

به نام اولین برگ



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک (اتمی و مولکولی)

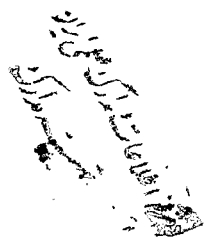
بررسی اثر چند کاتالیست در محیط های پلاسما-گازی مختلف بر فرآیند  
رشد لوله های نانویی کربنی با استفاده از طیف سنجی پراکندگی رامان،  
پراش اشعه ایکس (XRD)، تصویر برداری SEM و FT-IR.

نگارش

سپهر واشقانی فراهانی

استاد راهنما

دکتر رسول ملک فر



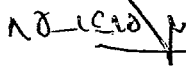
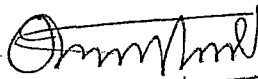

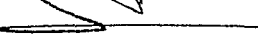

۱۳۸۶ / ۹ / ۲۳

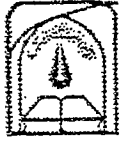
اسفند ۱۳۸۵

۱۰۲۵۴۶

## تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

اعضای هیئت داوران نسخه نهایی پایان نامه آقای سپهر فراهانی و اشقانی رشته فیزیک (اتمی مولکولی) تحت عنوان: «بررسی چند کاتالیست در محیطهای پلاسما - گازی مختلف بر فرآیند رشد لوله های نانوکربنی با استفاده از طیف سنجی پراکندگی FTIR-RAMAN و پراش اشعه ایکس (XRD) و تصویربرداری (SEM)» را از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مورد تأیید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	آقای دکتر رسول ملکفر	استادیار	
۲- استاد ناظر داخلی	آقای دکتر احمد یزدانی	دانشیار	
۳- استاد ناظر داخلی	آقای دکتر محمدرضا ابوالحسنی	استادیار	
۴- استاد ناظر خارجی	آقای دکتر مجید مجتهدزاده لاریجانی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر محمدرضا ابوالحسنی	استادیار	



انستگاه تربیت مدرس  
دانشکده علوم پایه

بسمه تعالی

### آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۲ در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند  
 «کتاب حاضر حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته مهرس است که در سال ۱۳۸۵ در دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴- در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

ماده ۵- دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶- اینجانب سرکار خانم / جناب آقای دانشجوی رشته مهرس متعهد و ضامن اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.  
 مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و

نام و نام خانوادگی: سرکار خانم / جناب آقای  
 تاریخ و امضا:

تقدیم به

مادر

پدر

و بزرادرانم

سجاد

سهیل

## تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می دانم که از زحمات کلیه کسانی که در انجام این پروژه پایان نامه مرا به انجای مختلف یاری کردند تشکر کنم.

در ابتدا باید از محبت های مادرم که با لطف و احساس مسولیت، همراه و مشوق من بودند سپاسگزاری کنم؛ و همچنین از پدر و برادرانم سهیل و سجاد که از مشوقان نزدیک من بودند بسیار ممنونم.

جا دارد که از زحمات استاد راهنمای خود جناب آقای دکتر ملک فر که در طول این پروژه از هیچ کمکی دریغ نمودند و با راهنمایی های خود باعث پیشرفت پروژه گردیدند کمال تشکر را به جا بیاورم.

از دوستان خوبم نیز که در تمام دوره کنار من بودند و به شکل های مختلف مرا کمک و اسباب پیشرفت پروژه را فراهم می نمودند تشکر می نمایم؛ دوستانی که با آنها در کنار هم، دوره ای علمی، با نشاط و خاطره انگیز را داشتم.

بر خود لازم می دانم که از سه دوست خودم خانم هانیه یزدانفر، آقای هادی حسینیان عارفی و آقای علیرضا قدیمی ماهانی که به طور ویژه علاوه بر کمک های شایانشان به من و پروژه ام، محبت فراوانی نسبت به من داشتند که همیشه در یاد و خاطره من باقی خواهند ماند، خاصاً سپاسگزاری و قدردانی نمایم!

سپهر واشقانی فراهانی

اسفند ۱۳۸۵

## چکیده

طیف سنجی رامان و تصویر برداری SEM، ابزارهایی مناسب برای تجزیه و تحلیل لوله های نانویی، شناخته شده اند. با استفاده از کارکرد این دو دستگاه می توان به ساختار هندسی- شبکه ای لوله های نانویی و برخی از وجوهات مربوط به خواص الکترونیکی، مکانیکی و دیگر خواص آنها پی برد. در اینجا ما به سنتز لوله های نانویی کربنی به روش تخلیه قوس پرداخته ایم. در این روش، لوله های نانویی کربنی در یک محیط پلاسمایی تشکیل می شوند که کیفیت و کمیت تولید، به شرایط پلاسمای داخل رآکتور بستگی دارد. در این پروژه، از دو محیط پلاسمایی مختلف استفاده شده است؛ یکی با فلوی گاز بی اثر آرگون و دیگری با گاز بی اثر هلیوم. هم چنین، به منظور تولید لوله های نانویی با کیفیت بهتر، چندین کاتالیست مختلف مورد استفاده قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده اند. این کاتالیست ها، به صورت تک- عنصری و دو- عنصری می باشند که کاتالیست های تک- عنصری شامل عناصر آهن، کبالت و نیکل و دو- عنصری ها، ترکیبات Ni/Co، Ni/Mo و Co/Mo می باشند. آزمایشات، در فلوی حدود ۴۵ml/min و در شرایط متعارفی فشار صورت گرفته است، که اختلاف پتانسیل دستگاه ۲۵۷ و جریان آن ۱۰۰A می باشد. برخی از لوله های نانویی تولید شده، توسط طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) نیز تجزیه و تحلیل می گردند و اطلاعات خاص مربوط به هر طیف اخذ خواهد شد.

بنابراین، در فصل اول، به توصیف خواص پیوندی و هندسی- شبکه ای لوله های نانویی، خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها، پرداخته می شود؛ در فصل دوم، یک نظریه در مورد خواص پلازما

به عنوان بستری برای رشد لوله های نانویی کربنی ارائه می گردد. در فصل سوم، چند مدل ساختاری در تشکیل لوله های نانویی کربنی به روش تخلیه قوس معرفی می گردد. در فصل چهارم، روش های طیف سنجی و شناسایی لوله های نانویی ارائه می شود؛ در فصل پنجم، تولید لوله های نانویی کربنی در شرایط فیزیکی متفاوت و انتخاب شده، توضیح داده می شود، و نمونه ها از طریق روش های ذکر شده در فصل چهارم، با یکدیگر مقایسه خواهند شد؛ و در فصل ششم، نتایج اخذ شده، به همراه پیشنهادات، ارائه خواهد گردید.



## فهرست

عنوان ..... صفحه

مقدمه ..... ۱

### فصل اول. ساختار و خواص لوله های نانویی کربنی

۱-۱) پیوند در اتم های کربن ..... ۴

۲-۱) لوله های نانویی بدون نقص ..... ۷

۳-۱) لوله های نانویی دارای نقص ..... ۱۵

۴-۱) خواص الکترونیکی لوله های نانویی ..... ۲۳

۵-۱) خواص اپتیکی و اپتوالکترونیکی لوله های نانویی ..... ۳۰

۶-۱) خواص مکانیکی و الکترومکانیکی لوله های نانویی ..... ۳۴

۷-۱) خواص شیمیایی و الکتروشیمیایی لوله های نانویی ..... ۴۱

۱-۷-۱) باز کردن ..... ۴۱

۲-۷-۱) خیس کردن و پر کردن ..... ۴۲

۳-۷-۱) جذب سطحی و انتقال بار ..... ۴۳

۴-۷-۱) آرایش شیمیایی، در میان افزودن، و تغییر و تبدیل ..... ۴۵

۸-۱) خواص گرمایی و ترموالکتریکی لوله های نانویی ..... ۴۶

### فصل دوم. پلازما، بستری مناسب برای تشکیل لوله های نانویی کربنی

۱-۲) مقدمه ..... ۵۰

۲-۲) مکانیسم تشکیل لوله های نانویی کربنی (CNT) در روش تخلیه قوس ..... ۵۲

۳-۲) تحلیل شرایط فیزیکی تخلیه قوس در شکل گیری لوله های نانویی کربنی ..... ۵۳

- ۵۴ ..... (۱-۳-۲) توزیع میدان الکتریکی، پتانسیل و بار فضایی
- ۵۵ ..... (۲-۳-۲) حالت یونیزاسیون و چگالی پلاسما در فضای میان الکترودها
- ۵۶ ..... (۳-۳-۲) پوشش بخار کربنی بر سطح کاتد و منطقه تشکیل لوله های نانویی
- ۵۷ ..... (۴-۳-۲) مدل تشکیل رسوب بر سطح کاتد
- ۵۹ ..... (۱-۴-۳-۲) تشکیل دانه
- ۶۰ ..... (۲-۴-۳-۲) رشد لوله کربنی در مرحله جریان یونی شبه پایدار
- ۶۱ ..... (۳-۴-۳-۲) خاتمه رشد، کلاهدک یافتگی و رشد مجدد لوله نانویی

### فصل سوم. مدل های ساختاری تشکیل لوله های نانویی کربنی

- ۶۶ ..... (۱-۳) مقدمه
- ۶۶ ..... (۲-۳) مکانیسم هسته سازی لوله نانویی کربنی تک دیواره از ساختار گرافیتی دو لایه ای
- ۶۸ ..... (۱-۲-۳) تشکیل هسته لوله نانویی کربنی صندلی وار
- ۷۰ ..... (۲-۲-۳) تشکیل هسته لوله نانویی کربنی زیگزاگ
- ۷۲ ..... (۳-۲-۳) تحلیل ملاحظات انرژی در فرآیند تشکیل هسته در این مدل
- ۷۵ ..... (۳-۳) مکانیسم دو مرحله ای تشکیل لوله نانویی کربنی تک دیواره بدون و با دخالت کاتالیست
- ۷۷ ..... (۱-۳-۳) مکانیسم هسته سازی لوله نانویی کربنی با حضور کاتالیست فلزی
- ۷۸ ..... (۲-۳-۳) مکانیسم رشد لوله نانویی کربنی بدون و با حضور کاتالیست فلزی
- ۷۹ ..... (۱-۲-۳-۳) مکانیسم رشد بدون حضور کاتالیست
- ۷۹ ..... (۲-۲-۳-۳) مکانیسم رشد با حضور کاتالیست

### فصل چهارم. ابزارهای طیف سنجی و خصوصیات آنها در تعیین لوله های نانویی

- ۸۴ ..... (۱-۴) مقدمه

۸۵	..... نواحی طیف سنجی الکترومغناطیسی (۲-۴)
۸۷	..... طیف سنجی پراکندگی RAMAN (۳-۴)
۹۱	..... جزئیات و ملاحظات مربوط به فرآیند طیف سنجی رامان CNT ها (۱-۳-۴)
۹۳	..... اهمیت ساختار الکترونی لوله های نانویی و انرژی لیزر تهییجی (۲-۳-۴)
۹۶	..... RBM-شعاعی مد های تنفسی (۳-۳-۴)
۹۹	..... G باند - ماسی- باند (۴-۳-۴)
۱۰۱	..... تجزیه و تحلیل قطبش (۵-۳-۴)
۱۰۳	..... باند D القائی از نامنظمی ها (۶-۳-۴)
۱۰۵	..... مقایسه FT-IR و Raman (۷-۳-۴)
۱۰۷	..... TEM و SEM میکروسکوپ الکترونی (۸-۳-۴)
۱۱۱	..... پراش اشعه X (XRD) (۴-۴)
۱۱۲	..... پراش اشعه X لوله های نانویی کربنی (۱-۴-۴)
۱۱۴	..... طیف سنجی انتقال فوریه مادون قرمز (FT-IR) (۵-۴)
۱۱۴	..... دستگاه طیف سنج FT-IR (۱-۵-۴)

### فصل پنجم. تولید لوله های نانویی کربنی

۱۲۱	..... مقدمه (۱-۵)
۱۲۱	..... شرح سیستم آزمایش (۲-۵)
۱۲۴	..... برقراری شرایط بهینه آزمایشگاهی برای تولید لوله های نانویی کربنی (۳-۵)
۱۲۶	..... بررسی و مقایسه طیف Raman لوله های نانویی کربنی تولید شده (۴-۵)
۱۳۸	..... بررسی تصاویر SEM لوله های نانویی کربنی تولید شده (۵-۵)

۶-۵) بررسی طیف XRD لوله های نانویی کربنی تولید شده ..... ۱۴۳

۷-۵) بررسی طیف FT-IR لوله های نانویی کربنی تولید شده ..... ۱۴۶

### فصل ششم. نتایج و پیشنهادات

۱-۶) نتایج ..... ۱۵۰

۲-۶) پیشنهادات ..... ۱۵۴

منابع ..... ۱۵۶

لوله های نانویی کربنی<sup>۱</sup> که از بخار کربنی به روش تخلیه قوس<sup>۲</sup> یا تبخیر لیزری<sup>۳</sup> گرافیت تولید می شوند، به طور کلی نقائص ساختاری کمتری نسبت به دیگر روش های شناخته شده دارند. این امر به دلیل دمای بالای فرآیند رشد می باشد که باعث آنیل کردن<sup>۴</sup> نقائص در صفحات لوله ای گرافینی می گردد. لوله های نانویی چند دیواره<sup>۵</sup> که با چنین روش های دما- بالایی تولید می گردند، در صورت پایداری پلاسما، معمولا به طور کلی مستقیم می باشند، بر خلاف لوله های تاب خورده ای که در دماهای پایین در رسوب بخار شیمیایی<sup>۶</sup> با حضور کاتالیست فلزی تولید می گردند. گرچه کیفیت لوله های دما- پایین می تواند با آنیل کردن پس از تولید در دماهایی بالاتر از ۲۰۰۰ K بهبود یابد، ولی خواص الکتریکی و مکانیکی لوله های نانویی چند دیواره در روش تخلیه قوس بسیار برتر خواهد بود. لوله های نانویی با کیفیت بالا از اهمیت بالایی در بسیاری از کاربردها برخوردار می باشند، به همین دلیل روش های کاتالیستی با تولید بالا هیچگاه به طور کامل جایگزین روش های تولید با دمای بالا نخواهند شد. بنابراین نیاز صنعت به روش های تولید دما- بالا با مقیاس بزرگتر رشد فزاینده ای خواهد داشت. لوله های نانویی تک دیواره<sup>۷</sup> نیز تقریبا مستقل از فرآیند سنتز نقائص ساختاری ندارند، بنابراین روش های دیگر می توانند

---

<sup>۱</sup> carbon nanotubes (CNTs)

<sup>۲</sup> arc discharge method

<sup>۳</sup> laser ablation

<sup>۴</sup> anneal

<sup>۵</sup> multiwall nanotubes (MWNTs)

<sup>۶</sup> chemical vapor deposition (CVD)

<sup>۷</sup> single wall nanotubes (SWNTs)

با روش های تخلیه قوس و تبخیر لیزری رقابت کنند و در تولید انبوه در آینده جایگزین این روش ها گردند. گستره این جایگزینی بستگی به خواص مهم دیگری مثل ثابت بودن بردار کایرال<sup>۱</sup>، توزیع اندازه، و تصفیه سازی راحت لوله نانویی دارد. مشخص نیست کدامیک از فرآیندهای تولید چنین کیفیاتی را بهتر تضمین می کنند. بنابراین زمینه هایی قوی برای تعقیب روش ها و مطالعات مربوطه در ارتقا دادن مقیاس چنین روش هایی وجود دارد. هر چه دانش ما در مورد مکانیسم رشد لوله های نانویی بیشتر باشد، توانایی ما در ارتقای مقیاس تولید و حصول کیفیات مطلوب تر، بیشتر خواهد بود.

---

<sup>۱</sup> chiral vector

# فصل اول

## ساختار و خواص لوله های نانویی کربنی

- پیوند در اتم های کربن
- لوله های نانویی بدون نقص
- لوله های نانویی دارای نقص
- خواص الکترونیکی لوله های نانویی
- خواص اپتیکی و اپتوالکترونیکی لوله های نانویی
- خواص مکانیکی و الکترومکانیکی لوله های نانویی
- خواص شیمیایی و الکتروشیمیایی لوله های نانویی
- خواص گرمایی و ترموالکتریکی لوله های نانویی

## ۱-۱) پیوند در اتم های کربن

برای فهم ساختار و خواص لوله های نانویی، ابتدا باید ساختار پیوند و خواص اتم های کربن را دانست. یک اتم کربن دارای شش الکترون است که دو تای آنها اربیتال  $1s$  را پر می کنند، چهار الکترون باقیمانده، اربیتال های هیبریدی  $sp^2$  یا  $sp^3$  را مانند  $sp$  می توانند پر کنند که اولی مربوط به ساختار پیوندی گرافیت، لوله های نانویی و فلورن ها<sup>۱</sup> و دومی مربوط به ساختار پیوندی الماس می باشد. در الماس چهار الکترون ظرفیت هر اتم کربن، اربیتال هیبریدی  $sp^3$  را اشغال می کنند و چهار پیوند کووالانسی هم ارز  $\sigma$  را ایجاد می کنند که در آن چهار اتم کربن در چهار جهت تتراهدرال به یکدیگر متصل می شوند. این ساختار بست گونه<sup>۲</sup> سه بعدی، الماس را به عنوان سخت ترین ماده شناخته شده در آورده است. چون الکترون ها در الماس پیوندهای کووالانسی  $\sigma$  تشکیل می دهند و مشمول پیوندهای  $\pi$  غیر جایگزیده<sup>۳</sup> نیستند، الماس به لحاظ الکتریکی عایق است. الکترون های الماس به طور محکم در پیوندهای میان اتم های کربن نگهداشته شده اند. این الکترون ها نور را در ناحیه ماورای بنفش جذب می کنند ولی در ناحیه مرئی و مادون قرمز جذب نمی کنند بنابراین الماس شفاف به نظر می رسد. الماس همچنین ضریب شکست بالایی دارد که دلیل زیبایی ظاهر آن است و همچنین به طور نامعمول دارای هدایت گرمایی بالایی است [۱].

در گرافیت، سه الکترون پوسته بیرونی هر اتم کربن، اربیتال هیبریدی تخت  $sp^2$  را اشغال و سه پیوند  $\sigma$  در راستای یک صفحه تخت برقرار می کنند، و الکترون باقیمانده، یک اربیتال (پیوند)  $\pi$  را خارج از

---

<sup>۱</sup> fullerenes  
<sup>۲</sup> interlocked  
<sup>۳</sup> delocalized

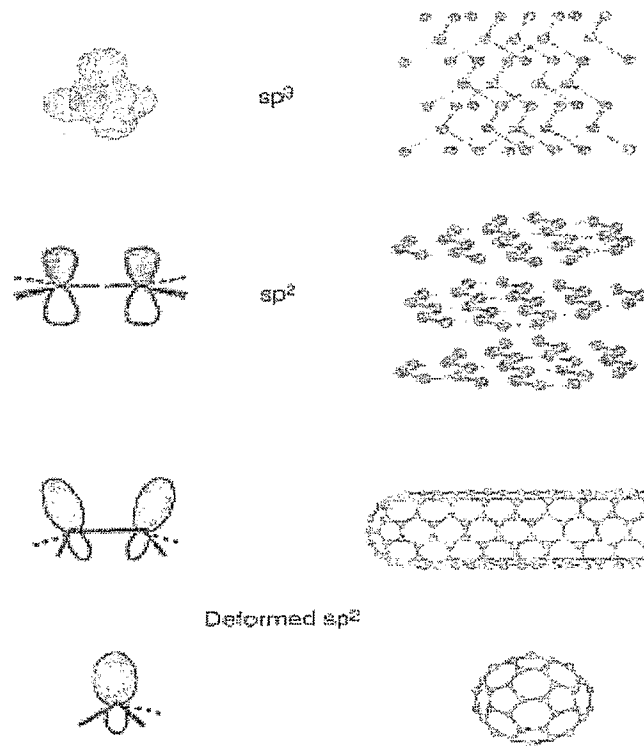


صفحه (عمود) ایجاد می کند. این یک شبکه هگزاگونال<sup>۱</sup> تخت را ایجاد خواهد کرد. نیروهای واندروالس، این صفحات شبکه ای هگزاگونال را به موازات یکدیگر و به فاصله  $0.335\text{nm}$  از یکدیگر نگاه می دارند. طول پیوند  $\sigma$  در اربیتال  $sp^2$ ،  $0.14\text{nm}$  و قدرت پیوند آن  $420\text{kcal/mol}$  در حالیکه در ساختار  $sp^3$ ، طول پیوند  $0.15\text{nm}$  و قدرت آن  $360\text{kcal/mol}$  می باشد. بنابراین، صفحات گرافیت قوی تر از الماس می باشند. به علاوه، اربیتال یا الکترون  $\pi$  خارج از صفحه، در طول صفحه گرافیتی توزیع شده است و باعث می شود که گرافیت، هدایت گرمایی و الکتریکی بیشتری داشته باشد. برهم کنش الکترون  $\pi$  غیر جایگزیده با نور سبب می شود که گرافیت سیاه به نظر برسد. برهم کنش ضعیف واندروالسی میان صفحات گرافیتی موجب شده است که گرافیت، نرم و بنابراین ایده آل به عنوان روان سازنده باشد، زیرا صفحات به راحتی نسبت به هم حرکت می کنند و روی هم سر می خورند [۲].

یک لوله نانویی، استوانه توخالی است که به صورت صفحه گرافیتی چرخیده، می باشد. پیوند در نانولوله ها اساساً  $sp^2$  می باشد. هرچند، انحنای دایره ای باعث تحدید کوانتومی<sup>۲</sup> و باز-هیبریداسیون<sup>۳</sup>  $\sigma-\pi$  می گردد که در آن سه پیوند  $\sigma$  به طور جزئی از حالت تخت خارج می شوند؛ و به تاثیر، اربیتال  $\pi$  در خارج لوله غیر جایگزیده تر خواهد شد. این موضوع سبب می شود که نانولوله ها نسبت به گرافیت، به لحاظ مکانیکی قوی تر، دارای هدایت گرمایی و الکتریکی بیشتر، و از نظر شیمیایی و بیولوژیکی فعال تر گردند. به علاوه، امکان ایجاد نقائص توپولوژیکی<sup>۴</sup> مثل پنتاگون<sup>۵</sup> ها و هپتاگون<sup>۶</sup> ها در داخل شبکه هگزاگونال وجود دارد که باعث ایجاد نانولوله های بسته کلاهک<sup>۷</sup> گونه، خم شده<sup>۸</sup>،

---

<sup>۱</sup> hexagonal  
<sup>۲</sup> quantum confinement  
<sup>۳</sup> rehybridization  
<sup>۴</sup> topological  
<sup>۵</sup> pentagons  
<sup>۶</sup> heptagons  
<sup>۷</sup> capped  
<sup>۸</sup> bent



شکل (۱-۱). ساختارهای پیوندی الماس، گرافیت، لوله های نانویی، و فلورن ها: زمانی که یک صفحه گرافیتی می چرخد و یک لوله نانویی را ایجاد می کند، اربیتال هیبریدی  $sp^2$  به دلیل باز-هیبریداسیون  $sp^2$  به سمت اربیتال  $sp^3$  یا ترکیب پیوندهای  $\sigma - \pi$ ، تغییر شکل می دهد. این شکل ساختاری باز-هیبریداسیون، همراه با تحدید الکترون  $\pi$ ، به لوله های نانویی خواص الکترونیکی، مکانیکی، شیمیایی، گرمایی، مغناطیسی، و اپتیکی خارق العاده و یگانه ای داده است [۸].

مارپیچی<sup>۱</sup> و چنبره ای<sup>۲</sup> می گردد؛ لازم به ذکر است که الکترون ها در پنتاگون ها و هپتاگون ها به دلیل باز-توزیع<sup>۳</sup> الکترون های  $\pi$ ، جایگزیده خواهند بود. به عنوان قرارداد، ما لوله های نانویی را بدون نقص<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> helical  
<sup>۲</sup> toroidal  
<sup>۳</sup> redistribution  
<sup>۴</sup> defect-free

می نامیم اگر تنها از شبکه هگزاگونال تشکیل شده باشند و دارای نقص<sup>۱</sup> اگر همچنین شامل نقائص توپولوژیکی مثل پنتاگون ها و هپتاگون ها یا دیگر نقائص ساختاری<sup>۲</sup> و شیمیایی باشند.

فلورن ها ( $C_{60}$ ) از ۲۰ هگزاگون و ۱۲ پنتاگون تشکیل شده اند [۳]. پیوند در آن نیز  $sp^2$  است اگرچه با خصلت  $sp^3$  به دلیل انحنای بالا، ترکیب می شود. ساختارهای خاص پیوندی در مولکول های فلورن باعث ایجاد پدیده های جالبی شده است، مثل گذار فلز-عایق<sup>۳</sup>، ویژگی های مغناطیسی غیر معمول، خواص و ساختار بسیار غنی باند اپتیکی و الکترونیکی، کارکرد شیمیایی و ذخیره مولکولی<sup>۴</sup>. به دلیل این خواصی که ذکر شد، فلورن ها در کاربردهای الکترونیکی، مغناطیسی، اپتیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و پزشکی به طور وسیع مورد استفاده قرار می گیرند.

## (۲-۱) لوله های نانویی بدون نقص

یک نانولوله تک دیواره، استوانه توخالی از صفحه گرافیتی است، در حالیکه یک نانولوله چند دیواره، گروهی از لوله های نانویی تک دیواره هم محور است (نانولوله تک دیواره در سال ۱۹۹۳، ۲ سال پس از کشف نانولوله چند دیواره [۴]، کشف شد [۵،۶]). آنها اغلب ساختارهایی مستقیم یا خمیدگی الاستیک به صورت انفرادی یا ریسمانی دارند که توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۵</sup>، میکروسکوپ الکترونی جاروبی<sup>۶</sup>، میکروسکوپی بر حسب نیروهای اتمی<sup>۷</sup>، و میکروسکوپ تونل زنی جاروبی<sup>۸</sup> دیده میشوند.

<sup>۱</sup> defective

<sup>۲</sup> structural defects

<sup>۳</sup> metal-insulator transition

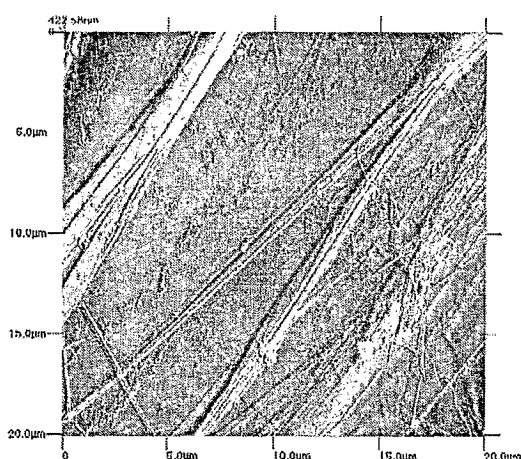
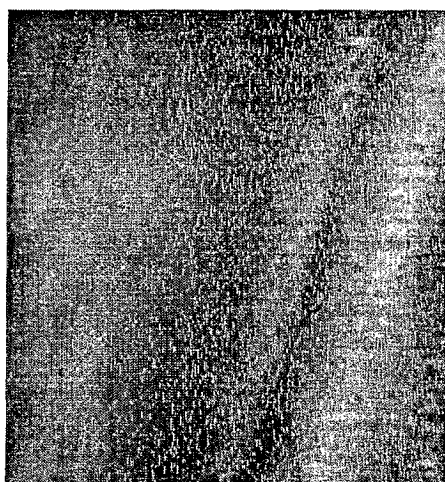
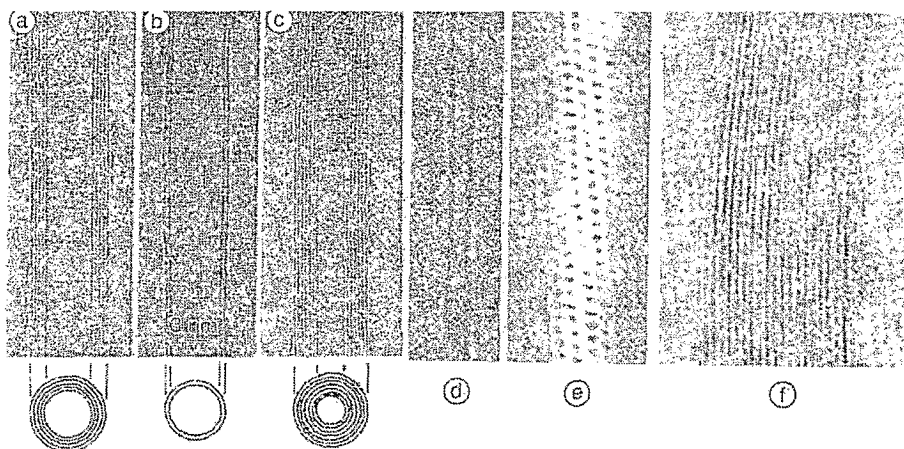
<sup>۴</sup> molecular stacking

<sup>۵</sup> transmission electron microscopy (TEM)

<sup>۶</sup> scanning electron microscopy (SEM)

<sup>۷</sup> atomic force microscopy (AFM)

<sup>۸</sup> scanning tunneling microscopy (STM)



شکل (۱-۲). لوله های نانویی همگن با شبکه هگزاگونال. تصاویر TEM (a)، (b) و (c)، از سه لوله نانویی چند دیواره، و تصویر TEM (d) از یک لوله نانویی تک دیواره می باشد که برای اولین بار توسط Iijima در سال ۱۹۹۱ (لوله های نانویی چند دیواره) و ۱۹۹۳ (لوله های نانویی تک دیواره) کشف شدند؛ (e)، تصویر STM با دقت اتمی از یک لوله نانویی تک دیواره است؛ و (f)، یک تصویر TEM از یک ریسمان از لوله های نانویی تک دیواره می باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۹۶ توسط Thess و همکاران [۷] گزارش گردید [۸]؛ تصویر قرمز رنگ سمت چپ، تصویر STM با دقت اتمی از یک لوله نانویی تک دیواره می باشد که شکل ساختار هگزاگونال آن قابل مشاهده است، و تصویر قرمز رنگ سمت راست، تصویر AFM از لوله های نانویی تک دیواره می باشد.