نانولوله‌های کربنی

کبری حاجی‌زاده*

اشاره

نانولوله‌ها ترکیب جدیدی از اتم‌های کربن به‌شکل استوانه‌ای توخالی است و دارای خواص ویژه‌ای است که باعث شده کاربردهای بسیار متنوعی در نانوفناوری، الکترونیک، اپتیک، مکانیک و حوزه‌های مختلف علوم مواد پیدا کنند این ترکیب به‌طرز عجیبی مستحکم است و خواص الکترونی منحصر بفردی از خود نشان می‌دهد.

اسم نانولوله به‌دلیل اندازه‌ی آن‌ها انتخاب شده زیرا قطر آن‌ها در حد چند نانومتر است و طولشان در نهایت به چند میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱).

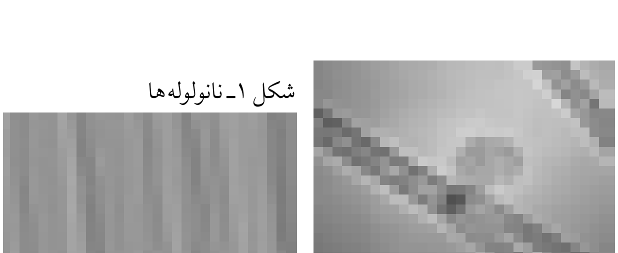
مقدمه

کربن از استثنایی‌ترین عنصرهایی است که در طبیعت به شکل‌های مختلف دیده می‌شود از جواهرهایی درخشان گرفته تا دوده‌های سیاه و تنها عنصری است که می‌تواند به راه‌های مختلف و متنوعی با اتم‌های دیگر ترکیب شود. اما تقریباً تا همین اواخر نمی‌دانستند که تعداد زیادی از اتم‌های کربن می‌توانند به شکل خیره کننده‌ای، به دور هم جمع شوند و مولکولی زیبا و جالب تولید کنند.

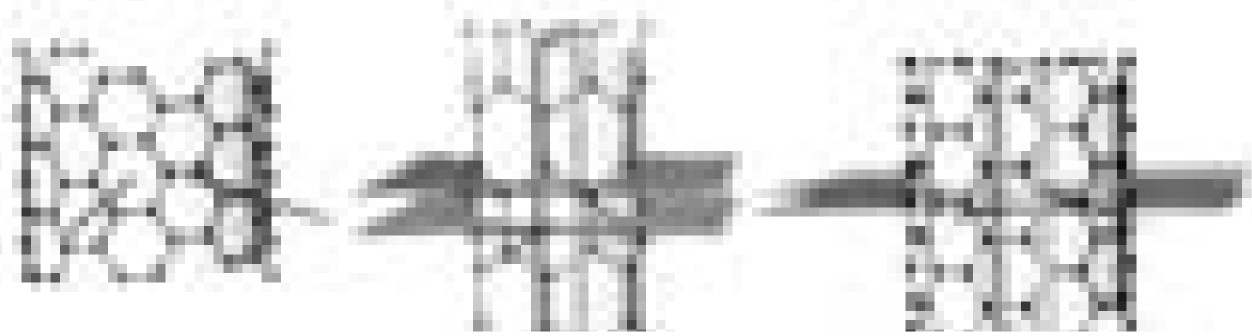
ظهور دسته‌ی جدیدی از مواد کربنی، فولرن‌ها[1]، در سال‌های اخیر موجب شگفتی محققان و دانشمندان گردید که به دلیل تقارن زیبا و خارق‌العاده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد این مولکول و استعداد بالقوه‌ی کاربرد آن در نانو فناوری است. فولرن تنها شکل پایدار از کربن خالص است و در این میان نانولوله‌های کربنی که از خانواده‌ی فولرن‌ها هستند کاربرد بسیار چشمگیری در صنعت پیدا کرده‌اند و بدلیل ابعاد نانویی، استحکام فوق‌العاده، انعطاف‌پذیری بالا و رسانایی شگفت‌انگیز آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

نانولوله‌ها به‌طور کامل از پیوندهای sp^2 تشکیل شده‌اند، مشابه آنچه در گرافیت وجود دارد. این ساختار پیوندها، قوی‌تر از پیوند sp^3 موجود در الماس است. به همین دلیل نانولوله‌ها مستحکم‌ترین مولکول موجود در طبیعت هستند[۱].

نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ به‌طور تصادفی کشف شدند[۲]. ایجیما[2] که در حال ساخت فولرن بود متوجه مواد دیگری شد که در فرایند ساخت فولرن به‌صورت گدازه‌ی پیرولیتی در کاتد تولید می‌شد[۳] و باعث کاهش تولید فولرن می‌شد. وی متوجه شد این مواد به‌شکل لوله هستند و آن‌ها را *باکی لوله* یا نانولوله نامید. در آن زمان انتظار نمی‌رفت که بعدها بتوانند در اسپکتروسکوپی جرمی این مواد را مشاهده



شکل ۱ـ نانولوله‌ها



شکل ۲ـ ساختمان نانولوله‌ها

کنند[۴]. روش تولید انبوه نانولوله‌ها را اولین بار کراشمر[۳] و هافمن[۴] به‌کار گرفتند[۵]. بعدها ابسن[۵] و آجایان[۶] در سال ۱۹۹۲ با افزایش فشار شرایط ساخت نانولوله‌ها را بهبود بخشیدند و متوجه شدند مناسب‌ترین فشار برای باکی‌بال‌ها ۲۰۰-۱۰۰تور[۶] و برای نانولوله‌ها ۵۰۰ تور است. وایتر[۷] دریافت با وجود این‌که فشار عامل مهمی در تولید نانولوله‌ها است. توان از اهمیت بیشتری برخوردار است. و با استفاده از یک میله‌ی گرافیتی به قطر $\frac{۱}{۴}$ اینچ به عنوان آند و جریان بیش از ۱۰۰آمپر می‌تواند تعداد زیادی اشکال پلی‌هدرال ساخت. [۷]

ساختمان نانولوله‌ها

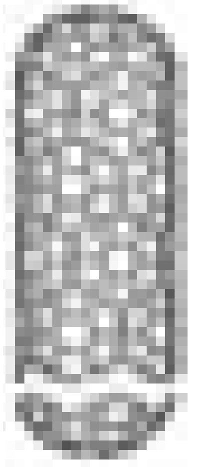
نانولوله‌ها در واقع استوانه‌های توخالی از اتم‌های کربن هستند. (شکل۲) از لحاظ ظاهر، نانولوله‌ها به‌صورت لایه‌لایه‌هایی از گرافیت هستند فاصله‌ی بین لایه‌ها ۰/۳۴nm است. مسیر پیوندهای کربنی به‌صورت مارپیچی هستند.

نانولوله‌ها به‌صورت میکروبلورهای لوله‌ای از گرافیت هستند و در سطح رویه‌ی لوله‌ها هیچ درز یا شکافی دیده نمی‌شود.

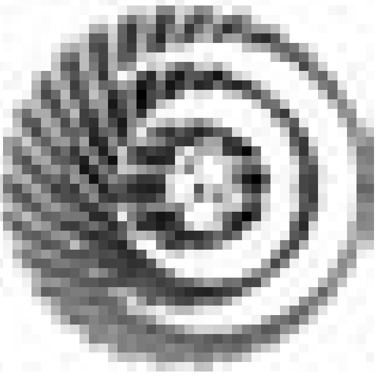
هر نانولوله دارای سطوحی با درجه‌ی پیچش، متفاوت است. در واقع، برای این‌که سطوح به بهترین شکل در کنار یکدیگر قرار بگیرند لازم است درجه‌های پیچش در لوله‌ها متفاوت باشد که در این صورت می‌تواند فاصله‌ی بین لایه‌ای را به کمترین مقدار برساند.

نانولوله‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: نانولوله‌های تک‌جداره (SWNT)[۸]، نانولوله‌های چندجداره (MWNT)[۹]. نانولوله‌های چندجداره در واقع نانولوله‌های تک‌جداره‌ی هم‌مرکزی هستند که در برخی از آن‌ها بین این تک‌جداره‌ها برهم‌کنش ضعیفی (برهم کنش لبه ـ لبه) وجود دارد. به‌نظر می‌رسد این برهم‌کنش باعث تداوم رشد نانولوله‌ها در فرایند ساخت می‌شود (شکل۳)

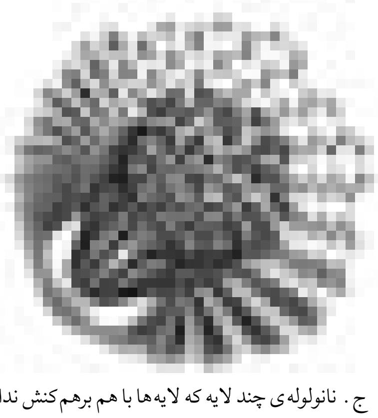
طول نانولوله‌ها معمولاً بین ۱ تا ۱۰ میکرومتر است، اغلب آن‌ها تقریباً به‌طول ۲میکرومتر هستند و قطرشان حدوداً بین ۱ تا ۲۰ نانومتر است، یعنی ۱۰۰۰۰بار کوچکتر از یک تار مو، بنابراین انتظار می‌رود نانولوله‌ها خواص مواد نانویی را دارا باشند. گاهی اوقات نانولوله‌ها به‌صورت رویه‌های گرافیتی کامل و بدون درز نیستند. در واقع یک لایه‌ی تک‌اتمی ـ ضخیم از گرافیت به نام گرافن[۱۰] به دور خود پیچیده می‌شود و نانولوله‌ی تک‌جداره را به صورت استوانه‌ی بدون درز تشکیل می‌دهد (شکل۴) روشی که صفحه‌های گرافن پیچیده می‌شوند با جفت شاخص (n,m) (بردارهای چرخشی) تعیین می‌شود (شکل۵) nوm اعداد صحیح هستند و اگر m = ۰



الف . نانولوله‌ی تک لایه

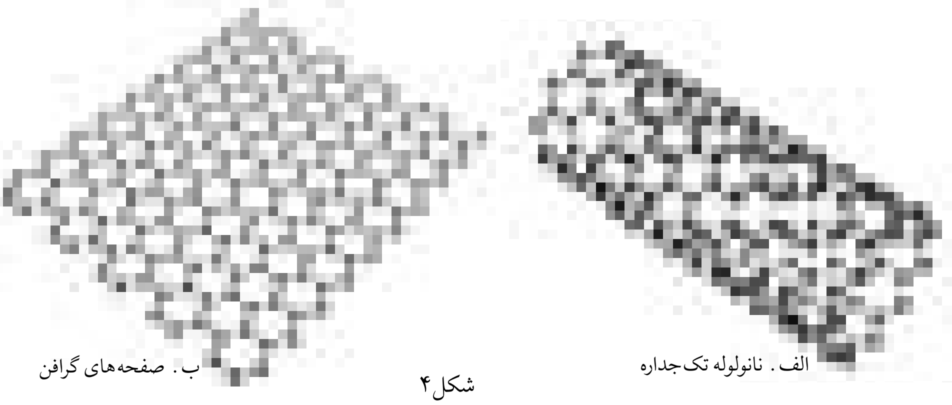


ب. نانولوله‌ی چند لایه ـ که لایه‌ها به‌صورت نانولوله‌های تک‌لایه‌ی هم‌مرکز هستند



ج. نانولوله‌ی چند لایه که لایه‌ها با هم برهم‌کنش ندارند

شکل۳



ب . صفحه‌های گرافن

الف . نانولوله تک جداره

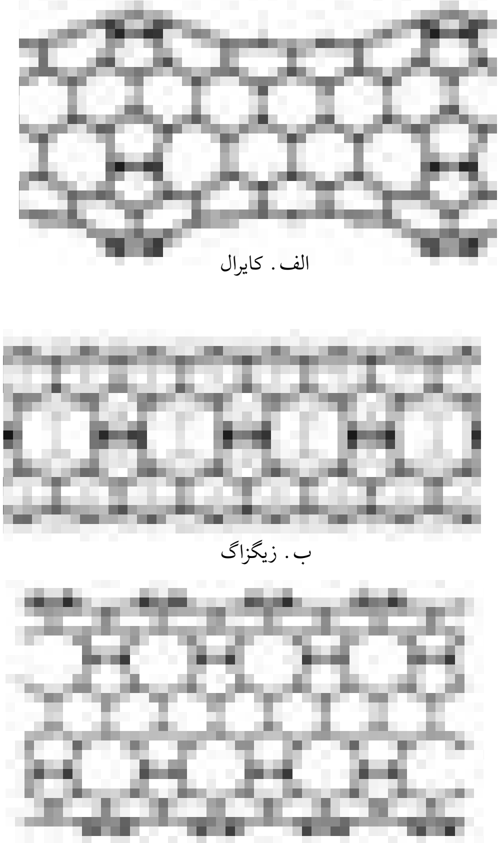
شکل۴

باشد نانولوله «زیگزاگ» نامیده می‌شود، اگر m=n «آرمچیر»[11] و اگر m n به آن «کایرال»[12] می‌گویند (رجوع شود به شکل ۶) این دسته از نانولوله‌ها به‌دلیل ویژگی‌های الکتریکی خاصی که دارند بسیار اهمیت دارند. این ویژگی‌ها منحصربه نانولوله‌ی تک‌جداره است و نانولوله‌های چند جداره از این ویژگی‌ها برخوردار نیستند. (شکل۴)

نانولوله‌های چندجداره به دو شکل تشکیل می‌شوند یا به‌صورت نانولوله‌های تک‌جداره هم‌مرکز که در برخی از انواع MWNT این SWNTها با هم برهم کنش دارند. یا ممکن است یک صفحه‌ی گرافیتی دور خودش مانند طومار پیچیده شود و MWNT را تولید کند. (شکل۵)

معیارهای مشخصه نانولوله‌ها قطر درجه‌ی مارپیچی و بردارهای غلتشی (n,m) است. (شکل۶ را ببینید)

کیفیت نانولوله‌ها به روش تولیدشان بستگی دارد. تولید نانولوله‌ها بسیار ساده است، اما تولید با کیفیت بالا که به‌صورت هگزاگونال پیوسته و بدون درز باشد، به‌سادگی میسر نیست.



الف . کایرال

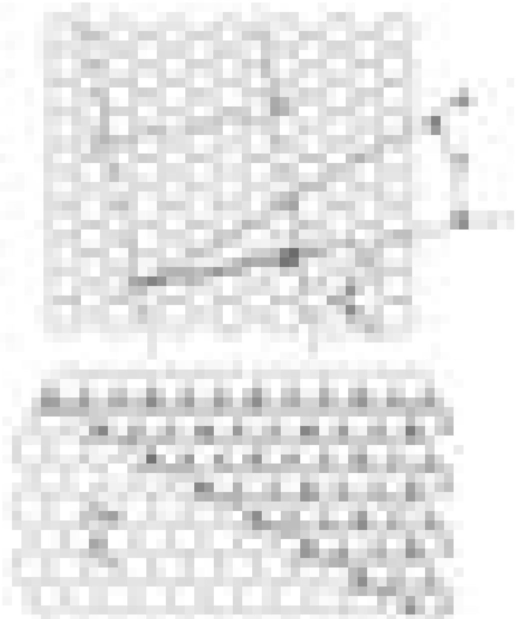
ب . زیگزاگ

ج . آرمچیر

شکل۶ ـ نمونه‌های مختلف نانولوله‌ها

روش ساخت

روش‌های مختلفی برای تولید نانولوله‌ها وجود دارد. ۱ . تخلیه‌ی قوس



شکل ۵ ـ بردارهای غلتشی n و m

۲ . مونوکسید کربن فشار بالا (Hipco) ۳ . فرساب لیزری ۴ . CVD[۱۳] . روش قوس کارآمدترین روش برای مقاصد علمی است، و چون این روش در دماهای بسیار بالا (۴۰۰۰K) انجام می‌شود دارای ساختار منظمی است، نانولوله‌ها به‌صورت دسته‌های کوچکی تشکیل می‌شوند و در کنار هم رشته‌های ۵۰μm را تولید می‌کنند.

نحوه‌ی جهت‌گیری نانولوله‌ها در رسوب نسبت به امتداد محور جریان قوس، نانولوله‌های حاصله و کیفیت ساختار آن‌ها، همگی به شرایط قوس بستگی دارد.

کمیت‌های مهم در تولید نانولوله‌ها عبارتند از: فشار خالص گاز، سرعت رشد، سرعت سرد شدن و پایداری پلاسمای قوس [۹].

در شرایط مطلوب حدود ۶۰٪ مواد اصلی تبدیل به نانولوله می‌شوند [۹]

اسمالی با تشریح روند تشکیل نانولوله‌ها، علت تشکیل لوله به‌جای شکل کروی را بررسی کرد. و علت را به این شکل بیان کرد:

میدان الکتریکی قوی، که ناشی از ولتاژ در فضای لایه‌های باردار نزدیک کاتد است، می‌تواند مسئول تولید چنین ساختاری باشد [۱۰]. گاملی[۱۴] (از دانشگاه بین‌المللی استرالیا) علت را به این ترتیب توضیح می‌دهد:

رقابتی که بین یون‌های کربنی ناهمگن که در یک جهت در ناحیه‌ی شکاف شتاب می‌گیرند، و کربن‌هایی که از کاتد به صورت گرمایی تبخیر شده‌اند و با توزیع سرعت همگن به حرکت درمی‌آیند، باعث تولید نانولوله‌ها می‌شود[۱۱]. به عبارت دیگر، وجود محور تقارن در ناحیه‌ی واکنش ناشی از نمونه‌های کربن باعث تولید ساختار لوله‌ای می‌شود. این توضیح در مورد توزیع دوگانه‌ی نمونه‌های کربنی بیش‌تر با محصولات تولید شده سازگار است. (مثلاً در مورد نانو ذرات که پلی‌هدرال هستند و محور تقارن ویژه‌ای ندارند).

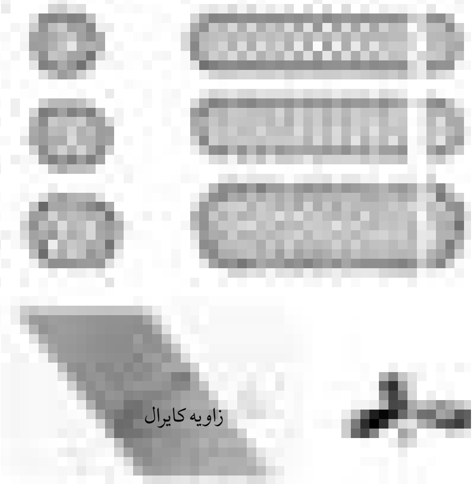
بعدها در این روش کاتالیست‌های فلزی مانند کبالت، آهن و نیکل به میله‌ی کربنی اضافه می‌شوند و برای تولید پلاسمای قوسی مورد استفاده قرار می‌گیرند که باعث ایجاد مقدار زیادی نانولوله‌ی تک‌رویه با قطر ۱٫۲nm می‌شود.

این روش وقتی برای اولین بار توسط دکتر تین و همکاران وی در IBM و NEC گزارش شد، خیلی مورد توجه قرار گرفت زیرا این نوع نانولوله‌ها بیش از نانولوله‌های چندجداره با نظریه سازگار است. اما جدا کردن این نانولوله‌های تک‌رویه از فلزات باقی‌مانده و دوده مشکل بزرگی بود، چرا که روش‌های تصفیه‌سازی به‌گونه‌ای نبود که این امکان را فراهم آورد. بعد از بررسی روش‌های مختلفی که به‌طور استاندارد برای تخلیص استفاده می‌شد (در NEC)، کشف شد نانولوله‌ها می‌توانند در کوره‌ای با دمای ۱۰۰۰K به روش اکسایش تصفیه شوند. چون نانولوله‌ها از نوک درونی مورد استفاده قرار می‌گیرند روش اکسایش نتیجه‌های مهمی در بر داشت در شکل (۷) این تفاوت آشکارا دیده می‌شود. گرچه مقدار محصول خیلی کم بود ولی سرانجام مقداری نانولوله‌ی چندرویه خالص در دسترس بودند و می‌توانستند مورد مطالعه قرار گیرند. (شکل ۷)

شکل ۷ـ درون یک نانولوله

ناکاملی‌ها

اغلب، نانولوله‌ها دارای ناکاملی‌هایی هستند که ساختار آن‌ها را تغییر می‌دهند (مانند حلقه‌های پنج‌وجهی و هفت‌وجهی) و در بررسی ویژگی‌های آن‌ها باید درنظر گرفته شوند. نانولوله‌های چندجداره ناکاملی‌های بیشتری نسبت به نانولوله‌های تک‌جداره دارند به همین دلیل ساخت نانولوله‌های تک‌جداره از اهمیت بیشتری



شکل ۸ـ
به لبه‌های نانولوله‌ها نگاه کنید
یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های نانولوله‌های کربنی زاویه‌ی کایرال آن‌هاست این زاویه نشان‌دهنده‌ی این است که صفحه‌های گرافن چطور دور هم پیچیده می‌شوند و یک استوانه را به‌وجود می‌آورند. اگر محور نانولوله‌ها هم‌راستا با خطوط افقی باشد ($\theta = ۰$) (در شکل بالا) نانولوله‌ی زیگزاک نامیده می‌شود. محور نانولوله‌ها اگر در زوایای ۰ تا ۳۰ درجه جهت‌گیری کنند نانولوله کایرال نامیده می‌شود.

برخوردار است و ساخت آن‌ها نیز به مراتب مشکل‌تر است. درجه خلوص و کاملی مورد نیاز برای نانولوله‌ها به ویژگی مورد اندازه‌گیری بستگی دارد. کیفیت نانولوله‌های تولید شده به روش کار بستگی دارد. به همین دلیل نتیجه‌هایی که گروه‌های کاوشگر مختلف بدست می‌آورند با هم متفاوت است، نانولوله‌ها در واقع رویه‌های گرافیتی هستند که مانند طومار لوله شده‌اند.

شکی نیست که این ساختار وجود دارد. اما این ساختار، ساختار تمام نمونه‌ها نیست. ثابت شده که نانولوله‌ها استوانه‌های به صورت لایه لایه از رأس، شروع به تحلیل رفتن می‌کنند و به طرف داخل می‌روند، اگر نانولوله‌ها درز (یا شکاف) داشتند، محل درز در هر جای لوله که باشد در ابتدای کار اکسیده می‌شود. ولی تاکنون چنین چیزی مشاهده نشده است. ناکاملی‌های نانولوله‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: ناکاملی‌های مربوط به سطح آن‌ها (توپولوژی آن‌ها)، ناکاملی ناشی از دورگه شدن مجدد آن‌ها و پیوندهای ناکامل. ناکاملی‌های مربوط به توپولوژی ناشی از حضور حلقه‌های غیرشش‌وجهی در ساختار آن‌ها (به‌جز در سرها که به شش پنج‌وجهی برای بسته شدن آن نیاز دارد) است. این ناکاملی ناشی از جفت‌های پنج‌وجهی ـ هفت‌وجهی است. شیمیدان‌ها این ساختار را به‌عنوان ساختار آزولین[۱۵] می‌شناسند. این جفت ۵/۷ باعث انحراف در ساختار نانولوله نمی‌شود. اما بسته به جهت‌گیری آن نسبت به محور لوله به آرامی قطر، درجه‌ی پیچش یا کایرالیتی[۱۶] لوله را عوض می‌کند. بعضی از این جفت‌های ۵/۷ به سختی دیده می‌شوند مگر این‌که همه‌ی آن‌ها در یک جهت قرار بگیرند. در این حالت قطر نانولوله به تدریج زیاد می‌شود، این پهن‌شدگی گاهی دیده می‌شود و تناوب هر جفت ۵/۷ تقریباً هر ۳nm تخمین زده می‌شود. (شکل ۸)

مینگکلیو[۱۷] و جان کولگ[۱۸] از دانشگاه آریزونا نشان داده‌اند که نانولوله‌ها همیشه مانند استوانه نیستند بلکه ممکن است چندوجهی باشند حضور یک پنج‌وجهی در رأس می‌تواند باعث شود که نانولوله به‌جای حالت استوانه‌ای به شکل چندوجهی رشد کند که باعث ناکاملی دورگه شدن می‌شود.

سرانجام، پیوندهای ناکامل ناشی از جابه‌جاشدگی انتها هر رویه نیز دیده شده است. اما تناوب تکرار آن‌ها طوری است که به نظر نمی‌رسد در نمونه‌های معمولی که توسط قوس تولید شده، مشکل مهمی به وجود آورد. ممکن است تعجب کنید

که چرا نانولوله‌ها که در دمای ۴۰۰۰K رشد کرده‌اند هنوز دچار نقص و ناکاملی‌هایی هستند. این امر در حقیقت ناشی از مراحل رشد است. (شکل ۹)

ویژگی‌ها

ـ سختی

نانولوله‌های کربنی یکی از مستحکم‌ترین موادی هستند که تاکنون دیده شده است. هم از نظر کششی هم از نظر مدول کشسانی. این استحکام به دلیل پیوندهای SP^2 کووالانتی است که بین اتم‌های کربن منفرد وجود دارد.

در سال ۲۰۰۰، نانولوله‌ی چندجداره‌ای (MWNT) مورد آزمایش قرار گرفت و قدرت کشش آن ۶۳GPa به‌دست آمد و مدول کشسانی آن از درجه‌ی ITPa به دست آمد [۱۴] و [۱۳].

چگالی نانولوله کربنی بسیار کم است: ۱/۳–۱/۴ g/cm^3.

ویژگی‌های الکتریکی

به دلیل تقارن و ساختار الکترونی منحصر به فرد گرافن، ساختمان نانولوله‌ها به شدت بر ویژگی‌های الکترونی آن تأثیر می‌گذارد. برای یک جفت n و m مشخص، اگر ۲n + m = ۳q (q یک عدد صحیح است) این نانولوله فلزی خواهد بود در غیر این صورت نانولوله نیمرساناست. بدین ترتیب تمام نانولوله‌های آرمیچر (n=m) فلزی هستند و نانولوله‌های (۰ و ۵)، (۴ و ۶) و (۱ و ۹) و غیره نیمرسانا هستند. به لحاظ نظری، نانولوله فلزی می‌تواند چگالی جریانی را از خود عبور دهد که ۱۰۰۰ بار بزرگ‌تر از فلزهایی مانند نقره یا مس است.

ویژگی‌های گرمایی

نانولوله‌ها در طول لوله رساناهای بسیار خوبی هستند اما از پهلو عایق خوبی هستند.

کاربردها

سختی و انعطاف‌پذیری نانولوله‌ها باعث شده پتانسیل خوبی در کنترل ساختار نانویی دیگر داشته باشند و در مهندسی نانوفناوری نقش مهمی را بازی می‌کنند.

در حال حاضر به دلیل قدرت کشش بسیار خوب نانولوله‌ها از آن‌ها به‌عنوان فیبرهای مرکب در بسپار و بتون استفاده می‌شود تا ویژگی‌های الکترونی، گرمایی و مکانیکی تولیدات را بهبود بخشند. نانولوله‌ها به دلیل استحکام چگالی پائین در **ساخت** بسیاری از مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند: لباس‌های ضدآب و مقاوم، بتون، پلی‌اتیلن، تجهیزات ورزشی (مانند راکت تنیس، توپ گلف، چوب گلف...)، بالابرهای فضایی.

کاربردهای دیگر: ساخت عضله‌های مصنوعی [۱۵]، باکی صفحه (صفحات ساخته شده از نانولوله‌ها که بسیار محکم‌تر از فولاد و ده‌بار سبک‌تر از آن است)، مدارهای رایانه، فیلمان‌ها، آهنرباها، سلول‌های خورشیدی، ابررساناها، خازن‌ها، ترانزیستورهای (FET)، فیلترهای آلودگی هوا [۱۶] و بسیاری مواد شیمیایی و مکانیکی دیگر.

نتایج برخی اندازه‌گیری‌ها در مورد نانولوله‌ی تک جداره

قطر متوسط SWNT ها	۱۰۲–۱۰۴nm [۱۸]
فاصله از اتم کربن روبه‌رو	۲/۸۳° A [۱۸]
فاصله‌ی پیوند تا کربن که به صورت موازی قرار دارد	
طول پیوند کربن (خط ۴)	۲/۴۵° A
تقارن گروه (۱۰ و ۱۰)	۱/۴۲° A
انرژی هم‌پوشانی پیوندهای C-C	$C_{۵v}$
ثابت شبکه	~۲/۵ev
	۱۷A°
پارامتر شبکه	
آرمیچر (۱۰ و ۱۰)	۱۶/۷۸A° [۱۳]
زیگزاگ (۰ و ۱۷)	۱۶/۵۲A°
کایرال (۶ و ۱۲)	۱۶/۲۲A°
چگالی	
آرمیچر (۱۰ و ۱۰)	۱/۳۳g / Cm۳
زیگزاگ (۰ و ۱۷)	۱/۳۴g / Cm۳
کایرال (۶ و ۱۲)	۱/۴۰g / Cm۳
فاصله‌ی بین لایه‌ها	
آرمیچر (n,n)	۳/۳۸A°
زیگزاگ (n,۰)	۳/۴۱A°
کایرال (۲n,n)	۳/۳۹A°

زیرنویس :

* عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد ـ تهران جنوب

۱ . Fullerrene– فولرن $c_{۶۰}$ شکل جدیدی از مولکول‌های کربنی است که در آن ۶۰ اتم کربن دور هم جمع می‌شوند و مولکولی کروی به‌شکل توپ فوتبال را تولید می‌کنند نام باک مینستر فولرن گرفته شده است .

2. Iijima
3. kratchmer
4. Huffman
5. Ebbsen
6. Ajaian
7. Whiter
8. Single WalledNanoTubes
9. Multi WalledNano Tubes

۱۰ . گرافن صفحه مسطح (دوبعدی) از کربن پیوندی $sp^۲$ است که ضخامت مشخصی دارند و از سلول‌های پنج وجهی و هفت وجهی تشکیل شد در واقع تصویر دوبعدی از گرافیت سه‌بعدی است .

11. armchair
12. chiral
13. Chemical vapor deposition
14. Gamaly
15. Azulin

۱۶ . chirality رجوع شود به شکل ۸ .

17. Mangqiliv
18. Jown cowleg

مراجع :

1. “Macroscopic Fibers and Ribbons of oriented carbon Nanotubes” Brigitte Vigolo, et al. Science, Vol 290, P 1331 (2000)
2. “Helical microtubules of graphitic carbon” S. Iijima. Nature, Vol 354. P 56 (1991)
3. “Large - Scale synthesis of carbon nanotubes” T. W. Ebbesen and PM. Ajaian, Nature, Vol 358, P 220 (1992)
4. Lecture given at Michigan state University by Phaedon Avouris (2000)
5. “Mass Production of nanotubes” Krachmer & Hullman Nature journal V 347
6. Carbon nanotubes Preparation and properties Ebbsen T. W. 1992
7. Approach curve method for large anode-cathode distance Jc. Whiters, V. P. Mammana. journal of Vocume Science & Technology March 2004 Volume 22 Issue 2 PP 715-720
8. A. Oberlin, M. Endo, T. Keyama, J. Crystal grows 1976, 32, 335
9. “Large-scale synthesis of carbon nanotubes” T. W. Ebbesen and PM Ajayan. Nature Vol. 358, P 220 (1992)
10. nanotube structure… Smalley
11. “Are Fullerenc tubules metallic?” Phy. Rev.Lett. Vol 68, P 631 (1995) Camaly
12. “Electronic structure of Graphcne tubules based on C. 60” R. saito, M. Fuijita, Phys. Rev. B Vol 46, P 18-4 (1992)
13. “Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes”, Science 273, 483 (1996) Andreas Thess, Roland Lee. Richard Smalley
14. “Energetic structure, Mechanical and Vibrational Properties of single Walled Carbon Nanotubes (SWNT)” Guanghua Gao, Tahir Cagin, (1997)
Location http://www. wag caltech. edu/ foresight/ foresight-2. html
15. Min. Feng Ya Bradley S files, Sivaram Arepalli Roelney S Ruoff. Phy. Rev Lett. 845552 (2000)
16. “TEM & SEM Images of Nanotubes” Zettle Research Group
Location: http://www Physics. berkeley. edu/ research/ zettl/ projects/ imaging. html
17. “High Resolution TEM observation of Single-Walled Carbon Nanotubes”. Tara Spires and R. Malcolm Brown J. Department of Botany The university of Texas at Austin. 78713 (1996)