الفصل السادس

أنابيب الكربون فائقة الصغر
Carbon Nanotubes

الفصل السادس – أنابيب الكربون فائقة الصغر
Carbon Nanotubes

المقدمة

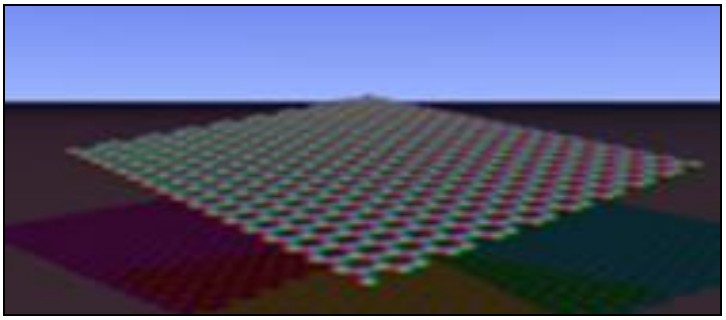
يقاس التقدم التكنولوجي في العصر الحالي بالقدرة على تصنيع أجهزة الكترونية أقل حجماً وأعلى كفاءة من حيث السرعة والجودة في أداء العمليات المختلفة. ففي الماضي (الجيل الأول) كانت الأجهزة الإلكترونية كبيرة الحجم نوعاً ما، فمثلا كان التلفزيون أبيض وأسود وبحجم كبير، ثم جاء (الجيل الثاني) جيل الترانزستور (Transistor) الذي جعل الأجهزة الإلكترونية أصغر حجماً وأفضل كفاءة ، ثم جاء (الجيل الثالث) وهو جيل الدوائر التكاملية (IC) وهي عبارة عن قطعة صغيرة جداً تقوم بنفس مهام الترانزستور بحيث تساعد هذه الدوائر على تصغير حجم الأجهزة وترفع من كفاءتها ومن وظائفها[88] وبعد ذلك ظهر (الجيل الرابع) هو جيل المعالجات الصغيرة (microprocessors) والذي أحدث ثورة كبيرة في مجال الإلكترونيات بإنتاج الحاسبات الشخصية الصغيرة (microcomputers) التي كان لها دور كبير في ثورة المعلومات وفي التقدم الذي حدث في العديد من المجالات العلمية والصناعية والتعليمية وفي مختلف جوانب الحياة. ومن ثم وخلال السنوات القليلة الماضية برز إلى الأفق مصطلح جديد وأصبح محط إهتمام جميع العلماء بشكل كبير وهو مصطلح تقنية "النانو" (الجيل الخامس) هذه التقنية هي تقنية الأنابيب متناهية الصغر (Nanotubes)

وقبل البدء بالتحدث عن أنابيب الكربون فائقة الصغر لا بد من معرفة شرط أساسي وهو أنه يجب أن تكون المواد المستخدمة هو مقياس "النانو" 1-100 نانومتر لذلك فإن المواد المستخدمة يجب أن يتم تقطيعها إلى أجزاء لاتزيد أقطارها عن 100 نانومتر

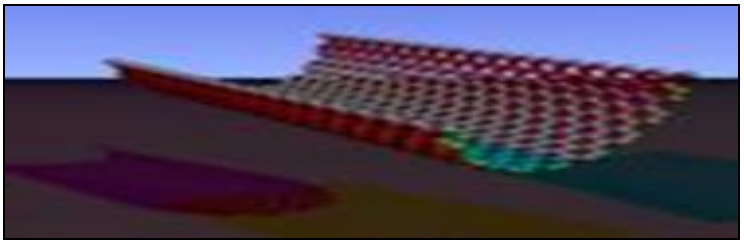
ولكن ماهى هذة المواد وماهو الشكل الهندسى للأجزاء التى سنتنتج عن عملية التقطيع؟؟

يمكننا إستخدام عدداً من العناصر والمركبات طبقاً للعلاقة بين الحجم ومساحة السطح فإننا سنلاحظ بأن أفضل شكل هندسي يعطينا مساحة سطح اكبر هو ما كان سمكه صغيرا وطوله أكبر.
والشكل الآسطواني المفرغ (أنبوبة) يعطي النتيجة المطلوبة لأنه يعطي حيزاً أقل مع الحفاظ على مساحة السطح وذلك كما هو مبين بالشكل أدناه.

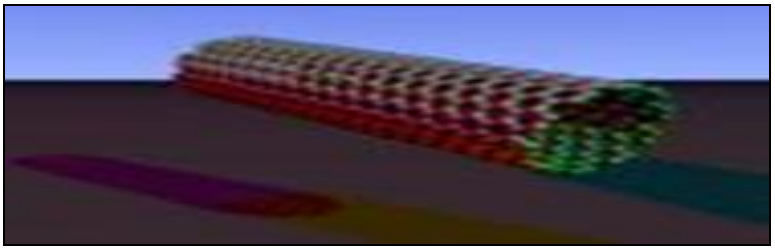
[88] د. محمود محمد سليم صالح، مجلة النانو، العدد الثاني، فبراير 2009 مقال بعنوان أنابيب الكربون النانونية ص.36



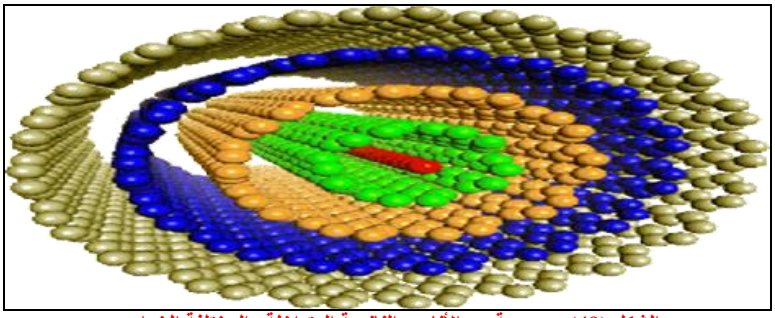
الشكل بالصورة أعلاه هو لشريحة مسطحة ولها حيز نتيجة لطولها وعرضها وإرتفاعها،سنقوم بثنى حواف هذة الشريحة كما هو موضح بالصورة أدناة



ثم سنقوم بثني الحواف إلى أن تلتقى الحواف مكونة شكلاً إسطوانياً مفرغاً كما هو بالشكل أدناه



من الواضح أن الحيز الذي تحتله الإسطوانه في الشكل أعلاه هي أقل من الحيز الذي يشغله الشكل المسطح، وبالرغم من ذلك فنرى أن هذا الحجم كبير حيث أن المساحة الفارغة هي الفراغ الموجود في منتصف الأنبوبة ، لذا يجب علينا إستغلالها بشكل جيد. سنقوم بإدخال مجموعة أخرى من الأنابيب ذات أنصاف أقطار متدرجة في الصغر لتصبح كما يلي:



الشكل (49) مجموعة من الأنابيب النانوية المتداخلة والمختلفة الخواص

من المؤكد بأن وضع الأنابيب بالشكل أعلاه يعطينا مساحة سطح كبيرة جداً نتيجة لتداخل الأنابيب ولكن!! ماذا لو أن لكل أنبوبة من هذه الأنابيب وظيفه مختلفة عن الأنبوبة الأخرى؟؟؟؟

سيصبح تراكيب الأنابيب بهذة الصورة عبارة عن نظام أنابيب وظيفى يمكنة أداء إحدى المهام المركبة وسيكون العمل من خلال الأنابيب فائقة الصغر Nanotubes وأشهرها أنبوبة الكربون فائقة الصغر Carbon Nanotubes وقد يتم دمج مواد أخرى داخل أنابيب الكربون ويعاد ترتيبها لتأخذ أوضاعاً طويلة وسمَيت (Vertically Aligned Carbon Nanotubes Arrays) ومن هذه المواد[89]:

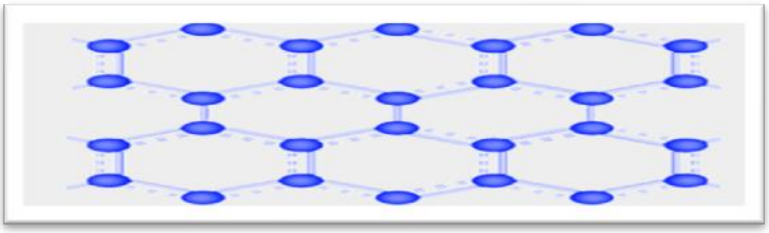
النحاس Copper
الكربون الزجاجى Glassy Carbon
شرائح الجرافيت Foil Graphite
الموليبدنوم Molybdenum
التيتانيوم Titanium
ستانليس ستيل Stainless Steel
البلاتين Platinum
استرانشيوم Strontium
الكوارتز

ولكن ماهى فائدة هذة الأنابيب وكيف يمكنها أن تقوم بإحدى الوظائف؟ لكي نعرف الإجابة على هذا السؤال ينبغي علينا أن نعرف ماهي أنبوبة الكربون الفائقة الصغر؟؟ أنابيب الكربون كما تحدثت سابقاً هى أنابيب من الكربون حجمها يقع فى إطار مقياس "النانو" Nano Scale

[89] موقع جامعة أم القرى، أنابيب الكربون فائقة الصغر، http://uqu.edu.sa

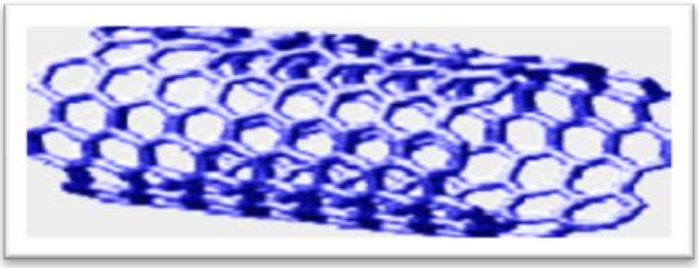
ما هي الأنابيب النانوية وما فائدة أنابيب "النانو" الكربونية[90]:

أنابيب الكربون بحجم "النانو"، هي تقنية شديدة التطور وهي عبارة عن إسطوانات فارغة في شكل أنابيب بحجم النانومتر كما تحدثنا سابقاً. وهي تتكون من مجموعة ضخمة من الهياكل السداسية التي تتكون بدورها من ذرات الكربون. والكربون نانوتيوب تم رصدها فى عام 1991م وفى شركة NEC للصناعات الإلكترونية وقد تم إكتشاف Carbon Nanotubes لأول مرة بواسطة العالم اليابانى سومو ليجيما(SumioLijima) ، كان سومو ليجيما يقوم بفحص الرماد الناتج عن عملية تفريغ كهربى يحدث بين قطبين من الكربون ولم يكن هذا الرماد يحتاج لفحص ولكن سوميو ليجيما لاحظ شيئاً!! لاحظ أن هناك بعض اللمعان أو البريق داخل هذا الرماد فأعتقد أن الكربون تحول إلى ماس فقرر فحصة بطريقة جيدة. لذا، أستخدم سوميو ليجيما الميكروسكوب الإلكترونى لفحص الرماد وكانت نتيجة الفحص أن جزيئات الكربون فى وضع غير طبيعى حيث أنة من المفترض أن يكون ترتيب جزيئات الكربون كما فى الشكل التالى:



الشكل (50) صورة توضح جزيئات الكربون

ولكنة فوجىء بشىء آخر وهو أن جزيئات الكربون قد ألتفت لتتصل مع بعضها مكوَنة ما يشبة الأنبوبة كما في الشكل التالي:



الشكل (51) صورة لجزيئات الكربون وهي متصلة ببعضها

[90] د. محمود محمد سليم صالح، جامعة الملك سعود، مقال بعنوان (أنابيب الكربون النانوية)، مجلة النانو، العدد 2 عام 2009 ص.37

تمت إعادة التجربة عدة مرات وفى كل مرة كان هناك جديد بعد كل فحص وكان مجمل ماتوصل إلية سومو ليجيما ما يلي:

1. جزيئات الكربون تأخذ ترتيباً يشبه الأنابيب.
2. أنابيب الكربون الناتجة غير متساوية في الحجم.
3. تنتج أنابيب متعددة الطبقات بمعنى أنها مجموعة من الأنابيب المتداخلة (Multi-Wall) ومختلفة في اللون والخواص.

هذا الإكتشاف لفت إنتباه شركة IBM فقررَت الدخول إلى هذا المجال، ففي عام 1993م تمكَن العالم دونالد بثيون (Donald Bathune) من شركة IBM لتكنولوجيا الحاسبات في الولايات المتحدة الأمريكية من رصد أنابيب كربون نانوية ذات جدار واحد (single-wall)، يبلغ قطر الأنبوب الواحد منها 12 نانومتر

ثم أنطلق العلماء بعد ذلك في مجال النانوتيوب حتى أستطاع فريق من العلماء الصينيين من رصد أصغر نانوتيوب في العالم الذي يصل قطرة إلى 0.5 نانومتر فقط (مع العلم أن أقل قطر لأي شيء في العالم نظرياً هو 0.4 نانو متر) وتم رصد هذا الأنبوب الصغير

خصائص أنابيب "النانو" الكربونية :

ماهو الشيء الذي جعل العلماء والباحثين يهتمون بهذه الأنبوبة؟

1. إن الخواص الميكانيكية المذهلة لأنابيب "النانو" الكربونية تعود لقوى الربط الغير عادية بين جزيئاتها. فمعامل يونج (معامل صلابة المادة) والذي هو نسبة الإجهاد الميكانيكي إلى الإنفعال الميكانيكي لأنبوب "النانو" الكربوني يصل إلى حوالي 1000 GPa وهذه القيمة أكبر من قيمة معامل يونج للفولاذ والذي هو أصلب المعادن المعروفة حتى الآن بأكثر من خمس مرات.
2. يبلغ إجهاد الكسر لأنابيب "النانو" الكربونية حوالي 63 MPa وهذا الرقم أكبر من إجهاد الكسر للفولاذ بخمسين مرة.
3. أيضاً من الخصائص الفريدة لأنابيب "النانو" الكربونية هي إنخفاض كثافتها حيث تتراوح كثافة هذه الأنابيب ما بين (1.22gm/cm3 الى 1.4 gm/cm3) بينما تبلغ كثافة الألمونيوم وهو من أخف المعادن المعروفة حتى اليوم 2.7 gm/cm3 ، وهذا يعني أن هذه الأنابيب سيكون لها تطبيقات كبيرة جداً في مجال تقنيات الفضاء والطيران ذلك لأنها ذات كثافة منخفضة جداً أي أنها خفيفة الوزن وفي نفس الوقت ذات قوة و صلابة عالية جداً تفوق صلابة المعادن.
4. أنابيب "النانو" الكربونية لها خصائص إلكترونية غير إعتيادية، فيمكن أن تكون موصلة كما يمكن أن تكون شبة موصلة وذلك بناءاً على تركيبها الجزيئي، فبعض هذه الأنابيب تمتلك موصلية كهربائية أعلى من النحاس فبعض الحسابات تشير الى أن هذه الأنابيب تستطيع حمل تيار كهربائي بقوة

مليار أمبير لكل سم مربع، علماً بأن النحاس ينصهر تماماً أذا مر فيه تيار بقوة مليون أمبير لكل سم مربع.

5. وبعض هذه الأنابيب لها خصائص السيلكون أي أنها تتصرف مثل أشباة الموصلات. أنابيب "النانو" الكربونية لها أيضاً خواص حرارية غير إعتيادية فهي تملك موصلية حرارية أعلى مرتين من الألماس والذي يعد أكثر المواد توصيلاً للحرارة وكل هذه الخواص وغيرها تعتمد على طبيعة التركيب الجزيئي لهذه الأنابيب.

طرق تحضير أنابيب "النانو" الكربونية:[91]

1. تترابط الذرات ثلاثياً في أنابيب الكربون الدقيقة في رقائق منحنية تشكل إسطوانات مفرغة يتم الحصول عليها بطريقة القوس الكربوني مع تغيير طاقته لكي يصبح التيار مستمراً بدلاً من المتردد.
2. يمكن الحصول على هياكل أنبوبية الشكل في أحد الرواسب على القطب وهذه الأنابيب مكونة بالكامل من الكربون وتمت تسميتها بالأنابيب النانومترية نظراً لقطرها الذي يبلغ عدة نانومترات.
3. توجد طرق عديدة لإنتاج جزيئات الكربون المكوَنة من الأنابيب النانومترية وهي:
   - عمل تحليل كهربي بإستخدام أقطاب من الجرافيت في أملاح منصهرة
   - تحليل حراري محفز للهيدروكربونات
   - تبخير للجرافيت بإستخدام الليزر
   - بإختلاف طرق عمل الأنابيب النانومترية تكون لها خواص إلكترونية مختلفة فالبعض متوقع أن يكون معدنياً والبعض الآخر أشباه موصلات.
   - إن هذه الأنابيب النانومترية قوية بدرجة كبيرة، فهي أقوى بمئات المرات من الصلب ويرجع ذلك لشكلها الهندسي السداسي الذي يمكنَه توزيع القوى والتشوهات بسبب قوة رابطة الكربون- كربون لذا فلها خواص إلكترونية غير عادية.

التركيب الدقيق لأنابيب "النانو" الكربونية

هناك نوعان من أنابيب "النانو" الكربونية وهي:

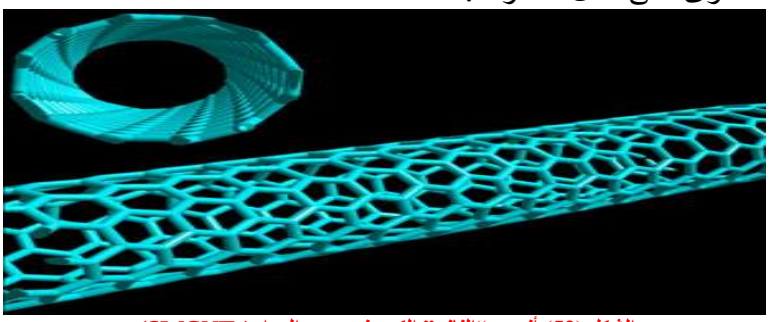
1. أنابيب "النانو" الكربونية وحيدة الجدار
2. أنابيب "النانو" الكربونية متعددة الجدر.

---

[91] د.محمود محمد سليم صالح أستاذ مشارك بقسم العلوم الطبيعية والتطبيقية، أنابيب النانو الكربونية، www.knol.com

1. أنبوب "النانو" الكربوني وحيد الجدار

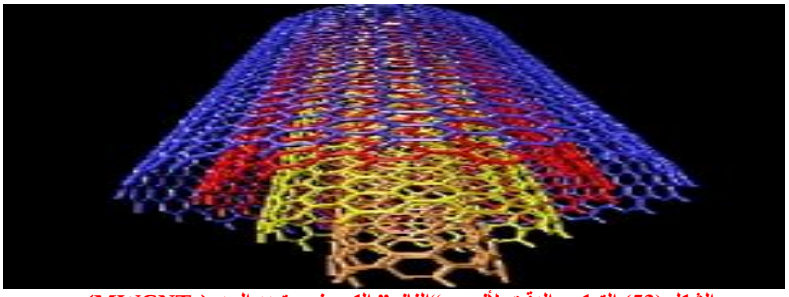
- يتراوح قطره من 0.7 نانو متر الى 10 نانومتر وفي أغلب الحالات يكون معدل قطره في حدود 2 نانومتر
- يصل طوله إلى عدة ميكرومترات
- له نهاية واحدة مغلقة على الأقل وذلك بتركيب نصف كروي يشبة القبعة
- سماكة جدار هذا الأنبوب هي ذرة كربون واحدة
- هو عبارة عن شريحة كربون (شريحة جرافيت) ذات سماكة ذرة واحدة تطوى على شكل أسطوانة.



الشكل (52) أنبوب "النانو" الكربوني وحيد الجدار(SWCNTs)

2. أنبوب "النانو" الكربوني متعدد الجدر

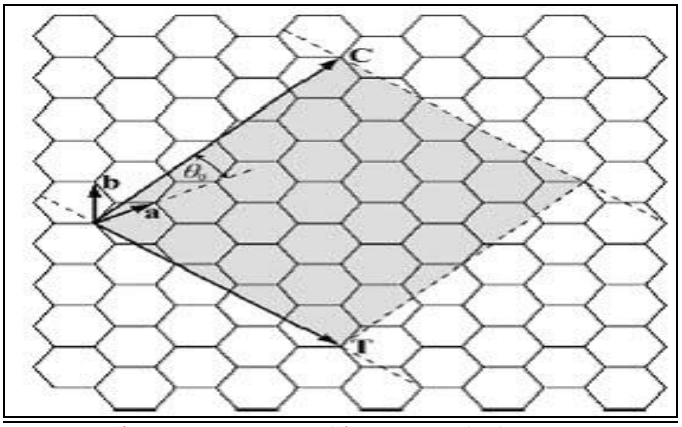
- عبارة عن مجموعة من أنابيب "النانو" وحيدة الجدار المتداخلة وذات المركز المتحد
- يتراوح قطر هذا الأنبوب مابين 10 نانومتر الى 30 نانومتر
- يبلغ عدد الأنابيب وحيدة الجدار المكونة له غالباً ما بين 7 الى 20 أنبوب.



الشكل (53) التركيب الدقيق لأنبوب "النانو" الكربوني متعدد الجدر(MWCNTs)

أشكال الأنابيب النانوية[92]:

1. أنابيب الكربون النانوية هي عبارة عن ألواح من الجرافيت تم ثنيها لتأخذ الشكل الأسطواني المجوف.
2. أبعاده الجانبية تبدأ من 0.2 إلى عدة نانومترات.
3. يكتسب الأنبوب النانوي خواصه الفيزيائية من خواص الجرافيت ذي البعدين
4. توجد ثلاثة أشكال هندسية لأنابيب الكربون النانوية تعتمد على طريقة ثني (roll up) لوح الجرافيت للحصول على الشكل الأسطواني وهي:
   أ. التركيب المتعرج (Zig-zag) وله الأبعاد (n,0)
   ب. تركيب "تشارل (Chiral) وله الأبعاد (m,n)
   ج. تركيب "كتف الكرسي (Armchair) وله الأبعاد (n,n)



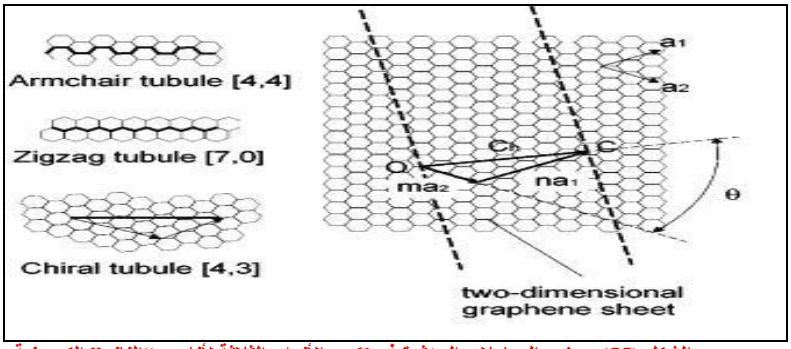
الشكل (54) لوح جرافيت ذو بعدين يمكن ثنية في إتجاة معين للحصول على الأنبوب النانوي

ويعود السبب في تكوَن هذه الأنواع الثلاثة إلى معاملين مهمين هما:

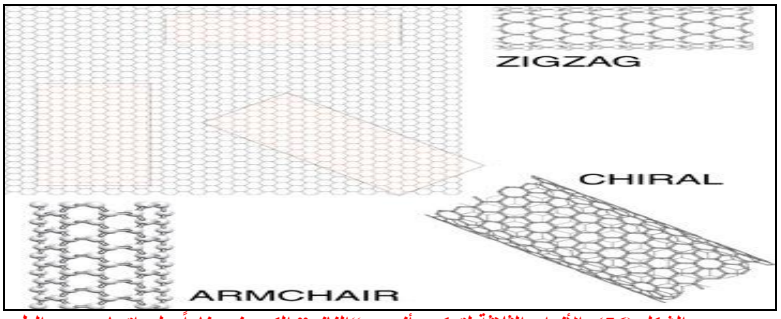
1. متجه تشارل لأنبوب "النانو" الكربوني chiral vector of the nanotubeو يرمز له بالرمز Ch ويعرف رياضيا بالعلاقة التالية = Ch nâ1 + mâ2حيث n و m أرقام صحيحة و â1 و â2 المتجهان الأحاديان ضمن الشبكة ثنائية الأبعاد
2. زاوية تشارل chiral angle ويرمز لها بالرمزO وهي الزاوية المحصورة بين معامل تشارول Ch والمتجهâ1
3. وهناك معامل آخر له تأثير في إختلاف تركيب أنبوب "النانو" الكربوني وهو محور طي شريحة الجرافيت المكوَنة لأنبوب "النانو" كربون وذلك لأن إختلاف مواضع إلتقاء متجه تشارل يؤدي إلى إختلاف نوع الأنبوب وعليه فإن أنبوب "النانو" الكربوني

[92] د. محمود محمد سليم صالح، جامعة الملك سعود، مقال بعنوان (أنابيب الكربون النانوية)، مجلة النانو، العدد 2 عام 2009 ص.38.

1. من نوع "كتف الكرسي armchair CNT "يتكوَن عندما تكون زاوية تشارول تساوي 30 درجة ومعامل n يساوي معامل m إي(n=m)
2. أنبوب "النانو" الكربوني من نوع "المتعرج zigzag CNT "يتكوَن عندما تكون قيمة n أو m تساوي الصفر إي (n or m = 0) وزاوية تشارل تساوي صفر
3. أخيراً فإن أنبوب "النانو" الكربوني من نوع "تشارول chiral CNT " يتكون عندما تأخذ زاوية تشارول إي قيمة ما بين 0 و 30 درجة.



الشكل (55) يوضح المعاملات المؤثرة في تكون الأنواع الثلاثة لأنابيب "النانو" الكربونية المشار اليها أعلاه



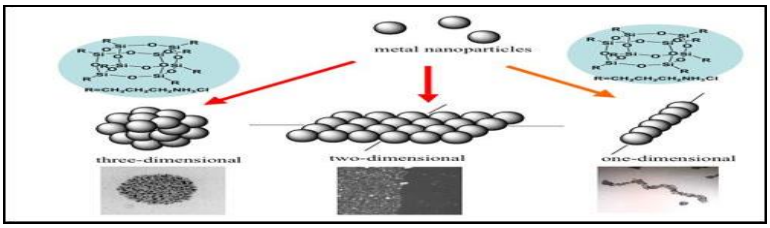
الشكل (56) الأنواع الثلاثة لتركيب أنبوب "النانو" الكربوني بناءاً على إتجاه محور الطي

تصوير أنابيب "النانو" الكربونية وحيدة الطبقة[93]:

1. سوف تسهل أنابيب "النانو" الكربونية وحيدة الطبقة إمكانية تصوير البيئات البيولوجية
2. تقوم جامعة "رايس" الأمريكية بمحاولة التوصل إلى وسائل جديدة لتخليق جسيمات "النانو" البيولوجية وتنقيتها وتحليلها من خلال الجهود التي يقوم بها المركز البيولوجي والبيئي لتكنولوجيا "النانو"(**Center for (Biological and Environmental Nanotechnology- CBEN**

[93] ليندا ويليامز، د.واد آدمز،تكنولوجيا النانو ترجمة الدكتور خالد العامري،مكتبة الأسرة، 2008 ص.125

3. يجب تحديد نوعية الأنابيب التي تنتج بعد تخليق أنابيب "النانو" الكربونية داخل المختبر، ثم تخليق هذه الأنابيب الناتجة بصورة إنتقائية وفصلها بعد عملية تخليقها الأولي كي تكون مفيدة بالنسبة للتطبيقات البيولوجية.
4. لقد أجريت في جامعة "رايس" أولى دراسات التحليل الطيفي لأنابيب "النانو" في وسط حيوي لتحديد أي الأنابيب تصلح لتطبيقها في مجال معين.



تصنيع أنابيب "النانو" الكربونية

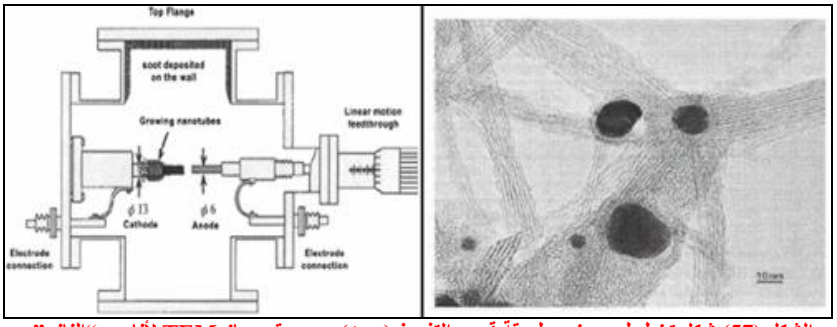
فيما يلي سأقدم عرضاً مختصراً لأهم ثلاث تقنيات لتصنيع وتحضير أنابيب "النانو" الكربونية، علماً بأن هناك عدد من التقنيات يتم إختبارها وإستخدامها من أجل توفير طرق غير مكلفة لتصنيع وتوفير هذه الأنابيب ذات الخواص الغير عادية مما يؤدي الى إمكانية دراستها وإستخدامها بشكل أكبر وأوسع وذلك لأن أنابيب "النانو" الكربونية ذات سعر مرتفع جداً كما أن تقنيات التصنيع ما زالت تحتاج للكثير من الدراسة والتطوير للحصول على الخواص المطلوبة في أنابيب "النانو" الكربونية التي يتم إنتاجها. وفيما يلي شرح لهذه التقنيات الثلاثة:-

1. تقنية قوس التفريغ[94]

إن تقنية أو طريقة قوس التفريغ Arc-Discharge Technique هي من أول التقنيات إستخداماً في تصنيع وتحضير تركيبات الكربون" الفلورين" حيث تم تطويرها على يد الباحث Krätschmer وفريقه، وفي عام 1991م إستخدمت في إنتاج أول أنابيب "النانو" الكربوتية، وذلك على يد الباحث الياباني Iijima ، وفي هذه التقنية يستخدم قطبين من الجرافيت أحدهما يمثل الآنود والآخر يمثل الكاثود حيث يوضعان في حيز مغلق chamber ، ويطبق بينهما جهد كهربائي يبلغ حوالي 20V ، والجدير بالذكر أن الكاثود يحتوي جزئياً على عدد من المعادن مثل الكوبولت والنيكل والحديد والتي تعمل كمحفزَات لعملية الإنتاج، وفي هذه العملية يتم ملئ الحيز المغلق بغاز خامل ثم يوضع النظام تحت التفريغ، حيث يتم تقريب القطبين من بعضهما بشكل

[94] http://www.bee2ah.com

منحنى (Curves) مما يسمح بحدوث قوس تفريغ كهربائي تتراوح شدة تياره ما بين 50-200 A وتصل درجة الحرارة الى 4000 درجة مئوية ودرجة الحرارة هذه تؤدي الى التسامي الجزيئي للكربون على الآنود، ويتم بعد ذلك ترسب ناتج العملية على جدار الحيز على شكل يشبة "شبكة العنكبوت" التقنية أستخدمت أولاً في إنتاج أنابيب "النانو" الكربونية متعددة الجدر، أما اليوم فيمكن وبشكل محدد إنتاج أنابيب "النانو" الكربونية أحادية الجدار من النوع "كتف الكرسي" وذلك بالتحكم في الغازات والمحفزات المضافة والجدير بالذكر أن نواتج هذه التقنية ليست أنابيب نانو نقية بل إن النواتج قد تحتوي على صيغ أخرى من تركيبات الكربون مثل الجرافيت والفلورين وبودرة الكربون الناعمة.



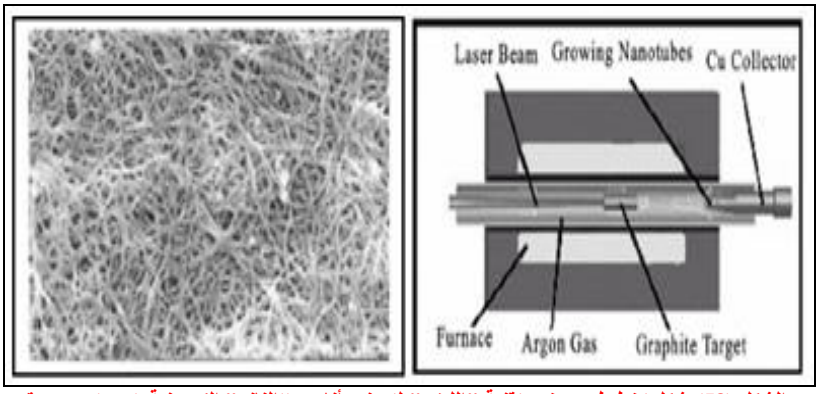
الشكل (57) شكل تخطيطي يوضح طريقة قوس التفريغ (يمين) وصورة بجهاز TEM لأنابيب "النانو" الكربونية و حيدة الجدار (يسار) والتي تم تحضيرها بهذه الطريقة

2. طريقة التبخير بالليزر[95]

تقنية التبخير بالليزر Laser Ablation Method أو "طريقة الإستئصال الليزري" تعد التقنية الثانية بعد تقنية "قوس التفريغ" وقد تم تطويرها في عام 1992م على يد الباحث Smalley وزملائه، وذلك بغرض تحضير كميات كبيرة من تركيبات الكربون، وفي عام 1996م، تم إستخدامها في إنتاج أنابيب "النانو" الكربونية أحادية الجدار، وذلك على يد نفس الفريق. وهذه التقنية تستخدم درجة حرارة عالية مثلها مثل تقنية قوس التفريغ التي تحدثت عنها سابقاً، وفيها يتم إستخدام إشعاع ليزر عالي الطاقة بحيث يركز هذا الإشعاع على هدف من الجرافيت يقع في مركز نظام تسخين مغلق (Furnace) ذو درجة حرارة مرتفعة تصل الى 1200C°، ويعمل الليزر على تبخير هذا الهدف في محيط يحتوي على غاز الأرجون Argon" Gas" وكذلك بعض العناصر مثل الكوبولت Co والنيكل Ni كعناصر محفزة لهذا التبخير، بعدها يتم تجميع أنابيب "النانو" والتي تكون على شكل بودرة ناعمة ذات لون أسود"soot" بواسطة المجمع النحاسي، كما يظهر في

[95] http://www.bee2ah.com

الشكل التوضيحي رقم (59) ويجدر الإشارة هنا إلى أن هذه التقنية تساعد في إنتاج كمية كبيرة من إنابيب "النانو" الكربونية أحادية الجدار ذات الجودة العالية حيث تصل كمية أنابيب "النانو" الكربونية المنتجة بواسطة هذه التقنية الى أكثر من 85% من الناتج الكلي للعملية والذي قد يحتوي على الفلورين كجزيء كربوني ناتج، ويمكن متابعة نمو أنابيب "النانو" عن طريق كاميرة فيديو عالية السرعة.



الشكل (58) شكل تخطيطي يوضح تقنية "الليزر" لتصنيع أنابيب "النانو" الكربونية (يمين) وصورة بالمجهر الإلكتروني SEM تظهر أنابيب "النانو" الكربونية الناتجة من هذه التقنية بعد أول عملية تصفية (يسار)

3. تقنية ترسيب الأبخرة الكيميائية

تقنية ترسيب الأبخرة الكيميائية Chemical Vapour Deposition Method (CVD) هي الطريقة الأحدث وتم تطويرها لتتغلب على عيوب الطريقتين السابقتين من حيث إنخفاض تكلفتها وإستخدام درجة حرارة أقل في الإنتاج، كما أنها تتميز بوفرة الإنتاج وتتميز كذلك بقدرتها على إنتاج كلا النوعين أي أنابيب "النانو" الكربونية أحادية الجدار ومتعددة الجدار. وفي هذه الطريقة يتم وضع "داعم" تفاعل substrate غالباً ما يكون رقاقة سيلكون في وسط حيَز التفاعل الذي يشبه الفرن oven-like وترفع درجة حرارة الحيز الى 600 درجة مئوية، ثم يضاف غاز الهيدروكربون أو أي غازات للكربون إلى نظام التفاعل والذي ينتج عنه فصل لذرات الكربون ثم تشكل أنابيب الكربون على الرقاقة السيلكونية، ويتم تشكيل الكثير من تركيبات الكربون الأخرى إلى جانب أنابيب "النانو" الكربونية مثل مسحوق الكربون وشرائح الكربون السميكة والرقيقة وغيرها، وعلى الرغم من بعض العيوب التي قد توجد في الأنابيب المنتجة بهذه الطريقة ألا إن هذه الطريقة هي أكثر الطرق إنتشاراً بين المجموعات البحثية لإنتاج أنابيب "النانو" الخاصة بهم، وذلك لسهولة عملها وتوفر تجهيزاتها.

تطبيقات أنابيب "النانو" الكربونية

- تم إستخدام أنابيب "النانو" الكربونية في العديد من المجالات مثل صناعة خزَانات وقود السيارت، مضارب التنس والجولف، عصي التزلج على الثلوج، طلاء المواد العسكرية التي لا يكتشفها الرادار.
- من التطبيقات الجديدة لتقنية "النانو"، أنبوب "النانو" الكربوني المكوَن من الحبر وهو عبارة عن حبر تم تطويره بواسطة الدكتور لي جن وونج من معهد كوريا للتكنولوجيا الكهربائية للبحوث تتضمن هذه التقنية طلاء أسطح البلاستيك بذلك الحبر لجعل السطح الرقيق قادراً على توصيل الكهرباء.
- من الممكن أيضاً تطبيق هذه التقنية في مجالات عدة منها شاشات اللمس وشاشات العرض القابلة للثني مع العلم بأن الدكتور لي قد أختار شاشات اللمس بسبب عدم وجود تقنية خاصة بالطلاء الدائم لأسطح البلاستيك.
- إن تطوير أنبوب كربوني من الحبر يمثل بداية مرحلة جديدة من التفوق المذهل في مجال تقنية "النانو".
- إن الخصائص الغير إعتيادية لأنابيب "النانو" الكربونية جعلت منها مواد أساسية في تقنية "النانو" القادمة والتي ستدخل جميع جوانب الحياة في المستقبل القريب إن شاء الله، وهذه الخواص المذهلة لهذه المواد فتحت للباحثين أبواباً كثيرة للبحث عن التطبيقات الممكنة لهذه المواد، وعلى الرغم من بعض الصعوبات التي تواجه أستخدام أنابيب "النانو" في البحث العلمي وفي التطبيقات العملية مثل أرتفاع تكلفة إنتاج هذه الأنابيب والتي قد تصل لبعض الأنواع ذات الجودة العالية الى 1500 دولار أمريكي للغرام الواحد، بالإضافة الى الصعوبات التقنية مثل إنخفاض كمية الإنتاج ومحدودية التحكم في تشكيل وتركيب هذه الأنابيب حسب التطبيقات المرغوبة ألا إنه قد تم إستخدام هذه التقنيات في عدد من التطبيقات الحالية ومنها:

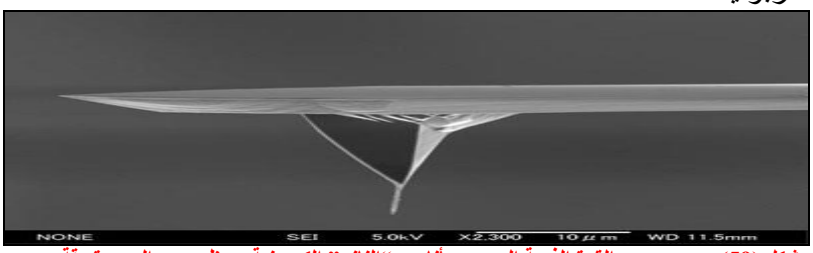
أجهزة الإنبعاث الإلكتروني

تعتبر تقنية الإنبعاث الإلكتروني من التقنيات الهامة جداً وهي أساس لكثيراً من التطبيقات الصناعية مثل صناعة شاشات العرض التلفزيونية والمسطحة وكذلك في تقنيات الأشعة الطبية المختلفة . وللوقوف على أهمية أنابيب "النانو" الكربونية في هذا المجال، لكم أن تعرفوا أنه أذا وضع أنبوب "النانو" الكربوني في مجال كهربائي فإنه يبعث سيل من الإلكترونات من أحد طرفية مباشرة وكأنه خرطوم ماء ذو طاقة عالية يقذف الماء من فوهته. وهذه الخاصية الفريدة لإنابيب "النانو" الكربونية جعلت منها أداة عالية الكفاءة تحل محل تقنية المدفع الإلكتروني القديمة وذلك في مجال صناعة شاشات العرض الفسفورية لأجهزة التلفزيون، وبالفعل قامت بعض الشركات حالياً بتسويق جيل جديد من شاشات العرض الفسفورية، والجدير بالذكر أنه وبتتبع نفس المبدأ السابق يمكن أستخدام أنابيب "النانو" الكربونية في

تطبيقات الأشعة الطبية والمصابيح الكهربائية وفي إنتاج موجات الميكرو. وأخيراً فإن هذا التطبيق أي إستخدام هذه الأنابيب في أجهزة الأنبعاث الإلكتروني ما زال يحتاج للمزيد من الدراسة للوقوف على خاصية الأنبعاث لأنابيب "النانو" الكربونية والتي تنشأ من حزم الطاقة المنفصلة وليست من حزم الطاقة المستمرة كما هو الحال في المواد الأكبر، وكذلك تعتمد إيضاً وبشكل كبير على التركيب الدقيق لهذه الأنابيب .

مجاهر القوة الذرية

إن دقة وكفاءة مجاهر القوة الذرية والتي هي أحد أنواع مجاهر المجسات الماسحة تعتمد إعتماداً كلياً على خصائص وأبعاد مجساتها التي تستخدم في دراسة أسطح المواد، وكذلك تعتمد على طبيعة المواد التي تصنع منها هذا المجسات. وغالباً ما تصنع هذه المجسات والتي تستخدم لدراسة أسطح المواد من التنجستون أو البلاتنيوم أو السيليكون وتأخذ شكل مدبب (مخروطي تقريبا) تتراوح سماكتها من 10 الى 50 ميكرومتر تعطي قوة تمييز تصل الى المستوى الذري، وحديثاً تم إستخدام أنابيب "النانو" الكربونية لتحسين كفاءة هذا المجس "المسبار" وذلك بإضافة هذا الأنبوب في النهاية الدقيقة لهذا المجس(probe tip) كرأس لهذا المجس ليقوم بعملية دراسة أسطح المواد وقد رفعت هذه التقنية قوة تمييز المجس التقليدي الى أكثر من عشر مرات. كما إن هذا المجس الجديد الذي يستخدم أنبوب "النانو" الكربوني ساعد في زيادة عمر إستخدام هذا المجس وكذلك قلل من مشكلة تشوية سطح العينة المدروسة وذلك للخصائص الميكانيكية العالية التي تتميز بها أنابيب "النانو" الكربونية

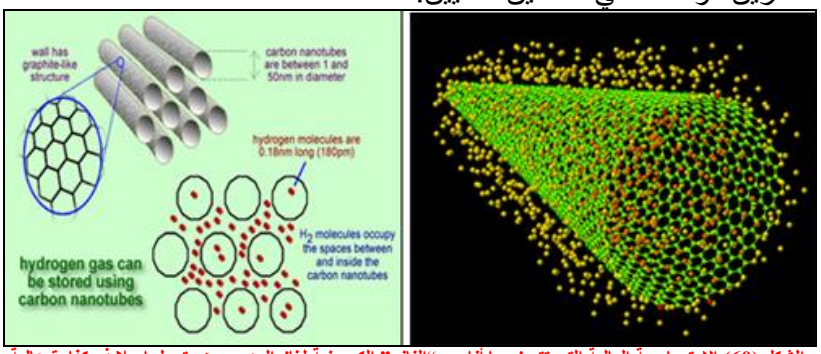


شكل (59) مجس مجهر القوة الذرية المحسن بأنابيب "النانو" الكربونية، ويظهر من الصورة دقة مجس "النانو" مقارنة بالمجس القديم والذي تقل سماكته أساسا عن 50 ميكرومتر

تخزين الهيدروجين

في خلايا الطاقة الهيدروجينية، والتي هي عبارة عن أجهزة كهروكيميائية يتم إستخدام غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين كمواد كيميائية لتشغيل هذه الخلايا. وخلايا الطاقة هذه تعطي مصدراً متجدداً للطاقة الكهربائية التي يمكن أن تستخدم في تشغيل السيارات الكهربائية وأجهزة اللابتوب وتعتبر هذه التقنية من التقنيات الحديثة التي ما زال الباحثون يواصلون فيها البحث والدراسة أملاً في تطويرها وتحسينها لتصبح مصدراً

نظيفاً وآمنا لطاقة الكهربائية، وكما ذكرت فإن أنابيب "النانو" الكربونية قدمت حلاً كبيراً لمشكلة تخزين غاز الهيدروجين حيث تعتبر صعوبات تخزينه من أكبر المعوقات التي تقف في طريق تقدم تقنية خلايا الطاقة الهيدروجينية، حيث تتميز هذه الأنابيب بقدرتها الفائقة على إمتصاص كمية كبيرة من غاز الهيدروجين، وبالتالي يمكن إضافة أنابيب "النانو" الكربونية الى خزانات وقود غاز الهيدروجين لتوفر هذه الأنابيب مستودعات آمنة وذات قدرة عالية لتخزين لغاز الهيدروجين ذو الطبيعة الخطيرة، وفكرة التخزين موضحة في الشكلين التاليين:



الشكل (60) الإمتصاصية العالية التي تتميز بها أنابيب "النانو" الكربونية لغاز الهدروجين، تجعلها حلا ذو كفاءة عالية لمشكلة تخزين غاز الهيدروجين في تقنيات خلايا الطاقة الهيروجينية

أجهزة الإستشعار عالية الحساسية

عندما تتعرض أنابيب "النانو" الكربونية شبة الموصلة لبعض الغازات مثل القلويات والهالوجين وذلك في درجة حرارة الغرفة فإن مقاومتها الكهربائية تزداد بشكل كبير، ومن هذه الخاصية المميزة لأنابيب "النانو" الكربونية تجعل منها مواد مثالية في تقنيات ألإستشعار، إن أنابيب "النانو" الكربونية تستطيع رفع حساسية أجهزة الإستشعار التقليدية عالية الكفاءة الى 1000 مرة تقريبا

مجسات "النانو" البيولوجية

- تعتبر المجسات البيولوجية من الأدوات المهمة في تكنولوجيا "النانو" حيث أنها تعتبر أداة مهمة في عملية التعرف على المواد الكيميائية السامة متناهية الصغر التي توجد في المنتجات الصناعية أو العناصر الكيميائية أو العينات البيئية "مثل الهواء والتربة والماء" أو الأنظمة الحيوية " كالبكتيريا أو الفيروسات أو الأنسجة" عند التشخيص الإكلينيكي.
- تستطيع المجسات البيويولجية إكتشاف المكونات الكيميائية للأنظمة المعقدة وكذلك التمييز بينها، إذ إن تصميمها عالي الكفاءة يمكنها من تحديد نوع العينة الخاضعة للفحص وكذلك كميتها بدقة متناهية.
- تعتبر مجسات "النانو" البيولوجية مجموعة جديدة للمجسات البيولوجية التي تعتمد على مسابير الـDNA والأجسام المضادة.

- على سبيل المثال، ظهرت المجسات المناعية الفلورية (fluoroimmunosensors) لإكتشاف الخلايا السرطانية، فتوضع الأجسام المضادة عند طرف مسبار الألياف الضوئية أو في مجس آخر (داخل المجسات المناعة الفلورية) لفحص التألق داخل جسم الكائن الحي في المعمل. ويمكن تحقيق درجة عالية من الحساسية باستخدام طاقة الليزر الهائلة وتغيير الإشارات البصرية.
- بإستخدام ليفة واحدة فقط، يرسل المجس المناعي الفلوري طاقة هائلة إلى العينة ويجمع مقدار التألق أو الفلورة المنبعث من البروتين عند طرف المسبار. بعد ذلك، يصل شعاع الليزر إلى مسبار المجس، فيؤدي إلى استثارة العنية المرتبطة بالأجسام المضادة الموجودة عند طرف مسبار الألياف الضوئية.
- تجرى العديد من التحاليل البسيطة والسريعة إعتماداً على هذة الطريقة لإقتفاء المكونات البيولوجية والكيميائية بدرجة حساسية عالية.