جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل
كلية التربية للعلوم الصرفة
قسم الفيزياء

الانابيب النانوية الكاربونية واستخدامها في الخلايا الشمسية

Carbon nanotubes and their use in solar cells

بحث مقدم الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة ـ جامعة بابل قسم الفيزياء

كجزء من متطلبات نيل درجة البكالوريوس في الفيزياء

من قبل الطالبة

سهاد علي نعمة

بأشراف

أ.د علي عبيس

2023م_____1445ه

إِنَّا فَتَحْنَا لَكَ فَتْحًا مُّبِينًا

(سورة – الآية)

الاهداء

سيدنا ومولانا أيها الإمام المهدي المنتظر سلام الله عليك وعلى آبائك الطاهرين أئمة الهدى ومصابيح الدجى..... هذه وريقات تشرفت بالاهداء لكم وهي منكم واليكم أضعها بين يديك فأنت أحق بها وأهلها ويا حبذا لوحظيت هذه الصفحات بالقبول عسى الله أن ينفعني بها يوم لا ينفع مال ولا بنون...

إلى صاحب السيرة العطرة، والفكر المُستنير؛

فلقد كان له الفضل الأوَّل في بلوغي التعليم العالي ..(والدي الحبيب)، أطال الله في عُمره.

إلى من وضعتني على طريق الحياة، وجعلتني رابط الجأش، وراعتني حتى صرت كبيرًا (أمي الغالية)..

إلى جميع أساتذتي الكرام؛ ممن لم يتوانوا في مد يد العون لي

أُهدي إليكم بحثي في.....

شكر وتقدير

الشـــكر والثنـــاء لله عـــز وجـــل اولاً علـــى نعمـــة الصـــبر والقـــدرة على انجاز العمل فـ لله الحمد على هذه النعم .

اتقدم بالشكر والتقدير الى استاذي الفاضل الدكتور (علي عبيس)الذي تفضل بأشرافه على هذا البحث ، ولكل ماقدمه لي من دعم وتوجيه وارشاد لاتمام هذا العمل على ماهو عليه فله أسمى عبارات الثناء والتقدير.

والشكر الجزيل الى اهلي وكل من ساعدني للوصول الى هذه المرحلة اهديهم جهدي المتواضع هذا .

خلاصة البحث RESEARCH SUMMARY

لا نستطيع حصر الفوائد والابتكارات التي توصلت لها تقنية النانو وما زالت تتوصل لها في المستقبل لكن يُمكن ذكر بعض الأمور المهمة في مجال الطاقة مثلًا حيث تُسهم تكنولوجيا النانو في إنتاج بطاريات بوسعها تخزين كميات هائلة من الطاقة بالإضافة إلى الألبسة الذكية القادرة على إنتاج الطاقة وإزالة الميكروبات أو الأوساخ أو الجراثيم

وأما بالنسبة للمجالات الأخرى، فيمكن لعلم النانو أن يساعد البيئة في حل مشكلة نقاء المياه المتفاقمة، إذ من الممكن تنقية المياه بواسطة الجسيمات النانوية التي تحتوي على بروتينات قادرة على مقاومة الملوثات، ويمكن أيضًا استخدام هذه الجزيئات نفسِها في صناعة الأغذية لكشف تغير جودة الأغذية وفسادها

يـأتي دور تقنيـة النـانو بقـدرتها علـى تطـوير وتحسـين المـواد المحفـزة التـي تعمـل علـى تحويـل الغـازات السـامة المتصـاعدة مـن المصـانع والسـيارات إلـى مـواد وغـازات أقـل ضـررا، حيـث أن المحفـزات الـداخل فـي تركيبهـا جسـيمات نانويـة تسـتطيع التفاعـل بشـكل أكبـر مـع المـواد الكيميائيـة بسـبب مسـاحة سـطح الجزيئات النانوية الكبيرة

THE AIM OF THE RESEARCH هدف البحث

قـد سـاهمت تكنولوجيـا النـانو فـي إيجـاد عـدد مـن الحلـول التكنولوجيـة الجديـدة والفريـدة، لاسـيما فـي مجـال إنتـاج الخلايـا الشمسـية، إذ إنهـا تعمـل علـى رفـع كفـاءة اسـتخدام الطاقـة، وخفـض تكلفـة إنتاجهـا وتشـغيلها لـتلائم كـل التطبيقـات الحياتيـة والصـناعية. ويـزداد الطلـب العالمي على الطاقة بصورة كبيرة يوماً بعد آخر.

وقـد يصـبح ممكنـاً فـي مسـتقبل غيـر بعيـد تصـميم مبـاني تنـتج الطاقـة التـي تغطـي حاجـات المبـاني، ومـن يسـكن

فيهـا؛ وقـد يبـدو هـذا طموحـاً مبالغـاً فيـه لكنـه فـي الواقـع هـدفاً يمكـن تحقيقـه فـي مـدة زمنيـة قـد تكـون اقصـر ممـا نتصـور لان هنـاك آلافـاً مـن البـاحثين فـي شـرق الأرض وغربها يعملون على تحقيقه.

المحتويات

ت	الموضوع	رقم الصفحة
١	الواجهة	
٢	الاية	
٣	الاهداء	
٤	الشكر والتقدير	
٥	خلاصة البحث	
٦	هدف البحث	
٧	المحتويات	
٨	قائمة الاشكال	
٩	قائمة الرموز	
١٠	الفصل الاول	1-12
١١	(١.١)المقدمة	٢-٤
١٢	(٢.١) التسلسل الزمني للأنابيب النانوية الكاربونية	٥-٩
١٣	(٣.١) خصائص الانابيب النانوية الكاربونية	٩-١٢
١٤	الفصل الثاني	١٣-١٨
١٥	(١.٢) طرق التصنيع	١٤-١٨
١٦	الفصل الثالث	١٩-٣٠
١٧	(١.٣) المقدمة	٢٠

١٨	(٢.٣) استخدام الانابيب النانوية الكاربونية في الخلايا الكهرو ضوئية	٢١-٢٠
١٩	(٣.٣) المركبات الكاربونية النانوية في الطبقة النشطة ضوئيا	٢٣-٢١
٢٠	(٤.٣) ان انابيب الكاربون النانوية كأقطاب شفافة	٢٤-٢٣
٢١	التطبيقات المحتملة	٢٥
	(٥.٣) المقدمة	٢٥
	(٦.٣) التطبيقات البنيوية	٢٦-٢٥
	(٧.٣) تطبيقات كهرو صوتية	٢٦
	(٨.٣) تطبيقات كهرو مغناطيسية	٢٧-٢٦
	(٩.٣) التطبيقات الميكانيكية	٢٨
	(١٠.٣) محركات الانابيب النانوية الكاربونية	٢٨
	(١١.٣) الدارات الكهربائية	٢٩ -٢٨
	(١٢.٣) التوصيلات الداخلية	٢٩
	(١٣.٣) الترانزستورات	٢٩
	(١٤.٣) التصميم الالكتروني واتمت التصميم	٣٠
	المصادر	٣٣-٣١

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
شكل رقم (١-١)	أ- أنبوب نانوي أحادي الجدار SWCNT ب- صورة تخيلية لأنبوب نانوي كربوني متعدد الجدران	3
شكل رقم (١-٢)	صورة العالم سوميو إيجيما	5
شكل رقم (٢-١)	مخطط للجهاز الذي يتم فيه إنتاج الأنابيب النانوية أحادية ومتعددة الجدار والفولورين	8
شكل رقم (٢-٢)	جهاز إنتاج الأنابيب النانوية الكربونية بطريقة القوس الكهربائي	9
شكل رقم (٢-٣)	أنابيب نانوية نمت بواسطة الترسيب الكيميائي للبخار المدعم بالبلازما	12
شكل رقم (٣-١)	هيكل جهاز ضوئي عضوي ثنائي الطبقة	22

الرمز	معناه	وحدة القياس
NEC	Nippon Electric Company	
UclA	University of California,los Angeles	
أي بي إم	International Business Machines	
MWCNTS	Mult Walled carbon nano tubes	
SWCNTS	Single walled carbon nano tubes	
SWNT	Single walled carbon nano tube	

	أول عملية نمو للأنابيب النانوية الكربونية	ET3000
	أوكسيد المغنيسيوم	Mgo
	أوكسيد الألمنيوم	Al_2o_3
	معدل النمو	H
	الزمن	T
	معدل النمو المبدئي	B
	العمر الزمني للعامل المحفز	T_o
	أوكسيد الكربون	CO
	رابط الساهمي	Sp^2
	Critical temperature	T_c
	Mult walled nano tube	MWNT
	Penta Erythritol Tetra Nitrate رباعي نترات خماسي ايريثريتول	PETN
	Organic Photo voltaic devices	Opvs
	Organic Photo voltaic	Opv
	Single walled carbon nano tube	SWCNT
	بولي(٣-أوكتيل ثيوفين)	P_3OT
	بولي (٣-هكسيل ثيوفين)	P_3HT
	بوكسينستر فولورين (كرة بوكي)	الفولرينC_{60}
	Carbon nano tube	CNT
	أوكسيد الموليبدينوم	MoO_X
	Carbon nano tubes	CNTS
	Indium Tinoxide	ITO

الأنابيب النانونية الكربونية وطرق تصنيفها وخصائصها

Carbon nanotubes, their classification methods and properties

the introduction المقدمة

(١.١)مقدمة عامة عن النانو General introduction to nanotechnology

تقنية أنابيب الكربون النانوية مازالت في مهدها،وهي حتى الآن تحت الدراسة لمعرفة المزيد من خواصها الفيزيائية وقدراتها المثيرة، ولكن الطريقة المستخدمة حالياً للحصول على النانوتيوب مرتفعة التكاليف.

ومن الواضح أن الكثير من الطرائق التي يجري استخدامها من أجل تحسين مردود الخلايا الشمسية تعتمد على النانوتكنلوجيا .بعضها تمثل في الهندسة النانوية لسطح الخلية بحيث يقل انعكاس ضوء الشمس عليه ، أو أنماء

طبقات رقيقة يضبط سمكها بدقة النانومتروأخرى استخدمت فيها حبيبات نانوية أو أنابيب كربونية نانوية .كل هذه الجهود مستمرة من أجل أن تصبح الطاقة الشمسية أقل تكلفة ،ونتمكن من تجنب الكارثة البيئية التي تهددنا نتيجة إفراطنا في استهلاك الطاقة المستخرجة من الفحم والمحروقات .بعض هذه البحوث نجحت في تحقيق نتائج مشجعة.

أدى التطور الحاصل في شتى الميادين ،إلى تغيير نمط الحياة وتسهيلها، إضافة إلى إيجاد الكثير من الحلول لمشاكل تقنية، كانت بالأمس القريب تعتبر من المستحيلات .ولعل اهم عامل ساهم في هذه الطفرة التقنية في المواد هو التطور الحاصل في علوم وتقنيات النانو (nanotechnologies). فيما شكل اكتشاف انابيب الكربون النانوية (carbon nano tube) مطلع تسعينات القرن الماضي من طرف (Iigima) اثناء عمله في مختبرات شركة (NEC) الحدث الأبرز ونقطة التحول في تاريخ تكنلوجيا النانو.

فما هي أنابيب الكربون النانوية؟

هي ببساطة: عبارة عن مادة على شكل أنبوب مصنوعة من الكربون (الجرافيت) مترابطة فيما بينها على شكل حبال وذلك بفضل القوى الذرية (Van Der Waals force) حيث ترتبط ذرات نهايتي الشريحة مع بعضها، لتخلق الأنبوب. تكون احدى نهايتي الأنبوب في الغالب مفتوحة والأخرى مغلقة على شكل نصف كرة، وهي ذات قطر صغير جداً يقاس بـ " النانو متر" (والنانو متر هي: وحدة قياس للطول وتساوي واحد من المليار متر)، ولكي نعرف مدى صغر النانو فهو واحد إلى عشرة آلاف من سمك شعرة الأنسان. فهو فعلاً صغير جداً ولا يرى في العين المجردة.

ويلاحظ أن نسبة طول الأنابيب النانوية الكربونية إلى قطرها تصل الى 32,000,000 1:1
الأنابيب النانوية تشبه في بنيتها خلايا النحل، وهي أمثلة أولية للخصائص العجيبة التي يمكن أن تتيحها القوى الكمية في النظم النانوية يمكن أن تعمل الأنابيب الكربونية النانوية وكأنها أسلاك مصغرة في الحواسيب الجزيئية، بفضل خاصية كمية تدعى النفق الإلكتروني (Electro tunneling)، تسمح للأنابيب ببث الإشعارات الكهربائية على مستويات يستحيل أن يسري فيها التيار العادي. فقد شارك فريق بحثي من (هيوليت باكارد) في كالتيك UclA في تطوير استخدام الأسلاك النانوية (الذي أصبح الآن شائعاً) في التوصيل بين المكونات المنفصلة في الحواسيب الجزيئية .

تعتمد البحوث الخاصة بإمكانية تصنيع دوائر متكاملة من الكربون على الخصائص الكمية غير العادية للأنابيب النانوية. وقد أصبحت هذه الأنابيب تتصرف كأشباه الموصلات بفضل التغيرات في هندستها. وقد ابتكر الباحثون في شركة (أي بي إم) مفاتيح وترانزستورات

ومكونات أخرى من الأسلاك النانوية باختبار الدخل والخرج لكثير من الأنابيب الكربونية النانوية.

وتحاول (أي بي إم) مع شركات أخرى الاستفادة من ذلك في المعالجات، حيث يكمن السر ببساطة في الأسلاك .

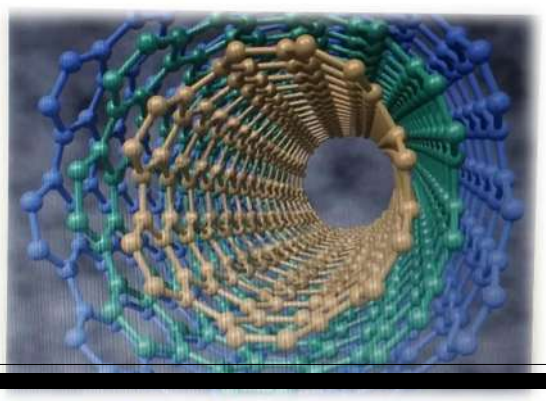
أفادت التقارير أن أطول أنابيب نانوية كربونية (وصل إلى ١٨.٥سنتمتراً) ظهرت عام ٢٠٠٩. حيث تم تنميتها على ركائز السيليكون(Si substrates) بواسطة استخدام طريقة ترسيب كيمائي للبخار بالإضافة الى تقديم حزم منتظمة متجانسة إلكترونياً من الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار.

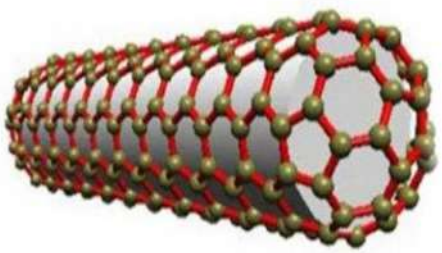
في حين كان أقصر أنبوب انبوبي كاربوني مركب حلقياً من البارافينيلين العضوي والذي تم تركيبه في أوائل سنة ٢٠٠٩.

كما أن أرفع أنبوب نانوي كربوني هو شكل (ذراع الكرسي أو الأريكي) ٢.٢ سنتيمتراً، حيث يصل قطره الي 3˚A. وقد نما هذا الأنبوب النانوي الكربوني داخل أنبوب نانوي كربوني متعدد الجدران. وتم تطبيق نموذج الأنبوب النانوي الكربوني من خلال دمج حسابات كل من المجهر الإلكتروني النافذ عالي الدقة (high-resolution transmission electron microscopy)، مطيافية رامان (Raman Spectroscopy)، والنظرية الدالية للكثافة (density functional theory).

كما أن أكثر الأنابيب النانوية الكربونية نحافة وقائمة بذاتها يقارب قطرها 4.3°A. وقد اقترح الباحثون أنه قد يكون أنبوباً نانوياً أحادي الجدار بأقطار

°A (٥.١)او °A (٤.٢)، إلا أن النوع المحدد للأنبوب النانوي الكربوني مازال محط تساؤل واستفهام. هذا وتم تحديد الأنابيب النانوية الكربونية ذات الأقطار (٣.٣) ، (٤.٣) ، (٥.١) (حيث تتراوح جميعاً حول طول قطر يصل إلى A4˚) بوضوح باستخدام صورة أكثر تصحيحاً للانحراف الناتج عن المجهر الألكتروني النافذ عاليا الدقة. على الرغم من ذلك،فقد وجدت داخل الأنابيب النانوية الكربونية مزدوجة الجدران.





شكل رقم (١-١)

أ- أنبوب نانوي احادي الجدار SWCNT

- ب- صورة تخيلية لأنبوب نانوي كربوني متعدد الجدران

(٢.١) التسلسل الزمني للأنابيب النانوية الكربونية Chronology of carbon nanotubes

بتتبع المراجع العلمية، والصحف، والمجلات، وحتى الدوريات الأكاديمية، يخيل للمرء أن الأنابيب الكربونية النانوية اكتشفت حديثاً، ولكن الحقيقة غير ذلك. فقد حصل عالمان بريطانيان على براءة اختراع من الولايات المتحدة عام١٨٨٩عن صناعة أنابيب الكربون الدقيقة، وذلك باستخدام غاز الميثان الذي كان معروفاً آنذاك باسم "غاز مارش" وهي طريقة تشبه إلى حد كبير النظم الصناعية الحالية. وقد نجحوا في إنتاج أسلاك رفيعة جداً من الكربون بحجم الشعرة؛ للإضاءة الكهربائية ،وهذه الشعيرات الكربونية تعود إلى شكلها الأصلي بعد ثنيها ولفها في أشكال متعددة. ولم تكن تلك المحاولة الحالة الوحيدة التي عرف فيها العالم الكربون نانوتيوب.

ففي عام ١٩٥٢ نشر كل من "ل. ف. رودو شكو فيتش " و "ف.م.لوقانوفيتش" صوراً واضحة لأنابيب نانوية ذات اقطار ٥٠ نانو مصنوعة من الكربون في منشور الكيمياء الفيزيائية السوفيتي

لم يلق هذا الاكتشاف الاهتمام بصورة كبيرة، خاصة أن المقالة قد نشرت باللغة الروسية، وكان وصول العلماء إلى الصحافة السوفيتية محدوداً خلال فترة الحرب الباردة. فعلى الأرجح أنه تم إنتاج الأنابيب النانوية قبل ذلك التاريخ، لذلك فأن اختراع المجهر الإلكتروني النافذ سمح برؤية تلك الهياكل النانوية مباشرة.

كذلك أظهرت دراسة أجراها كل من أوبرلين،أندو وكوياما والتي نشرت عام ١٩٧٦، بوضوح أليافاً نانوية كربونية ذات أقطار نانوية الأبعاد باستخدام أسلوب النمو البخاري. هذا بالإضافة إلى أن المؤلفين عرضوا صور بالمجهر الإلكتروني النافذ لأنبوب نانوي يتكون من

حائط واحد من الغرافين. في حين أشار إندو لاحقاً إلى تلك الصور على أنها لأنبوب نانوي أحادي الجدار (كما هو معروف حاليا).

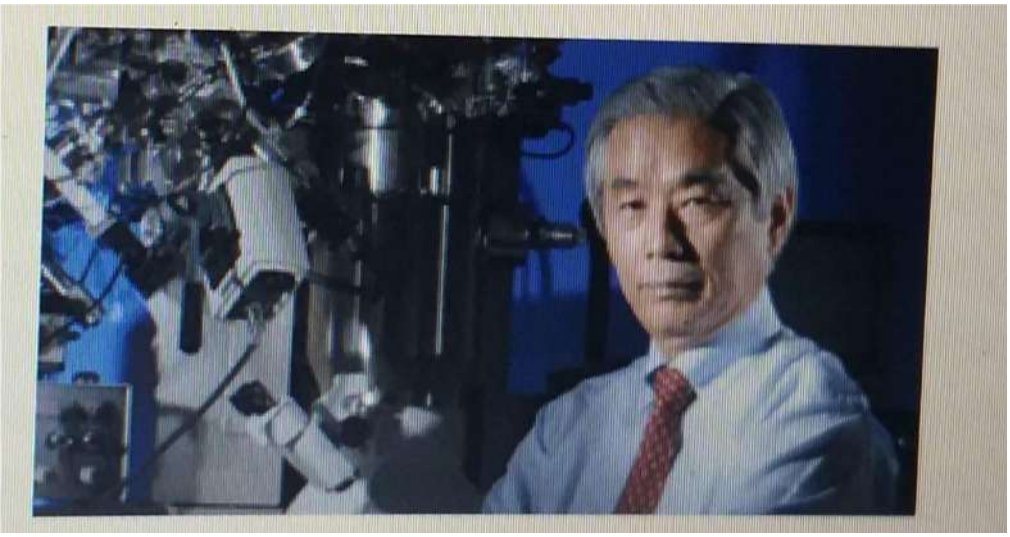
في حين قدم جون أبراهامسون في عام ١٩٧٩ دليلاً من الأنابيب الكربونية في مؤتمر بينيل الرابع عشر للكربون في جامعة ولاية بنسيلفانيا (Pennsylvania state Vniversity). حيث قدمت ورقة المؤتمر البحثية وصفاً للأنابيب النانوية الكربونية على أنها أليافاً كربونية ثم أنتجها على أقطاب الكربون خلال عملية تفريغ شحنة القوس. كما تم تشخيص هذه الألياف بالإضافة إلى افتراض نموها في محيط نتروجين تحت ضغط جوي منخفض.

وفي عام ١٩٨١ نشرت مجموعة من العلماء السوفييت نتائجا للتشخيص الكيميائي والبنائي التكويني للأنابيب الكربونية النانوية بواسطة عدم التناسب التحفيزي الحراري (thermos catalyticl disproportionation) لأحادي أوكسيد الكربون. حيث افترض المؤلفين بناءً على الصور المقدمة من المجهر الإلكتروني النافذ ونماذج حيود الاشعة السينية أن "بلورات الكربون متعددة الطبقات الأنبوبية " تشكلت من خلال لف وطي طبقات الغرافين إلى أسطوانات كما توقعوا إنه بواسطة طي طبقات الغرافين إلى أسطوانات، فمن الممكن الحصول على تشكيلات شبكية سداسية متعددة الترتيبات للغرافين. كما اقترحوا كذلك إمكانيين لتلك الترتيبات وهما: الترتيبات الدائرية (الأنابيب النانوية أريكية الشكل) وكذلك ترتيبات حلزونية

اما في عام ١٩٨٧ فقد نشر هوارد تينيت بشركة "هايبريون للتحفير"(Hyperioncatalysis)، براءة اختراع أمريكي لإنتاج "الألياف الكربونية اسطوانية الشكل المنفصلة" ذات "قطر ثابت يتراوح بين ٧.٠- ٣.٥ نانو متراً تقريباً ،في حين يصل طولها إلى ١.٢ ومنطقة خارجية للطبقات المتعددة والمستمرة من ذرات الكربون ومحوراً داخلياً مميزاً".

وبعد ذلك التاريخ توالت الأبحاث من أجل دراسة وأكتشاف تركيبات جديدة للكربون.

وفي عام ١٩٩١ أنتج الباحثون اليابانيون بعمل الإلكترونيات بمدينة تسكوبا اليابانية في شركة أن إي سي (NEC) بقيادة العالم سوميو إيجيما (Sumio Iijima)



شكل رقم (١-٢)

صورة العالم سوميو إيجيم

أنابيب الكاربون النانوية، وجاء أكتشاف إيجيما ورفاقه بعد سنوات قليلة من مفاجئة أكتشاف شكل جديد لذرة الكربون على الشكل البيضوي. وبعد نشر الكتاب المثير للعالم الأمريكي إريك دريسكلر (Eric Drexler) الذي بعنوان "ماكينات الإبداع"

ولاحظ سوميو إيجيما (Sumio Iijima) خلال تحضيره التركيبات جزيئات الكربون تكون جزيئات كربونية ذات اشكال أنبوبية مفرغة، ومغلقة بتركيبات ذات شكل نصف كروي ، حيث استخدمه في تحضيرها تقنية القوس الكهربي (Direct-current are discharge) وقطبين كربونيين مغمورين في غاز الهليوم عند درجة حرارة تبلغ ٣٠٠٠ درجة مئوية، وقد أطلق على هذه الأنابيب بعد ذلك أنابيب النانو الكربونية .

ومن الجدير بالذكر أن هذه الأنابيب التي اكتشفت في عام ١٩٩١ هي أنابيب النانو الكربونية متعددة الجدار، والتي يطلق عليها باللغة الإنكليزية (Mult-walled carbon Nanotubes)ويرمز لها اختصاراً (MWCNTS) ولم يقف الأمر عند هذا الحد، بل في عام ١٩٩٣ حضر الباحث الياباني نفسة أنابيب النانو الكربونية وحيدة الجدارأو ما يسمى باللغة الإنكليزية (Single –walled carbon nano tubes) ويرمز لها اختصاراً (SWCNTS) وفي العام نفسه تمكن العالم دونالد بثيون (Donald Bethune) من شركة تكنلوجيا الحاسبات في الولايات المتحدة الأمريكية من رصد نانوتيوب مكونة من طبقة واحدة (Single –wall) يبلغ قطرها ١٢ نانو متر .

وفي عام ١٩٩٥ كان الباحثون السويسريون هم أول من أوضع خصائص الانبعاث الإلكتروني للأنابيب النانوية الكربونية.

وقد قام المخترعان الألمانيان تيل كيسمان وهربيرت غروس –وايلد بالتنبؤ بهذه الخاصية للأنابيب النانوية الكربونية في وقت سابق من ذلك العام وذلك في تطبيقهم لبراءة الاختراع.

وفي عام ١٩٩٧ تم إيضاح الترانزستورات الأولى أحادية الإلكترون المعتمدة على الأنابيب النانوية الكربونية (والتي تعمل عند درجات حرارة منخفضة) ومن قبل مجموعات في جامعة ديلفت،

وفي جامعة كاليفورنيا، بركلي. وكذلك تم تطبيق أول أقتراح لاستخدام الأنابيب النانوية الكربونية كهوائيات بصرية في براءة اختراع المخترع روبرت كراولي في كانون الثاني عام ١٩٩٧.

وفي عام ١٩٩٨ تم إيضاح الترانزستورات الأولى ذات الأثر المجالي المعتمدة على الانابيب النانوية من قبل مجموعات في جامعة ديلفت، وفي آي بي إم.

وفي عام٢٠٠٠ كانت الإيضاحات الأولى التي اثبتت أن الأنابيب النانوية الكربونية المنحنية تغير من مقاومتها .

وفي عام ٢٠٠١ في نيسان كان أول تقرير حول طريقة فصل الأنابيب النانوية الكربونية المعدنية وشبه الموصلة.

وفي عام ٢٠٠٢ في كانون الثاني تم إيضاح الأنابيب النانوية الكربونية عديدة الجدران هي أسرع الهرتزات المعروفة.

في عام ٢٠٠٣ في أيلول أعلنت شركة إن إي سي تقنية تصنيع مستقرة لترانزستورات الأنابيب النانوية الكربونية.

وفي عام ٢٠٠٤ في آذار نشرت صحيفة الطبيعة صورة لأنبوب نانو أحادي الجدار (SWNT) طوله ٤ سنتيمتر.

وفي عام ٢٠٠٥ في أيار تم عرض نموذج أولي لشاشة مسطحة عالية الدقة ذات بعد ١٠ سنتيمتر صنعت بأستخدام الأنابيب النانوية

وفي آب من نفس العام قامت جامعة كاليفورنيا بإيجاد أنابيب نانوية ذات شكل هندسي لتستخدم كترانزستورات جاهزة.

وكذلك أعلنت جنرال إلكتريك تطوير ثنائي مثالي من الأنابيب النانوية الكربونية يعمل عند "الحد النظري" (افضل أداء ممكن) وتم ملاحظة تأثير فولط الضوئي في جهاز الثنائي ذو الأنابيب النانوية مما قد يؤدي إلى اختراقات في الخلايا الشمسية وجعلها أكثر كفاءة وأطول عمراً من الناحية الاقتصادية . وكذلك تم تصنيع أنابيب نانوية بإبعاد 100x5سنتيمتر .

وفي أيلول من نفس العام قامت شركة تقنية النانو التطبيقية (تكساس) بالتعاون مع ست شركات إلكترونية يابانية بإنتاج نموذج أولي للتلفاز ٢٥-انش باستخدام الأنابيب النانوية الكربونية . ولم يعاني نموذج التلفازمن ظاهرة "الظلال "التي يعاني منها بعض التلفازات الرقمية.

وفي عام ٢٠٠٦ في آذار أعلنت شركة آي بي إم عن بناء دائرة إلكترونية حول أنبوب نانوي كربوني. وكذلك تم استخدام الأنابيب النانوية كمقومات لإعادة توليد الأعصاب التالفة.

وفي أيار تم تطوير طريقة لوضع الأنابيب النانوية بدقة من قبل الشركة آي بي إم. وفي أيار تم تطوير طريقة لوضع الأنابيب النانوية بدقة من قبل الشركة آي بي ام.

وفي حزيران تم اختراع أدارة في جامعة رايس لفرز الانابيب النانوية حسب الحجم والخصائص الكهربائية.

وفي تموز تم خلط الأنابيب النانوية في ألياف الكربونية للدراجة التي فازت في سباق فرنسا.

وفي عام ٢٠٠٩ في نيسان ساهمت الانابيب النانوية في البطارية الفيروسية.

وما زالت قضية اكتشاف الأنابيب النانوية من القضايا الجدلية القائمة حتى الوقت الحالي. فالعديد يصدقون أن تقرير إيجيما في عام ١٩٩١ له أهميتة الخاصة بسبب أنه جلب انتباه المجتمع العلمي ككل إلى الأنابيب النانوية الكربونية.

(١-٣)خصائص الأنابيب النانوية الكربونية Properties of carbon nanotubes

١-٣-١ القوة Power

تتسم الأنابيب النانوية الكربونية بأنها الأقوى، الأكثر صلابة، وجموديه بين المواد التي تم أكتشافها من حيث مقاومة الشد ومعاملة المرونة على التوالي. وتنتج تلك القوة والصلابة من روابط sp^2 التساهمية والمكونة فيما بين الذرات الكربون الفردية. حيث تم ختيار أنبوب نانوي كربوني متعدد الجدران في عام ٢٠٠٠ بهدف الحصول على درجة مقاومته للشد التي وصلت إلى ٦٣ غيفا باسكال. أن هذا يعادل القدرة على تحمل ضغط وزن يكافئ ٦٤٢٢ كيل غرام على كابل أو سلك بقطاع رضي يصل إلى ١ ميليمتراً مربعاً. وبسبب أن الأنابيب النانوية كربوني كثافة منخفضة بالنسبة للمواد الصلبة تتراوح من ١.٣إلى ١.٤ غرام ،فأنه مقاومتها النوعية تصل إلى ٤٨٠٠٠ كن. م. كغ$^{-1}$- هي الأفضل بين المواد المعروفة مقارنة بالمقاومة النوعية الخاصة بالصلب مرتفع الكربون والتي تصل إلى ١٥٤ كن. م. كغ$^{-1}$.

وتحت شدة الالتواء المفرط، تخضع الأنابيب للتشوه اللدن (plastic deformation) مما يعني حصول تشوه دائم. ويبدء التشوه عند عمليات التواء تصل تقريباً إلى ٥% ويمن زيادة

الحد الأقصى لالتواء الأنابيب قبل الكسر عن طريق إطلاق طاقة الالتوائية. وهنا نلاحظ أن الأنابيب النانوية الكربونية ليست قوية تقريباً تحت الضغط. وبسبب بنيتها الجوفاء وأرتفاع نسبة العرض إلى الارتفاع، فهي تميل إلى الانبعاج (buckling) عندما تخضع لظروف الضغط، الالتواء أو الانحناء[١] وتشيرالملاحظة والفحص عبر استخدام المجهر الإلكتروني النافذ للمرونة الشعاعية أنه حتى قوى فان ديرفالس لها القدرة على تشويه أنبوبين نانويين متجاورين. كما أشارت تجارب الثلم النانوي (Nano indentation) والتي تمت من قبل مجموعات عدة على الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران. إلى أن قيمة معاملة يونغ لها يعادل عدة وحدات غيفا باسكال ، مما يؤكد أن الأنابيب النانوية الكربونية في الواقع طرية في الإتجاه الأشعاعي نصف القطري.

١-٣-٢ الصلادة hardness

يعتبر الألماس أكثر المواد صلادة. ويتحول الغرافيت تحت ظروف الحرارة العالية والضغط العالي إلى الألماس. نجحت أحدى الدراسات في تركي أو تصنيع مادة عالية الصلادة من خلال ضغط الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار إلى ما فوق ٢٤ غيفا باسكال في درجة حرارة الغرفة. كما تم قياس صلادة تلك المادة الجديدة بالمثلم النانوي (Nano indenter) لما بين ٦٢-١٥٢ غيفا باسكال. في حين أن صلادة عينات الألماس ونتريد البورون المرجعية تتراوح بين ١٥٠-٦٢ باسكال، على التوالي. في حين يفوق معامل المرونة الحجمي للأنابيب النانوية الكربونية أحادي الجدار المضغوطة والذي يقدر بـ ٤٦٢-٥٤٦ باسكال، معامل الألماس الذي يصل إلى ٤٢٠ باسكال.

١-٣-٣ الحركية kinetic

تتسم الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران بأنها أنابيب نانوية كربونية متعددة ومتمركزة بدقة وبصورة متداخلة مع بعظها .أن هذه الأنابيب تظهر خاصية انزلاق الأسطوانات فوق بعظها البعض كما في التليسكوب، وبموجبها قد ينزلق محور الأنبوب النانوي الداخلي ،غالباً بدون أحتكاك ،داخل غلاف الأنبوب النانوي الخارجي مما ينتج أو يخلق محامل ذرية خطية أو دورانية .لذلك يعد هذا النموذج من الأمثلة الأولى الحقيقية للتقانة النانوية الجزيئية، المتمثلة في التوضع الدقيق للذرات لإنتاج آلات مفيدة .وقد أستخدمت تلك الخاصية بالفعل لإنتاج أصغر محرك دوار في العالم أجمع لذلك تم وضع تصورات للتطبيقات المستقبلية ومنها المذبذبات الميكانيكية الغيغا هرتزية .

١-٣-٤ الكهربائية electrical

أن بنية الأنبوب النانوي تؤثر بصورة قوية على خصائصها الكهربائية، بسبب التناظر والتركيب الإلكتروني الفريد للغرافيت.

فلو كانت m=n فأن الأنبوب النانوي يكون فلزي (شبيه بناقلية الفلزات)؛ أما أذا كانت n-m تساوي ثلاث أضعاف من ٦٣ فأن الأنبوب النانوي يكون شبه موصل ذو فجوة نطاق صغيرة، ودون ذلك يكون الأنبوب النانوي شبه موصول موجب معتدل. لذا فإن كل الأنابيب النانوية أريكية الشكل (n-m) هي معدنية ، في حين تكون الأنابيب النانوية (٦.٤) (٩.١)، إلخ أشباه موصلات. على الرغم من ذلك، فللقاعدة أستثنائيتها، بسبب أن تأثيرات الأنحناء في الأنابيب النانوية الكربونية صغيرة القطر قد تؤثر بقوة على الخصائص الكهربائية. لذا فإن الأنبوب النانوي الكربوني أحادي الجدار (٥.٠) والذي كان يجب أن يكون شبة موصول يكون في الواقع فلزي وفقاً للحسابات. وعلى نفس المنوال، وبصورة معكوسة فأن الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار متعرجة وأريكية الشكل ذات الأقطار الصغيرة والتي يجب أن تكون فلزية، لها فجوة محدودة (تضل الأنابيب النانوية أريكية الشكل معدنية).

وفقاً للنظرية، فإن الأنابيب النانوية المعدنية لها القدرة على حمل ونقل كثافة التيار الكهربائي ٤×١٠^{٩} A/cm ،والتي تزيد عن ١.٠٠٠ مرة عن تلك الخاصية بالفلزات مثل النحاس . في حين تظهر الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران ذات القشور الداخلية المتداخلة معاً موصلية فائقة مع درجة حرارة انتقالية عاليه نسبياً T_c=12درجة حرارة مطلقة. وعلى النقيض فأن T_c قيمة أسية أقل بالنسبة للحبل المكون للأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار أو تلك الخاصة بالأنابيب النانوية متعددة الجدران ذات القشور أو الأغلفة العادية غير المتداخلة مع بعضها البعض.

١-٣-٥ البصرية visual

تشير الخصائص البصرية للأنابيب النانوية الكربونية إلى الامتصاص والضيائية (الضوئية) ومطيافية رامان للأنابيب النانوية الكربونية. تعد الخصائص البصرية ذات أهمية كبيرة، من منطلق صناعي، اذ أنها يمكن أن تساهم في تحديد نوعية الأنابيب النانوية الكربونية المنتجة، وذلك في تحديد المحتوى الكربوني، والبنية (اليدوانية) والكشف عن العيوب البنيوية. من المتوقع أن تسخر الخصائص البصرية للأنابيب النانوية الكربونية في مجال الصمامات الباعثة للضوء وفي المكاشيف الضوئية. أن الخاصية المميزة لهذا التطبيقات ليست في كفاءتها اذ لا تزال ضعيفة، إنما في أنتقائيتها لطول موجه الإصدار والكشف، وبإمكانية تحسينها عن طريق بنية الأنابيب النانوية الكربونية.

١-٣-٦الحرارية thermal

من المتوقع أن تكون الأنابيب النانوية الكربونية جميعها موصلات جيدة للحرارة على طول الأنبوب، مما يظهر خاصية معروفة باسم (التوصيل الباليستي) (ballisitistic conduction) إلا أنها في الوقت ذاتة تلعب دور عوازل جيدة لمحور الأنبوب بصورة افقية .وقد أظهرت التجارب ان الأنابيب النانوية أحادي الجدار القدرة على توصيل درجة حرارة الغرفة على طول محورها لما يصل إلى ٣٥٠٠ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ؛

ولنقارن هذا بالنحاس، وهو فلز معروف بأنه موصل جيد للحرارة، حيث ينقل $W.m^{-1}.K^{-1}$ 385 ؛ حيث أن الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار خاصية نقل أو توصيل درجة حرارة الغرفة عبر محورها عما يقارب ١.٥٢ $Wm^{-1}.K^{-1}$، والذي وهو تقريباً موصل حراري كلتربة .

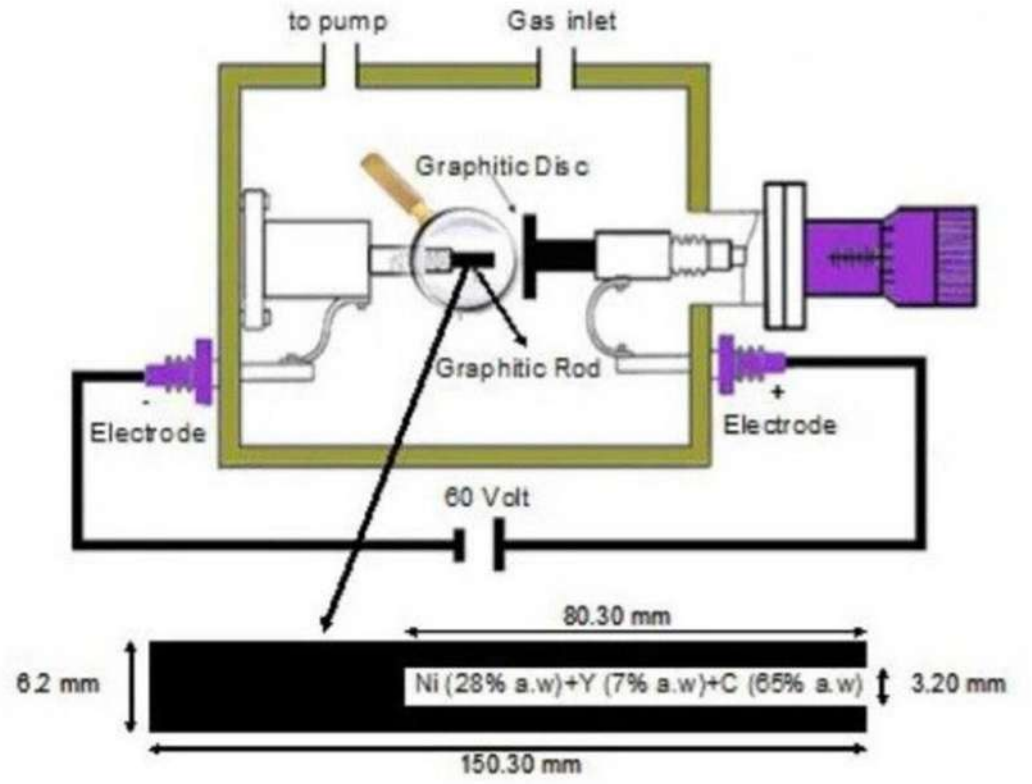
كما تقدر ثباتية درجة الحرارة للأنابيب النانوية الكربونية بما قد يصل الى ٢٨٠٠ س° في الفراغ وإلى ما يصل الى ٧٥٠ س° في الهواء

طرق التصنيع

.manufacturing methods

(١.٢) طرق التصنيع manufacturing method

تطورت الأساليب المستخدمة في أنتاج الأنابيب النانوية الكربونية ذات الأحجام المتناسبة والمعقولة،وكان من بينها؛ تفريغ القوس الكهربائي ،والتذرية الليزرية أ،ول أكسيد الكربون عالي الضغط ،والترسيب الكيميائي للبخار، مع ملاحظة أن معظم تلك العمليات تقع تحت الفراغ أو مصاحبة مع غازات نبيلة . حيث يمكن إنتاج أنابيب النانوية الكربونية من تنامي الترسيب الكيميائي للبخار في الفراغ أو تحت الضغط الجوي ..



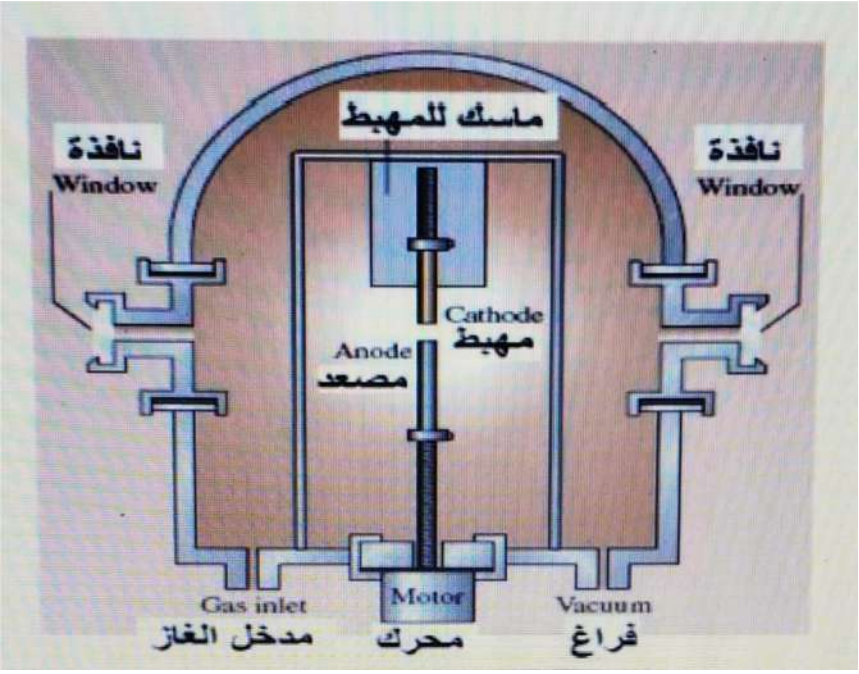
شكل رقم (٢-١)

مخطط للجهاز الذي يتم فيه إنتاج الأنابيب النانوية

أحادية ومتعددة الجدار وال٠فولورين

٢-٢-١ تفريغ القوس الكهربائي electric arc discharge

لوحظ تواجد الأنابيب النانوية الكربونية عام ١٩٩١ في سخام الكربون أقطاب الغرافيت أثناء عملية تفريغ القوس، من خلال استخدام تيار شدته ١٠٠ أمبير، والتي قصد منها إنتاج الفلورين. على الرغم من ذلك، قام باحثان بأول عملية إنتاج الأنابيب النانوية الكربونية المجهرية تمت خلال عام ١٩٩٢ في معمل الأبحاث الرئيسي التابع لشركة إن إي سي وكانت الطريقة المستخدمة مثلها مثل الطريقة التي استخدمت قبل ذلك في عام ١٩٩١. حيث تسامي الكربون الداخل في تركيب أقطاب الغرافيت السالبة بسبب درجة حرارة التفريغ العالية. وبسب أن ذلك الأسلوب يمثل الطريقة المستخدمة في اكتشاف تواجد الأنابيب النانوية الكربونية، فقد أصبح أكثر طريقة واسعة الانتشار في تصنيع الأنابيب النانوية. ويمثل عائد تلك الطريقة ما يقدر بحوالي ٣٠% من حيث الوزن وتقوم بإنتاج الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار ومتعددة الجدران كلتيهما بأطوال تصل الى ٥٠ ميكرومتراً باقل عيوب بنائية



شكل رقم (٢-٢) جهاز لإنتاج الأنابيب النانوية الكربونية بطريقة القوس الكهربائي

١-٣-٢ تذرية ليزرية laser ablation

يبخر الليزر النابض في أثناء عملية التذرية الليزرية الغرافيت الهدف في مفاعل ذو درجة حرارة مرتفعة، في حين يضخ الغاز الخامل عبر ارجاء حجرة المفاعل. وهنا نلاحظ أن الأنابيب النانوية الكربونية تنمو وتتطور على الأسطح الابرد للمفاعل حيث يتكثف الكربون المتبخر.ومن ثم، يمكن دمج سطح مبرد بالماء ضمن النظام بهدف تجميع الأنابيب النانوية. طور د. ريتشارد سمولي تلك العملية بمعاونة مساعديه في جامعة رايس ،والذين في أثناء وقت اكتشاف الأنابيب

النانوية الكربونية ، كانوا يقومون بتسليط الليزر على المعادن لإنتاج جزيئات معدنية متنوعة. وعندما سمعوا بوجود ما يسمى الأنابيب النانوية ، قاموا باستخدام الغرافيت بدلاً من المعادن لإنتاج أنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران. وفي وقت لاحق من هذا العام ،استخدم الفريق مركباً من الغرافيت وجسيمات حفاز معدنية (وكان أفضل منتج يتم الحصول عليه من خلط الكوبلت ونيكل) بهدف تركيب الأنابيب النانوية والكربونية أحادية الجدار

وصل مردود التذرية الليزرية إلى ما يقارب ٧٠% بالإضافة الى أنها أنتجت الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار ذات الأقطار متحكم بها والتي جرى التحكم بها بواسطة درجة حرارة التفاعل. إلا أنها على الرغم من ذلك تعد باهظة التكاليف عن عمليتي تفريغ القوس الكهربائي أو التوضع (الترسيب) الكيميائي للبخار.

٣-٣-١ الترسيب الكيميائي للبخار Chemical vapor deposition

أفادت التقارير حدوث أول عملية لمرحلة الترسيب الكيميائي للبخار في عام .**١٩٥٩**

إلا أنه لم تتكون الأنابيب النانوية الكربونية بواسطة تلك العملية ألا في عام ١٩٩٣. في حين طور الباحثون في جامعة سينسيناتي في عام ٢٠٠٧ علية لتنمية صفائح الأنابيب النانوية الكربونية المصطفة مع بعظها البعض بطول ١٨ مليمتراً على أول نظام نمو لأنبوب نانوي كربوني ET3000 بحسب ما أطلق عليه . وفي أثناء عملية التوضع الكيميائي للبخار يتم تجهيز ركيزة مع طبقة من جسيمات حفاز معدنية، والتي غالباً ما تكون النيكل ،الكوبلت ، الحديد أو مزيجاً منها. هذا ومن الممكن إنتاج الجسيمات النانوية المعدنية بطرق أخرى ،منها اختزال

الأكاسيد أو محاليل الاكاسيد الصلبةَ .وترتبط أقطار الأنابيب النانوية التي تنمو بحجم الجسيمات المعدنية . ويمكن ضبط هذا من خلال ترسيب المعدن المنقوس أو (المغطى) تخمير المعادن حرارياً أو من خلال خرط البلازما لطبقة المعدنَ . ويتم تسخين الركيزة إلى نحو ٧٠٠ درجة مئوية تقريباً . ولبدء عملية نمو الأنابيب النانوية، يتم ضخ غازين إلى داخل المفاعل وهما غاز معالج (على سبيل مثال؛ غاز الأمونتا، النتروجين أو الهيدروجين) مع غاز حاوي على الكربون (ومنه على سبيل المثال؛غاز الأستيلين،الأثيلين ،الأيثان، أو الميثان). ثم تنمو الأنابيب النانوية الكربونية في مواقع البلورة المعدنية؛ حيث يكسر الغاز المحتوى على الكربون على سطح الجسم المحفز، ثم ينتقل الكربون إلى حواف الجسيم، حيث تشكل الأنابيب النانوية. ومازالت هذه الآلية في طور الدراسة. ونلاحظ أن الجسيمات المحفزة قد تضل باقية على أطراف الأنابيب النانوي النامي خلال عملية النمو أو الإنتاج، أو تظل عنده قاعدة الأنبوب النانوي، وذلك وفق للالتصاق أو الألتحام فيما بين الجسيم المحفز والركيزة. كما أن عملية التحلل التحفيزي الحراري للهيدروكربون أصبحت مساحة نشطة للبحث والتجريب. بالإضافة إلى أنها تعد مجالاً واعداً لإنتاج النصيب الأكبر من الأنابيب النانوية الكربونية. هذا ويلعب مفاعل المهد المسيل (Fluidised bed reactor) المفاعل الأوسع استخداماً لتجهيز الأنابيب الناوية الكربونية. إن تحويل المفاعل على النطاق الصناعي يمثل تحدياً رئسياً في هذا المجال.

ومن ثم تعد عملية الترسيب الكيميائي للبخار طريقة شائعة للإنتاج التجاري للأنابيب النانوية الكربونية. ومن أجل ذلك الغرض ، يتم خلط الجسيمات المدنية النانوية مع المدعم المحفز مثل(Mgo) أو(Al_2o_3) لزيادة مساحة السطح لتحقيق عائد(المردود) أعلى من التفاعل التحفيزي لمواد التلقيم الكربونية مع الجسيمات المعدنية.ومن إحدى القضايا المتجسدة في مسار التركيب هذا تتمثل في إزالة تدعيم المحفز من خلال المعالجة الحمضية، والتي قد تدمر في بعض الأحيان البنية الأصلية للأنابيب النانوية الكربونية. على الرغم من ذلك ، فقد أثبتت المدعمات التحفيزية البديلة ، والقابلة للذوبان في الماء ، أنها فعالة في عملية نمو الأنابيب النانوية.

في حال تم إنتاج البلازما من خلال تطبيق مجال الكهربائي قوي خلال عملية النمو (ترسيب كيميائي مدعم بالبلازما للبخار) فأن نمو الأنابيب النانوية سيتبع أتجاه المجال الكهربائي. وبتعديل بناء المفاعل، يصبح من الممكن تركيب الأنابيب النانوية الكربونية المصطفة عمودياً. (بمعنى

تكون الأنابيب متعامدة على الركيزة) ، وهو ذلك التكوين الذي يمثل مصدر شغف واهتمام الباحثين المهتمين في الأنبعاث الإلكترون من الأنبوب النانوي. فدون البلازما، غالباً ما تكون الأنابيب النانوية الناتجة عن عملية النمو عشوائية التوجه. كما أنه تحت بعض ظروف وشروط التفاعل، حتى مع غياب البلازما، فأن الأنابيب النانوية المتقاربة في المسافة ستضل محافظة على إتجاه نموها العمودي الناجم عن الحزمة الكثيفة من الأنابيب المشابهة لسجادة أو غابة. مما يجعلنا نقر أنه من بين كل الطرق المستخدمة في إنتاج الأنابيب النانوية الكربونية، فأن عملية الترسيب الكيميائي للبخار أثبتت أنها أكثر وعيداً من أجل الترسيب على الصعيد الصناعي، بسبب نسبة السعر / الوحدة، وذلك بسبب أن الترسيب الكيميائي للبخار قادراً على إنماء الأنابيب النانوية الكربونية مباشرة على الركيزة المرغوبة ، في حين يجب أن يتم تجميع الأنابيب النانوية في طرق الإنماء الأخرى. حيث أن مواقع النمو يتم التحكم بها من خلال عملية الترسيب الحذر للعامل المحفز. وفي عام ٢٠٠٧ قام فريق من جامعة ميجو بإجراء عملية ترسيب كيميائية للبخار عالية الكفاءة من أجل إنماء الأنابيب النانوية الكربونية من الكافور. هذا وقد ركز الباحثون في جامعة رايس ،على إيجاد طرق لإنتاج كميات ضخمة ونقية من أنواع معينة من الأنابيب النانوية.
على إيجاد طرق لإنتاج كميات ضخمة ونقية من أنواع معينة من الأنابيب النانوية .

التطبيقات والتطبيقات المحتملة للانابيب النانوية الكربونية

Applications and potential applications of

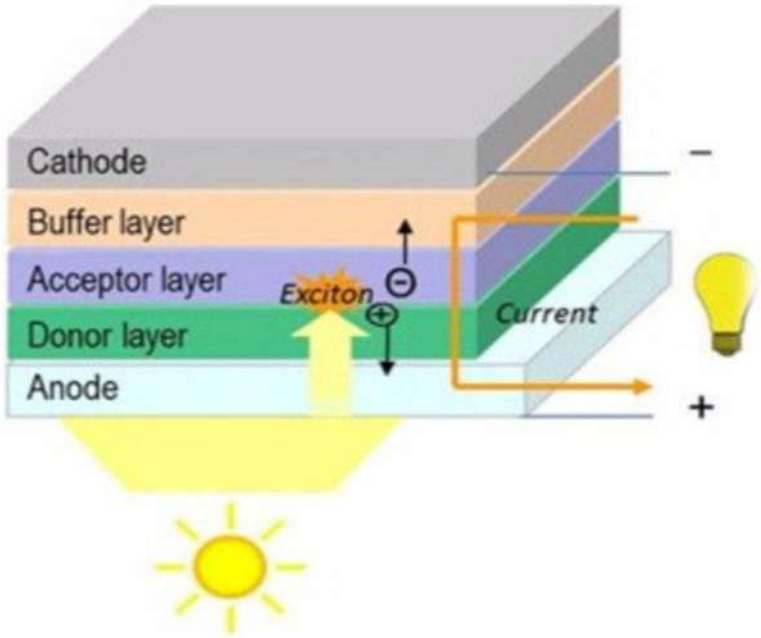
(١.٣)المقدمة

على مدار العقد الماضي تمت دراسة الأجهزة الكهروضوئية التي تستخدم مواد النانو، مثل النقاط الكمومية لأشباه الموصلات، والأسلاك النانوية وما إلى ذلك.

لقد جذبت الأنابيب النانوية الكربونية ذات الهياكل الأحادية البعد التي تشبه الأسطوانة اهتماماً كبيراً للتطبيقات الكهروضوئية نظراً لخصائصها الإلكترونية والبصرية، بما في ذلك القدرة على ضبط فجوات نطاقاتها على مدى طول موجه واسعة، وقيم الشفافية البصرية عالية مع أنخفاض المقاومة. ولقد تم الإبلاغ عن مجموعة متنوعة من الأجهزة الكهروضوئية التي تستخدم الأنابيب النانوية الكربونية مثل الخلايا الشمسية العضوية المستندة إلى الأنابيب النانوية الكربونية، والخلايا الكهروضوئية الكيميائية، الخلايا الشمسية الحساسة للصبغة والخلايا الشمسية للانانوية الكربونية. علاوة على ذلك تزداد بأسمرار أهمية الأنابيب النانوية الكربونية كموار فلطائية ضوئية.[١٨]مع ذلك لا يزال يتعين وحل العديد من المشكلات الحاسمة لزيادة تحسين أداء الأجهزة الكهروضوئية ذات الأنابيب النانوية الكربونية.

(٢.٣)استخدام الأنابيب النانوية الكربونية في الخلايا الكهروضوئية The use of carbon nanotubes in photovoltaic cells

يتم تصنيع الأجهزة الكهروضوئية العضوية (OPVS) من اغشية من اشباه الموصلات العضوية ،مثل البوليمرات ومركبات الجزيئات الصغيرة ،وإعادة ما تكونةبسماكة ١٠٠نانو متر . ونظراً لأن (OPVS) المستند إلى البوليمر يمك إجراؤها بأستخدام عملية الطلاء مثل طلاء الدوران أو صباغة النافثة للحبر ،فهي في خيار جذاب لتغطية المسافات الكبيرة بالإضافة الى الأسطح البلاستيكية المرنة ،بديل منخفض التكلفة واعد للخلايا الشمسية التقليدية المصنوعه من السيليكون البلوري . هناك قدرة كبيره من الأبحاث المخصصة في جميع انحاء الصناعة والأوساط الأكادمية لتطوير (OPVS)وزيادة كفاءة تحويل الطاقة .



شكل رقم (٣-١)

هيكل جهاز ضوئي عضوي ثنائي الطبقة

(٣.٣) مركبات الكاربونية النانوية في الطبقة النشطة ضوئياً Carbon nanocomposites in the photoactive laye

أن الجميع بين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبوليمرات المتقاربة مع الموصلية العالية على طول محور الأنبوب للأنبوب النانوية الكربونية ويوفر قدراً كبيراً من الحوافز لتفريق النفثالينات في الطبقة النشطة ضوئياً للحصول على أجهزة (OPV) أكثر كفاءة. يمكن أن تؤدي الوصلة الغير متجانسة بين الجهات المانحة والمقبولة في هذه الأجهزة إلى فصل الشحنات وجمعها بسبب وجود شبكة مزدوجة. وعلى طول هذه الشبكة، يمكن للإلكترونات والثقوب الأنتقال الى جهات الاتصال الخاصة بها من خلال مستقبل الإلكترون والمتبرع بثقب البوليمر. ويقترح تحسين الكفاءة الكهروضوئية بسبب أدخال تقاطعات البوليمر/ الأنابيب النانوية الداخلية داخل المصفوفة البوليمر. يمكن للحقل الكهربائي العالي في هذه التقاطعات أن يقسم الإكسيتونات ، بينما يمكن للأنبوب النانوي الكربوني أحادي الجدار (SWCNT) أن يعمل كمسار للإلكترونات . ولعل تشتت النفثالينات في حال يتبرع فيه الإلكترون بالبوليمر المتقارن هو الأستراتيجية الأكثر شيوعاً لإستخدام مواد النفثالينات .

من خلال التبخر الحراري أو طلاء الرذاذ، توضع طبقة سمكية يتراوح سمكها بين ٢٠-٧٠ نانومتر من الألمنيوم واحياناً طبقة وسطية من إفلوريد الليثيوم على المادة النشطة ضوئياً .

وقد لوحظت تحسينات بأكثر من درجتين في التيار الضوئي من أضافةSWCNT الى مصفوفة P_3OT جرى التكهن بأنة التحسينات تعزى إلى فصل الشحن في وصلات البوليمر SWCNT وزيادة كفاءة نقل الإلكترونات عبر نقاط التحويل . مع ذلك فقط لوحظت كفاءة تحويل طاقة منخفضة بدرجة أقل من ٠.٠٤% تحت ١٠٠ ميغاواط \سم^{٢} للإضاءة البيضاء للجهاز مما يشير إلى تفكك غير مكتمل بالأكستون عند تركيزات منخفضة من النفثالينات ١.٠%من الوزن .أن الإنقلاب داخل مصفوفة البوليمر كان يعتقد أنه يسبب دوائر قصيرة ولتوفير مواقع تفريغ إضافة، قام باحثون بخلط وظائف SWCNTS في P_3HT لإنشاء P_3HT – SWCNTS مع جهاز ذي طبقتين من فوليرين سي إس أو (١٤) ، غير أن كفاءة الطاقة كانت لا تزال منخفضة نسبياً حيث تقل الإضاءة البيضاء الى ٠.٠١%تحت ١٠٠ميغاواط سم^{٢}.وقد يكون ضعف أنتشار الأكسيتون إتجاه الواجهة البينية المتقبلة للجهة المانحة في بنية بيلاير هو السبب بالإضافة إلى طبقة الفولرين C60 والتي ربما تعاني من ضعف أنتقال الإلكترونات .وفي الآونة الأخيرة ،تم تصنيع جهاز فلطائي ضوئي من بوليمر من , P_3HT SWCNTS . وكان تشعيع الموجات الصغيرة بمزيج من المحلول المائي SWCNT ومحلول co في التولوين .وبعد ذلك أضيف البوليمر المتقارن P_3HT مما أسفر عن كفاءة تحويل طاقة قدرها ٠.٥٧% في أطار محاكاة التشعيع الشمسي (٩٥ ميغاواط \ سم^{٢}) وكانت النتيجة الرئيسية تحسين كفاءة تحويل الطاقة بإضافة محولات التيار الكهربائيSWCNTS . بالإضافة إلى ذلك فأن التسخين يؤدي إلى زيادة حركة الفجوات وكفاءة الطاقة في جهاز البلمرة CNT.

على الرغم من أن النفثالينات المكلورة أظهرت قدرة في الطبقة النشطة الضوئياً، فأنها لم تسفر عن خلية شمسية ذات كفاءة تحويل طاقة أكبر من أفظل الخلايا العضوية الترادفية (فعالية ٦.٥%).

غير أنه تبين في معظم التحقيقات أن الرقابة على المزج المتجانس للإلكترون الذي يتبرع بالبوليمر المتقارن والإلكترون الذي يقبل CNT هي من الجوانب الأكثر صعوبة والأساسية في إيجاد جمع فعال للتيار الضوئي في أجهزة OPV خماسي الكلور المعتمد على النفثالينات. وذلك فأن استخدام النفثالينات المكلورة في طبقة النشطة الضوئياً من أجهزة OPV لايزال في مراحل البحث الأولية ولا يزال هناك مجال لأساليب جديدة للإستفادة بشكل أفظل من الخصائص المفيدة للتحاليل القائمة على النفثالينات .

تتيح الأنابيب النانوية متعددة الأقطاب امتصاص بصري واسع النطاق من الضوء المرئي إلى الإشعة تحت الحمراء مما يؤدي إلى تجسيد التيار الضوئي بالمقارنة باستخدام الأنابيب النانوية المفردة . ولزيادة أمتصاص الضوء الى أقصى حد ،تم اسخدام بنية الجهاز المقلوب مع طبقة أوكسيد الزنك والتي تخترق الطبقة النشطة لتقليص طول الجمع . وقد استخدم أوكسيد الموليبدينوم (MOOX) كطبقة نقل ثقب من أجل زيادة الفولطية لأقصى حد.

حققت الخلايا المصنعة في بهذا الهيكل كفاءة تحويل طاقة قياسية بلغت 3.1% ، وهي نسبة أعلى من أي مواد أخرى للخلايا الشمسية التي تستخدم النفثالينيات المكلورة في الطبقة النشطة . كما أن هذا التصميم يتمتع بثبات أستثنائي مع بقاء CNTS عند حوالي ٩٠% على مدى ثلاثين يوماً .

يسمح الثبات الكيميائي الأستثنائي للمواد النانوية الكربونية بأستقرار بيئي ممتاز بالمقارنة مع معظم الخلايا الفلطاضوئية العضوية التي يجب تكبيسها للحد من التحلل . نسبة إلى أفظل الخلايا الشمسية المتغايرة البوليمرية الفلورية التي تبلغ نسبة البوتاسيوم فيها حوالي ١٠%، فأن الخلايا الشمسية متعددة الأشكال والنانوية والفوليرين لا تزال بعيدة المنال.

(٤.٣) ان انابيب الكربون النانوية كأقطاب شفافة The carbon nanotubes are transparent electrodes

تعد ITo تعد حالياً المادة الأكثر شيوعاً المستخدمه في الأقطاب الكهربائية الشفافة في أجهزة OPV ؛ومع ذلك ، فلديها عدد من العيوب .فهي من ناحية، غير متوافقة جداً مع الركزات البوليمر نظراً لإرتفاع درجة ترسيبها التي تبلغ نحو ٦٠٠ ثانية لـ ITo التقليدية خصائص ميكانيكية مميزة مثل كونها هشة نسبياً . بالإضافة إلى ذلك فأن الجمع بين ترسيب الطبقة المكلفة في الفراغ والأمداد المحدود من الإنديوم يؤدي إلى أن تكون أقطاب ITO رانسبورات عالية الجودة باهظة الثمن . وذلك فأن إيجاد بديل لـ ITO وتسويقه هو أحد محاور التركيز الرئسية للبحث والتطوير في مجال OPV . وأصبحت طلاءات الـ CNT الموصلة في الآونة الأخيرة بديلاً محتملاً يعتمد على مجموعة واسعة من الطرق بما في ذلك الرش ،وطلاء الدوران ،

أظهرت جهود بحثية أخرى أن الأفلام المصنوعة من التفريغ القوسي يمكن أن تؤدي إلى موصلية عالية وشفافية عالية. وعلاوة على ذلك ، فأن وظيفة عمل شبكات SWCNT تقع في نطاق 4.8ev إلى 4.7ev (بالمقارنة مع ITO التي لديها وظيفة عمل أدنى تبلغ4.7ev) مما يؤدي إلى توقع تكون وظيفة عمل ,SWCNT, عالية بما يكفي لضمان جمع الثقوب بكفاءة . ومن الفوائد الأخرى أن أفلام SWCNT تظهر شفافية بصرية عالية في مدى طيفي واسع من الأشعة فوق البنفسجية المرئية إلى مدى قريب للأشعة تحت الحمراء . ويحتفظ عدد قليلا فقط من

المواد بقدر معقول من الشفافية في الجزء المرئي من الطيف فظلاً عن موصلية كهربائية عامة مقبولة .

والأفلام العازلة ذات المرونة عالية ، ولا تتسلل ، ولا تتصدع بعد الانحناء ، ولها موصلات حرارية عالية تتحمل تبديد الحرارة ، ومقاومة أشعاعية عالية . غير أن مقاومة الصفائح الكهربائية في ITOاقل من حيث الحجم عن مقاومة الصفائح المقاسة SWCNT . مع ذلك تبين الدراسات البحثية الأولية أنه يمكن اسخدام الأفلام الرقيقة من نوع SWCNT لإجراء أقطاب شفافة لجميع الثقوب في أجهزة OPV بكفاءة تتراوح بين ١% و٢.٥%مما يؤكد أن هذه الأقطاب مماثلة اللأجهزة المصنعة باستخدام ITO

التطبيقات المحتملة potential application

(٥.٣)المقدمه the introduction

أن التطبيقات المحتملة للأنابيب النانوية الكربونية متنوعة، وأن الأنابيب النانوية الكربونية يمكن استخدامها في عدة مجالات مثل الإلكترونيات، تقنية النانو، علم المواد، التطبيقات البصرية والبناء. وذلك من خلال الاستفادة من خواصها الكهربائية الفريدة، وكفاءتها في نقل الحرارة، وقوتها الغير عادية ومن هذه التطبيقات: -

(٦.٣)-تطبيقات بنوية tructural applications

للأنابيب النانوية الكربونية العديد من المزايا لتستخدم كمادة انشائية، ومن هذه التطبيقات: -

- المنسوجات: - صناعة أقمشة مقاومة للتمزق والمياه.
- سترات حماية: - يتم العمل في معهد ماساتشوستس للتقنية على تصنيع دروع واقية باستخدام الأنابيب النانوية الكربونية كألياف فائقة القوة يمكنها التصدي للرصاص وفحص شروط ارتدائها. قامت جامعة كامبردج بتطوير الألياف وإعطاء رخصة للشركة لتصنيعها
- الخرسانات: - حيث يتم في الخرسانات زيادة القوة الشد وإيقاف أنتشار الكسر.
- بولي إيثلين لقد وجد الباحثون أن إضافة الأنابيب النانوية الكربونية إلي بولي أثيلين يؤدي إلى زيادة معامل اللدونة للبوليمر
- المعدات الرياضية: - تستخدم الأنابيب النانوية الكربونية في صنع معدات الرياضية أقل وأخف وزناً.
- مصعد الفضاء: يتم دراسة الأنابيب النانوية الكربونية كمكوّن محتمل لحبل الشد الذي يمكن لمصعد الفضاء تسلقه وهذا يتطلب الحصول على قوة شدّ أعلى من ٧٠ غيغاباسكال

- العضلات الاصطناعية: - بسبب معدل الانقباض / التمدد الكبير للأنابيب النانوية الكربونية مولدة بذلك تياراً كهربائياً ،لذلك تعتبر الأنابيب النانوية الكربونية مناسبة للإستخدام في العضلات الأصطناعية .
- الجسور: - يمكن استخدام الأنابيب النانوية الكربونية بدلاً من الفولاذ في الجسور المعلقة.
- الحماية من الحرائق: - أن طلي المواد بطبقة رقيقة من ورق البوكي (Bucky paper) يحسن من مقاومتها للحريق بشكل كبير، وذلك يعود إلى الانعكاس الفعال للحرارة عبر كثافة طبقات مضغوطة من الأنابيب النانوية الكربونية أو ألياف الكربون.

(٧.٣)تطبيقات كهروصوتية electroacoustic applications

- مكبر الصوت: - في شهر تشرين الثاني عام ٢٠٠٨ ، أعلن مركز أبحاث التقانة النانوية في تسينفوا (Tsinghua) فوكسكون (FoxConn) في بكين أنه قام بتصنيع مكبرات صوت من شرائح من الأنابيب النانوية الكربونية المتوازية، وهي توليد الصوت بشكل مشابه لكيفية توليد البرق للرعد. ومن التطبيقات التجارية الممكنة استخدمها في مكبرات الصوت الكهرضغطية المستخدمة في بطاقات المعايدة.

(٨.٣)تطبيقات كهرومغناطيسية Electromagnetic applications

يمكن للأنابيب النانوية الكربونية أن تستخدم في صناعة النواقل الكهربائية، العوازل، أنصاف النواقل .ومن هذه التطبيقات :-

- العضلات الاصطناعية: للأنابيب النانوية الكربونية قدرة جيدة على التمدد والتقلص يجعلها بديل مناسب عن الانسجة العضلية.[٧]
- ورق البوكي: وهي شريحة رقيقة مصنعة من الأنابيب النانوية وهي أقوى من الفولاذ بأكثر من ٢٥٠ مرة وأخف منه بأكثر من ١٠مرات، ويمكن أن تستخدم كمصرف حراري لألواح الرقاقات، أو كإضاءة خلفية لشاشات الكريستال السائل LCD أو كقفص فاراداي لحماية الأجهزة الكهربائية/ الطائرات.
- الأسلاك النانوية الكيميائية: وإضافة لما سبق يمكن استخدام الأنابيب النانوية الكربونية لإنتاج أسلاك نانوية مصتّعة من مواد كيميائية أخرى كالذهب أو أكسيد الزنك. وهذه الأسلاك النانوية ستستخدم بدورها لتصنيع أنابيب نانوية من مواد كيميائية أخرى كنتريد الغاليوم. وتكون هذه الأنابيب مختلفة بخواصها عن الأنابيب النانوية الكربونية، فعلى سبيل المثال تكون الأنابيب النانوية المصنّعة من نتريدالغاليوم محبة للماء بينما تكون الأنابيب النانوية الكربونية كارهة للماء، مما يجعلها مناسبة أكثر للاستخدام في الكيمياء العضوية.
- الأغشية الناقلة:إن رسم مساحات شفافة وذات قوة كبيرة من أنابيب النانو أحادية الجدار تعتبر طريقة إنتاج وظيفية. وهي تستخدم في شركة كاناتو Canatu، هلسنكي، فنلندا. وشركة ايكوس Eikos، فرانكلين، ماساتشوستس. وشركة ينيدايم [١٠] Unidym، وادي السيلكون، كاليفورنيا حيث يتم العمل على تطوير أغشية شفافة ناقلة كهربائياً من الأنابيب النانوية الكربونية وكذلك أغشية عديدة الجدر يمكن استخدامها بدلاً من أكسيد الإنديوم القصديري ((ITOفي شاشات الكريستال السائل LCD، الشاشات اللمسية، والأجهزة الكهروضوئية. كما يمكن استخدامها في شاشات الحواسب، الهواتف النقالة، والمساعدات الرقمية الشخصية PDAوآلات الصراف الآليATM
- فرشاة المحرك الكهربائي: تستخدم الأنابيب النانوية الكربونية الناقلة في الفرشاة الكهربائية المستخدمة في المحركات الكهربائية التجارية. وباستخدامها تم الاستعاضة عن الكربون الأسود التقليدي الذي غالباً ما يلّوث الفوليرين الكربوني الكروي. تعمل الأنابيب النانوية على تحسين الناقلية الكهربائية والحرارية، وذلك بسبب تمددها في المصفوفة البلاستيكية للفرشاة. مما يسمح بتناقص الحشو الكربوني من ٣٠% وحتى ٣.٦%. وبذلك يمكن إضافة مصفوفات أكثر في الفرشاة. تعد فرشاة المحركات الكهربائية المكوّنة من الأنابيب النانوية أفضل تشحيماً (من حيث المصفوفة)، أكثر ترطيباً عند العمل (من حيث التشحيم الأفضل والناقلية الحرارية الأعلى)، أقل هشاشة (مصفوفات أكثر وتعزيز للألياف)، وكذلك فهي أقوى وأكثر دقة في التعديل(مصفوفات أكثر). وبما أن الفرشاة تعد نقطة حرجة للفشل في المحركات الكهربائية إلا أنها تحتاج مواداً أكثر مما يجعلها مهمة اقتصادياً أكثر من أي تطبيقات أخرى.

- فتيل المصباح الضوئي: -حيث يمكن استبدال فتيل التنغستن في المصابيح المتوهجة بالأنابيب النانوية الكربونية.
- المغناطيس: - يمكن توليد حقولاً مغناطيسية أقوى وذلك بنقطية الأنابيب النانوية الكربونية عديدة الجدران MWNT بمادة المنفنيت
- الاشتعال الضوئي: - يمكن وضع طبقة من الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار SWNT المغذاة بالحديد بنسبة ٢٩% فوق طبقة من المواد المتفجرة مثل مادة البيتن PETN ويمكن اشعالها باستخدام أفلاس الكامرة التقليدي.
- نواقل عالية: - فقد ثبت أن الأنابيب النانوية ذات ناقلية عالية عند درجات الحرارة المنخفضة.
- مكثفات فائقة: - يجري البحث في معهد ماساتشوستس على استخدام الانابيب النانوية وضمها إلى أسطح الشحنات للمكثفات وذلك لزيادة مساحة السطح وبالتالي قابلية تخزين الطاقة .
- الهوائي الكهرومغناطيسي: - يمكن استخدام الأنابيب النانوية الكربونية كهوائيات لأجهزة الراديو وغيرها من الأجهزة الكهرومغناطيسية .

(٩.٣)التطبيقات الميكانيكية mechanical applications

المذبذب: فالمذبذبات المعتمدة على الأنابيب النانوية الكربونية وصلت إلى سرع أعلى من غيرها من التقنيات (> ٥٠ غيغاهرتز).

غشاء الأنبوب النانوي: حيث يتدفق السائل بشكل أسرع بمقدار خمسة أمثال عما كان متوقعاً بواسطة ديناميكا السوائل التقليدي.

أسطح ملساء: فقد أظهرت بعض الأقمشة المعتمدة على الأنابيب النانوية الكربونية أنها أقل احتكاكاً من التيفلون.

مقاومة نفاذية الماء: حيث تكون بعض الأقمشة المعتمدة على الأنابيب النانوية الكربونية مقاومة لنفاذية الماء.

(١٠.٣)محركات الأنابيب النانوية الكربونية Carbon nanotube engines

كواشف الأشعة تحت الحمراء: تكون انعكاسية ورق البوكي المنتج وفق طريقة ترسب البخار الكيميائي «فائق النماء» ٠.٠٣ أو أقل مما يجعل الأداء الأفضل لصالح كاشف الأشعة تحت الحمراء الكهربي الحراري

المقياس المعياري الراديومتري: كمقياس معياري للسواد.

الإشعاع الحراري: وذلك للانبعاثات الحرارية في الفضاء كالأقمار الصناعية.

التخفي: يكون الامتصاص عالياً ضمن مجال كبير من أقصى الأشعة فوق البنفسجية FUV إلى أقصى الأشعة تحت الحمراء FIR

(١١.٣)الدارات الكهربائية Electric cycles

يمكن للأنبوب النانوي المشكّل عبر وصل نهايتي اثنين من الأنابيب النانوية ذات أقطار مختلفة أن يعمل كثنائي، مما يتيح إمكانية بناء دارات الحاسب بشكل كامل من الأنابيب النانوية. وبسبب خصائصها الجيدة في نقل الحرارة يمكن للأنابيب النانوية الكربونية أن تبدد الحرارة الناتجة عن شرائح الحاسب. ويعادل طول أطول دارة ناقلة للكهرباء أجزاء من الإنش.

تشكل صعوبات التصنيع عقبة كبيرة أمام الأنابيب النانوية الكربونية. تستخدم عمليات تصنيع الدارات المتكاملة القياسية ترسب البخار الكيميائي لإضافة طبقات إلى الرقاقة. ولكن لم يتم إنتاج الأنابيب النانوية الكربونية بشكل كبير باستخدام هذه الطرق بعد.

يمكن للباحثين التعامل مع الأنابيب النانوية بشكل افرادي باستخدام مجهر قوة ذرية في عملية تستغرق وقتاً طويلاً. ولا يزال استخدام طرائق التصنيع القياسية يتطلب من المصممين وضع إحدى نهايتي الأنبوب النانوي، وخلال عملية الترسيب يمكن لحقل كهربائي أن يوجه نمو الأنابيب النانوية، والتي بدورها تميل إلى النمو على طول خطوط الحقل من القطبية السالبة إلى القطبية الموجبة. كطريقة أخرى للتجميع الذاتي يمكن استخدام طرق كيميائية أو حيوية لتحريك الأنابيب النانوية الكربونية كحل لتحديد الأماكن على الطبقة الأساسية. ولكن حتى لو كان توضيع الأنابيب النانوية بدقة ممكناً، يبقى المهندسون غير قادرين على التحكم بأنواع الأنابيب النانوية الناتجة (ناقلة، شبه موصل، أحادية الجدار، عديدة الجدر).

(١٢.٣)التوصيلات الداخلية internal connections

أثارت الأنابيب النانوية الكربونية المعدنية اهتمام الباحثين بما تملكه من تطبيقات، ومن هذه التطبيقات التوصيلات ذات تكامل النطاق الواسع جدا VLSI وذلك لما تملكه من استقرار حراري كبير، ناقلية حرارية عالية، وسعة نقل التيار الكبيرة. يمكن لأنبوب نانوي كربوني معزول أن ينقل كثافة تيار تتجاوز ١٠٠٠ ميلي أمبير / سنتيمتر مربع دون أي خسائر حتى في درجات الحرارة المرتفعة ٢٥٠o درجة سلسيوس، مما يحد من مخاوف الوثوقية المتعلّقة بالارتحال الكهربائي التي تعاني منها توصيلات النحاس. وقد أظهرت نماذج عمل حديثة بعد مقارنتها للطريقتين أن توصيلات حزم الأنابيب النانوية الكربونية تقدم مزايا أفضل من توصيلات النحاس. وقد أظهرت تجارب حديثة مقاومة منخفضة تصل إلى ٢٠ أوم باستخدام بنى مختلفة كماأظهرت قياسات مفصّلة للناقلية أجريت على نطاق واسع من الحرارة توافقاً مع نظرية ناقل شبه أحادي البعد غير منتظم. توفر التوصيلات المختلطة التي توظف الأنابيب النانوية الكربونية بالإضافة إلى توصيلات النحاس مزايا من حيث الوثوقية والإدارة الحرارية.

(١٣.٣) الترانزستورات transistors

تم استخدام الأنابيب النانوية الكربونية شبه الموصلة في تصنيع ترانزستورات المفعول المجالي CNTFET، والتي أظهرت بعض المزايا تعود إلى خصائصها الكهربائية الجيدة مقارنة مع ترانزستورات المفعول المجالي ذو شبه موصّل من أكسيد ومعدن MOSFET

المعتمدة على السيليكون. وبما أن متوسط المسار الحر للإلكترون في الأنابيب النانوية الكربونية احادية الجدار يمكن أن يتجاوز ١ ميكرومتر، وترانزستورات المفعول المجالي ذات الأنابيب النانوية الكربونية طويلة القناة تبدي خصائص قريبة من النقل القذفي، مما ينتج أجهزة عالية السرعة. ومن المتوقع أن تعمل أجهزة الأنابيب النانوية الكربونية مجال ترددي من مئات الغيغا هرتز. كما أظهرت بعض الدراسات الحديثة التي أوضحت مزايا ومساوئ الأشكال المختلفة من ترانزستورات المفعول المجالي ذات الأنابيب النانوية الكربونية أن ترانزستورات المفعول المجالي ذات الأنابيب النانوية الكربونية النفقية توفر خصائص أفضل بالمقارنة مع البنى الأخرى. وقد وجد أن هذا الجهاز يتفوق من حيث منحني العتبة الفرعية- وهي خاصية مهمة في التطبيقات ذات الطاقة المنخفضة. تنمو الأنابيب النانوية عادة على جزيئات نانوية من معدن مغناطيسي (حديد Fe،كوبلت Co) مما يسّهل إنتاج أجهزة دورانية الكترونية spintronic. وقد أجري تحكم بالتيار عبر ترانزستور مقعول مجالي باستخدام حقل مغناطيسي في بنية نانوية أحادية الأنبوب

(١٤.٣)التصميم الإلكتروني وأتمت التصميم Electronic design and design automation

على الرغم أن أجهزة الأنابيب النانوية الكربونية وتوصيلاتها قد أثبتت جودتها كل على حدا حسب خواص كل منها، إلا أن القليل من الجهود التي حاولت ربطهم ضمن دارة حقيقية. معظم بنى ترانزستورات المفعول المجالي ذات الأنابيب النانوية الكربونية تستخدم أساس من السيليكون كبوابة خلفية. وإن تطبيق جهود مختلفة على البوابة الخلفية يمكن أن يسبب بعض المخاوف عند تصميم دارات كبيرة من هذه العناصر. لذلك فقد طرحت العديد من البنى ذات البوابة العليا لتجنب هذه المخاوف. وقد أبلغ حديثاً عن بناء دارة منطقية متكاملة بشكل كامل على أنبوب نانوي واحد تم فيها استخدام البوابة الخلفية. ينبغي دراسة العديد من التحديات المرتبطة بالعمليات قبل أن تدخل الأجهزة والتوصيلات المعتمدة على الأنابيب النانوية الكربونية خط تصنيع تكامل النطاق الواسعِ جداً الأساسي. وتشمل المشاكل المتبقية عمليات التنقية، الفصل، التحكم عبر الطول، الكايرالية أو اليدوانية chirality والمحاذاة المطلوبة، الموازنة الحرارية المنخفضة، ومقاومة نقاط الاتصال العالية. وقد طرحت العديد من الأفكار المبتكرة لبناء ترانزستورات عملية من شبكات نانوية. وحيث أن ضعف التحكم بالكايرالية ينتج خليطاً من أنابيب نانوية كربونية معدنية وشبه موصلة من أي عملية تصنيع، وأنه من الصعب التحكم باتجاه نمو الأنابيب النانوية الكربونية، فيمكن طرح مصفوفات عشوائية سهلة الإنتاج من الأنابيب النانوية أحادية الجدار لبناء ترانزستورات غشائية رقيقة. ويمكن استخدام هذه الطريقة لبناء ترانزستورات ودارات عملية تعتمد على الأنابيب النانوية الكربونية دون الحاجة لنمو وتجميع دقيق.

المصادر Sources

١- تينينت، هاورد ج. (٥ أيار ١٩٨٧) الألياف الكربونية، طريقة لانتاج المثل وومكونات تحوي المثل نسخة محفوظة ٠٣ مارس ٢٠١٦ على موقع واي باك مشين.

2-بيتون، د. س. (١٧ حزيران ١٩٩٣) النمو المحفز بالكوبلت للأنابيب النانوية الكربونية ذات الجدران أحادية الطبقة الذرية. الطبيعة ٣٦٣: ٦٠٥–٦٠٧ doi:10.1038/363605a0 .
نسخة محفوظة ١٩ يونيو ٢٠١٧ على موقع واي باك مشين.

3- إيجيما، سوميو، توشيناري اشيهاشي (١٧ حزيران ١٩٩٣)الأنابيب النانوية الكربونية أحادية القشرة ذات القطر ١ نانومتر الطبيعة ٣٦٣: ٦٠٣–٦٠٥ doi:10.1038/363603a0 .
نسخة محفوظة ٢١ يونيو ٢٠١٧ على موقع واي باك مشين.

٤- دي هيير (١٧ تشرين الثاني ١٩٩٥)مصدر انبعاث الالكترون المجالي المعتمد على الأنابيب النانوية الكربونية العلوم ٢٧٠: ١١٧٩–١١٨٠ .
doi:10.1126/science.270.5239.1179نسخة محفوظة ٣٠ يناير ٢٠١٠ على موقع واي باك مشين.

٥- مهبط الانبعاث المجالي وطريقة تصنيعه. براءة الاختراع EP0801805 نسخة محفوظة ١٦ فبراير ٢٠١٧ على موقع واي باك مشين

٦- تانس، س (٣ نيسان ١٩٩٧) الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار الفردية كأسلاك كمومية الطبيعة ٣٨٦: ٤٧٤–٤٧٧ doi:10.1038/386474a0 .نسخة محفوظة٢٣ أكتوبر ٢٠١٢ على موقع واي باك مشين.

٧- تانس، س (٧ أيار ١٩٩٨) ترانزستور لقياس درجة حرارة الغرفة معتمد على أنبوب نانوي كربوني واحد الطبيعة ٣٩٣: ٤٩–٥٢ doi:10.1038/29954 .نسخة محفوظة ٠٥ مارس ٢٠١٦ على موقع واي باك مشين.

٨- كولينز؛ فيليب، ميتشل س. أرنولد، فيدون أفوريس (٢٧ نيسان ٢٠٠١)هندسة الأنابيب النانوية الكربونية ودارات الأنابيب النانوية باستخدام الانهيار الكهربائي العلوم ٢٩٢ (٥٥١٧): ٧٠٦–٧٠٩ .doi:10.1126/science.1058782 .ببمد ١١٣٢٦٠٩٤نسخة محفوظة ٢٩ أبريل ٢٠٠٩ على موقع واي باك مشين.

٩- الأنابيب النانوية في الخط السريع ١٨ كانون الثاني ٢٠٠٢نسخة محفوظة ٠٨ يوليو ٢٠٠٦ على موقع واي باك مشين.

١٠- برنامج بحث جنرال إلكتريك يحقق إنجازاً كبيراً في مجال التقانة النانوية جنرال إلكتريك نسخة محفوظة ٠٥ مارس ٢٠٠٧ على موقع واي باك مشين.

١١- قياسات نسيج الأنابيب النانوية الكربونية ترتفع (١٨ آب ٢٠٠٥ (Nanotechweb.orgنسخة محفوظة ١٢ يونيو ٢٠٠٦ على موقع واي باك مشين

12-التقانة النانوية التطبيقية لانتاج تلفاز ٢٥-إنش ملون باستخدام الأنابيب النانوية الكربونية ٣٠ ايلول ٢٠٠٣نسخة محفوظة ٠٣ أغسطس ٢٠٠٨ على موقع واي باك مشين..

13-إعادة نمو العصب البصري باستخدام مقوّم من الألياف النانوية ١٣ آذار ٢٠٠٦ نسخة محفوظة ١٦ أبريل ٢٠٠٧ على موقع واي باك مشين.

14-الأنابيب النانوية الكربونية دخلت سباق فرنسا ٧ تموز ٢٠٠٦ نسخة محفوظة ٨ فبراير ٢٠٢٠ على موقع واي باك مشين.

١٥ - بطارية جديدة مبنية من الفيروسات يمكنها تزويد الطاقة للسيارات والأجهزة الالكترونية ٢ نيسان ٢٠٠٩ نسخة محفوظة ٠١ مارس ٢٠١٤ على موقع واي باك مشين ,Iijima ^ -.

16-عضلات الايروجيل باستخدام الأنابيب النانوية الكربونية فائقة اللدونة، كبيرة النبضة، أوليف 2009-03-20 .Sciencemag.org نسخة محفوظة ٢٦ مارس ٢٠٠٩ على موقع واي باك مشين.

17- ز. زاو، ج. جو "تحسين تثبيط النار للمركبات الحرارية المعدلّة بالألياف النانوية الكربونية" (٢٠٠٩) تحميل مجاني نسخة محفوظة ١٣ مارس ٢٠٢٠ على موقع واي باك مشين.

18 -الأنابيب النانوية تشغّل الإيقاعات الطبيعة ٠٣-١١-٢٠٠٨ نسخة محفوظة ٢٤ يوليو ٢٠١٧ على موقع واي باك مشين..

19- ز. كي. تانغ العلوم ٢٩٢ (٢٠٠١)٢٤٦٢ نسخة محفوظة ٠٩ مايو ٢٠٠٩ على موقع واي باك مشين.

20- يمكن لهوائيات الأنابيب النانوية أن تكشف الإشارات الكهرومغناطيسية بشكل مباشر[وصلة مكسورة] نسخة محفوظة ٢٦ يناير ٢٠٢٠ على موقع واي باك مشين.