماء بخطوات متتالية من 1nM إلى 1mM. وقد تمت جميع إجراءات الكشف خلال ما يعادل 30~ ثانية بغية مراقبة تغيرات الكثافة الضوئية للديود الباعث للضوء، الخاضع لتغذية ثابتة من قبل المكثفات.

ويهدف الحد من حدوث أي تبدد للطاقة خلال إجراءات الكشف المتعاقبة، بدأت مراقبة التركيز من أخفض قيمة وصولاً إلى أعلاها. فعندما كان تركيز أيونات الزئبق Hg^{2+} في قطرة الماء في حدود الدنيا، كان متوقعاً أن يتم فقط استخدام الاستطاعة الدنيا (V^2/R) لإجراء عملية التحسس، وذلك بسبب توافر المقاومة العالية نسبياً داخل الدارة (انظر الشكل المكبر ضمن الشكلين c 6.11 و d 6.11). وكما هو ظاهر بعد الصورة الثالثة من (الشكل 6.11 e)، بدأ ظهور ضوء ملحوظ من قبل الديود الباعث للضوء، وذلك بدءاً من التركيز 10 nM وصولاً إلى تدرج إشعاعي أكثر إشراقاً من أجل تركيز مساوٍ 10 mM. لاحظ، أن تجربة الكشف هذه قد أجريت باستخدام دارة التحسس المعدة من قبلنا، فقط، والمغذاة من قبل المولدات النانوية، ودون أي معدات مساعدة مثل مضخات الإشارة لكل من التوتر والتيار. وإضافة لذلك، يمكن الاستعاضة عن الديود الباعث للضوء بوحدة ترددات راديوية، بحيث يمكن الكشف عن الإشارة لاسلكياً ولمسافة أطول. يمكن لهذا النظام المعد من قبلنا، أن يكون في المستقبل نموذجاً أولياً لأجهزة التحسس البيئي، التي هي عبارة عن أجهزة قائمة بذاتها وذاتية التغذية الإشارة.

باختصار، من خلال تخزين الطاقة المولدة من قبل مولد نانوي، قمنا بعرض نظام ذاتي التغذية، يمكنه أن يعمل بشكل مستقل ولاسلكياً. ويتكون هذا النظام من مولد نانوي ودارة تقويم ومكثف لتخزين الطاقة وحساس ومرسل بيانات ذي تردد راديوي. ورجى الكشف عن الإشارات اللاسلكية المرسله من قبل هذا النظام بواسطة راديو تجاري موجود على مسافة تتراوح بين 5 إلى 10 أمتار. ولقد أثبتت هذه الدراسة جدوى استخدام مولدات نانوية أساسها أسلاك أكسيد الزنك النانوية بغية إنشاء أنظمة ذاتية التغذية وقادرة على نقل البيانات لمسافات طويلة، مما يثبت بوضوح إمكانية تطبيق هذا النظام في كل من التحسس الحيوي اللاسلكي ورصد البنية التحتية البيئية وشبكات الحساس والالكترونيات الشخصية، حتى في مجال الأمن الوطني (أو القومي).

11.6. المراجع

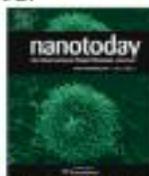
- [1] Z. L. Wang, J. Song, *Science* **312**, 242 (2006).
- [2] Z. L. Wang, *Sci. Am.* **298**, 82 (2008).
- [3] P. Glynne-Jones, N.M. White, *Sensor Review* **21**, 91 (2001).
 E. Katz, A.F. Bückmann, I. Willner, *J. Am. Chem. Soc.* **123**, 10752 (2001).
 M. Goldfarb, E.J. Barth, M.A. Gogola, J.A. Wehrmeyer, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* **8**, 254 (2003).
 E.P. James, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.R. Harris, P. Glynne-Jones, J.N. Ross, N.M. White, *Sensors and Actuators A* **110**, 171 (2004).
 S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, *Measurement Science & Technology* **17**, R175 (2006).
 D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher, L. Benini, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **55**, 2759 (2008).
 T.H. Owen, S. Kestermann, R. Torah, S.P. Beeby, *Sensor Review* **29**, 38 (2009).
- [4] Y.F. Hu, Y. Zhang, C. Xu, L. Lin, R.L. Snyder, Z.L. Wang, *Nano Letters*. **11** (6), 2572 (2011).
- [5] M.B. Lee, J.H. Bae, J.H. Lee, C.S. Lee, S.H. Hong, Z.L. Wang, *Energy & Environmental Science*, DOI: 10.1039/c1ee01558c.

المراجع

- [13] Caofeng Pan, Ying Fang, Ahamd Mashkoo, Zhixiang Luo, Jianbo Xie, Lihua Wu, Zhong Lin Wang, Jing Zhu* "[Generating Electricity from Biofluid with a Nanowire-Based Biofuel Cell for Self-Powered Nanodevices](#)", Adv. Materials, 22 (2010) 5388-5392.
- [14] Kwi-II Park, Sheng Xu, Ying Liu, Geon Tae Hwang, Suk-Joong L. Kang, Zhong Lin Wang and Keon Jae Lee* "[Piezoelectric BaTiO₃ Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates](#)", Nano Letts., 10 (2010) 4939-4943.
- [15] Youfan Hu, Yan Zhang, Chen Xu, Guang Zhu and Zhong Lin Wang* "[High output nanogenerator by rational unipolar-assembly of conical-nanowires and its application for driving a small liquid crystal display](#)", Nano Letters, 10 (2010) 5025-5031.
- [16] Sheng Xu, Benjamin J. Hansen and Zhong Lin Wang* "[Piezoelectric-Nanowire Enabled Power Source for Driving Wireless Microelectronics](#)", Nature Communications, vol. 1 Article Number: 93 (2010).



- [17] Zhong Lin Wang* "[Piezopotential Gated Nanowire Devices: Piezotronics and Piezo-phototronics](#)", Nano Today, 5 (2010) 540-552.



- [18] Zhong Lin Wang "[Toward Self-Powered Sensor Network](#)", Nano Today, 5 (2010) 512-514.
- [19] Min-Teng Chen, Ming-Pei Lu, Yi-Jen Wu, Chung-Yang Lee, Ming-Yen Lu, Yu-Cheng Chang, Li-Jen Chou, Zhong Lin Wang and Lih-Juann Chen* "[Electroluminescence from In-situ Doped p-n Homojunctioned ZnO Nanowire Array](#)", Nano Letters, 10 (2010) 4387-4393.
- [20] Zhong Lin Wang*, Rusen Yang, Jun Zhou, Yong Qin, Chen Xu, Youfan Hu and Sheng Xu "[Lateral nanowire/nanobelt based nanogenerators, piezotronics and piezo-phototronics](#)", Mater. Sci. and Engi. Reports, R70 (No. 3-6) (2010) 320-329.



- [21] Wenzhuo Wu^a, Yaguang Wei^a and Zhong Lin Wang* "[Strain-gated piezotronic logic nanodevices](#)", Adv. Materials, 22 (2010) 4711-4715.

- [22] Qing Yang, Xin Guo, Wenhui Wang, Yan Zhang, Sheng Xu, Der Hsien Lien, Zhong Lin Wang* ["Enhancing sensitivity of a single ZnO micro/nanowire photodetector by piezo-phototronic effect"](#), ACS Nano, 4 (2010) 6285 – 6291.
- [23] 王中林 ["微纳系统中的可持续自供型电源 - 能源研究中的新兴领域"](#), 《科学通报》, 55 (2010) 2472-2475.
- [24] Chi-Te Huang, Jinhui Song, Chung-Min Tsai, Wei-Fan Lee, Der-Hsien Lien, Zhiyuan Gao, Yue Hao, Lih-Juann Chen,* and Zhong Lin Wang* ["Single-InN-nanowire nanogenerator with up to 1 V output voltage"](#), Adv. Mater., 36 (2010) 4008-4013.
- [25] 王中林 ["压电电子学和压电光电子学"](#), 《物理》, 39 (2010) 556-557.
- [26] Jinhui Song[†], Huizhi Xie[†], Wenzhuo Wu, V. Roshan Joseph, C. F. Jeff Wu[†] and Zhong Lin Wang* ["Robust Optimizing of the Output Voltage of Nanogenerators by Statistical Experimental Design"](#), Nano Research, Nano Res. 3 (2010) 613–619.
- [27] Minbaek Lee, Rusen Yang, Cheng Li, Zhong Lin Wang* ["Nanowire-quantum dot hybridized cell for harvesting sound and solar energies"](#), J. Phys. Chem. Letts., 1 (2010) 2929–2935.
- [28] Yaguang Wei[‡], Wenzhuo Wu[‡], Rui Guo, Dajun Yuan, Suman Das* and Zhong Lin Wang* ["Wafer-scale high-throughput ordered growth of vertically aligned ZnO nanowire arrays"](#), Nano Letters, 10 (2010) 3414-3419.
- [29] Jingbin Han, Fengru Fan, Chen Xu, Shisheng Lin, Min Wei, Xue Duan, Zhong Lin Wang* ["ZnO nanotube-based dye-sensitized solar cell and its application in self-powered devices"](#), Nanotechnology, 21 (2010) 405203.
- [30] Weihua Liu, Minbaek Lee, Lei Ding, Jie Liu, Zhong Lin Wang* ["Piezopotential Gated Nanowire-Nanotube-Hybrid Field-Effect-Transistor"](#), Nano Letters, 10 (2010) 3084–3089.
- [31] Guang Zhu, Rusen Yang, Sihong Wang, Zhong Lin Wang* ["Flexible high-output nanogenerator based on lateral ZnO nanowire array"](#), Nano Letters, 10 (2010) 3151–3155.
- [32] Yan Zhang, Youfan Hu, Shu Xiang, and Zhong Lin Wang[‡] ["Effects of Piezopotential Spatial Distribution on Local Contact Dictated Transport Property of ZnO Micro/Nanowires"](#), Appl. Phys. Letts., 97 (2010) 033509.
- [33] Benjamin J. Hansen[†], Ying Liu[†], Rusen Yang and Zhong Lin Wang* ["Hybrid Nanogenerator for Concurrently Harvesting Biomechanical and Biochemical Energy"](#), ACS Nano, 4 (2010) 3647-3652.
- [34] Youfan Hu, Yan Zhang, Yanling Chang, Robert L. Snyder and Zhong Lin Wang* ["Optimizing the Power Output of a ZnO Photocell by Piezopotential"](#), ACS Nano. 4 (2010) 4220-4224.; Corrections: 4 (2010) 4962 - 4962.

- [36] Xue Bin Wang, Jin Hui Song, Fan Zhang, Cheng Yu He, Zheng Hu, and Zhong Lin Wang "Electricity Generation Based on One-dimensional Group-III Nitride Nanomaterials", *Adv. Mater.*, 22 (2010) 2155 – 2158.
- [37] Sheng Xu¹, Yong Qin¹, Chen Xu¹, Yaguang Wei, Rusen Yang, Zhong Lin Wang* "Self-powered Nanowire Devices", *Nature Nanotechnology*, 5 (2010) 366-373.

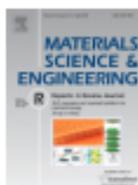


- [38] Z.L. Wang "Piezotronic and Piezo-phototronic Effects", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1 (2010) 1388–1393.
- [39] Chi-Te Huang, Jinhui Song, Wei-Fan Lee, Yong Ding, Zhiyuan Gao, Yue Hao, Lih-Juann Chen, and Zhong Lin Wang* "GaN Nanowire Arrays for High-Output Nanogenerators", *J. Am. Chem. Soc.*, 2010, 132, 4766–4771.
- [40] Youfan Hu, Yanling Chang, Peng Fei, Robert L. Snyder and Zhong Lin Wang* "Designing the electric transport characteristics of ZnO micro/nanowire devices by coupling piezoelectric and photoexcitation effects", *ACS Nano*, 4 (2010) 1234–1240.

2009

- [41] Zhong Lin Wang "Ten years' venturing in ZnO nanostructures: from discovery to scientific understanding and to technology applications", *Chinese Science Bulletin*, 54 (2009) 4021-4034.
- [42] Peng Fei, Ping-Hung Yeh, Jun Zhou, Sheng Xu, Yifan Gao, Jinhui Song, Yudong Gu, Yanyi Huang¹, Zhong Lin Wang* "Piezoelectric-potential gated field-effect transistor based on a free-standing ZnO wire", *Nano Letters*, 9 (2009) 3435 - 3439.
- [43] Zhiyuan Gao, Yong Ding, Shisheng Lin, Yue Hao, Zhong Lin Wang* "Dynamic Fatigue Studies of ZnO Nanowires by In-situ Transmission Electron Microscopy", *physica status solidi RRL*, 3 (2009) 260-262.
- [44] S. S. Lin, J. H. Song, Y. F. Lu, Z. L. Wang* "Identifying individual n- and p-type ZnO nanowires by the output voltage sign of piezoelectric nanogenerator", *Nanotechnology*, 20 (2009) 365703.
- [45] Giulia Mantini, Yifan Gao, A. D'Amico, C. Falconi, Zhong Lin Wang* "Equilibrium piezoelectric potential distribution in a deformed ZnO nanowire", *Nano Research*, 2 (2009) 624-629.
- [46] Youfan Hu, Yifan Gao, Srikanth Singamaneni, Vladimir V. Tsukruk and Zhong Lin Wang* "Converse piezoelectric effect induced transverse deflection of a free-standing ZnO microhelix" *Nano Lett* 9 (2009) 2661-2665

- [47] Zhiyuan Gao, Jun Zhou, Yudong Gu, Peng Fei, Yue Hao, Gang Bao, Zhong Lin Wang* "[Effects of Piezoelectric Potential on the Transport Characteristics of Metal-ZnO Nanowire-Metal Field Effect Transistor](#)", *J. Appl. Physics*, 105, 113707 (2009).
- [48] Christian Falconi, Giulia Mantini, Arnaldo D'Amico, Zhong Lin Wang* "[Studying piezoelectric nanowires and nanowalls for energy harvesting](#)", *Sensors and Actuator, B* 139 (2009) 511–519.
- [49] Chen Xu, Xudong Wang and Zhong Lin Wang* "[Nanowire structured hybrid cell for concurrently scavenging solar and mechanical energies](#)", *JACS*, 131 (2009) 5866–5872.
- [50] Z.L. Wang "[Energy Harvesting Using Piezoelectric Nanowires - Comment on "Energy Harvesting Using Nanowires?" by Alexe et al.](#)", *Adv. Materials*, 21 (2009) 1311-1315.
- [51] Z.L. Wang, "[ZnO Nanowire and Nanobelt Platform for Nanotechnology](#)" (Review), *Materials Science and Engineering Report*, 64 (issue 3-4) (2009) 33-71.



- [52] Ming-Pei Lu, Jinhui Song, Ming-Yen Lu, Min-Teng Chen, Yifan Gao, Lih-Juann Chen, and Zhong Lin Wang* "[Piezoelectric nanogenerator using p-type ZnO nanowire arrays](#)", *Nano Letters*, 9 (2009) 1223 - 1227.
- [53] Rusen Yang, Yong Qin, Cheng Li, Guang Zhu, Zhong Lin Wang* "[Converting Biomechanical Energy into Electricity by Muscle/Muscle Driven Nanogenerator](#)", *Nano Letters*, 9 (2009) 1201 - 1205.
- [54] Yifan Gao and Zhong Lin Wang* "[Equilibrium Potential of Free Charge Carriers in a Bent Piezoelectric Semiconductive Nanowire](#)", *Nano Letters*, 9 (2009) 1103 - 1110.
- [55] Xudong Wang, Yifan Gao, Yaguang Wei and Zhong Lin Wang* "[The Output of Ultrasonic-Wave Driven Nanogenerator in a Confined Tube](#)", *Nano Research*, 2 (2009) 177-182.
- [56] Rusen Yang, Yong Qin, Cheng Li, Liming Dai and Zhong Lin Wang* "[Characteristics of Output Voltage and Current of Integrated Nanogenerators](#)", *Appl. Phys. Letts.*, 94 (2009) 022905.
- [57] Rusen Yang, Yong Qin, Liming Dai and Zhong Lin Wang* "[Flexible charge-pump for power generation using laterally packaged piezoelectric-wires](#)", *Nature Nanotechnology*, 4 (2009) 34-39.



2008

- [58] Sheng Xu, Yaguang Wei, Jin Liu, Rusen Yang and Zhong Lin Wang* "[Integrated multilayer-nanogenerator fabricated using paired nanotip-to-nanowire brushes](#)", Nano Letters, 8 (2008) 4027-4032.
- [59] Jun Zhou, Peng Fei, Yudong Gu, Wenjie Mai, Yifan Gao, Rusen Yang, Gang Bao, Zhong Lin Wang* "[Piezoelectric-potential-controlled polarity-reversible Schottky diodes and switches of ZnO wires](#)", Nano Letters, 8 (2008) 3973-3977.
- [60] Z.L. Wang "[Towards self-powered nanosystems: from nanogenerators to nanopiezotronics](#)" (feature article), Advanced Functional Materials, 18 (2008) 3553-3567.
- [61] Jun Zhou, Yudong Gu, Peng Fei, Wenjie Mai, Yifan Gao, Rusen Yang, Gang Bao, Zhong Lin Wang* "[Flexible piezotronic strain sensor](#)", Nano Letters, 8 (2008) 3035-3040.
- [62] Jun Zhou, Peng Fei, Yifan Gao, Yudong Gu, Jin Liu, Gang Bao, Zhong Lin Wang* "[Mechanical-electrical triggers and sensors using piezoelectric microwires/nanowires](#)", Nano Letters, 8 (2008) 2725-2730.
- [63] Yi-Feng Lin, Jinhui Song, Ding Yong, Shih-Yuan Lu* and Zhong Lin Wang* "[Alternating the Output of CdS-Nanowire Nanogenerator by White-Light Stimulated Photoelectronic Effect](#)". Adv. Materials, 20 (2008) 3127-3130.
- [64] Z.L. Wang "[Energy harvesting for self-powered nanosystems](#)" (review), Nano Research, 1 (2008) 1-8.
- [65] Jin Liu, Peng Fei, Jun Zhou, Rao Tummala and Zhong Lin Wang* "[Toward High Output-Power Nanogenerator](#)", Appl. Phys. Letts., 92 (2008) 173105.
- [66] Z.L. Wang, "[Oxide Nanobelts and Nanowires - Growth, Properties and Applications](#)" (Review), J. Nanoscience and Nanotechnology, 8 (2008) 27-55.
- [67] Yong Qin, Xudong Wang and Zhong Lin Wang* "[Microfiber-Nanowire Hybrid Structure for Energy Scavenging](#)", Nature, 451 (2008) 809-813.



- [68] Yi-Feng Lin, Jinhui Song, Yong Ding, Zhong Lin Wang* and Shih-Yuan Lu "[Piezoelectric Nanogenerator using CdS Nanowires](#)", Appl. Phys. Letts., **92** (2008) 022105.
- [69] Zhong Lin Wang*, Xudong Wang, Jinhui Song, Jin Liu and Yifan Gao "[Piezoelectric Nanogenerators for Self-Powered Nanodevices](#)", IEEE Pervasive Computing, 7 (No. 1) (2008) 49-55.
- [70] Z.L. Wang "[Self-powering nanotech](#)", Scientific American, 298 (No. 1) (2008) 82-87.



- [71] Jin Liu, Peng Fei, Jinhui Song, Xudong Wang, Changshi Lao, Rao Tummala, Zhong Lin Wang* "[Carrier density and Schottky barrier on the performance of DC nanogenerator](#)", Nano Letters, 8 (2008) 328-332.
- [72] Jinhui Song, Xudong Wang, Jin Liu, Huibiao Liu, Yuliang Li, Zhong Lin Wang* "[Piezoelectric potential output from a ZnO wire functionalized with p-type oligomer](#)", Nano Letters, 8 (2008) 203-207.

2007

- [73] Xudong Wang, Jin Liu, Jinhui Song, Zhong Lin Wang* "[Integrated Nanogenerators in Bio-Fluid](#)", Nano Letters, 7 (2007) 2475-2479.
- [74] Yifan Gao and Z.L. Wang* "[Electrostatic Potential in a Bent Piezoelectric Nanowire – The Fundamental Theory of Nanogenerator and Nanopiezotronics](#)", Nano Letters, 7 (2007) 2499-2505.
- [75] Xudong Wang, Jinhui Song, Jin Liu and Zhong Lin Wang* "[Direct Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Wave](#)", Science, 316 (2007) 102-105.



- [76] Z.L. Wang "[The new field of Nanopiezotronics](#)", Materials Today, 10 (No. 5) (2007) 20-28.
- [77] Z.L. Wang "[Nanopiezotronics](#)", Adv. Mater., 19 (2007) 889-992.
- [78] Jr H. He, Cheng L. Hsin, Lih J. Chen*, Zhong L. Wang* "[Piezoelectric Gated Diode of a Single ZnO Nanowire](#)", Adv. Mater., 19 (2007) 781-784.
- [79] Charles M. Lieber and Zhong Lin Wang "[Functional Nanowires](#)", MRS Bulletin, 32 (2007) 99-104.
- [80] Zhong Lin Wang "[Piezoelectric nanostructures: from novel growth phenomena to electric nanogenerators](#)", MRS Bulletin, 32 (2007) 109-116.
- [81] Pu Xian Gao, Jinhui Song, Jin Liu and Zhong Lin Wang* "[Nanowire Nanogenerators on Plastic Substrates as Flexible Power Source](#)", Adv. Materials, 19 (2007) 67-72.

2006

- [82] Xudong Wang, Jun Zhou, Jinhui Song Jin Liu, Ningsheng Xu and Zhong L. Wang* "[Piezoelectric-Field Effect Transistor and Nano-Force-Sensor Based on a Single ZnO Nanowire](#)", Nano Letters, 6 (2006) 2768-2772.
- [83] Jinhui Song, Jun Zhou, Zhong Lin Wang * "[Piezoelectric and semiconducting dual-property coupled power generating process of a single ZnO belt/wire – a technology for harvesting electricity from the environment](#)", Nano Letters, 6 (2006) 1656-1662.
- [84] Zhong Lin Wang* and Jinhui Song "[Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays](#)", Science, 312 (2006) 242-246.



ترجمة المصطلحات

Abdominal:	جوف، بطن
Ablation:	استئصال
Abundant (abundance):	وفير، غزير
Accomplish:	يؤسس، يكمل، ماهر، يؤثر
Acetifying:	تغيير حالة، تشغيل
Active mode:	حالة عمل فعالة
Acoustic:	سمعي
Actuating:	تفعيل، تشغيل
Acquired:	اكتسبت، حصلت، جمعت
Aqueous:	يحتوي ماء
Adequate:	كاف، المطلوب حكماً
Adhesion:	إمكانية اللصق
Add Up:	إضافة
Adjacent:	مجاور
Adsorb:	ماز، يمتص
Accomplished:	بارع
Accumulate:	يزود، يقدم، يجمع
Aligned:	بشكل خطي، استقامة، مرصوف، متراس
Aligner (Alignment):	صف، الوضع على صف واحد، صفوف
Ag:	فضة
A.F.M (Atomic Force Microscope):	مجهر القوة الذرية
Agent:	وسيط
Agitation:	إثارة، خض، تحريك
Affinity:	مقاربة، تقارب، جاذبية، علاقة، ألفة كيميائية
Aiming:	هادفين
Anesthesia:	تخدير
Annealing:	تلدن
Anions:	أيونات
Anticipated:	مشاركة، فائدة
Approaches:	يتعامل مع، قريب بالمسافة، يقترب، يعالج، أسلوب، منحى، اقتراح
Artifacts:	تصنيع، صنع باليد
Aromatic:	عطري، حلقة بنزين
Aspect:	مظهر، بعد، وجه من الأوجه، مسألة
Aspect Ratio:	نسبة ياقيه ، نسبة العرض إلى الارتفاع
Aspergillus Niger (black mold):	عفن أسود
Astride:	عرضياً، متشعب، يمتطي
Athletic:	رياضي
Au:	معدن الذهب
Axial strained nanowire:	السلك النانوي المضغوط محورياً
Back Forth:	من الآن فصاعداً، هبوطاً وصعوداً
Back ground:	الخلفية
Baked on:	يحمص، يسخن

Band:	حزمة – مجال
Beam:	حزمة
Belt:	حزام
Beneath:	أدنى مرتبة، تحت شيء ما
Bending:	حني، لوي، انحناء
Bibliometric:	قياس متري مرجعي (ورقي)
Biochemical:	كيمياء حيوية (بيوكيميائي)
Biocompatibility:	البقاء، التأقلم الحيوي
Biological science:	علم البيولوجيا
BFC (Bio Fuel Cell):	خلية وقود حيوية
Bio Fluid:	سائل حيوي
Biomass energy:	طاقة الكتلة الحيوية
Biomechanical energies:	طاقة الكيمياء الحيوية
Biomechanical Nanogenerator:	المولدات النانوية من الكيمياء الحيوية
Biomedical systems:	أنظمة طبية حيوية
Biomolecular sensors:	حساسات حيوية جزيئية
Bind:	نحو
Blinking:	لمعة، ومضة
Blue tooth transmitters:	مرسلات بلوتوس (مرسلات راديوية)
Bleached:	فقد اللون، لون صناعي
Blew:	ينفخ
Body Force:	الجاذبية والقوى الكهرو مغناطيسية مثلاً
Bond (Bonded):	رابطة، ربط، حزام
Breakthrough:	اختراق
Broadened:	تزداد عرضاً
Brushing	مسح سطحي، تفريش للسطح
Bubbled:	فقاعات
Buffer:	دارئ، عازل
Bundle (Bundled):	حزمة، باقة، محزمة، معلقة
Burden:	عبء
Cancel out:	طرح، حذف
Capping:	تغطية، سدادة
Cardiac:	قلبي
Carrier type:	نوع الحامل
Carry out:	إنهاء، إتمام
(Carbon Nano Tube) CNT:	الأنابيب النانوية الكربونية
Carry out:	نقل، التنفيذ العملي، استكمال
Catalysts (Catalysis):	تحفيز، يحفز
Cations:	أيون موجب
CHC (Compacted Hybrid Cell):	خلية هجينة مجمعة، مغلقة
Clotting:	تجلط دموي
Cod down:	ينتعش
Citation:	ترقية، مستقاة من عمل ما
Coherent:	مترايط، متمائل

Compacted:	متماسكة، مغلفة، مجمعة
Compatible:	توافق، عمل مشترك ناجح، ظهور
Compex 205:	ذراع آلي ضوئي متحرك لتوجيه الليزر
Concurrently:	سوية، بنفس الوقت
Conceptual:	فكرة، مفهوم
Configuration:	تشكيلات
Confinement:	قريب بالمسافة، الحد من الفاعلية، التواجد في مكان محدد
Conjunction (Conjunctionally):	الاقتران بـ
Conical:	مخروطي
Constitutive:	مكونات، عناصر، تركيب
Contrast:	تباين
Contribute (Contribution):	يساهم، مساهمة، هبة، إعانة، حصة، يقدم
Convection:	انتقال الحرارة بالحمل
Convenience:	مريح، مفيد
Conventional:	تقليدي
Convolutates, Convolution:	يلف، لصق، تغيير المعنى أو الشكل، عمل مشترك
Counter electrode:	الكتروود (مأخذ) عداد
Combine:	يضم، يجمع، يشمل، يتحد
Converse:	معاكس
Correlated:	مرتبطة، متوافقة، متطابقة
Cost-effective:	مردود عال (فعالية بدون إضاعة الزمن والجهد والتكلفة)
Criterion (criteria):	مقياس، معيار
Cross- Link:	تصالب، رابطة متصالية
Crystal structure:	تركيب بلوري
Crystallography:	علم البلورات
Cushion:	حماية من الصدمة، طبقة هوائية، وسادة هوائية
Decomposition:	تحلل
Deflect:	عيب، تشوه
Defect tolerant sensor networks:	شبكات حساس التسامح في الخطأ
Degenerate:	يسوء، يشوه
Deionized:	غير مؤين
Deoxidize:	تخفيض نسبة الأوكسجين
Degency:	عدم التشكل
Demodulated:	غير المعدلة
Deplete:	نضوب، استهلاك، تنقيص
Depicted:	ممثلة بالرسم
Desirable:	مرغوب فيه
Deposition:	ترسبات، توضع على شكل طبقات
Desperate for:	شديد الحاجة إلى، بحاجة ماسة
Desperately:	حاد، بشكل كبير
Diabetes:	مرض السكري
Diaphragm:	حجاب، حاجز
Dice:	قطعة الزهر المكعبة الشكل
Dictated:	نظم القيادة والتحكم، أوامر للتحكم

Dielectric:	عزل كهربائي
Digression:	خارج الموضوع
Dim:	معتّم، خافت
Dip pen lithography:	الطباعة النانوية بالقلم الغاطس
Discrete:	مميز، حذر
Dis location:	انخلاع، تباعد، أثر سلبي
Diffraction:	انعراج
Dissolved:	انحلال
Dispersion:	انتشار، توزيع
Disposal:	النفائات، رهن إشارة
Doped semi conductive nanowire:	سلك نانوي نصف ناقل مشوب
Dope:	حبوب
Doped (Doping):	مشوب، مطعم، تطعيم
Drain:	تصريف، بالوعة، يستهلك
Drastic (Drastically):	قوي المفعول، قاس، مفاجئ، ضخّم كبير
Droplet:	قطرة ماء
Drops:	يسقط للأرض، تتخفّف قيمته
Dropping-on:	إسقاط نقاط على، تنقيط
(Dye Sensitized Solar Cell) DSSC:	الخلية الشمسية ذات التركيب الصبغى
Dynamic straining:	الإجهاد الديناميكي
Elaboration:	مفصل، تفصيل، إضافة
Electrochemical deposition:	طبقة ترسيب كهرو كيميائية
Electrode-nanowire interface:	منطقة التماس لمأخذ - سلك نانوي
Electromagnetic induction:	التحريض الكهرومغناطيسي
Electron-beam lithography:	الطباعة الحجرية بالحزمة الإلكترونية
Electron diffraction pattern:	نمط الانعراج الإلكتروني
Electrolyte:	محلول ناقل للتيار
Electro Oxidized:	مؤكسد كهربائي
Electrostatic Potential:	كمون كهرو ساكن
Electro spun:	غزل كهربائي
Emerge:	ينبثق، يصدر
Encasing:	صندوق، تغطية، تغليف
Energy sciences:	علوم الطاقة
Enhance (Enhancement):	يحسن، يعزز، يقيم
Entangling (Entangled):	يذوب، ممزوج، مندمج، ملفوف على بعضه
Entire:	كامل
Epitaxial:	تنضيد
Essential:	جوهرى، أساسى
Etching (Etched):	تتميش، محفور
Etching away:	طبع في مكان آخر
Evince:	جعله واضحاً
Even (Evenly):	حتى في، بشكل منتظم
Eventually:	في النهاية، أخيراً
Exhalation:	الزفير

- Exhibit: يظهر، يبدي
- Exhalation driven fiber Nano generator: المولدات النانوية الليغية المقادة بالزفير
- Expedited: تسريع
- Expansion: توسع، انتشار
- Explicit: صريح، واضح
- Exposed: معرض، مكشوف
- Extrapolated: تخمين ما سوف يحدث
- Ext ruction: ضفر، نتوء، ينبثق بالضغط
- Facet: وجه، سطوح
- Fairly: بانتظام
- Fellow: زميل مماثل
- F.E.M: طريقة العناصر المنتهية
- F.E.T Field effect transistors: ترانزستور الأثر الحقلية
- Fiber Nano generator: مولد نانوي ليفي
- Fill Factor: عامل الملء
- Finding: نتيجة
- Finger type: نموذج الإصبع
- Flat: مسطح
- Flexible substrates: ركازة مرنة، قاعدة مرنة
- Flexible fiber: الليف المرن
- Flew: تطير، تغادر
- Flounce: تدفق، كثافة جريان لجزيئات
- Fluctuation: تارجح، نموج
- Foldable: قابل للطي
- Forefront: الأكثر أهمية
- Foresee: يتوقع، يتنبأ
- Forth: من الآن فصاعداً، للأمام
- Fold: يدبر، يدور، يعلق
- Fracture: كسر
- FTIR: تحويل فورييه الطيفي بالأشعة تحت الحمراء
- Functional: قابل للعمل عند
- Fusion: انصهار، تتحد مع
- Ga: عنصر الغاليوم
- Gap: ثغرة هوائية
- Geothermal: الحرارة الجوفية
- Geneously (generously): كريم، سخاء
- Get rid of: التخلص من
- Global positioning systems GPS: أنظمة تحديد الموقع العالمية
- Glucose Oxidase (GOX): مؤكسد
- Glucose: سكر الدم
- Glucono Lactone $C_6H_{10}O_6$: مادة ذات خواص فيزيائية وكيميائية تضاف للمواد الغذائية
- 1 GPa = 10⁹ Pa = 1 جيجا باسكال**
- Green energy: الطاقة الخضراء
- Grating Pattern: نموذج شبكية

Harvesting (Harvester):	تجميع، تحصيل، يحدد، يسيطر
Health care:	العناية الصحية
Heteroepitaxial growth:	نمو تنضيدي غير متجانس
Hetrojunction:	وصلات لا متجانسة
Hexamethylenetetramine (HMTA):	بودرة مركبة صمغية ومادة مساعدة غير قابلة للاحتراق
Hidden:	مستتر، مخفي
High-Throughput (HT):	طاقة إنتاجية عالية، قدرة عالية
Hibernation:	سبات، تقاعد
Homeland security:	الأمن القومي
Homoepitaxially:	تنضيد متجانس
Human-electronics:	الإلكترونيات البشرية
Hybrid Nano generators:	المولدات النانوية الهجينة
Hybrid cell:	خلية هجينة
Hydro gel:	هلام مائي
Hydrolyze:	يتحلماً، تفاعل ضمن الماء
H ₃ PO ₄ :	حمض الفوسفور
Identification:	تمييز، التعرف على
Immobilization:	منع حركة
Impact:	تأثير
Impair:	إضعاف، أقل فعالية
Implantable biosensors:	حساسات قابلة للزرع
Implies:	يدل ضمناً على
Incident:	حادث، ظاهرة
Incubation:	تغطية، يحتضن
Incompatibility:	تعارض، متضارب، لا يحدث بأن واحد
Individual sensors:	حساسات فردية، شخصية، مستقلة
ITO (Indium Tin Oxide):	أكسيد القصدير الأنديموم
Infra-Red:	أشعة تحت الحمراء
Infiltrated:	مغمسة، مشبعة بالماء
Inhibit:	يكبح، يمنع، يبطئ
Innovative:	مبتكر
In-Situ:	في المكان الأساسي
In-vitro case:	حالة خارج الجسم الحي، مخبرية
In-vivo case:	حالة داخل الجسم الحي
Inorganic substrates:	قواعد لا عضوية
Insight:	عميق، واضح
Inspired:	حث، أوحى، ألهم
Interface:	ربط حواسيب ببعضها، تحقيق اتصال، مخاطبة
Inter digitative:	تشكل ضمنى
Intrinsic:	ذاتي، أصيل، حقيقي
Innovative:	مبتكر، مخترع، ابتكاري
In-Situ:	في المكان الأصلي الأساسي
Inset:	شكل إضافي مكبر
Interference:	تداخل

- Introduce: قدم
- Entail:** يستلزم، يوجب
- Investigate: استقصاء
- Isotropic: متماثل، غير متغير بالنسبة للاتجاه (إيزو تروبي)
- Issue: عدد لمجلة، مسألة، قضية
- Jogging: جري بطي
- Kapton: بليميد على قاعدة إيميد
- Laid (LAY): وضع شيء على سطح ما
- Land mark: إشارة دلالة للزمن والمكان
- Laser patterning: النمذج أو الشكل الليزري، النسخ الليزري
- Laser interference patterning: النسخ الليزري المتداخل
- Laser scanners: ماسح ضوئي ليزري
- Llaterally aligned nanowire array: مصفوفة سلك نانوي متراصة جانبياً
- Laterally bonded nanowires: أسلاك نانوية مترابطة جانبياً
- Lattice parameter: وسيط الشبكة
- Lead: موصل، يقود إلى، يحدد، معدن الرصاص
- Least: دون أهمية، الأقل، الأصغر
- Lifting-off: إزالة، رفعها، انطلاق، ترك
- LIL loi informatique et liberates: قانون معلوماتي
- Light emitting diode: ديود إرسال ضوئي
- Ligation: ربط شريان
- Like wise: كذلك، مشابه
- Limbs: طرف
- LING (Lateral Integrated Nano Generator): مولد نانوي متكامل جانبياً
- Liquid crystal display: شاشة عرض بلورية سائلة
- Lithography: طباعة حجرية
- Loose (loosely): غير مثبت، يفقد الاتصال، دون شد
- Mandatory: مطلوب فعلها، مطلوبة
- Manipulate objects: أدوات للمعالجة اليدوية
- Mange: أدار، تصرف
- Manipulate (Manipulating): يعالج بمهارة، تداول
- Macroscopically: تكبير، جهري
- Magnetron Plasma Sputter (MPS): مرذاذ بلازما مغنطروني
- Mask: قناع، حجاب
- Materials Science: علم المواد
- Mechanical energy: الطاقة الميكانيكية
- Meaning full: مفيد، هام، إعطاء معنى
- Methodology: أسلوب، طريقة
- Micro-Nano-systems: أنظمة - ميكرو - نانوية
- Microfibers: ألياف ميكروية
- Microfiber- Nanowire Hybrid Structure: بنية هجينة من ألياف ميكروية - سلك نانوي
- Microwatts: واحد على مليون من الواط
- Mobile environmental sensors: حساسات بيئية متحركة
- Mode: نمط

Molar:	مول لكل ليتر
Molecular:	جزيئي، ذرة
Morphology:	علم التشكل، تشكل، تكوين
Nanobelt:	الحزام النانوي
Nano devices:	جهاز نانوي
Nano electronic:	الالكترونيات نانوية
Nano generators:	مولد نانوي
Nanopizotronic:	الالكترونيات الضغط الكهريائية (استخدام مزدوجة الكهرباء الضغطية وخواص النصف ناقلة للأسلاك النانوية)
Nanotube:	أنبوب نانوي
Nanomaterial's:	مواد نانوية
Nano patterning:	نمط نانوي
Nano piezo tronics:	الالكترونيات الضغط النانوية
Nano-power-source:	منبع طاقة نانوي
Nanowire arrays:	مصفوفات سلك نانوي
Nanowires:	أسلاك نانوية
Nano systems:	أنظمة نانوية
Nano rode's:	قضبان نانوية
Nano robotics:	روبوت نانوي
Nano tip-to-nanowire:	من النانو الحاد(المدبب) - إلى - السلك النانوي
Neutralized:	يعدل، تعديل كمون
NHE:	الاختبارات غير التحطيمية
Nodes:	عقد
Non-contact nanowires:	أسلاك نانوية- بدون تماس
Nucleation sites:	مواقع التذرع أو الذرات
Nutrent:	تغذية
Off set:	إزاحة أولية
Optoelectronics:	الالكترونيات ضوئية
Optical lithography:	طباعة حجرية ضوئية
Out ward:	باتجاه الخارج
Oxide Nano belts:	أكسيد ذو الأربطة النانوية
Packaged:	تغليف، تحزيم، مجهز، لف
Pad:	حشوة
Parallel-Plate – Capacitor:	مكثف الصفيحة المتوازي
Par chased:	تمسك، التصاق، يشتري
Paste:	لاصق، مزيج لاصق
Pasal:	قاعدة
Pattern (Patterning):	طرز، نمط، نموذج، طريقة عمل، شكل
Patterned growth:	تزايد أو نمو نمطي
PC Backing:	بولش، صمغ كيميائي
Lead zirconate titanatePb (Zr,Ti)O ₃ :	زركونات الرصاص التيتانات (مادة كيميائية غير عضوية)
Peak:	ذروة، قمة
peddles:	التجوال، النشر
Performance Characterization:	مميزات الأداء
Peripheral:	جانبي، غير رئيسي

Perturbation: اضطراب، فوضى، اضطراب
 Permittivity: ثابت العزل، سماحية
 Piezoelectric: كهروضغطي
 Piezoelectricity: كهرباء الضغط
 piezoelectric zinc oxide nanowire arrays: مصفوفات سلك نانوي من أكسيد الزنك الكهروضغطي
 Piezotronics: الكترونياات ضغطية
 piezo-phototronics: صور الكترونية - مضغوطة
 piezopotential: الضغط الكموني
 pH: نسبة الحموضة
 Phenomenological: بشكل ظاهري
 Phosphate Buffer Solution (PBS): محلول عزل فوسفاتي

Phosphoric Acid HS PO4

photon sensor: حساس فوتوني
 Photovoltaic: جهد الفوتون، توتر الفوتون
 Photoresist: مقاومة متغيرة ضوئياً
 Photoresist: مقاومة متغيرة ضوئياً
 (P.F.W) Power generation with laterally packaged piezoelectric fine wires:

الاستطاعة المولدة من أسلاك كهروضغطية ناعمة مغلقة جانبياً

Pins: مخرز
 Plot: رسم بياني
 Polyurethane: مواد بلاستيكية تعمل كالورنيش للعزل
 Polar surfaces: السطوح القطبية
 PMMA Polymethyle methaerylate: بولي ميتاكريليت دو ميتيل
 Poling: قطب كهربائي، قضيب، أعمدة
 Polyimide: بوليميد
 Polluters: ملوث
 PDMS (Poly Dimethyl Siloxane): بولي ديميثيل سيلوكسان
 PVA (Poly vinyl Alcohol): ومحلول بولي فينيل ألكول
 Post: يثبت على، ختم، محطة
 Potential: إمكانية، كمون، طاقة، مقدرة
 Potentiostat: منظم كمون
 Powering: تغذية
 Powering of Nano devices: تغذية التجهيزات النانوية
 Precipitate: ترسيب
 Preclude: منع، تجنب حدوث
 Precursor: مولد طليعي للنترونات المتأخرة
 Predicted: متوقعة
 Pre-Patterned: نموذج مجهز مسبقاً (مسبق التجهيز)
 pressure sensor: حساس ضغط
 Preserve: يحفظ، يحمي
 Probing: تسجيل معلومات، كشف أو استفسار عن، سبر
 Probing the piezopotential: تسجيل كمون الضغط
 Prohibit: يمنع
 Projected: المتوقعة، المفروضة

Promote (Promoted): بحث، يحض، ترقية، دفع، تقدم، دعاية، تسهيل

PS: الياقوت (أكسيد الألمنيوم)

Pt: بلاتينيوم

Protonated: هيدروجين بروتوني، مبرتن

Prototype: نموذج أولي

Provided: شريطة أن

Pulse laser deposition: ترسبات الليزر النبضي

Punctual: دقيق بالوقت

Purchased: تمسك، التصاق، يشتري

Purposely: مقصود

Pyro electric:

كهرباء نارية (إمكانية بعض المواد المعدنية من توليد استقطاب عند تسخينها أو تبريدها أو تعرضها لحقل كهربائي)

Quantitatively (Quantitative): نوعي، كمي

Radial textured ZnO: أول أكسيد الزنك المنسوج قطرياً

Raised: يرفع، يزد، يرفع

Random energy: الطاقة العشوائية، غير المنظمة

Random vibration: الاهتزاز العشوائي

Rather: بدلاً من، بالأحرى

Ration: يوزع كفرق

Rational (Rationally): منطقي، منطقياً

Reconfigured: تغيير الترتيب، أو التركيب

Recycling: إعادة تدوير

Rectangular cantilever: رافعة مستطيلة

Predicted: يتنبأ، يتوقع

Redox: إرجاع وأكسدة

Regent's: سجل، مؤقت

Release: يطلق سراح، يفلت من حالة الشد

Relevant: مناسب

Reliable: موثوق، حقيقي

Relies: يعتمد على

Remnant: متبقي

Repository: مستودع، مخزن

Resonator: الطنان، مهتز

Retract: يعود

Revealed (revealing): يبوح، كشف، اظهر، جعله معروفاً، يعرض

Ripple: تموجات خفيفة

Rooted: قاعدة، جذور

Ruling out: منع حدوث شيء

Sample: عينة

Sanction: معاقبة، مقاطعة

Scale-up: مقياس، مدى، زيادة حجم

Scalable: ممكن قياسه

Scalable Technology: تقنية تقييس

Scanner: مسح ضوئي

Scavenging:	تنظيف، تجميع مواد مرفوضة غير لازمة
Scm:	سنتمتر مكعب لكل دقيقة
Schematic:	مخطط
Schottky barrier:	حاجز شتوكي
Scratch:	نزع، قطع
Scrub:	يفرك، يدعك
Sealed:	تغلف، تغلف بمانع تسريب، مختوم، مغلق
Self-powered nanotechnology:	تقنيات النانو ذاتية التغذية
Self-powered sensor network:	شبكة الحساس ذاتي التغذية
Seeded Growth:	نمو انشطاري
Seeds:	بذر، بذور
SEM (Scanner electronic microscope):	مجهر الكتروني ماسح
Sensitize:	جعله حساساً
Set up:	تحضير، تقييم، تنظيم، يؤسس شيء ما
Sets:	يحدد
Shear:	مقص
Shooped off:	يقطع أو يقص من القاعدة
Shrinks:	ينكأ، ينكمش
Side:	جانب
Si ₃ N ₄ :	نتريد السليكون
Slit:	شق، مجرى
Smart machine:	آلة ذكية
Snapshots:	مختصرة، ملخص لصورة
Soaked:	تغمر، تشبع بالسائل
solar cell technologies:	تقانات الخلايا الشمسية
Solely:	فقط لا غير
Solide Polymer Electrolyte:	محلول بولوميري صلب
Sonicated:	تغطيس
Space group:	زمرة فضائية
Species:	أجناس
Spectrum (Spectroscopy):	طيف، طيفي
Split:	شطر، قسم نصفين، تفريق
Spintronics:	الإلكترونيات الغزل
Spun (Spin):	غزل
Squeezed:	يضغط، يفرك بقوة
Strand:	خيوط، شريط، جديلة
Standby mode:	وضع احتياطي
Stationary:	ساكن
Status:	حالة، ظروف، وضعية
Stiff (stiffer):	صلب، أصلب
Stimulator (Stimulating):	محرز، تفعيل، فعالة
(STM) Scanning Tunneling Microscope:	المجهر النفقي الماسح
Strained:	بيدل مجهوداً، يرهق
Strain:	ضغط، إجهاد

Stress Tensor:	إجهاد الشد
Stretching:	تمطّي، يتمدد، يبسط، شد
Stretchable:	قابلة للتمدد، مرنة
Strips:	خط ملون مقطّع
Stripping:	نزع
SU-8  résine photosensitive negative:	صمغ حساس ضوئياً سالب
Substantially:	جوهرياً
Substrate:	قاعدة، ركازة
Sub-micron:	تحت الميكرن
Suffer:	يعاني من
Super capacitor:	مكثف فائق السعة
Super lattice:	شبيكة متطورة
Sustainable:	قابل للمداولة
Sweeping (Swept):	تنظيف تكنيس، مسح سطح
Synthesis:	تصنيع، تركيب
SWG (single wire generator):	مولد السلك المفرد
Tape:	لاصق
Template:	مرصف، طبعة، قالب، موديل، دليل
Tensile:	شد
Tetrahedral (Tetrahedrally):	رباعي الوجوه
Textured ZnO film:	غشاء، أو فلم من أكسيد الزنك المنسوج
Textured:	منسوج، سطح غير ناعم
therapeutic action:	إجراء صحي
Thermoplastic:	نوع من المواد التي يمكن صهرها وإعادة تشكيلها لعدة مرات
Tilting (Tilt):	الميل
Topology:	طريقة ربط الأشياء، ترتيب، ربط (توبولوجي)
Toughness:	صلابة، يتحمل القوة
Threatening:	يهدد
Throughput:	طاقة، قدرة
Threshold:	عتبة
Ti:	تيتانيوم
Tilted-view:	منظر مائل
Tiny:	ضئيل
Tip:	نهاية، طرف
Tolerate:	يتحمل، يتألم، يسمح
Tonic:	سانل كربوني، منشط
TORR:	واحدة لقياس الضغط حسب العالم توريشلي (الضغط المطبق بمقدار واحد مليمتر زئبقي عند درجة حرارة صفرية)
Track:	ملاحقة، مسار، سكة
Tracheotomy:	قصبة هوائية
Transferring:	نقل
Transversely deflected nanowire:	سلك نانوي منحرف عرضياً
Transient flow:	جريان عابر
Transmission electron microscope:	ميكروسكوب إرسال إلكتروني
Trend:	ميل للتغيير، رغبة

Tribo electric: كهرياء ساكنة، يحدث لبعض المعادن نوع من التوصيل لدى فركها مع مواد أخرى

Tweezers: بانسة، أداة يدوية للمسك غرض

Twist: قتل، لوي

Ultrasonic wave: موجة فوق صوتية

Ultrasonicated: فوق صوتية

Ultrasensitive: فائق الحساسية

Ultra Violet (UV): فوق البنفسجي

Under going: يمر عبر، تغيير

Under Neath: السفلية، تحت

Un predictably: غير متنبأ به

Upon: فوق، على

upside down: بالمقلوب

Vacancy: ثغرة، شاغر

Valance band: مجال أو منطقة التكافؤ

Ventral: سفلي

vertically aligned nanowire array: مصفوفة سلك نانوي مرصوفة شاقولياً

vertical nanowire: سلك نانوي شاقولي

Viscos: سميك

Vitally: حيوي

VLS: بخار - سائل - صلب

VSS: بخار - صلب - صلب

wafer level nanowire arrays: مصفوفات سلك نانوي بسوية رقاقة

Wearable: قابل للتلف، يمكن لبسه

wearable personal electronics: الكترونيات شخصية قابلة للربط على الانترنت

Vial: انبوب اختبار، حياطة

WO₃: أكسيد التنغستين

Wrapped up: يغلف

Wrist: سيء، معصم

wurtzite structured nanowires: أسلاك نانوية بتركيب فيرتز

Yarns: خيط غزل

zigzag electrode: مأخذ متعرج على شكل زكزاك

ZN(CH₃COO)₂: ملح أسيتيت الزنك

Zn(NO₃): نترات الزنك



العنوان : شارع محمد علي عقيد - المركز العمراني الشمالي

1003 تونس - الجمهورية التونسية

الهاتف : (+216) 70 013 900

تليفاكسميلي : (+216) 71 948 668

إنترنت : www.alecso.org.tn

البريد الإلكتروني : alecso@alecso.org.tn

facebook : <https://www.facebook.com/alecso.org.tn>

fliker : <https://www.flickr.com/photos/tags/alecso>

twitter : @followalecso

I.S.B.N. : 978 - 9973 - 15 - 372 - 2