مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (40) العدد (3) 2018
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (40) No. (3) 2018

آفاق استخدام تقنية النانو تكنولوجي وتطبيقاتها

سميرة علي عبود*

(تاريخ الإيداع 20 / 3 / 2018. قُبِل للنشر في 30/ 4 / 2018)

□ ملخّص □

يعرض هذا البحث دراسة مرجعية عن تقنية النانو تكنولوجي(NanoTechnology). يوضّح فيها أشكال المواد النانوية، وطرق تصنيعها، وخصائصها، وتطبيقاتها، ودور تقنيات النانو في الإلكترونيات والضوئيات، كما إنه يشرح إمكانية تصنيع حاسوب من أنابيب الكربون النانوية، ويشرح تقنية البطارية الورقية، والمكثفة الفائقة والعالية السعة، كما إنه يعطي فكرة عن الأجهزة والتقنيات المستخدمة في فحص المواد النانوية، ويعرض البحث تعامل ميكانيك الكم مع الإلكترونيات النانوية، وبالنهاية يعطي فكرة عامة عن أجهزة الكم وعمليات المحاكاة الخاصة بها.

الكلمات المفتاحية: تقنية النانوتكنولوجي، أنابيب الكربون النانوية، الترانزستور وحيد الإلكترون.

* مشرفة على الأعمال في قسم الاتصالات-كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية-جامعة تشرين- اللاذقية – سورية .

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (40) العدد (3) 2018
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (40) No. (3) 2018

Prospects for using of the technique of the nanotechnology and its applications

Sameera ali abood*

(Received 20 / 3 / 2018. Accepted 30 / 4 / 2018)

□ ABSTRACT □

This research shows a reference study about the technique of the nanotechnology, kinds of nano materials, methods of its manufacturing, its characteristics, its applications, and the role of nano in electronics and optoelectronic. As well this research explains the possibility of manufacturing of a computer with carbon nanotubes and the technique of the paper battery and the capacitor with high capacity.

This study gives too an overvieo of the devices and the used technique to in vestigate the nano materials.The article shows too the behavior of the quantum mechanics with the nano electronics. Finally it gives a general overvieo about the quantum devices and their own simulation processes.

Key words: Technique of the nanotechnology, Carbon nanotubes, Single-electron transistor.

***Work Supervisor, Department of Communication, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering , Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدمة:

يقف العالم اليوم على أعتاب ثورة علمية هائلة ألا وهي ثورة تكنولوجيا النانو أو التكنولوجيا متناهية الصغر، التي تقوم على استخدام الجزيئات في صناعة كل شيء بمواصفات جديدة وفريدة ومتميزة وبتكلفة تصل أحياناً إلى عشر التكلفة الحالية، فهذه التقنية تُبشّر بقفزة هائلة في جميع فروع العلوم والهندسة وكافة مجالات الطب الحديث والاقتصاد العالمي والعلاقات الدولية وحتى الحياة اليومية للفرد العادي فهي بكل بساطة ستمكّننا من صنع أي شيء نتخيله وذلك عن طريق صف جزيئات المادة إلى جانب بعضها البعض بشكل لا نتخيله وبأقل كلفة ممكنة.

لا يزال علم النانو[1] علماً جديداً في مرحلته الجنينية في المختبرات وتحت المجاهر النانوية، وتقنية النانو هي مقدرة الإنسان على تصنيع المادة والأجهزة والأنظمة عند مقياس النانو ومقياس النانو هو واحد من المليار من المتر. أدت حداثة هذا العلم إلى العديد من الصعوبات للباحثين فيه، لأن البرامج النانوية ما زالت محتكَرة بعض الشيء، لذا فإن ما توصل إليه في هذا المجال ليس في متناول جميع الفئات.

أهمية البحث وأهدافه:

إيجاد دراسة مرجعية للباحثين في مجال تقنيات النانوتكنولوجي، والعمل على تحويل تقنيات النانو إلى منتجات في مجالات الطاقة والإلكترونيات والبصريات والخلايا الشمسية وفي المجالات الطبية والبيئية وفي مواد البناء وغيرها من الاستخدامات الكثيرة، وأيضاً الاستخدام الأمثل للمواد بجودة عالية وبتكلفة منخفضة.

طرائق البحث ومواده:

قمنا في هذا البحث بإتباع الخطوات التالية:

1- التعريف بعملية تصنيع المواد النانوية، وبالأجهزة والتقنيات العلمية المستخدمة في فحص ودراسة هذه المواد.
2- التعريف بأشكال المواد النانوية.
3- دراسة خصائص أنابيب الكربون النانوية، وطرق تصميمها، وتطبيقاتها.
4- دراسة تأثير تقنيات النانو على الإلكترونيات.
5- دراسة تأثير تقنيات النانو على الضوئيات والبصريات، والتعريف بتقنية البطارية الورقية والمكثفة الفائقة والعالية السعة.
6- التعريف بحاسوب من أنابيب كربون نانوية.
7- دراسة تأثيرات الكم على الإلكترونيات النانوية.

عند تصنيع المواد بحجم النانو فإن التركيب الفيزيائي والكيميائي للمواد الخام المستخدمة في التصنيع تلعب دوراً مهماً في خصائص المادة النانوية الناتجة، خلافاً لما يحدث عند تصنيع المواد العادية. تتركب المواد عادة من مجموعة من الحبيبات والتي تحتوي على عدد من الذرات وقد تكون هذه الحبيبات مرئية أو غير مرئية للعين المجردة بناء على حجمها، يمكن ملاحظتها بواسطة الميكروسكوب، يتفاوت حجمها من مئات الميكرومترات إلى بضع سنتيمترات، أما في المواد النانوية فإن حجم الحبيبات يكون في حدود 1- 100 نانومتر.

- تصنيع حجم نانوي:

توجد طريقتان لتصنيع حجم نانوي[3]:

الطريقة الأولى: من الأعلى للأسفل (OP – DOWN): تبدأ هذه الطريقة بحجم محسوس من المادة محل الدراسة وتصغُر شيئاً فشيئاً حتى الوصول إلى المقياس النانوي، ومن التقنيات المستخدمة في ذلك أ-الحفر الضوئي ب-القطع ج-الكحت والطحن، وقد استُخدمت هذه التقنيات للوصول إلى مركبات الكترونية مجهرية كشرائح الكمبيوتر وغيرها.

الطريقة الثانية: من الأسفل للأعلى (BOTTOM-UP): تبدأ هذه الطريقة بجزيئات منفردة كأصغر وحدة وتُجمّع في تركيب أكبر، وغالباً ما تكون هذه الطرق كيميائية، وتتميز بصغر حجم النواتج (نانومتر واحد)، وقلة هدر للمادة الأصلية، والحصول على قوة ترابط بين الجسيمات النانوية الناتجة.

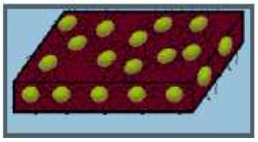
الأجهزة والتقنيات العلمية المستخدمة في فحص ودراسة المواد النانوية :

يمكن فحص ودراسة خصائص المواد النانوية والتأكد من تركيبها وتحديد السمات الجديدة التي تتمتع بها وتحديد أبعادها باستخدام عدد من الأجهزة والتقنيات العلمية من أهمها: المجهر الإلكتروني النافذ (TEM)، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، ومجهر القوى الذرية (AFM).

التعريف بأشكال المواد النانوية:

يمكن تصنيع المواد النانوية بعدة أشكال وذلك بناءً على الاستخدام المقرر لها:

أ-النقاط الكمية (Quantum Dots-QD) : هي عبارة عن نانوي شبه موصل ثلاثي الأبعاد، تتراوح أبعاده ما بين 2 إلى 10 نانومتر. عندما يكون قطر النقطة الكمية 10 نانومتر فإنه يمكن صف ورص 3 ملايين نقطة كمية بجوار بعضها البعض بطول يساوي عرض إصبع إبهام الإنسان كما بالشكل(1).



الشكل(1) مجموعة هائلة من النقط الكمية متراصة بجانب بعضها البعض.

ب- الفولورين (Fullerene): جزيئات نانوية مكونة من ذرات كربون مترابطة ثلاثياً تعطي شكل كرات لها بناء يماثل الجرافيت، ولكن بدلاً من الشكل السداسي النقي فإنها تحتوى على أشكال خماسية واحتمال سباعية من ذرات الكربون مما يؤدي لانثناء الطبقات إلى كرات أو أسطوانات، ويُعد أكثر الفولورينات شهرة هو الجزيئ C_{60} حيث تترتب 60 ذرة كربون على رؤوس مجسم عشريني ناقص ويتميز بأنه جزيء ممغنط وغير قابل للاحتكاك كما بالشكل(2).

الشكل(2) الجزئ C_{60} بالصورة الجزيئة وبالصورة البلورية.

ت- الكرات النانوية(nano balls): من أهمها كرات الكربون النانوية والتي تنتهي إلى فئة الفولورينات من مادة C_{60}، لكنها تختلف عنها قليلاً بالتركيب حيث أنها متعددة القشرة، كما أنها خاوية المركز على خلاف الجسيمات النانوية، بينما لا يوجد على السطح فجوات كما هو الحال في الأنابيب النانوية متعددة الجدران، (وقد يصل قطر الكرات النانوية إلى 500 نانومتر أو أكثر كما بالشكل(3):

الشكل(3) الكرات النانوية.

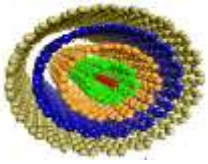
ث- االجسيمات النانوية (Nano particles): عبارة عن تجمع ذري أو جزئيي ميكروسوبي يتراوح عددها من بضع ذرات إلى مليون ذرة، مرتبطة مع بعضها بشكل كروي تقريباً بنصف قطر أقل من 100 نانومتر، فجسيم نصف قطره نانومتر واحد سوف يحتوي على 25 ذرة. عندما يصل حجم الجسيمات النانوية إلى مقياس النانو في بعد واحد فإنها تسمى البئر الكمي (quantum well) كما بالشكل(4)، أما عندما يكون حجمها النانوي في بعدين فتسمي السلك الكمي (quantum wire)، وعندما تكون هذه الجسيمات بحجم النانو في ثلاثة أبعاد فإنها تُعرف بالنقاط الكميةQD.
إن التغير في الأبعاد النانوية في التركيبات الثلاثة السالفة الذكر سوف يؤثر على الخصائص الإلكترونية لها، مما يؤدي إلى حدوث تغيير كبير في الخصائص الضوئية أيضاً، ومن الصور الأخرى للجسيمات النانوية النقاط الكمية شبه الموصلة والبلورات النانوية.

الشكل(4) جسيم نانوي.

الشكل(5) ليف نانوي.

ج- **الألياف النانوية (Nano fibers):** من أشهر الألياف النانوية الألياف المصنوعة من البوليمرات كما بالشكل(5). يكون عدد ذرات سطح الألياف كبيراً مقارنة بالعدد الكي، وهذا يكسبها خواص ميكانيكية (كالشدة والصلابة، ..) تؤهلها للاستخدام كمرشحات في تنقية السوائل والغازات وفى العديد من التطبيقات الطبية والعسكرية.

ح- **الأنابيب النانوية(Nano tubes):** تخضع المواد المستخدمة فى تقنية النانو لشرط أساسى وهو مقياس النانو (100-1) نانومتر، ولذا فإن المواد المستخدمة يجب أن يتم تقطيعها إلى أجزاء لا تزيد أقطارها عن 100 نانومتر. تتكون الأنابيب النانوية من خليط من مواد موصلة ومواد شبه موصلة أسطوانية الشكل مجوفة يتراوح قطر الأنبوب بين 1 إلى 100 نانومتر. يمكن إدخال عدة أنابيب ذات أنصاف أقطار متدرجة فى الصغر لتصبح على الشكل(6)، وكل أنبوب من هذه الأنابيب يؤدي وظيفة مختلفة عن الأخر، وأشهر الأنابيب النانوية أنابيب الكربون متناهية الصغر(Carbon Nano tubes). تُصنّع الأنابيب النانوية أحياناً من مواد غير عضوية مثل أكاسيد الفلزات، وهي شبيهة من ناحية تركيبها بأنابيب الكربون النانوية، ولكنها أثقل منها وليست بنفس قوة أنابيب الكربون.



الشكل(6) مجموعة من الأنابيب النانوية المتداخلة والمختلفة الخواص.

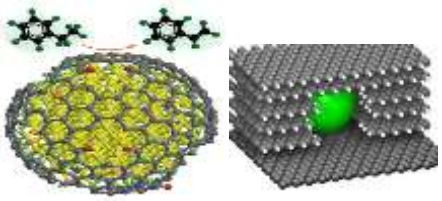
خ- **الأسلاك النانوية (Nano wires):** هي أسلاك بقطر قد يقل عن نانومتر واحد وبأطوال مختلفة أي بنسبة طول إلى عرض تزيد عن 1000 مرة، لذا فهي تلحق بالمواد ذات البعد الواحد، وكما هو متوقع فهي تتفوق على الأسلاك التقليدية لأن الإلكترونات تكون محصورة كمياً باتجاه جانبي واحد مما يجعلها تحتل مستويات طاقة محددة تختلف عن تلك المستويات العريضة الموجودة في المادة الحجمية، وهي لا توجد في الطبيعة ولكنها تُحضَر في المختبرات حيث منها الفلزي(الناقل)، ونصف الناقل والعازل، ومنها الأسلاك الجزيئية العضوية (DNA) وغير العضوية التي ينظر لها كتجمعات بوليمرية ذات القطر 0.9 من النانومتر وبطول يصل لمئات من المايكرومتر، يمكن استخدامها في المستقبل القريب لربط مكونات الكترونية دقيقة داخل دائرة صغيرة، أو عمل وصلات ثنائية p-n ، وكذلك بناء الدوائر الإلكترونية المنطقية وقد تُستخدم مستقبلاً لتصنيع الكمبيوتر الرقمي، وتوجد الأسلاك النانوية بعدة أشكال منها الحلزوني (spiral) أو متماثل خماسي الشكل، وقد تكون عند تحضيرها في المختبر على شكل أسلاك متعلقة من طرفها العلوي أو تكون مترسبة على سطح أخر. من الطرق المستخدمة لإنتاج هذه الأسلاك عملية كحت كيميائي لسلك كبير أو قذف سلك كبير بواسطة جسيمات ذات طاقة عالية.

د- **المركبات النانوية ([8]Nano composites):** عبارة عن مواد يضاف إليها جسيمات نانوية خلال التصنيع، ونتيجة لذلك فإن المادة النانوية تبدي تحسناً كبيراً في خصائصها. مثلاً عند إضافة أنابيب الكربون النانوية للمادة يؤدي إلى تغيير خصائص التوصيلية الكهربائية والحرارية لها، وقد يؤدي إضافة أنواع أخرى من الجسيمات النانوية إلى تحسين الخصائص الضوئية وخصائص العزل الكهربائي، وكذلك الخصائص الميكانيكية مثل الصلابة والقوة. يجب أن تكون النسبة المئوية الحجمية للجسيمات النانوية المضافة منخفضة جداً (في حدود 0.5% إلى 5%) وذلك بسبب أن النسبة بين المساحة السطحية إلى الحجم للجسيمات النانوية تكون عالية.

تجرى البحوث حالياً للحصول على مركبات نانوية جديدة ذات خصائص ومميزات تختلف عن المركبات الأصلية، ومن هذه المركبات المركبات البوليمرية النانوية. إن فكرة استخدام تقنية النانو تتلخص في إعادة ترتيب الذرات التي تتكون منها المواد في وضعها الصحيح، وكلما تغير الترتيب الذري للمادة كلما تغير الناتج منها إلى حد كبير. بمعنى آخر فإنه يتم تصنيع المنتجات من الذرات، وتعتمد خصائص هذه المنتجات على كيفية ترتيب هذه الذرات، فإذا قمنا بإعادة ترتيب الذرات في الفحم يمكننا الحصول على الألماس، أما إذا قمنا بإعادة ترتيب الذرات في الرمل وأضافة بعض العناصر القليلة يمكننا تصنيع رقائق الكمبيوتر، وإذا قمنا بإعادة ترتيب الذرات في الطين والماء والهواء يمكننا الحصول على البطاطا.

ذ- **جزئيات الجرافيت و جزيئات الألماس:**

إن ذرات جزئيات الجرافيت ذات فراغات بينية كبيرة كما بالشكل(7)، بينما جزيئات الألماس ذات بنية منتظمة و مراتصة كما بالشكل(8)، وهذه الأساسيات هي مدخل لقدرة النانو تكنولوجي على تغيير تلك التركيبات الذرية وترتيبها للحصول على مواد ذات كفاءة أعلى وبالشكل المطلوب في الأغراض المختلفة.



الشكل(7) جزيئات الألماس. **الشكل(8) جزيئات الجرافيت.**

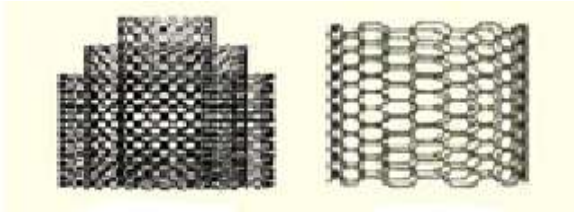
ر- أنابيب الكربون النانوية(Carbon Nanotubes):

تُعد أنابيب الكربون النانوية[3]-[2] التي اكتشفت عام1991م مهمة جداً نظراً لتركيبها المتماثل وخصائصها المثيرة واستخداماتها الواسعة في التطبيقات الصناعية والعلمية وفي الأجهزة الإلكترونية الدقيقة، والأجهزة الطبية الحيوية، وهي عبارة عن شرائح من الجرافيت يتم طيها حول محور ما لتأخذ الشكل الأسطواني، حيث ترتبط ذرات نهايتي الشريحة مع بعضها لتُغلق الأنبوب، تكون إحدى نهايتي الأنبوب في الغالب مفتوحة والأخرى مُغلقة على شكل نصف كرة، كما قد يكون جدار الأنبوب فردي الذرات وتسمى الأنابيب النانوية أحادية الجدار، أو ثنائي أو أكثر وتسمى الأنابيب متعددة الجداران، ويتراوح قطر الأنبوب بين أقل من نانومتر واحد إلى 100 نانومتر أما طوله فقد يصل إلى 100 مايكرومتر ليشكل سلكاً نانوياً. للأنابيب النانوية عدة أشكال فقد تكون مستقيمة، لولبية، متعرجة، أو مخروطية وغير ذلك. كما أن لها خصائص غير اعتيادية من حيث القوة والصلابة والتوصيل الكهربائي وغيرها. كما أن للكربون النانوي أشكالاً أخرى مثل الكرات النانوية والألياف النانوية. يتم إنتاج أنابيب الكربون النانوية بعدة تقنيات منها: التفريغ القوسي، والكحت الليزري، والترسيب بواسطة أول أكسيد الكربون ذي الضغط العالي، والترسيب بواسطة البخار الكيميائي.

يوجد نوعين للأنابيب النانوية كما ذكرنا هما:

1-أنابيب الكربون النانوية أحادية الجدارSWN (Single Walled Nanotubes): وهي عبارة عن أنابيب مكونة من طبقة واحدة من صفائح الجرافيت يصل قطرها الداخلي إلى ثلاث نانومترات، مفتوحة من أحد طرفيها أو كليهما، وقد يوجد غطاء من ذرات الكربون على شكل فلورين نصف كرة يقفل أحد طرفيها.

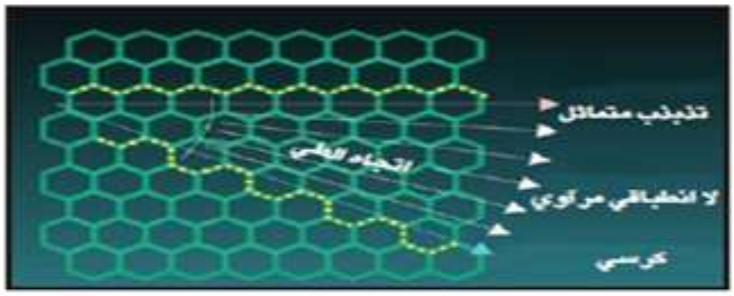
2-الأنابيب متعددة الجدران MWNT (Multi Walled Nanotubes): تتكون من أكثر من طبقة من الجرافيت ملفوفة على بعضها البعض يصل قطرها الداخلي إلى أكثر من عشرة نانومترات كما بالشكل(9).



الشكل(9) الأنابيب أحادية الجدار ومتعددة الجدران.

خصائص أنابيب الكربون النانوية:

1- الخواص الكهربائية: تعتمد هذه الخواص على محور طي صفائح الجرافيت المكونة لها كما في الشكل(10)، وعلى قطر الأنبوب النانوي وعلى نوع المواد المصنعة منها، والتي قد تكون ذات خصائص فلزية عالية التوصيل الكهربائي، أو شبه موصلة. إن موجة الإلكترون الساكنة يمكن أن تتزايد فقط إذا كان محيط الأنبوب أحد مضاعفات الطول الموجي للإلكترون. مما يجعل أنابيب الكربون النانوية مناسبة جداً للتوصيلات الالكترونية حيث أن الالكترونات تسير خلالها بدون مقاومة تذكر بحيث يتساوى عدد الالكترونات الداخلة للأنبوب مع عدد الالكترونات الخارجة منه بغض النظر عن طول الأنبوب.



الشكل (10) العلاقة بين محور طي الجرافيت وأنواع أنابيب الكربون النانوية.

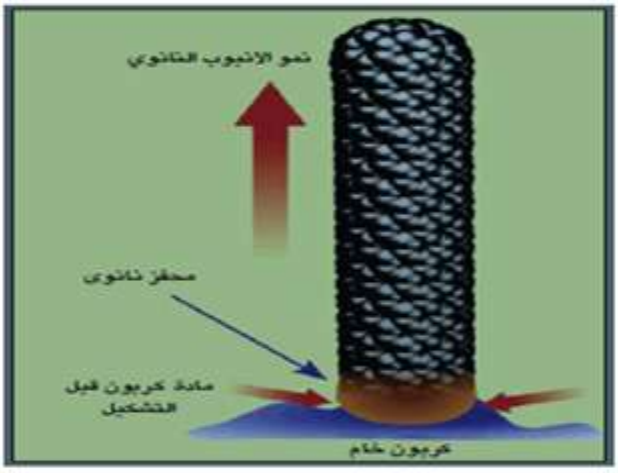
2- **الخواص الميكانيكية:** لأنابيب الكربون النانوية معامل صلابة(يونغ) عالي بامتداد محورها، وتُعد مرنة نتيجة لزيادة طولها مقارنة بقطرها، حيث تبين أن لها معامل يونغ يعادل 10^{12} نيوتن لكل متر مربع أي يعادل خمسة أضعاف صلابة الفولاذ. بالإضافة لكونها خفيفة جداً مما يجعلها مناسبة للاستخدام في المواد المركبة.

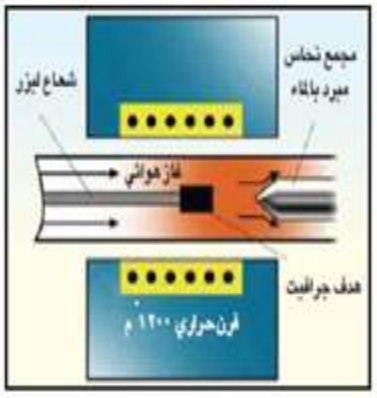
3- **الخواص الكيميائية:** يعد التفاعل الكيميائي لأنابيب الكربون النانوية أفضل من تفاعل صفائح الجرافيت بسبب الانحناء في سطحها، أي أنه كلما صغر قطر الأنبوب النانوي كلما زاد التفاعل، كما أنه يمكن حشوها بغازات مثل الهيدروجين أو بسوائل أو بجوامد مختلفة، وبسبب الشد العالي على سطحها فإنها لا تتأثر بما في داخلها.

إنتاج أنابيب الكربون النانوية:

من أهم التقنيات المستخدمة في إنتاج أنابيب الكربون النانوية ما يلي:

1- تفريغ القوس الكهربائي(Electric Arc Discharge): يتم تصنيع أنابيب الكربون النانوية باستخدام ذراع يوجد بين جرافيت نقي وقطب كهربائي موجود في محيط خامل، ثم يبدأ الترسيب بالتراكم على القطب السالب المتبخر من القطب الموجب، فتتكون رواسب على شكل صدفات صغيرة وقاسية ومحشوة بمسحوق أسود ناعم كما بالشكل(11).





الشكل(11) طريقة تفريغ القوس الكهربائي. **الشكل(12) طريقة التبخير بالليزر.**

2-التبخير بأشعة الليزر(Laser Vaporization): تتم العملية بتسليط أشعة الليزر على الجرافيت بوجود غاز خامل عند درجة حرارة 1200 درجة م، بحيث يمكن إنتاج أنابيب نانوية أحادية الجدار أو متعددة الجدران بتغيير نبضات وتردد الليزر المستخدم كما بالشكل(12). وتتميز هذه الطريقة بأنها تنتج أنابيب ذات أقطار منتظمة.

3- الترسيب بالتبخير الكيميائي (Chemical Vapor Deposition - CVD) : تتم هذه العملية عن طريق وضع مصدر كربوني في مرحلة الغاز ثم استخدام مصدر طاقة مثل البلازما أو حلزون ساخن لنقل الحرارة للكربون الذي ينمو على حبيبات تمثل محفزاً على القاعدة. وتوجد عدة طرق للترسيب بالتبخير الكيميائي منها:

أ- الترسيب بالبلازما. ب- الترسيب بالتبخر الكيميائي الحراري.

عمليات ما بعد تصنيع أنابيب الكربون النانوية: من الطبيعي أن تحتوي أنابيب الكربون النانوية بعد التصنيع على بعض الشوائب مثل الجرافيت والكربون المشوه والفلزات المحفزة أو أجزاء صغيرة من الفلورين التي تؤثر تأثيراً كبيراً على خصائصها المميزة، ولتنقية هذه الأنابيب من تلك الشوائب هنالك عدة طرق أشهرها:

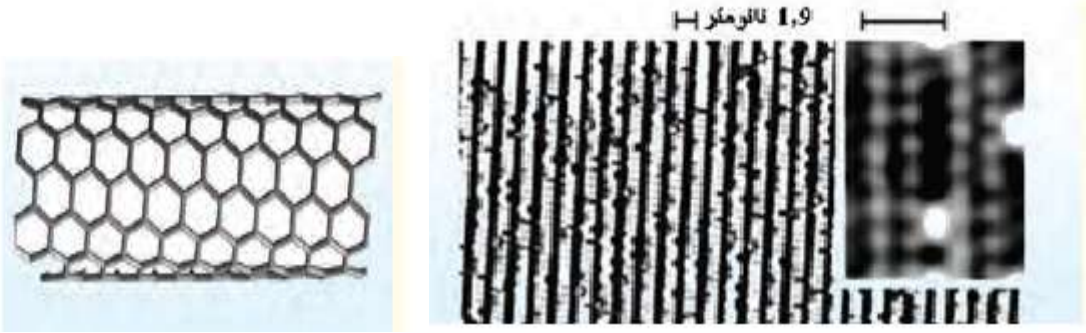
1- الأكسدة القوية: تعتمد على عدة عوامل مثل مدة الأكسدة ، والبيئة المحيطة ، ودرجة الحرارة، وعلى الرغم من أن الأكسدة القوية تزيل أكثر الشوائب الموجودة في الأنبوب إلا أنه يُعاب عليها أن الأنبوب النانوي تتم أكسدته.

2-المعالجة بالأحماض: تستخدم هذه الطريقة حمض الكلور (HCl) أو النيتروجين (HNO3) أو أحماض أخرى حيث تقوم هذه الأحماض بإزالة الشوائب العالقة بالأنبوب ومن أهمها المحفزات الفلزية المستخدمة في التصنيع.

طرق تصميم أنابيب الكربون النانوية:

تتميز أنابيب الكربون النانوية بخصائص توصيل التيار الكهربائي بحسب تركيبا عند تكوينها وذلك حسب اتجاه محور الطي في الخلايا المكونة لجدارها كما الشكل(a-13)، فإذا كان الفرق أحد مضاعفات الثلاثة يكون الأنبوب فلزياً، وعندئذ فإنه يمتاز بقدرة توصيل عالية أي مقاومته شبه معدومة تزيد ألف مرة عنه في الألماس والفضة، أما إذا كان الفرق غير ذلك فإن الأنبوب يكون شبه موصل.

تم أيضاً تطوير أسلاك نانوية من أشباه الموصلات كالسليكون والفلزات(النيكل و البلاتين و التيانيوم)، وهذه الأسلاك مهّدت بشكل كبير بصناعة الدوائر المعقدة والترانزستورات إلا أنها تعد أقل صلابة من الأسلاك المصنوعة من أنابيب الكربون النانوية. يوضح الشكل(b-13) سلك نانوي يتكون من سلاسل جزئية من السليكون.



الشكل(13): (a) سطح الأنبوب النانوي مطوياً على المحور، (b) سلاسل جزيئية من السيلكون تشكل أسلاك نانوية.

تواجه الإلكترونات مشاكل بسبب صغر قطر أسلاك النانو المصنوعة من النحاس أو الألمنيوم لأنها تحتاج إلى مسار حر بمعدل معين ولأن حركة الإلكترون تُحصر في قطر أقل من المطلوب، لذا يقل التوصيل في أسلاك النحاس ذات قطر أقل من 40 نانومتر. أما أنابيب الكربون النانوية فإنها لا تواجه هذه المشكلة لأن الإلكترونات تنتقل فيها بطبقة النقل البالستي(ballistic transport).

إن تطوير طرق تصنيع الترانزستور باستخدام الأسلاك أو أنابيب الكربون النانوية من أكثر المجالات حركة لأنها تمتاز بتركيب بلوري منتظم وبالتالي قدرة توصيل عالية، بينما يقل توصيل أسلاك النحاس وغيرها من الفلزات في الصورة النانوية، وبالتالي تقل سرعة الأجهزة المبنية عليها مقارنة بتلك الأجهزة التي تعتمد على أنابيب الكربون. يعمل

مصممو دوائر التكامل الفائق(Very Large Scale Integration -VLSI) على تطوير التصاميم شديدة التعقيد التي تعمل كنوتة للأجهزة الإلكترونية فائقة السرعة، لذا يضعون طرق الصناعة في الحسبان عند التصميم التي تستخدم الطباعة الضوئية غالباً.

تطبيقات أنابيب الكربون النانوية:

أحدثت أنابيب الكربون النانوية ثورة صناعية في مختلف المجالات من أهمها:

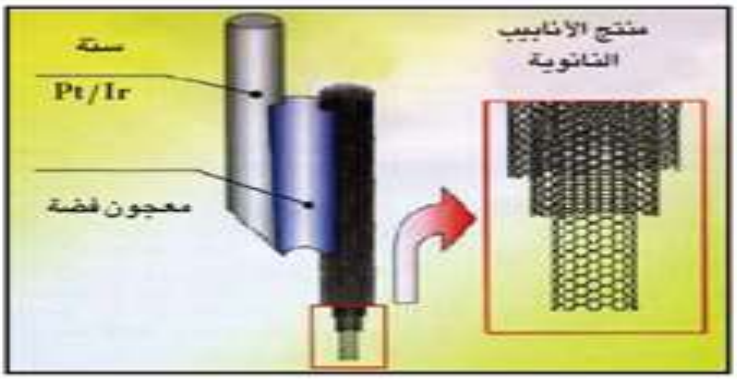
1-توصيل العقاقير: يمكن استخدام أنابيب الكربون النانوية في توصيل العقاقير للجسم، حيث يمكن تقطيع أنبوب الكربون النانوي إلى قطع صغيرة باستخدام الموجات فوق السمعية في خليط من محاليل حمض النيتروجين وحمض أو الحمض النووي DNA بحيث يحفظ خصائصها ويمنعها من التفاعل مع أجزاء الجسم السليم.

2-تخزين الطاقة: تُستخدم أنابيب الكربون النانوية في خلايا الوقود، والبطاريات، والتطبيقات الكهروكيميائية، لأنها جيدة في حفظ الطاقة والسبب هو أبعادها الصغيرة وتركيبة سطحها الناعمة، كما أن لها أهمية كبرى في تحسين أداء المكثفات بشكل كبير بفضل زيادة مساحة سطح الأنابيب النانوية إلى حجمها.

3-تطبيقات الإلكترونيات: تُستخدم أنابيب الكربون النانوية في أجهزة الانبعاث المجالي (Field Emitting Devices) وذلك لثباتها الجيد عند كثافات التيار العالية وتوصيلها الممتاز وثباتها الكيميائي. من الجدير بالذكر أن شركة سامسونج الكورية قامت باستخدام مصفوفة من أنابيب الكربون النانوية تعمل على شكل قاذفة إلكترونات لتحسين أداء شاشات العرض البلورية، وكذلك تُستخدم أنابيب الكربون النانوية في تصنيع ترانزستورات تأثير المفعول المجالي (Field-Effect Transistor) حيث يوضع الأنبوب بين المصدر(Source) والمصرف (Drain) وعند تطبيق جهد على البوابة(Gate) فإن الأنبوب النانوي يتحول من موصل للالكترونات إلى عازل. إن تصنيع ترانزستورات من أنابيب الكربون النانوية يفتح المجال لتصنيع الدوائر المنطقية التي تشكل وحدة بناء الحاسوب، وكذلك يمكن استخدام أنابيب الكربون النانوية في التوصيل في الدوائر الكهربائية عالية الدقةVLSI (Very Large Scale Integration) وذلك لصغر حجمها وتوصيلها العالي كما بالشكل(14).

الشكل(14) تصنيع الترانزستور بواسطة أنابيب الكربون النانوية.

4-المجسات النانوية والحساسات: بما أن أنابيب الكربون النانوية تمتاز بمرونتها وتوصيلها الكهربائي الجيد فإنه يمكن استخدامها في أجهزة المسح المجسّي، مثل مجهر القوة الذرية (Atomic Force Microscope- AFM) حيث تستخدم كرأس مجسّي بدلاً من السيليكون أو الفلزات الأخرى كما بالشكل(15) ويمكن استخدام أنابيب الكربون النانوية كملقاط ذي دقة عالية لتحريك الجسيمات النانوية، ويمكن استخدامها كذلك كحساسات كيميائية لالتقاط بعض الغازات مثل النشادر (NH3) وذلك عن طريق التقاط التغير في المقاومة الكهربائية، إضافة إلى ذلك يمكن استخدامها كحساسات للحمض النووي DNA داخل جسم الإنسان.



الشكل(15) استخدام أنابيب الكربون النانوية كرؤوس في مجهر القوى الذرية.

تقنيات النانو و الالكترونيات:

أسهمت تقنية النانو في تطوير الإلكترونيات لأنها تسعى إلى فهم خواص المواد والأنظمة على مستوى النانو، والتي بدورها تساعد على تطوير التصميم والصناعة التي تحتاج إلى تصغير مستمر لمواكبة متطلبات الحياة، كما تؤدي إلى تطوير الأداء وتقليل التكلفة، ولقد تأثرت تقنية المعلومات بتقنية النانو وأهم المكونات التي تأثرت بذلك:

1-السليكون: إذ تعتمد عليه الأجهزة الإلكترونية منذ وقت طويل وقد تطورت هذه الصناعة إلى درجة يمكن معها العمل على مستوى الذرات في النمذجة والتكبير على الرقاقات.

2-تصغير الترانزستور: حيث استفاد مجال معالجة البيانات من التصغير المستمر لأحجام الترانزستورات عن طريق زيادة عددها في نفس الحجم أو المساحة مما أدى إلى زيادة الترددات، وبالتالي تحسين أداء المعالجات.

3-تصغير المسافة بين الترانزستورات: حيث شهدت صناعة وحدات المعالجة المركزية تطوراً شمل أجيالاً متعددة من خلال تقليل المسافة التي تفصل الترانزستورات عن بعضها البعض لأنه كلما قلت المسافة المساوية لنصف المسافة بين توصيلتين فلزيتين في خلية ذاكرة DRAM زادت دقة التقنية المستخدمة في الصناعة.

4-عازل البوابة: تعدّى مصنعو المعالجات المركزية حالياً خارطة مور الزمنية إذ تمكنوا من تطوير تقنية 45 نانومتر الصناعية باستخدام الهافنيوم كعازل للبوابة في الترانزستورات بديلاً أو مشتركًا مع السليكون لتكوين أكسيد مناسب. تكمن أهمية العازل الجديد في التقليل من التسريب للتيار الكهربائي عند الصمام في حالة تقليل سماكته وتقليل جهد العتبة اللازم إضافة لتسهيل مرور الإلكترونات من المصدر إلى المصرف وهذا يؤدي لتقليل الطاقة المفقودة والحرارة الناتجة، وبالتالي يؤدي للوصول على النتيجة بشكل أسرع التي كانت تشكل عوائق للتصغير، وقد مهد التسارع في الأجيال المتعاقبة للتقنيات إلى إمكانية زيادة عدد النويات للمعالجات المركزية وبالتالي تحسين الأداء.

5-الذاكرة العشوائية النانوية (NRAM): استُخدمت تقنية النانو في صناعة الذاكرة العشوائية التي تعتمد على تأثير أنابيب الكربون النانوية التي تمر فوق سطح مستوي كما بالشكل(16)، وتكون ملامسة له أو شبه منفصلة عنه عمودياً بفضل تفاعلات فاندر فالز على مستوى تجاذب وتنافر الذرات. تمثل أنابيب الكربون المشدودة حالة تخزين صفر، بينما تمثل تلك المتدلية حالة تخزين واحد، وقد أدى عدم استخدام(flip- flops) إلى حماية هذه التقنيات من التأثر بالإشعاع.

6-الحساسات(SENSORS): تعمل الحساسات على تحويل الطاقة إلى إشارة إلكترونية أو العكس لتصل دقتها إلى درجة عالية عند استخدام تقنيات النانو في تصميمها. وتتميز الحساسات النانوية بعدم تأثيرها على الجسم المختبَر

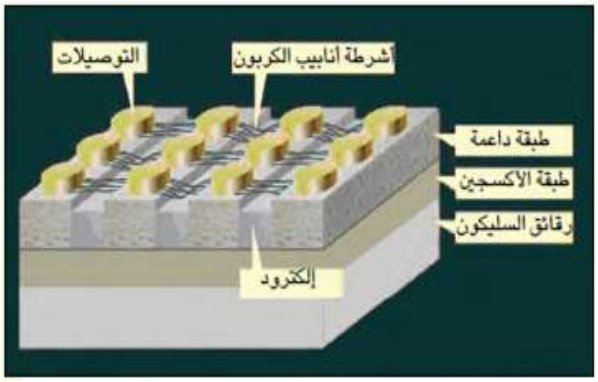
بالإضافة إلى الدقة العالية في النتائج، وقابلية استخدامها لقياس العديد من الخصائص، لكن تصميمها يحتاج لحل بعض المشاكل مثل تقليل أثر الاتصال مع المادة المختبَرة، وتبادل الحرارة والتعامل مع إشارة الضوضاء على مستوى شديد الدقة والتآكل الشديد، وتُستخدم الحساسات فيما يلي:

أ-**الذاكرة القرصية:** يعتمد تخزين البيانات فيها على تصغير الأجزاء الإلكتروميكانيكية المكونة لها فمثلاً: يُغطّى القرص الغير مغناطيسي داخل القرص الصلب بطبقة ممغنطة بسمك ذرات قليلة، كما يرتفع ذراع القارئ فوق القرص بمسافة 25 نانومتر. أدى تصغير الحجم إلى زيادة مساحات التخزين وتقليل تكاليف التصنيع بواقع ملايين المضاعفات خلال ربع القرن الماضي.

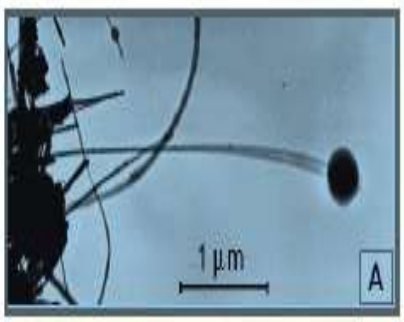
ب-**المجاهر:** منها مجهر المسح المجسّي(SPM)، والمجهر النفقي الماسح(STM) الذي فيه عرض الرأس الماسح ذرة واحدة لإتمام ظاهرة حركة الإلكترون النفقية من السطح المراد رؤيته، وتساعد مجاهر المسح المجسّي على دراسة التركيبات النانوية وتطويرها.

ت-**الطب:** تمّ إنتاج حساسات تماثل اللمس البشري في الدقة، تستخدم هذه الحساسات طبقة سلفيد الكاديوم شبه الموصل بسمك 3 نانومتر ويتم ذلك من خلال حساب الضغط على السطح بقياس الضوء المنبعث منه، يمتاز هذا التصميم بسهولة التصنيع بالإضافة إلى إمكانية استخدامه في عمليات إزالة الأنسجة السرطانية .

ث- وزن الأجسام: تمكّن الباحثون من تصميم ميزان عن طريق وضع جسيم من الكربون على أنبوب كربون نانوي، وعبر خاصية صلابة الأنبوب العالية على طوله تمكنوا من حساب وزن الجسيم عن طريق تمرير شحنة كهربائية عبر الأنبوب، وقياس التغير في تردد الاهتزاز الرنيني له بوجود الجسيم وبدونه كما في الشكل (17).



الشكل(16) ذاكرة NRAM.



الشكل(17) ميزان للجسيمات الصغيرة.

تطبيقات تقنيات النانو:

1- في مجال الضوئيات و الإلكتروضوئيات:

ترتبط الضوئيات بالإلكترونيات بعلاقة وثيقة، حيث تعتمد طريقة الطباعة الضوئية على الإلكترونات لإنتاج الليزر وذلك للقيام بعملية الحرق اللازمة لإزالة مادة ما عن سطح معين لإتمام تصميم الدوائر، وقد تم استخدام فلوريد الأرجون لإنتاج ضوء ذو طول موجي 193 نانومتر، تم بواسطته الحصول على الطباعة الضوئية بالغمر (Immersion photolithography)وذلك بتمريره بطبقة سائلة ما بين المصدر والسطح المصنّع، وبالتالي تحسين دقة الطباعة بمعامل يساوي معامل انكسار السائل.

ستُحدث الضوئيات من مجالات تقنيات النانو نقلة نوعية للأنظمة في المستقبل القريب، لكنها تواجه بعض المشاكل منها مشكلة توجيه الضوء الصادر من المواد المحتوية على فجوات الموجات الضوئية (Photonic band-gaps) لذا ستقوم البلورات الضوئية المصنّعة سواء بالطباعة الضوئية أو بالتكوين الإنشائي بتوجيه الضوء الصادر وتتكون هذه البلورات من شبكة متكررة من الفراغات في مادة عازلة مصنعة بدقة أقل من 10 نانومتر، وبالتالي يعطي تكرار شبكة الفراغات قابلية المادة لنقل الضوء بأي طول موجي معطى.

تركز دراسات الضوئيات بالوقت الحاضر على إنتاج ليزر يُستخدم كمصدر للضوء المستخدَم في الألياف البصرية ، وقد تم في هذا المجال تطوير ليزر من السليكون يقوم بدور التضمين وكدليل موجي، ويحدث ذلك عندما يمرر الليزر إلى الدليل الموجي وبقية الأجزاء المصنوعة من السليكون، حيث ينتج ليزر بشكل محدود يمكن التحكم به من خلال التحكم في تركيب السليكون وذلك بتمرير شعاع أيوني موزّع على السطح لإزالة كمية مناسبة من الذرات للحصول على التركيب المطلوب.

2-في مجال الإلكترونيات النانوية :

تعرّف تقنية النانو بأنها تطبيق علمي يتولى إنتاج الأشياء عبر تجميعها على المستوى الصغير من مكوناتها الأساسية، مثل الذرة والجزيئات. وما دامت كل المواد المكوّنة من ذرات متراصة وفق تركيب معين، فإننا نستطيع أن نستبدل ذرة عنصر ونضع عوضاً عنها ذرة لعنصر آخر، وهكذا نستطيع صنع شيء جديد، وأحياناً تفاجئنا تلك المواد بخصائص جديدة لم نكن نعرفها من قبل، مما يفتح مجالات جديدة لاستخدامها وتسخيرها لفائدة الإنسان.

ينص قانون مور الأول: أن المساحة اللازمة لوضع الترانزستور في شريحة يتضاءل بحوالي النصف كل 18 شهراً. هذا يعني أن المساحة التي كانت تتسع لترانزستور واحد فقط قبل 15 سنة يمكنها أن تحمل حوالي 1000 ترانزستور في أيامنا هذه، ويحمل قانون مور الثاني أخباراً قد تكون غير مشجّعة كنتيجة طبيعية للأول فهو يتنبأ بأن كلفة بناء خطوط تصنيع الشرائح تتزايد بمقدار الضعف كل 36 شهراً. تُعدّ النقاط الكمية من أهم التطبيقات الصناعية في علم النانو وتُعتبر الأساس التطبيقي في أشباه الموصلات للكثير من الصناعات، ويمكن استخدام البلورات النانوية في تطبيقات الصور البيولوجية والمرشحات الضوئية كعناصر فعالة في الديودات الباعثة للضوء وكحساسات في تطبيقات الخلايا الفولتا ضوئية Photovoltaic application cells .

3- في مجال الديودات النانوية :

تُستخدم ديودات الحالة الصلبة الباعثة للضوء Light Emission Diodes في الأسواق التجارية بوفرة. إن هذه الديودات أحدثت ثورة صناعية كبرى في عالم المصابيح بسبب استهلاكها المنخفض للطاقة الكهربائية والشدة الضوئية العالية في التوليد مع كمية منخفضة جداً من الحرارة المنبعثة، مما أدى إلى استخدامها في مصابيح إنارة الشوارع والمتاحف لإنارة اللوحات الفنية. إن الحدث الصناعي الرئيسي هو الاستبدال الشامل للمصابيح بالديودات الباعثة للضوء وذلك لتشغيل جميع لوحات التحكم Control Panels، وفي صناعة شاشات الحاسوب وشاشات العرض الكبيرة.

هنالك العديد من التساؤلات بخصوص استخدام النقاط الكمية كصماماتٍ ثنائيةٍ باعثةٍ للضوء لإقامة العروض المختلفة وكمصادرٍ أخرى للضوء، ومنها على سبيل المثال عروض صمامات النقاط الكمية الثنائية الباعثة للضوء (QD-LED)، وصمامات النقاط الكمية الثنائية الباعثة للضوء الأبيض (QD-WLED). للنقاط الكمية أهمية كبيرة في مجال العروض الضوئية لأنها تبعث الضوء مما يساعد على تصميم عرض ضوئي له القدرة على إنتاج أكثر الألوان دقة لتستقبلها العين البشرية. وتملك طاقةً أقل لأنها ليست ألواناً صافية.

4-البطارية الورقية :تمتاز بأنها مرنة، رقيقة جداً، مخزّنة ومعطية للطاقة، وتُصنع من خلال الجمع بين أنابيب الكربون النانوية مع ورقة عادية من السيللوز. إن المواد النانوية الخاصة هي ذات بعد واحد بأقطار صغيرة جداً لأن القطر الصغير يساعد هذه المواد على الالتصاق بقوة إلى الورقة، مما يجعل للبطارية عمر طويل. السبب وراء اختيار الورق كبطارية هو هيكلها المصمم بشكل جيد من ملايين من الألياف المترابطة، ويمكن لهذه الألياف التمسك أو الالتصاق بأنابيب الكربون النانوية بسهولة وللورقة كما نعلم القدرة على الثني واللف وبالإمكان طيها في مختلف الأشكال والنماذج بالإضافة لخفة وزنها، وتعمل البطارية الورقية كبطارية عالية الطاقة أو كالمكثفة الفائقة.

5-المكثفة الفائقة أو المكثفة عالية السعة capacitor Super:

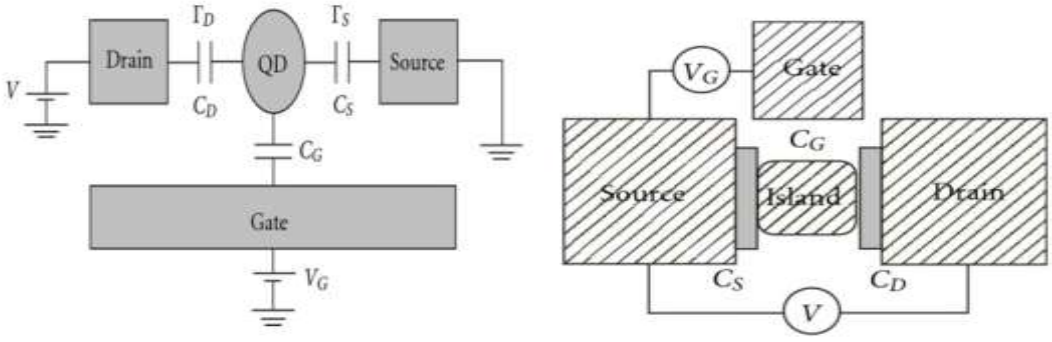
الثورة الجديدة في مجال تخزين وتوفير الطاقة هي مكثفة مزدوجة كهروكيميائية معروفة أيضاً باسم المكثفة الفائقة ultracapacitors، وهي أجهزة تخزين طاقة كهربائية، يمكنها تخزين طاقة عالية الكثافة نسبياً، وتُستخدم هذه المكثفات في الأجهزة المخصصة للبطاريات وهي ممتازة لتخزين الطاقة وتفريغها بوقت قصير وعند وجود تيار عالي، والميزة الأكثر أهمية لها قدرتها أكثر من البطاريات على الشحن والتفريغ باستمرار من دون تدهورها. وتعمل على سد الثغرة كاحتياط كهربائي عند انقطاع التيار الكهربائي، ولكنها باهظة الثمن من حيث التكلفة لكل واط ، وتُستخدم في نُظم الكومبيوتر، وأنظمة ال يو بي أس والمحولات ومزودات الطاقة والكاميرات والمولدات الكهربائية ودارات إقلاع المحركات (خاصة في المناطق الباردة).

6-الترانزستور وحيد الإلكترون (SET):

يسمى الترانزستور(SET) عادة نموذج سعة وهو مبين في الشكل (a -18). يتم صناعته من وصلتين نفقيتين تشتركان بقطب عام. تتكون الوصلة النفقية من قطعتين من المعدن يدعمهما عازل رقيق جداً (حوالي 1 نانومتر). السبيل الوحيد لانتقال الإلكترونات من أحد الأقطاب المعدنية إلى القطب الأخر هو أن تعبر نفقياً من خلال العازل. بما أن الاتصال النفقي عملية منفصلة فالشحنة الكهربائية التي تتدفق من خلال الوصلة النفقية هي من مضاعفات e(شحنة الإلكترون)، وتتكون النقطة الكمية (QD) في غاز إلكترون ثنائي الأبعاد(2DEG) باستخدام معيار الطباعة الحجرية لشعاع الإلكترون. يتم توصيل النقطة الكمية إلى قطبي المنبع والمصرف من خلال الحواجز النفقية ويمكن السيطرة على الطاقة الموجودة فيها من خلال قطب البوابة الذي يقترن بشكل سعوي معها كما بالشكل (b-18). يتم تشكيل التيار دورياً من خلال النقطة الكمية بواسطة جهد البوابة المعّرف بالعلاقة (1) عدد الإلكترونات ثابت عندما يكون التيار صفر ولكنه يختلف على جانبي قمة التيار.

$$V_G = (2n + 1)\, e/2C_G \qquad (1)$$

7-توجد تطبيقات أخرى للترانزستورات مثل الترانزستور ذو الأثر الجزئي، والترانزستور ذو أنبوب الكربون النانوي (CNT,[18])، وترانزستور ذو الأثر الحقلي الدوار(MFET).



b **a**

الشكل (18): (a) بنية الترانزستور(SET)، (b) الرسم التخطيطي المكافئ من SET.

يتم توصيل النقطة الكمية بقطبي المنبع والمصرف من خلال حواجز نفقية صغيرة.الطاقة في النقطة الكمية يمكن تعديلها من قبل قطب البوابة المتصل سعوياً مع النقطة الكمية، يتم تطبيق انحياز DC (V_D) ويحسب التيار كتابع ل V_D و V_G، بارامترات SET هي $C_S, C_D, C_G, \Gamma_S, \Gamma_D$.

8- حاسوب من أنابيب الكربون النّانَوِيّة :

تمّ بناء حاسوب من أنابيب الكربون النانويّة (النانومترية) شامل وفعال وظيفيًّا، ويمثل هذا تقدماً كبيراً في مجال المواد الإلكترونية الناشئة. تُوصف الترانزستورات المصنوعة من أنابيب الكربون النانومترية شبه الموصلة بأنها بديل أكفأ في استخدام الطاقة من ترانزستورات السيليكون التقليدية في الأجيال القادمة من الرقائق، وكان التقدم بطيئاً في هذه التقنية نظراً لصعوبة إدماج أجهزة أنابيب الكربون النانومترية في الدوائر الإلكترونية واسعة النطاق.

أورد شوليكر وزملاؤه مؤخراً أول حاسوب من أنابيب الكربون النانومترية، يحتاج تصميمه وتصنيعه جيشاً من المهندسين حتى يكون فعال وظيفيّاً[17]–[4]–[2]، لذا يجدر بالذِكْر أنّ مجموعة بحثْ صغيرة صنعت هذا الحاسوب واعتمدت نهجاً بشقين:

الشق الأول: اعتمدوا على خبراتهم التقنية في تصنيع ورص مصفوفة أنابيب الكربون النانوية على ركيزة، وطّوروا طُرقاً لتعطيل(على الركيزة) كل أنابيب الكربون المعدنية مما يُعّرض سلوك النظام شبه الموصل المرغوب به للخطر، وتم تغطية سطح الركيزة الناتج بمصفوفة متراصة بشكل كبير من الأنابيب النانوية شبه الموصلة. حينئذ استطاع الباحثون تصنيع ترانزستورات تعمل بإتقان باستخدام تصميم نظام تخطيط ترانزستورات متقدم وتقنيات الطباعة الحجرية، حيث يتكون كل ترانزستور من ترتيب موازٍ لعدة أنابيب نانوية شبه موصلة، واستطاع الباحثون تشكيل عناصر ودوائر منطق كهربائية كيفية بالربط السليم بين الترانزستورات. يماثل المنطق الأساسي لهذه الأجهزة منطق أشباه موصلات أكسيد المعادن الموجبة (PMOS) التي استخدمت في الأيام المبكرة لترانزستورات أشباه الموصلات قبل أن تسود أشباه موصلات أكسيد المعادن السالبة (NMOS) في 1970 تقريبًا. حيث يتم تشغيل ترانزستور PMOSبإطلاق جهد كهربائي سالب على قطب بوابة التحكم، ويتم على النقيض تشغيل ترانزستور NMOS بإطلاق جهد كهربائي موجب على البوابة.

أما **الشق الآخر** لنهج شوليكر وزملائه فهو اختيار أبسط تصميم ممكن للحاسوب، وبالتالي خفض تعقيد أجهزة الدوائر الكهربائية وعدد الترانزستورات المطلوب لتحقيق وظائف الحاسوب المرغوبة. اختار الباحثون تصميم حاسوب يعمل على وحدة نقل بيانات واحدة (بت واحدة) ويستخدم أمراً واحداً بخلاف حواسيب اليوم التي تنخرط فيها 32 أو 64 بتًّا مُستخدمةً أوامر عديدة، لكن إمكانية تحقيق أي عملية يتطلب عدداً من وحدات نقل البيانات بعمليات عدة تعمل

باستخدام بت واحدة، ويحتاج هذا الأسلوب وقتاً أطول. يُنفذ الحاسوب أمراً وحيداً هو (SUBNEG) اطرح وتفرّع في حالة السالب الذي يمكن تنفيذه في هذا التصميم باستخدام 20 ترانزستوراً فقط من الأنابيب النانوية. يأخذ الأمر SUBNEGمحتوى عنوان ذاكرة أولى ويخصّه من محتوى عنوان ذاكرة ثانية، ثم يخزّن النتيجة في عنوان الذاكرة الثانية، أما إذا كانت نتيجة الطرح سالبة فيتم تخزينها في عنوان ذاكرة ثالثة، ولأن الأمر يتضمن هذا العبارة الشَرطية فإنه يضمن اكتمال عملية ال Turing أي يستطيع القيام بأي عملية حسابية مادامت الذاكرة المتاحة للحاسوب كافية. بكلمات أخرى يتيح هذا الأمر صنع حاسوب تطبيقات شامل.

استطاع حاسوب شوليكر وزملائه تشغيل لوجارثمين للحساب، وفرز الأعداد الصحيحة معاً. وهو أبعد ما يكون عن معايير التنافسية الحالية من حيث الأداء، ويحدّ الاستخدام الحصري لمنطق ترانزستورات أشباه موصلات أكسيد المعادن الموجبة توسيع نطاق تطبيق هذا النهج، لأن هذا المنطق يتطلب أن يختلف عرض أصغر الترانزستورات عن عرض أكبرها بأكثر من 20 مرة، كذلك يستهلك هذا المنطق طاقة كهربائية مستمرة بسبب تدفق تيار كهربائي دائم في الدوائر الرئيسية.

تعمل رقائق الحاسوب السيليكونية الحالية بتقنية أشباه موصلات أكسيد المعادن التكاملية (CMOS) والتي تستخدم ترانزستورات أشباه موصلات أكسيد المعادن الموجبة والسالبة متساوية العرض تقريباً في اتصال متسلسل. مما يجعل هذه التقنية أكثر قابلية للتطبيق وأقل استهلاكًا للطاقة من المنطقين الآخرين NMOS PMOS. جعل منطق (CMOS) قيد التنفيذ بدوائر أنابيب الكربون النانوية واضح وبسيط [4]-[3] لكن تنفيذه بالنسبة إلى شوليكر وزملائه كان سيضاعف عدد خطوات تصنيع الحاسوب، ومع ذلك كان عائد التصنيع (عدد الترانزستورات الشغالة) سينخفض. وذلك لأن كل خطوة إضافية تصاحبها احتمالات إضافة عيوب بالأجهزة. لذا كلما زاد عدد خطوات الإنتاج زادت احتمالات خروج أجهزة مُعيبة. أظهر تاريخ تصنيع الرقائق أن زيادة عائد الإنتاج هو أساساً مسألة جهود، لذا ليس هناك عائق حقيقي أمام تصنيع دوائر قائمة على الأنابيب النانوية باستخدام (CMOS). كان عرض أصغر الترانزستورات التي استخدمها شوليكر وزملاؤه حوالي 8 ميكرومتر نظراً إلى الطبيعة الإحصائية لعملية تصنيع أنابيب الكربون النانوية التي استخدمها الباحثون. هذا يترك السؤال مفتوحًا حول قابلية طريقتهم للتطبيق بمختلف المستويات بنهاية المطاف، وإمكان جعلها على قدم المساواة مع تقنيات السيليكون الحالية أو متقدمة عليها. ستعتمد الإجابة على مستوى دقة ترتيب الأنابيب النانوية على الركيزة، ولم يتوقف التقدم في هذا المجال[5]، وأصبح مجدياً الوصول إلى كثافة 500 أنبوب نانوي لكل ميكرومتر في المستقبل القريب وبناء على ذلك إذا تركزت الجهود البحثية باتجاه الوصول إلى نسخة أكبر من حاسوب شوليكر وزملائه (64 بت) وصغيراً من حيث حجم الترانزستور (20 نانومتراً)، فربما نستخدم هذا الحاسوب قريباً.

تطوير محاكي كمي للأجهزة الإلكترونية النانوية الناشئة:

لقد طورت مجموعة من الباحثين NEMO-VN2 وهو جهاز كمي جديد ينمذج الأدوات التي تحاكي طائفة واسعة من أجهزة الكم مثل الديود النفقي(RTD)، الترانزستور وحيد الإلكترون(SET)، الترانزستور ذو الأثر الجزئي، الترانزستور ذو أنبوب الكربون النانوي(CNT)، وترانزستور ذو الأثر الحقلي الدوار(MFET). يتم في هذا العمل استخدام دالة غرين لحالة انعدام التوازن(NEGF) للقيام بدراسة شاملة للأجهزة الإلكترونية النانوية الناشئة.

يستخدم NEMO-VN2 برنامج Matlab لحل معادلة شرودنجر للحصول على خصائص الجهد الحالي لأجهزة الكم.

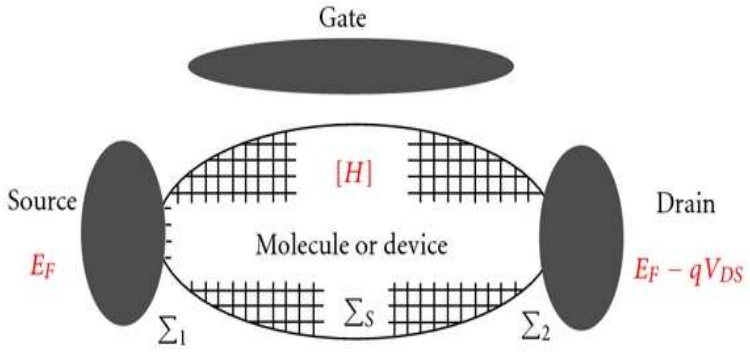
ستصبح العملية التكنولوجية وقياس الأبعاد لجهاز (CMOS) أكثر صعوبة كلما اقتربت صناعة أنصاف النواقل من مرتبة ال 10نانومتر (6 نانومتر طول القناة المادية). وسوف تقترب في النهاية من نهاية مقاربة وفقاً لخارطة الطريق التكنولوجية الدولية لأنصاف النواقل لأجهزة البحوث الناشئة بعد هذه الفترة من(CMOS) التقليدي[1]، من الممكن الاستمرار في التوسع الوظيفي من خلال دمج الأجهزة الإلكترونية البديلة على منصة سليكون، وتشمل هذه الأجهزة الإلكترونية البديلة هياكل 1D مثل أجهزة الكم المذكورة في بداية الفقرة.

لا تزال أجهزة الإلكترونيات النانوية في مراحلها الأولى على الرغم من هذه الإمكانيات المثيرة، كلفة وصعوبة التصنيع تكمن في صعوبة بناء واختبار مصفوفات أجهزة الكم من اجل كفاءة أفضل، والمهندسون بحاجة إلى أداة تتنبأ بالخصائص الإلكترونية كدالة لهندسة الأجهزة وتكوينها في وضع أكثر علمية، محاكي من هذا القبيل سيعزز كثيراً فهم تأثيرات الكم التي تقود عملية النقل وتؤمن وسيلة للتحقيق في المفاهيم الجديدة في الجهاز. حتى الأجهزة التقليدية تتطلب تصحيحاً لتأثيرات الكم المرتبطة مع مميزات الجهاز الأصغر حجماً. على سبيل المثال تحمل أجهزة MOS آثار حبس الإلكترونات في طبقة الانعكاس، وهذه الظاهرة تدل على تقليل ثخانة الأكسيد بدلاً من الحجم الكلي للجهاز، فتأثيرات الكم تصبح هامة كلما قل سمك طبقة الأكسيد لأدنى من3 نانومتر الذي سيتم قريباً وضعه كمعيار للدارات المتكاملة المصنّعة، والمشاكل من هذا القبيل سوف تصبح أكثر انتشاراً كلما استمر تقليص الأجهزة.

تتطلب نمذجة أجهزة الإلكترونيات النانوية نهجاً أساسياً لميكانيك الكم، تم اقتراح العديد من الصيغ لتصحيح الكم للنماذج الكلاسيكية من الأجهزة الإلكترونية. وتشمل هذه التصحيحات تصحيحات الكم الخاصة ب [MOSFET]-[5] [6]، وتصحيحات الكم العامة لكل من الجرف والانتثار (drift-diffusion)، والهيدروديناميكية (hydrodynamic) [8]-[7] ونماذج معادلة النقل لبولتزمان[9] (Boltzmann transport equation)، ولذا تحتاج صناعة أنصاف النواقل لميكانيكية كم جديدة تعتمد على أداة TCAD.

كان أحد الأهداف الهامة لمشروع NEMO-VN2هو صنع محاكي سهل الاستخدام ويوفر أكبر قدر ممكن من التحكم بكل جانب من جوانب المحاكاة، ولديه مجموعة من النماذج التي تسمح للمستخدم بالمبادلة بين سرعة الحساب والدقة، ويشمل أيضاً واجهة المستخدم الرسومية(GUI) من ماتلاب التي تمكن دخول البارامترات، والتحكم بالحساب، وعرض النتائج وطرق تحليل البيانات في الموقع.

حققت مؤخراً مجموعات مختلفة النجاح في سعيها لبناء محاكي من أجل الترانزستور SET [11]-[10] وعمليات محاكاة مونت كارلو (مثال [12] KOSEC) وطرق المعادلات الرئيسية[14]-[13] صحيحة تماماً لكنها تستهلك وقتاً كبيراً. في المقابل النموذج الذي يستخدم طريقة دالة غرين لحالة انعدام التوازن(NEGF) [15]-[16] المستخدمة عادة في الأجهزة النانوية متفوقة من حيث البساطة، وأُستخدمت هذه الطريقة في أجهزة الكم لنقل عمليات المحاكاة الموضحة في الشكل(19).



الشكل (19): ترانزستور عام يتألف من قناة الجهاز متصلة مع قطب المنبع وقطب المصرف. تيار المنبع– المصرف يمر عبر قطب ثالث هو البوابة، وتظهر في الشكل أيضاً الكميات المعنية في NEGF.

هنا H هو الجهاز هاملتونيان، و $\Sigma_{1,2}$ توابع الطاقة الذاتية تعرض نقاط الاتصال المثالية الشبه لانهائية بين المنبع والمصرف. Σ_S هي الطاقة الذاتية للتفاعل الهيدروجيني e-ph، ومجموعات واحدة $\Sigma_S = 0$ للتقريب البالستي.

الاستنتاجات والتوصيات :

علم النانو هو علم جديد ما يزال في مراحله الجنينية في المختبرات وتحت المجاهر النانوية ، ومن الطبيعي أن يكون هناك عدة مخاوف ضمن إطار هذا العلم الواسع، كما أن حداثة هذا العلم أدت إلى العديد من الصعوبات للباحثين فيه، فالبرامج النانوية ما زالت محتكرة بعض الشيء إذا صح التعبير.

يرجى من المؤسسات المعنية دعم عملية البحث العلمي في مجال علم النانو، وإيجاد مراكز للبحث وتمويلها، وتشكيل فرق من الباحثين وتدريبهم، وتطوير المناهج التعليمية بإدخال هندسة وعلوم النانو على مناهج التعليم العالي المتعلقة بهذا المجال، والعمل بجد لمواكبة التطور السريع بهذا العلم.

المراجع:

[1] HARI SINGH NALWA**,** *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Stevenson Ranch, American Scientific publishers*, 2003.

[2] SUSAN B. SINNOTT and RODNEYANDREWS, "*Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties and Applications, Critical Reviews in Solid state and Materials Sciences*", 26(3): 145-249 (2001).

[3] M. DAENEN, R.D DE FOUW, B.HAMERS, P.G.A JANSSEN,K.SCHOUTEDEN and M.A.J VELD, *The Wondrous World of Carbon Nanotubes, Eindhoven University of technology*, Feb 2003.

[4] FRANS KREUPL, Electronic; *The carbon-nano tube computer has arrived* Nature, vol. 501, pp.495-497, 2013.

[5] W. H¨ANSCH, T. VOGELSANG, R. KIRCHER, and M. ORLOWSKI, "*Carrier transport near the Si/SiO2 interface of a MOSFET*" Solid State Electronics, vol. 32, no. 10, pp. 839–849, 1989.

[6] P. VANDE VOORDE, P. B. GRIFFIN, Z. YU, S. Y. OH, and R. W. DUTTON, "*Accurate doping profile determination using TED/QMmodels extensible to sub-quarter*

micron nMOSFETs," in Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM '96), pp. 811–814, IEEE, December 1996.
[7] D. L. WOOLARD, M. A. STROCIO, M. A. LITLEJOHN, R. J. TREW, and H. L. GRUBIN, "*A new nonparabolic hydrodynamic model with quantum corrections*," in Computational Electronics: Semiconductor Transport and Device Simulation, pp. 59–62, Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass, USA, 1991
[8] J. P. KRESKOVSKY and H. L. GRUBIN, "*Electron transport using the quantum corrected hydrodynamic equations,"* VLSI Design, vol. 3, no. 2, pp. 179–200, 1995
[9] H. L. GRUBIN and J. P. KRESKOVSKY, "*Quantum moment balance equations and resonant tunnelling structures*," Solid State Electronics, vol. 32, no. 12, pp. 1071–1075, 1989.
[10] K. UCHIDA, K. MATSUZAWA, J. KOGA, R. OHBA, S. I. TAKAGI, and A. TORIUMI, "*Analytical single-electron transistor (SET) model for design and analysis of realistic SET circuits*," Japanese Journal of Applied Physics, Part 1, vol. 39, no. 4, pp. 2321–2324, 2000.
[11] S. MAHAPATRA, A. M. IONESCU, and K. BANERJEE, "*A quasianalytical SET model for few electron circuit simulation,"* IEEE Electron Device Letters, vol. 23, no. 6, pp. 366–368, 2002.
[12] Y. S. YU, J. H. OH, S.W. HAWNG, and D. AHN, "*Implementation of single electron circuit simulator by SPICE: KOSECSPICE*," in Proceedings of Asia Pacific Workshop: Fundamental Application Advanced Semiconductor Device, pp. 85–90, 2000.
[13] K. K. LIKHAREV, *"SETTRAN—a simulator for single lectron transistor*," http://hana.physics.sunysb.edu/set/software.
[14] H. INOKAWA and Y. TAKAHASHI, "*A compact analytical model for asymmetric single-electron tunneling transistors*," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 50, no. 2, pp. 455–461, 2003.
[15] S. DATTA, *Quantum Transport: Atom to Transistor*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.
[16] D. S. HIEN, H. L. THU THAO, and L. H. MINH, "*Modelling transport in single electron transistor*," Journal of Physics, vol. 187, Article ID 012060, 2009.
[17] J. M. MARULANDA, *Carbon Nanotubes Applicationson Electron Devices*,Intech, 2011.
[18] D. S. HIEN, N. T. LUONG, T. T. A. TUAN, and D. V. NGA, "*3D simulation of coaxial carbon nanotube field effect transistor*," *Journal of Physics*, vol. 187, Article ID 012061, 2009.