دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط

سال چهاردهم، شماره‌ی ۵۵
پاییز ۱۴۰۲، صفحات ۶۵-۵۹

مروری بر نانولوله‌های کربنی و روش ساخت آن‌ها

مجتبی جمعیتی *
گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران
Email: drmjamiati@gmail.com

ارسال: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۴

چکیده

نانولوله‌های کربنی (CNTs)، نماینده یکی از منحصر بفردترین اختراعات در زمینه نانوتکنولوژی هستند. آن‌ها از خواص و ویژگی‌های منحصر بفردی برخوردار هستند. روش‌های مورد استفاده برای تولید نانولوله‌های کربنی شامل فرسایش لیزری، تخلیه قوس الکتریکی، رسوب بخار شیمیایی، رسوب‌دهی بخار شیمیایی با افزایش پلاسما، رسوب لیزر پالسی، استفاده از امواج فراصوت با فرکانس پایین، گرم کردن پلیمر حجیم و کندوپاش توده‌ای است. CNT ها خواص مکانیکی و حرارتی بسیار خوبی دارند که به شدت به ساختار آنها بستگی دارد. CNT های مغناطیسی عامل‌دار در میکروسکوپ نیروی مغناطیسی مورد استفاده در زیست پزشکی نقش دارند. حد مایع و پلاستیک کائولینیت را می‌توان با افزودن CNT به آن افزایش داد. در زمینه پزشکی، CNT ها کاربردهای متعددی از جمله انتقال ژن به سلول‌ها، سرطان درمانی، دارورسانی و بازسازی بافت دارند. ماهیت آنتی اکسیدانی آن‌ها همچنین امکان استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی و درماتولوژی را فراهم می‌کند. مهم‌ترین خاصیت نانولوله‌ها، هدایت الکتریکی آن‌هاست که بستگی به میزان نظم قرار گرفتن اتم‌ها، مقدار این پارامتر متغیر است. آن‌ها همچنین برای کاربردهای ساختاری ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند و خواص آن‌ها را می‌توان با ساخت کامپوزیت‌های آن‌ها با فلزات بهبود بخشید. چنین فلزاتی ممکن است با روش‌های مختلفی از جمله واکنش حالت جامد، روش تخلیه قوس الکتریکی و تکنیک‌های الکتروشیمیایی وارد هسته نانولوله‌های کربنی شوند. مقدار گاز هیدروژن جذب شده در CNT ها بین ۰/۴ تا ۶۷ درصد جرمی متغیر است.

کلید واژه: نانولوله‌های کربنی، سنتز، کامپوزیت، گرافیت، هدایت الکتریکی.

مقدمه

کربن تقریباً در تمام زمینه‌های علم و فناوری، به ویژه به عنوان منبع انرژی، نقش مهمی ایفا می‌کند [۱]. نانولوله‌های کربنی (CNTs)[۱]دارای خواص الکتریکی و مکانیکی برجسته‌ای هستند که به‌عنوان جزء مهم باتری‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌شوند [۲]. آنها ساختارهای استوانه‌ای توخالی هستند که به شکل استوانه‌ای شبیه به شبکه لانه زنبوری نورد شده‌اند. قطر داخلی نانولوله‌های کربنی در محدوده نانومقیاس یا ۱ میکرومتر طول دارد. نانولوله‌کربنی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط دانشمندی ژاپنی به نام سومیو ایجیما[۲]در سال ۱۹۹۱ کشف شد و اولین پلیمر نانوکامپوزیتی که نانولوله‌کربنی به عنوان پرکننده در آن استفاده شده بود در سال ۱۹۹۴ توسط آجایان[۳]گزارش شد [۳].

نانولوله‌های کربنی به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- نانولوله‌های کربنی تک جداره (SWCNT) [۴]و ۲- نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNT) [۵] چقرمگی و هدایت حرارتی بالاتر به دلیل وجود هیبریداسیون SP2 در CNT ها است. SWCNT ها هم در حلال‌های آلی و هم در حلال‌های معدنی نامحلول هستند، اگرچه ممکن است پس از کمپلکس شدن و پلیمریزاسیون محلول باشند. هنگامی که SWCNT ها به آنیلین (حلال آلی) اضافه می‌شوند، مجتمع انتقال بار SWCNT-آنیلین تشکیل می‌شود که SWCNT ها را در حلال‌های آلی محلول می‌کند و طبیعت بکر آن‌ها را حفظ می‌کند، همانطور که توسط ابزارهای مختلف تجزیه و تحلیل ثابت شده است. CNTها شامل ورقه‌های گرافیتی هستند که به صورت یک الگوی استوانه‌ای نورد شده‌اند [۴]. CNT ها کاربردهای مختلفی در زمینه‌های پزشکی و علوم مواد دارند. آن‌ها در هر جنبه‌ای از زندگی مانند فیلم و پوشش‌ها و همچنین در زمینه‌های بیوتکنولوژی، الکترونیک، محیط زیست، ذخیره انرژی و بسیاری موارد دیگر به دلیل رسانایی حرارتی بالاتر، چقرمگی و رسانایی الکتریکی منحصر به فرد خود، کاربردهای گسترده‌ای دارند [۵].

با توجه به اهمیت فراوان نانوتکنولوژی در زمینه‌های مختلف، مطالعه حاضر ادبیات مربوط به سنتز و خواص نانولوله‌های کربنی (CNTs) را مرور می‌کند.

- سنتز نانولوله‌های کربنی (CNTs)

روش‌های سنتز نانولوله‌های کربنی متنوع بوده و از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. تخلیه قوس الکتریکی
۲. سایش لیزری
۳. رسوب شیمیایی فاز بخار
۴. روش الکترولیز
۵. استفاده از انرژی خورشیدی

در این میان، سه روش اول از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و بیشتر از بقیه روش‌ها، برای تولید نانولوله‌های کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از نظر تاریخی، تخلیه قوس الکتریکی اولین روشی بود که برای تشکیل CNT ها استفاده شد. روش تخلیه قوس از نظر فنی شبیه فرآیند تبخیر لیزری بود. مقایسه این دو روش (فرایند تبخیر لیزری و تخلیه قوس الکتریکی) نشان می‌دهد که در خلوص و کیفیت محصولات بدست آمده تفاوت وجود دارد. با این حال، مطلوب‌ترین و توسعه یافته‌ترین تکنیک ها برای سنتز CNT ها مربوط به مواد در مقیاس بزرگ است که شامل انواع مختلف رسوب بخار شیمیایی (CVD) و تخلیه قوس می‌شود [۱]. در نتیجه، نانولوله‌های کربنی با استفاده از تکنیک‌های مختلف، مانند فرسایش لیزری یا تخلیه قوس، سنتز شدند. با این حال، در حال حاضر، CVD ($< 80^{\circ}C$) جایگزین این تکنیک‌ها (ابلیشن لیزری و تخلیه قوس) شده است، زیرا این روش به

[۱] carbon nanotubes
[۲] Sumio Iijima
[۳] Pulickel Madhavapanicker Ajayan
[۴] single-walled carbon nanotubes
[۵] multi-walled carbon nanotubes

طور دقیق قطر، طول، چگالی، خلوص، جهت‌گیری و تراز نانولوله را کنترل می‌کند [۱].

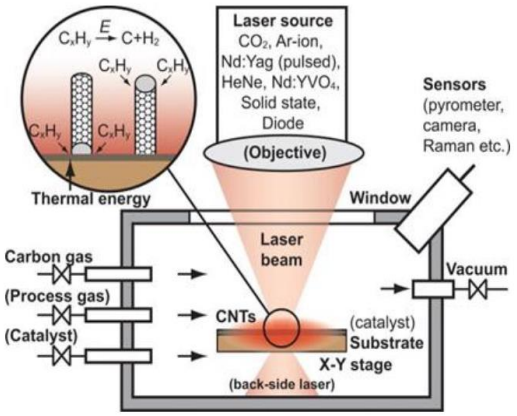
- روش تخلیه قوس الکتریکی

روش تخلیه قوس شامل تبخیر کربن با اعمال میدان الکتریکی در یک گرادیان دمای بالا است. این فرآیند ممکن است در حضور کاتالیزورهای فلزی متعدد (به عنوان مثال، آهن، کبالت، نیکل، ایتریم، بور و گادولینیوم) تحت فشار کاهش یافته گاز بی اثر بهبود یابد [۶]. راه اندازی تخلیه قوس شامل دو میله گرافیتی است که به عنوان آند و کاتد عمل می‌کنند و قطر آن‌ها به ترتیب ۲۰ میلی‌متر و ۷ میلی‌متر است. یک قوس زمانی ایجاد می‌شود که جریان ۱۰۰-۲۰۰ آمپر بین الکترودها تامین شود [۷]. به طور کلی، نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) زمانی تولید می‌شوند که هیچ کاتالیزوری استفاده نشود. با این حال، نانولوله‌های کربنی تک جداره (SWCNTs) در حضور یک کاتالیزور فلزی انتقالی سنتز می‌شوند. روش تخلیه قوس در دمای بالا (بالاتر از ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) منجر به تشکیل یک محصول مخلوط می‌شود و نیاز به جداسازی CNT ها از زغال سنگ و فلزات باقیمانده (کاتالیزوری) دارد [۸]. کاتالیزور متشکل از ذرات فلزی با اندازه نانو (مانند Ni، Co یا Fe)، است که باعث تجزیه مولکول های پیش ساز هیدروکربن گازی به کربن می‌شود [۹]. CNT های سوزنی مانند با طول تقریبی ۱ میلی متر و قطر ۴-۳۰ نانومتر را می‌توان بر روی کاتد کربن با استفاده از تبخیر تخلیه قوس مستقیم کربن تولید کرد. لیجیما و همکاران از محفظه تحت فشار پر شده با مخلوط گازی از ۴۰ torr آرگون و ۱۰ torr متان استفاده کردند. تولید CNT ها با بازده بالا به غلظت و ماهیت کاتالیزورها، گازهایی که از پلاسما تشکیل شده‌اند، فشار گاز بی‌اثر، شدت جریان قوس الکتریکی و فاصله بین الکترودها بستگی دارد [۱].

- تکنیک فرسایش لیزری[۶]

CNT ها را می‌توان با استفاده از روش لیزری نیز تولید کرد (شکل ۱). به طور معمول، یک لیزر بر روی کربن مورد نظر هدایت می‌شود، که مقدار کمی از مواد را در داخل کوره‌ای که تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده است تبخیر می‌کند. پرتو صاف لیزر روی هدف توسط یک سیستم کنترل کامپیوتری تضمین می‌شود [۱۰]. پلاسمای تولید شده توسط این روش معمولاً توسط نیتروژن یا آرگون از یک گرادیان دمای بالا جاروب می‌شود و بر روی سطح بستر رسوب می‌کند که توسط سیستم خنک کننده خارجی خنک می‌شود. لیزر پالسی یا پیوسته ۱/۲ درصد Co/Ni را با ۹۸ درصد کامپوزیت هدف گرافیت در زیر ۵۰۰ torr از گاز بی‌اثر هلیوم در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد در کوره کوارتز تبخیر می‌کند. یک ستون بخار در این دمای بالا تشکیل می‌دهد که به سرعت منبسط شده و سرد می‌شود. یک خوشه بزرگ از فشرده سازی سریع مولکول‌ها یا اتم‌های کربن کوچک برای خنک کردن بخارات تشکیل می‌شود [۲۱]. رشد نانولوله‌ها زمانی متوقف می‌شود که لایه کربن دیگر نتواند ذرات را جذب کند، زیرا سطح قبلاً اشغال شده است و فضایی برای ذرات بعدی وجود ندارد. MWCNT ها با استفاده از یک هدف گرافیتی خالص تشکیل می‌شوند. بازده SWCNT ها به شدت و به نوع کاتالیزور فلزی بستگی دارد و می‌توان آن را با افزایش دمای کوره از جمله عوامل دیگر افزایش داد [۱۲]. فرسایش لیزری بهترین روش برای رشد SWCNT با خلوص بالا و کیفیت بالا است [۱۷].

[۶] Laser ablation



شکل ۱: راه‌اندازی لیزر فرسایش برای سنتز CNT [۱].

- روش رسوب بخار شیمیایی (CVD)[۷]:

در ساخت مکمل اکسید فلز- نیمه رسانا (CMOS)[۸] رسوب بخارهای شیمیایی (CVD) مناسب ترین تکنیک برای سنتز CNT ها در مقایسه با روش های ابلیشن لیزری و تخلیه قوس است. این تکنیک می‌تواند CNT ها را در دمای پایین تر سنتز کند [۱۱]. تکنیک CVD مواد جامد بسیار خالص و با کارایی بالا تولید می‌کند. از این تکنیک می‌توان برای سنتز موادی استفاده کرد که در آن اجزای شیمیایی فاز بخار در سطوح خاصی واکنش می‌دهند و لایه های جامد را تشکیل می‌دهند [۱۲].

CVD اولین بار در سال ۱۹۹۶ برای تولید نانولوله‌ها گزارش شد. در CVD، رسوب خلاء برای تولید CNT ها رخ می‌دهد. در این فرآیند، بسترها در معرض یک پیش ماده فرار، قرار می گیرند که در سطح زیرلایه واکنش نشان می‌دهد یا تجزیه می‌شود. این روش برای تولید نانولوله‌ها به مقدار زیاد و همچنین برای کنترل جهت رشد بر روی بستر مفید است. سنتز CNTها از طریق CVD شامل کندوپاش کردن یک کاتالیزور فلز واسطه بر روی بستر است. همچنین از بازپخت حرارتی[۹] برای القای هسته در ذرات کاتالیزور استفاده می‌کند. خوشه ها بر روی بستر در نتیجه بازپخت حرارتی تشکیل می‌شوند و نانولوله‌ها رشد می‌کنند [۱-۱۳].

در محفظه واکنش یک فاز گازی وجود دارد که منبع کربن در آن قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از یک منبع انرژی مانند پلاسما، مولکول کربن یا سیم پیچ گرمایشی به سطح اتمی تبدیل می‌شود. مونوکسید کربن، متان یا استیلن را می‌توان به عنوان منبع کربن استفاده کرد [۱].

به طور کلی، CVD از محدوده دمایی ۶۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای سنتز نانولوله‌ها استفاده می‌کند که در نتیجه بازده آن حدود ۳۰ درصد است [۱].

MWCNT ها با روش های CVD حرارتی، با استفاده از گاز استیلن یا اتیلن به عنوان ماده اولیه کربن در حضور نانوذرات Ni، Co یا Fe به عنوان کاتالیزور تولید می‌شوند. در این دماها، اتم های کربن به نانوذرات فلزی حل می‌شوند که در نهایت اشباع می‌شوند و رسوب کربن CNTها را تشکیل می‌دهد. اندازه ذرات فلزی (کاتالیزورها) می‌تواند به تعیین قطر CNT ها کمک کند. هنگامی که از عناصر دیگری مانند منگنز، کروم و مس استفاده می‌شود، نانولوله‌های کربنی تنها در مقادیر جزئی تشکیل می‌شوند. درصد بازده CNT ها بسته به روش ساخت آن‌ها متفاوت است [۱-۱۴].

- رسوب بخار شیمیایی با پلاسما (PECVD)[۱۰]:

استفاده از پلاسما برای لایه نشانی شیمیایی از بخار باعث می‌شود که واکنش شیمیایی تشکیل لایه در دمایی به مراتب پایین‌تر (۵۵۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) از لایه نشانی شیمیایی بخار معمولی (CVD) که در دمای ۹۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، انجام می‌گیرد، صورت پذیرفته و لایه مورد نظر ایجاد شود. با استفاده از این روش می توان پوشش‌های دوتایی، سه تایی، چهارتایی به‌صورت تک لایه یا چند لایه نظیر TiN، TiC، CNTi، TiAlN، TiBN، TiAlCN و غیره را ایجاد کرد.

مزیت‌های دستگاه رسوب نشانی شیمیایی از بخار به کمک پلاسما به این صورت است که با دارا بودن این سیستم امکان انجام فرایند نیتراسیون و متعاقب آن فرایند لایه نشانی وجود

[۷] Chemical Vapor Deposition

[۸] Complementary metal–oxide–semiconductor

[۹] Thermal annealing

[۱۰] Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition

دارد به این ترتیب پوشش‌های فوق سخت بر روی بستری با سختی مناسب قرار می‌گیرند که این امر موجب افزایش استحکام، چسبندگی و مقاومت آن می‌شود.

این دستگاه قابلیت نیتراسیون پلاسمایی فولادهای صنعتی، ابزار، تندبر و ... را دارد. همچنین نیتراسیون پلاسمایی فلزاتی مانند آلومینیوم و تیتانیم نیز به کمک این دستگاه قابل انجام است. لایه نیتریدی تولید شده سبب افزایش سختی و مقاومت به خوردگی فلزات مذکور می‌شود. در PECVD، واکنش توسط پلاسما فعال می‌شود و دمای لایه نشانی به صورت قابل ملاحظه‌ای پایین می‌باشد. PECVD فرآیند فیزیکی و شیمیایی را در هم می‌آمیزد و می‌تواند پلی برای رفع نواقص و فضای بین دو فرآیند CVD و PVD باشد.

در این روش واکنش رسوب دهی در دماهای پایین تری نسبت به رسوب‌دهی گرمایی انجام می‌پذیرد و دارای سرعت و نرخ رشد بالایی می‌باشد؛ عامل کنترل کننده سرعت، سنتیک سطح خواهد بود که در نتیجه موجب یکنواختی بیش‌تر رسوب بدست آمده خواهد شد. رسوب دهی در دمای پایین باعث تشکیل لایه‌های بلوری دانه ریزمی‌شود که اغلب خواص فوق العاده ای دارند. در PECVD، انرژی فعال‌سازی برای واکنش CVD نه تنها با افزایش گرادیان دما، بلکه با تشکیل پلاسمای پرانرژی در یک میدان الکتریکی تامین می‌شود.

- روش رسوب لیزر پالسی(PLD):[11]

CNT ها را می‌توان با روش رسوب لیزر پالسی سنتز کرد. این یک روش رسوب لایه نازک است که در آن مواد مورد نظر توسط یک پالس پرتو لیزر تبخیر شده و یک فیلم بر روی سطح بستر رسوب می‌کند. کوره حاوی ماده هدف قرار گرفته در پایین است که در آن بستر در قسمت بالایی کوره قرار گرفته است. پرتو لیزری که معمولاً استفاده می‌شود :Nd YAG است. پرتو لیزر به اتم مورد نظر برخورد کرده و آن‌ها را تبخیر می‌کند. اتم های تبخیر شده را ستون می‌نامند. ستون به سمت بستر حرکت می‌کند، رسوب می‌کند و به صورت نانولوله‌های کربنی روی سطح زیرلایه رشد می‌کند. سرعت رسوب و پرتو لیزر را می‌توان برای کنترل پارامترهای خاصی از CNT ها با یکدیگر همگام نمود. این نانولوله‌های کربنی در سطح زیرلایه‌ای رسوب می‌کنند که می‌تواند از نانوذرات کربن، کربن آمورف و سایر ناخالصی‌های ناخواسته جدا شود. این نانولوله‌های کربنی آماده شده را می‌توان با چندین روش خالص‌سازی کرد که شامل تصفیه فاز گاز و تصفیه فاز مایع است که بیش‌تر برای فرآیند تصفیه استفاده می‌شود [۱۵].

- تصفیه فاز گاز

در روش تصفیه فاز گاز، نانولوله‌های کربنی با اعمال اکسیداسیون در دمای بالا خالص‌سازی می‌شوند که با استخراج مکرر با اسید نیتریک و هیدروکلراید ادامه می‌یابد. در این فرآیند، نانولوله‌های کربنی سنتز شده دارای خلوص و پایداری بالایی هستند، که از آن جمله، ناخالصی های کمی یا کاتالیزور باقی مانده می‌باشد [۱-۱۵].

- تصفیه فاز مایع

در تصفیه فاز مایع، نانولوله های کربنی در چندین مرحله خالص سازی می‌شوند که عمدتاً عبارتند از:

- فیلتراسیون اولیه، که برای حذف عمده ذرات باقیمانده گرافیت انجام می‌شود.
- نانولوله‌های کربنی در هر دو حلال متمرکز، اسیدی و آلی حل می‌شوند تا کاتالیزور و فولرن‌های واکنش نداده، حذف شوند.
- مرحله بعد جداسازی گریز از مرکز CNT ها از محلول است.
- سپس میکروفیلتراسیون انجام می‌شود.
- مرحله نهایی خالص سازی کروماتوگرافی است که برای جداسازی MWCNT ها و SWCNT ها استفاده می‌شود [۱].

[11] Pulsed Laser Deposition Method

- اصلاح CNTها توسط امواج فراصوت با فرکانس پایین

نانولوله‌های کربنی که شامل نانولوله‌های تک جداره و نانولوله‌های چند جداره می‌باشند به دلیل دارابودن خصوصیات حرارتی، الکتریکی و مکانیکی منحصر بفرد بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد با دوام و در برابر گرما مقاوم هستند و تمیز کردن و استفاده مجدد از آن‌ها ساده است. سطح مقطع وسیع، خلل و فرج بالا و ساختار لایه‌ای این نانولوله‌ها آن را به جاذبی موثر برای حذف انواع ترکیبات خطرناک همچون ناخالصی‌های کاتیونی و آنیونی، آلی و معدنی تبدیل نموده است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که اصلاح شیمیایی نانولوله‌های کربنی با مخلوط HNO_3/H_2SO_4یا HNO_3 منجر به افزایش غلظت گروه‌های عاملی کربونیل و کربوکسیل در سطح نانولوله‌ها می‌شود. اصلاح نانولوله‌های کربنی با مخلوط H_2SO_4/HNO_3 می‌تواند تراکم بالاتری از گروه‌های عاملی را نسبت به HNO_3 تنهایی ایجاد نماید [۱-۱۶].

- سنتز CNT ها از طریق پلیمر حجیم

پلیمرها به خاطر وزن سبک و شکل‌پذیری مطلوبی که دارند گزینه جذابی برای جایگزینی فلزات در بعضی از کاربردها هستند. برای مثال در صورتی‌که از پلیمرها در تانکرهای نگهداری سوخت استفاده شود، تولید تانکرها بسیار ساده‌تر و انتقال آنها نیز راحت‌تر می‌شود، ولی نیاز است تا تانکرهای سوخت مقداری رسانای الکتریسته باشند تا بار سطحی بر روی آن‌ها تجمع نکند (تخلیه بار سطحی ممکن است باعث انفجار شود). اکثر پلیمرهای مرسوم عایق الکتریکی هستند و پلیمرهای رسانا نیز بسیار گرانند. در نتیجه یک راه‌حل ساخت نانوکامپوزیت‌های رسانای الکتریکی زمینه پلیمری با نانوساختارهایی همچون نانولوله‌های کربنی یا گرافن است. از کاربردهای دیگر این نانوکامپوزیت‌ها می‌توان به هولدرهای لامپ‌های LED اشاره کرد که باید رسانای حرارت باشند تا نیمه‌هادی داخل آن آسیب نبیند. یا لزوم رسانایی الکتریکی در قطعات پلیمری که به روش الکترواستاتیکی رنگ زده می‌شوند (مثل درب باک خودروها). نانولوله‌های کربنی را می‌توان با حرارت دادن یک پلیمر توده‌ای در حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در هوا سنتز کرد. تشکیل CNT ها با تعداد آنالیزهای طیف سنجی تایید می‌شود [۱].

- سنتز CNT ها از طریق کندوپاش انبوه

یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها در بین همه روش‌ها، روش کندوپاش فله‌ای است که ممکن است برای تولید انبوه نانولوله‌های کربنی استفاده شود، با این حال، این فرآیند بیش از حد قیمت دارد. در طی فرآیند کندوپاش، گرافن معمولاً به عنوان ماده مورد نظر در محفظه قرار می‌گیرد. محفظه واکنش، با گاز آرگون خنثی پر شده است که معمولاً در مواقعی که نیاز به یک گاز بی‌اثر یا برای تولید تیتانیوم و سایر مواد واکنش پذیر است استفاده می‌شود. میدان الکتریکی بین دو الکترود اعمال می‌شود که فرآیند یونیزاسیون گاز آرگون را تسریع می‌کند تا ذرات باردار تولید شود که به سطح ماده گرافن مورد نظر برخورد کرده و اتم‌های کربن را از سطح گرافن بیرون می‌زند و CNTها روی سطح بستر رشد می‌کنند. بنابراین CNT های تهیه شده با این روش ناخالص هستند و می‌توان آن‌ها را با چندین روش دیگر خالص‌سازی نمود [۱].

نتیجه‌گیری

نانولوله‌های کربنی را می‌توان با فرسایش لیزر، تخلیه قوس الکتریکی، رسوب بخار شیمیایی (CVD)، رسوب بخار شیمیایی با پلاسما (PECVD)، رسوب لیزر پالسی، استفاده از امواج فراصوت با فرکانس پایین، با گرم کردن یک پلیمر حجیم و کندوپاش توده‌ای و غیره تولید کرد. رسوب شیمیایی بخار (CVD) و تخلیه قوس، محبوب ترین روش‌ها برای تولید CNT ها در مقیاس بزرگ هستند. با این حال، دومی نسبتاً گران است. تکنیک CVD مواد جامد بسیار خالص و با کارایی بالا تولید می‌کند و توانایی کنترل دقیق قطر، طول، چگالی، خلوص، جهت گیری و تراز نانولوله را دارد.

رسوب دهی بخار شیمیایی با پلاسما (PECVD) جدیدترین تکنیک برای موقعیت یابی انتخابی و تراز عمودی CNTها است.

فرسایش لیزری بهترین روش مناسب برای رشد نانولوله‌های تک جداره با خلوص و کیفیت بالا می‌باشد. نانولوله‌های کربنی تهیه شده توسط رسوب لیزر پالسی نیاز به تصفیه فاز گاز یا مایع دارند.

منابع

[1] Shabbir, H., Uzma, A., Muhammad, A., et al., 2023, Synthesis, Properties, and Applications of Carbon Nanotubes: An Overview. Scientific Inquiry and Review (SIR), 7(3), 95-124.
[2] Iijima, s., 1991, Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, 354, 56-58.
[3] Ajayan, P. M., Stephan, O., Colliex, C., &Trauth, D., 1994, Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin—nanotube composite. Science, 265(5176), 1212-1214.
[4] Chen, J., Hamon, M. A., Hu, H., et al., 1998, Solution properties of single-walled carbon nanotubes. Science, 282(5386), 95–98.
[5] Tasis, D., Tagmatarchis, N., Bianco, A., Prato, M., 2006, Chemistry of carbon nanotubes. Chem. Rev., 106(3), 1105–1136.
[6] Jamiati, M., 2020, Kinetic Energy Distribution for Neutron-Induced Fission of Thorium Isotopes. Physics of Atomic Nuclei, 83, 859–865.
[7] Jamiati, M., Mehdipour, K. P., 2020, The calculation of total fragment excitation energy for photofission of Uranium isotopes. Turkish Journal of Physics, 44(4), 364–372.
[8] Sharma, R., Sharma, A. K., Sharma, V., 2015, Synthesis of carbon nanotubes by arc-discharge and chemical vapor deposition method with analysis of its morphology, dispersion and functionalization characteristics. Cogent Eng., 2(1), e1094017.
[9] Rashad, A. A., Mohammed, S. A., Yousif, E., 2016, Synthesis of carbon nanotube: A review. J. Nanosci Technol., 2(5), e7.
[10] van de Burgt, Y., 2014, Laser-assisted growth of carbon nanotubes—a review. J. Laser Appl., 26(3), e032001.
[11] Emmenegger, C., Bonard, J. M., Mauron, P., et al. 2003, Synthesis of carbon nanotubes over Fe catalyst on aluminium and suggested growth mechanism. Carbon, 41(3), 539–547.
[12] Yadav, B. C., Kumar, R., Srivastava, R., Shukla, T., 2011, Flame Synthesis of Carbon Nanotubes using Camphor and its Characterization. Intl. J. Green Nanotechnol, 3(3), 170–179.
[13] Bode, Y., 2018, Vibration analysis of coupled coaxial carbon nanotube with damping in the presence of graphene sheet (master's thesis University of Akron).
[14] Varshney, K., 2015, Carbon nanotubes: A review on synthesis, properties and applications. Int. J. Eng. Res. General Sci., 2(4), 660–670.
[15] Franz, G., 2021, Plasma enhanced chemical vapor deposition of organic polymers. Processes, 9(6), e980.
[16] Cho, W. S., Hamada, E., Kondo, Y., Takayanagi, K., 1996, Synthesis of carbon nanotubes from bulk polymer. Appl Phy. Lett., 69(2), 278–279.