STEM CELL TECHNOLOGY
شرکت فن آوری بن یاخته

تکنولوژی نانولوله‌های کربنی

(تولید، تخلیص، عاملی‌سازی و کاربردها)

www.ketab.ir

نویسندگان:

مهندس اکبر گزمه: کارشناس ارشد مهندسی نساجی

دکتر یوسف محمدی: دکترای تخصصی مهندسی پزشکی

دکتر مسعود سلیمانی: دکترای تخصصی هماتولوژی، (عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس)

اکبر گزمه
تکنولوژی نانولوله‌های کربنی (تولید، تخلیص، عاملی سازی و کاربردها)/ مؤلفان: مهندس اکبر گزمه، دکتر یوسف محمدی، دکتر مسعود سلیمانی
تهران: اندیشهٔ ظهور، ۱۳۸۵. ۲۸۰ ص. مصور، جدول، نمودار
ISBN 978-964-96805-1-4.
فهرست‌نویسی براساس اطلاعات فیپا
کتاب‌نامه: ص. ۲۶۹-۲۸۰.
موضوع: نانوتکنولوژی- مواد نانوساختار. تکنولوژی نانولوله‌های کربنی. اکبر گزمه، یوسف محمدی، مسعود سلیمانی
T۱۷۴ /۷/ گ۴ت۸ ۱۳۸۵
۶۲۰/۵
کتابخانه ملی ایران
۸۵-۴۷۸۸۹م

اندیشه‌ظهور
دفتر پخش: شرکت فن‌آوری بن‌یاخته: ۷-۸۸۸۶۱۰۶۵-۰۲۱
www.Stemcellstech.com

تکنولوژی نانولوله‌های کربنی

- نویسندگان: مهندس اکبر گزمه، دکتر یوسف محمدی، دکتر مسعود سلیمانی
- ناشر: اندیشهٔ ظهور
- ناظرفنی و صفحه‌آرایی: ز- فرضی
- لیتوگرافی: آرمانسا
- چاپ: محیا
- صحافی: ثارا...
- نوبت چاپ: اول/۱۳۸۵
- تیراژ: ۱۰۰۰ جلد
- قیمت: ۴۰۰۰۰ ریال

شابک: ISBN 978-964-96805-1-4

www.ketab.ir

فهرست مطالب

فهرست ۱

پیشگفتار ۵

چالش‌های فراوری نانولوله‌های کربنی ۵

۱- تولید انبوه با قیمت مناسب ۶

۲- خالص‌سازی نانولوله‌ها ۶

۳- اتصال نانولوله‌ها و ایجاد رشته‌ها ۷

۴- جلوگیری از توده‌ای شدن نانولوله‌ها ۷

۵- چگونگی حفظ نانولوله‌ها بعد از فرآوری ۸

۶- کنترل رشد نانولوله‌ها ۱۳

فصل اول: ساختار و سنتز نانولوله‌های کربنی ۱۳

۱-۱- تاریخچهٔ فولرین‌ها ۱۵

۱-۲- ساختار و خواص نانولوله‌های کربنی ۲۳

۱-۳- تعریف ریاضی ۲۴

۱-٤- نواقص ساختاری ۳۰

۱-۵- خواص ویژه نانولوله‌های کربنی ۳۱

۱-۶- سنتز ۳۲

۱-۶-۱- مکانیزم رشد ۳۴

۱-۶-۲- روش تخلیه قوس الکتریکی ۳۶

۱-۶-۲-۱- سنتز *SWNT* ۳۷

گاز ورودی ۳۷

b). کنترل پلاسمای اپتیکی ۳۸

C). کاتالیست ۳۸

d). اصلاح مقاومت اکسیداسیون ۴۰

e) سنتز نانولوله‌های کربنی در هوای آزاد توسط قوس لحیم حاصل از انبرک جوشکاری ۴۱

۱-۶-۲-۲- سنتز نانولوله‌های کربنی چند دیواره .....

www.ketab.ir

فهرست مطالب

a). سنتز در نیتروژن مایع ۴۲

b). سنتز در میدان مغناطیسی ۴۳

c). ایجاد پلاسمای چرخشی در روش تخلیه قوس الکتریکی ۴۴

۱-۶-۳- روش تبخیر لیزری ۴۶

۱-۶-۳-۱- نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره در مقابل نانولوله‌های کربنی چنددیواره ۴۸

۱-۶-۳-۲- سنتز نانولوله‌های تک‌دیواره درمقیاس بالا ۴۹

۱-۶-۳-۳- تپش مافوق سریع از لیزر الکترون آزاد (روش *FEL*) ۴۹

۱-۶-۳-۴- روش پودر- لیزر موج مداوم ۵۱

۱-۶-۴- رسوب گذاری بخارشیمیایی ۵۲

۱-۶-۴-۱- رسوب گذاری بخار شیمیایی- پلاسمایی ۵۳

۱-۶-٤-۲- رسوب گذاری بخارشیمیایی- حرارتی ۵۵

۱-۶-۴-۳- رسوب گذاری بخارشیمیایی- کاتالیست الکلی ۵۶

۱-۶-۴-۴- رشد فاز بخار ۵۸

۱-۶-۴-۵- روش رسوب گذاری بخار شیمیایی پشتیبانی شده توسط ایروژل ۵۹

۱-۶-۴-۶- ترکیب رسوب گذاری بخارشیمیایی- حرارتی با لیزر ۵۹

۱-۶-۴-۷- فرآیند *CoMoCat* ۶۱

۱-۶-۴-۸- فرآیند نامتجانس درفشار بالای منوکسید کربن(*Co*) ۶۳

۱-۶-۵- سنتز توسط شعله ۶۴

۱-۷- خلاصه ۶۶

۱-۷-۱- روش تخلیه قوس الکتریکی ۶۶

۱-۷-۲- روش تابش لیزر ۶۶

۱-۷-۳- روش رسوب گذاری بخار شیمیایی ۶۷

۱-۸- تمرین ۶۸

فصل دوم: خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی ۷۱

۲-۱- اکسیداسیون ۷۲

www.ketab.ir

۲-۲- عملیات اسیدی ۷۳
۲-۳- تابکاری ۷۴
۲-۴- عملیات مافوق صوت ۷۴
۲-۵- تخلیص مغناطیسی ۷۵
۲-۶- میکروفیلتراسیون ۷۶
۲-۷- برش ۷۸
۲-۸- عاملی سازی ۷۹
۲-۹- کروماتوگرافی ۷۹
۲-۱۰- بحث ۸۰
۲-۱۱- روش‌های خالص‌سازی نانولوله‌ها ۸۱
۱- روش خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره ۸۱
مرحلهٔ اول اکسیداسیون ۸۱
مرحلهٔ دوم اکسیداسیون ۸۱
۲- کاهش توزیع قطر نانولوله‌های تک‌دیواره توسط اکسیداسیون انتخابی ۸۲
اتمسفر حاوی اکسیژن کاهنده ۸۲
اکسیداسیون شیمیایی ۸۳
۳- تابکاری پلاسمایی جهت تخلیص و کنترل باز شدن انتهای نانولوله‌های کربنی آرایش یافته .. ۸۴
٤- تخلیص و شناسایی نانولوله‌های تک‌دیواره ۸۵
۵- تخلیص نانولوله‌های تک‌دیواره توسط حرارت دهی مایکروویو ذرات کاتالیست ۸۶
شرایط بهینه ۸۶
۶- جداکردن نانولوله‌های تک‌دیواره بریده شده توسط کروماتوگرافی سیالی با کارایی بالا ... ۸۷
تخلیص و برش *SWNTs* ۸۷
عملیات *HPLC* ۸۸
۷- خالص‌سازی نانولوله‌های تک‌دیواره سنتزشده به روش تخلیه قوس هیدروژن ۸۸
۸-خالص‌سازی نانولوله‌های تک‌دیواره با کیفیت عالی از دوده تولیدی توسط فرآیند تخلیهٔ قوس ۸۹

www.ketab.ir

۹- خالص‌سازی نانولوله‌های تک‌دیواره توسط فرآیندی با بازده بالا ۹۱
۱۰- خالص‌سازی و شناسایی نانولوله‌های تک‌دیواره سنتزشده توسط تجزیه فازگازی منوکسیدکربن (فرآیند *HiPCo*) ۹۲
۱۱- فرآیند رفلکس همراه با عملیات مافوق صوت جهت خالص‌سازی نانوساختارهای کربنی ۹۳
۱۲- خالص‌سازی نانولوله‌های تک‌دیواره توسط میکروفیلتراسیون ۹۴
۱۳- خالص‌سازی نانولوله‌های تولیدی به روش *HiPCO* از طریق عاملی سازی آلی ۹۶
۱۴- خالص‌سازی *SWNTs* توسط عملیات مافوق صوت و فیلتراسیون ۹۷
۱۵ - خالص‌سازی مکانیکی دسته نانولوله‌های تک دیواره از ذرات کاتالیست ۹۸
۱۶- برش نانولوله‌های تک دیواره توسط فلورینه کردن ۹۹
۱۷- افزایش درجه اشباع لیتیم توسط آسیاب ساچمه‌ای نانولوله‌های تک دیواره ۱۰۰
۱۸- خالص‌سازی نانولوله‌های تک دیواره قابل انحلال به روش کروماتوگرافی ۱۰۰
۱۹- تخلیص کروماتوگرافی و خواص نانولوله‌های قابل انحلال ۱۰۱
۲-۱۲- تمرین ۱۰۷
فصل سوم: عاملی سازی نانولوله‌های کربنی ۱۰۹
۳-۱- عاملی سازی شیمیایی سطح خارجی نانولوله‌های تک دیواره ۱۱۱
۳-۲- فضای مقعر درون لوله‌ها به‌عنوان راکتور شیمیایی ۱۱۸
۳-۲-۱- پر کردن نانولوله‌های تک دیواره توسط فولرین‌ها ۱۱۸
۳-۲-۲- پلیمریزاسیون فولرین‌ها در درون نانولوله‌ها ۱۲۱
۳-۲-۳- تولید نانولوله‌های کربنی دو دیواره ۱۲۴
۳-۳- اصلاح نانولوله‌های کربنی توسط پلیمرها ۱۲۷
۳-۳-۱- اتصالات غیر کووالانسی ۱۲۸
۳-۳-۱-۱- راپینگ پلیمر ۱۲۸
۳-۳-۱-۲- جذب پلیمر ۱۲۹
۳-۳-۲- اتصال کووالانسی ۱۳۰
۳-۳-۲-۱- روش اتصال به ۱۳۱

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۳-۳-۲-۲- روش اتصال از ۱۳۹
۳-۴- تاثیر عاملی سازی شیمیایی بر روی خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی ۱۴۴
۳-۵-تمرین ۱۵۱
فصل چهارم: کاربرد نانولوله‌های کربنی ۱۵۳
۴-۱- الکترونیک مولکولی توسط نانولوله‌های کربنی ۱۵۳
۴-۱-۱- ابزارهای نشر میدان ۱۵۳
۴-۱-۲- ترانزیستورها ۱۶۰
۴-۲- نانو ردیاب‌ها و سنسورها ۱۶۴
۴-۳-کاربرد در کامپوزیت‌ها ۱۶۵
۴-۴- نانولوله به‌عنوان قالب یا بستر ۱۶۹
۴-۵- ذخیره انرژی ۱۶۹
۴-۵-۱- ذخیرهٔ هیدروژن ۱۷۰
۴-۵-۲- ذخیرهٔ لیتیم ۱۷۰
۴-۵-۳- ابرخازن‌های الکتروشیمی ۱۷۱
۴-۶- تمرین ۱۷۴
فصل پنجم: ذخیره انرژی در نانولوله‌های کربنی ۱۷۵
۵-۱- ذخیره انرژی ۱۷۵
۵-۲- ذخیره الکتروشیمیایی هیدروژن ۱۷۶
۵-۲-۱- مطالعات تجربی ۱۷۶
۵-۲-۲- مدل ۱۸۵
۵-۳- ذخیره الکتروشیمیایی لیتیم ۱۹۴
۵-۳-۱- مطالعات تجربی ۱۹۴
۵-۳-۲- مدل‌سازی ۲۰۰
۵-۴- ذخیره هیدروژن در فازگازی ۲۰۹
۵-۴-۱- مطالعات تجربی ۲۰۹

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۵-۴-۲- مدل‌سازی ۲۱۵
۵-۵- ابرخازن‌ها ۲۲۲
۵-۵-۱- مقدمه ۲۲۲
۵-۵-۲- اصول کلی ابرخازن‌ها ۲۲۳
۵-۵-۳- تعیین خواص ابرخازن‌ها ۲۲۶
۵-۵-۴- اصلاح نانولوله‌های کربنی ۲۲۷
۵-۶- تمرین ۲۳۳
فصل ششم: الکترونیک مولکولی ۲۳۵
۶-۱- ابزار نشر میدان ۲۳۵
۶-۱-۱- ساخت نشرکننده‌های میدان الکترونی توسط *CNT* ۲۳۶
نانولوله‌های کربنی به‌عنوان نشرکننده‌های منفرد ۲۳۶
نشرکننده‌های فیلمی تولیدی از نانولوله‌ها ۲۳۷
۶-۱-۲- نشرکننده‌های میدانی توسط فیلم نانولوله‌های کربنی ۲۳۹
۶-۱-۳- تخریب فیلم‌های *CNT* ۲۴۵
۶-۱-۴- نشر میدان از نانولوله کربنی منفرد ۲۴۶
a) پایداری نشر و گسیختگی ۲۴۶
۶-۲- ترانزیستورها ۲۴۷
۶-۲-۱- اساس ترانزیستورهای *MOSFET* و *CNTFET* ۲۴۸
۶-۲-۲- تولید *CNTFET* ۲۴۹
۶-۲-۳- فیزیک ترانزیستورهای نانولوله‌ای اثرمیدانی ۲۵۰
a) هدایت در نانولوله‌های کربنی ۲۵۰
b) دوپه شدن نانولوله‌های کربنی ۲۵۱
۶-۲-۴- مکانیزم سویچینگ *MOSFET* و *CNTFET* ۲۵۲
۶-۲-۵- خواص *CNTFET* ۲۵۲
۶-۲-۶- بهینه‌سازی ترانزیستورهای اثرمیدانی نانولوله‌ای ۲۵۳

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۶-۲-۷- چشم‌انداز آینده ۲۵۳
۶-۳- ترانزیستور تک الکترونی ۲۵۴
۶-۳-۱- ساخت *SET* بر روی نانولوله تک‌دیواره ۲۵۵
a) شکل دهی شیمیایی ۲۵۵
b) خمش نانولوله‌های کربنی ۲۵۶
۶-۳-۲- مکانیزم عملکرد *SET* ۲۵۶
۶-۴- تمرین ۲۵۷
فصل هفتم: تعیین خواص تک نانو لوله‌های کربنی ۲۵۹
۷-۱- رشد کاتالیستی بر روی یک نگهدارنده ۲۶۰
۷-۲- مکان‌یابی توسط روش *AFM* ۲۶۱
۷-۳- اندازه‌گیری خواص الکترونیکی نانولوله تک‌دیواره مجزا ۲۶۳
۷-۴- اندازه‌گیری شارژ انتقالی به نانولوله کربنی در الکترولیت ۲۶۵
۷-۵- شناسایی نانولوله مجزا توسط اسپکتروسکوپی رامان ۲۶۵
۷-۶- تمرین ۲۶۷
منابع و مأخذ ۲۶۹
سایر منابع ۲۷۸

www.ketab.ir

پیشگفتار

بدون شک علوم و فناوری نانو، تغییرات اساسی در روش‌های آیندهٔ تولید مواد و ساختارهای حاصل از آن‌ها ایجاد خواهد کرد. توانایی‌های فوق‌العاده در تولید واحدهای ساختمانی نانومتری با ابعاد و شیمی کنترل‌شده و سامان‌دهی آن‌ها به‌صورت نانو ساختارها با خواص و کارایی منحصر به فرد، موجب ایجاد تغییرات دگرگون‌کننده در صنعت و زندگی بشر می‌شود. پیشوند نانو[1] نشان دهندهٔ یک بیلیونیم هر چیزی می‌باشد.

در سیستم متریک، یک نانومتر 10^{-9} مرتبه کوچک‌تر از یک متر می‌باشد. برای تجسم بهتر باید گفت، در صورتی که ده اتم هیدروژن پهلو به پهلو کنار هم قرار گیرند یک نانومتر طول پیدا می‌کنند ویا یک نانومتر $\frac{1}{60000}$ عرض تار موی انسان می‌باشد. علم نانو[2] به علمی گفته می‌شود که در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر بکار گرفته می‌شود و معمولاً هدف آن ساخت قطعاتی با دقت اتمی می‌باشد. نانوتکنولوژی عبارت است از بکارگیری و توسعه علم نانو در تکنولوژی. نانوتکنولوژی نقطهٔ همگرایی علوم مختلف فیزیک، شیمی، بیولوژی، مواد و مهندسی می‌باشد و شامل تمام زمینه‌های ساخت، ترکیب و کاربرد ساختارهای نانومتری در ترکیبات بزرگ‌تر، سیستم‌ها و معماری‌ها می‌باشد. کنترل ماده در سطح بنیادی این امکان را فرآهم می‌سازد تا انجام عملیات در سطح خواص بنیادی مواد با مهارت زیاد صورت گیرد.

---

1 nano
2 nanoscience

www.ketab.ir

دسترسی به چنین پتانسیل‌هایی رویای بشر را در ساخت موادی که قوی‌تر، سبک‌تر، بادوام‌تر، انعطاف‌پذیرتر، عاملی‌تر، ریزتر و براق‌تر باشند وهمچنین از ظرفیت انرژی بالاتری برخوردار باشند ودر عین حال ارزان‌تر و دقیق‌تر باشند، برآورده خواهد کرد. مهمترین رویداد رخ داده در علم نانو به سال ۱۹۸۰ میلادی با اختراع میکروسکوپ نیروی اتمی[1] و میکروسکوپ تونلی پویشی[2] توسط گروه تحقیقاتی *IBM* برمی‌گردد. با چنین اختراعی دانشمندان توانستند برای اولین بار تحولات در سطح اتمی را با حساسیت کافی مشاهده کنند. قابلیت مشاهده پدیده‌ها در مقیاس اتمی از آن زمان به بعد با همراهی تکنولوژیست‌ها منجر به توسعه روزافزون نانوتکنولوژی و ثبت پتنت‌های متعدد در این زمینه شد. بطوری‌که تعداد ثبت پتنت‌ها در سال ۱۹۷۰ که حدود ۶۷۳ پتنت در سال بود به ۱۲۱۳ پتنت در سال ۱۹۸۰ و ۳۲۰۹ پتنت در سال ۱۹۹۰ میلادی رسید.

سنتز و فرآوری نانو ساختارها، طیف وسیعی از انواع مواد آلی، معدنی و زیستی را دربر دارد. ایجاد خلاقیت و ابتکار در روش سنتز و چیدمان، موجب افزایش دقت ساخت می‌شود که نتیجهٔ آن کنترل اندازه، شکل، ساختار، مورفولوژی و نحوهٔ پیوند مولکول‌ها، ابر مولکول‌ها، نانو اشیاء، مواد و قطعات نانو ساختاری خواهد بود. ادغام واحدهای ساختمانی نانو متری وایجاد الگوی چیدمان جدید، موجب ظهور مواد و وسایل نانو ساختاری جدیدی می‌شود که توانایی‌های بی‌نظیر آن‌ها برای ما باور نکردنی است. افزایش و گسترش تجهیزات ساخت، پردازش و ابزارهای شناسایی که باید در خدمت جامعهٔ علمی نانو ساختارها باشد، مستلزم گردآوری منابع به‌صورت علمی و آموزشی در یک جامعه می‌باشد. لازم است به موازات فرآیندهای تغییر و تحول در برنامه‌های آموزشی و پژوهشی و پیگیری تحقیقات چند رشته‌ای، همکاری‌های صنعتی با مراکز علمی و پژوهشی نیز توسعه داده شود. در میان محصولات نانویی فولرین‌ها و نانولوله‌های کربنی دنیای بسیار شگفت آور و امیدوارکننده‌ای را تشکیل می‌دهند. با بکارگیری توأم آن‌ها ممکن است قادر به ساخت ابزارهای نانومتری انقلابی باشیم که ممکن است منجر به ساخت کامپیوترهایی با قدرتی باورنکردنی یا بسیار کارآمد و یا ابزارهای خاصی برای درمان بیماری‌ها گردند.

---

1 AFM
2 STM

www.ketab.ir

نانولوله‌های کربنی، لوله‌های ساخته شده از ورقهٔ لوله شده گرافیت هستند. قطر آن‌ها حدود یک نانومتر است و طول آن‌ها ممکن است هزاران بار بیش از قطرشان باشد. آن‌ها می‌توانند در آن واحد به‌عنوان یک پلیمر تک عنصری آروماتیک، یک بلور تک جهت، ساختاری مطابق قانون چند وجهی اویلر و یا یک ساختار ستونی محسوب شوند. خواص آن‌ها بستگی به اشکال هندسی‌شان دارد (پیکربندی تک یا چنددیوارهای، زیگزاگ،صندلی،کایرال). نکتهٔ قابل توجه این است که آن‌ها رسانایی پرتابه‌ای کوانتیزه دارند و لذا ممکن است برای ساخت ترانزیستور تک الکترونی به‌کار بروند .آن‌ها بسته به شکل می‌توانند عایق، رسانا، نیمه رسانا یا ابر رسانا باشند. لذا آن‌ها می‌توانند برای ساخت سیم‌های نانوسکوپی هم مرکز، ترانزیستورهای اثر میدانی(سوییچ‌های نانومقیاسی)، دیودها و دیودهای نورتاب، لیزرهای نانوسکوپیک، نمایشگرهای جدید، نانوسلنوئیدها (ساختارهای حلقه مانند) و ... به‌کار روند.

آن‌ها مولکول‌هایی "پر سر و صدا" هستند، یعنی زمانی که تحت فشار مکانیکی قرار می‌گیرند امواج صوتی ساطع می‌کنند. آن‌ها ممکن است نقش مشابهی هم در ابزارهای پیزوالکتریک داشته باشند (که برای آن‌ها فشارهای مکانیکی موجب تولید جریان الکتریکی می‌گردد) که به جای سیگنال‌های الکتریکی، امواج صوتی تولید می‌نمایند. بنظر می‌آید برای نانولوله‌ها، این فرآیند غیرقابل برگشت است. از مسائل مهم در ارتباط با نانولوله‌ها می‌توان به تولید نانولوله‌هایی با قطر، طول و کایرالیتی کنترل شده، ایجاد روشی مناسب جهت اتصال سیم‌ها به نانولوله‌ها، حفاظت نانولوله‌ها در برابر عوامل الکتریکی، گرمایی و شیمیایی، تولید انبوه و ارزان نانولوله‌ها و... اشاره کرد.

بی‌تردید با وجود کوشش‌های فراوانی که نگارنده به عمل آورده، مجموعه حاضر خالی از کاستی‌هایی نمی‌باشد. لذا ارایه هرگونه رهنمودی از سوی اساتید گرامی، دانشجویان ارجمند و تمام خوانندگان محترم موجب ارتقای این اثر در چاپ‌های بعدی و امتنان صمیمانه از طرف نویسندگان خواهد بود.

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از کمک‌های ارزنده علمی آقای مهندس کمال لطیفی و آقای جعفر کیانی صمیمانه سپاسگزاری نماییم، چرا که انتشار این کتاب بدون تلاش‌های

www.ketab.ir

نمایم چرا که انتشار این کتاب بدون تلاش‌های ایشان هرگز امکان پذیر نبود. امید است تالیف این کتاب بتواند گام مثبتی در راستای آشنایی دانش‌پژوهان و راهگشای خدمتگزاری به جامعه و کشور عزیزمان گردد.

پاییز ۸۵

www.ketab.ir

چالش‌های فراوری نانولوله‌های کربنی[۱]

با وجود ویژگی‌های بالای نانولوله‌ها و کاربردهای فراوان آن، تولید و استفاده مستمر از این محصولات با اهداف مورد نظر مشکل می‌باشد، لذا محققان زیادی در جهت رفع مشکلات آن برآمده‌اند. در ادامه، چند مورد از مشکلات اساسی استفاده از نانولوله‌ها ذکر می‌گردد.

۱- تولید انبوه با قیمت مناسب

از آنجا که تولید انبوه نانولوله‌ها در مقیاس تنی با قیمت مناسب، بزرگ‌ترین مانع تجاری‌سازی اختراعات در این زمینه بوده است، لذا شرکت‌های مختلفی در صدد هستند تا بتوانند این مشکل را حل نمایند. هر چند که قیمت نانولوله‌ها نسبت به قیمت اولیهٔ آن کاهش زیادی یافته اما هنوز هم برای تجاری‌سازی و استفاده در صنایع مختلف مناسب نمی‌باشد، لذا دانشمندان ابراز امیدواری کرده‌اند که بتوانند در چند سال آینده ضمن تولید چند تنی آن، قیمت آن را به زیر یک دلار کاهش دهند.

۱-گرفته شده از بخش گزارشات سایت ستاد توسعه فناوری نانو *(www.nano.ir)* نوشتهٔ مجید کاظمی

www.ketab.ir

۲- خالص‌سازی نانولوله‌ها

یکی از مسائل کلیدی در الکترونیک، استفاده از نانولوله‌های کربنی با کیفیت بالا (نانولوله‌های خالص) می‌باشد. تولید محصولات جانبی نا مطلوب در حین فرایند رشد نانولوله‌ها سبب کوتاه شدن مدارها می‌شود. بزرگ ترین چالش محققان، در خالص‌سازی، میزان نانولوله‌های تولید شده است. در فرایند استفاده شده توسط محققان برای ساخت نانولوله‌ها، ناخالصی‌ها دائماً افزایش یافته و مقدار زیادی از کربن به هدر رفته و کاتالیست‌ها را بلا استفاده می‌کند، که این عوامل در نهایت منجر به افت کیفیت نانولوله‌ها می‌شود. برای رسیدن به نانولوله‌های کربنی خالص باید از دمای بالا استفاده نماییم اما در این روش مقداری کربن آمورف حاصل می‌شود که یک لایه رسانای نامطلوب بر روی زیرلایه ایجاد می‌نماید. لذا راهبرد جدید، استفاده از روش رشد سریع می‌باشد. این روش رسوب‌دهی، تولید نانولوله‌کربنی حاصل را تضمین می‌کند زیرا رشد نانولوله‌ها سریع‌تر از رشد محصولات جانبی نامطلوب است. بنابراین می‌توان گفت حذف فرایندهای هزینه‌بر، زمان‌بر و اغلب مخرب در تخلیص نانولوله‌ها به معنی دسترسی به نمونه‌هایی با درجه‌ای از خلوص کربن است که می‌توانند در زمینه‌های مختلفی از جمله زیست شناسی، شیمی و تحقیقات مغناطیسی وادوات نشر میدانی که خلوص نانولوله‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد، به‌کار روند.

۳- اتصال نانولوله‌ها و ایجاد رشته‌ها

از آنجا که برای بسیاری از مقاصد، نیاز به اتصال نانولوله‌ها به صورت پشت سر هم یا به صورت عمود بر هم و تشکیل آرایه می‌باشد لذا اتصال نانولوله‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به طوری که اگر بتوان نانولوله‌های کربنی را به هم پیوند داد به موادی کامل و تمام عیار دست می‌یابیم. اما برای ایجاد این اتصالات بین لوله‌ها باید پیوندهای کربنی بین لوله‌ای ایجاد کرد. دو روش ایجاد رشته‌هایی از نانولوله‌ها عبارتند از معلق ساختن نانولوله‌ها در مایع و عبور جریان از آن به منظور ردیف ساختن نانولوله‌ها و دوم استفاده از جریان گاز هیدروژن برای ردیف کردن نانولوله‌ها به طوری که آن‌ها به شکل بخاری از اتم‌های کربن درآیند. دانشمندان معتقدند که امروزه استفاده از آرایه‌های منظم نانولوله‌های مجزا جای استفاده تصادفی از نانولوله‌های متراکم و توده‌ای را گرفته است.

www.ketab.ir

۴-جلوگیری از توده‌ای شدن نانولوله‌ها

اگر نانولوله‌ها به آسانی در محلول غوطه‌ور شوند، به آسانی می‌توانند قابلیت عظیم خود را در الکترونیک و مواد به نمایش گذارند، اما این استوانه‌های کربنی به شدت نامحلول بوده و تمایل به دسته شدن با همدیگر در رشته‌های کروی کنترل ناپذیر دارند؛ لذا مانع از دستیابی به بسیاری از این کاربردها می‌شوند. دانشمندان روش‌هایی را برای جداسازی ارائه کرده‌اند، مثلاً با یک نیروی قوی (لوله‌ها با امواج مافوق صوت در فرایندی موسوم به اختلاط صوتی از هم جدا می‌شوند) یا با استفاده از گروه‌های شیمیایی آلی بزرگ که از چسبیدن نانولوله‌ها به یکدیگر جلوگیری می‌کنند. همچنین با استفاده از مواد شیمیایی شوینده‌های غیرصابونی نیز توانسته‌اند نانولوله‌ها را از هم جدا کنند. از دلایلی که برای به هم چسبیدن این نانو لوله‌ها ارائه شده، وجود نیروهای واندروالس بین اتم‌های کربن می‌باشد. نانولوله‌ها به واسطه نیروی واندروالس که نیروی جاذبه الکتروستاتیک طبیعی بین اتم‌ها و مولکول‌های بدون بار است، از انتها به یکدیگر متصل می‌شوند، بارها مثبت و منفی اتم‌ها و مولکول‌ها که با هم برابر اما از یک بخش به بخش دیگر تغییر می‌کنند، منجر به نیروی جاذبه‌ای بین اتم‌ها و مولکول‌های مجاور می‌شوند. نیروی واندروالس تنها برای اشیاء بسیار کوچک نمود پیدا می‌کند؛ اما سئوال اساسی اینجاست که آیا، اگر نانولوله‌هایی را که به هم چسبیده‌اند جدا کنیم همواره جدا می‌مانند، یا بعد از مدت زمانی دوباره به هم می‌چسبند و این مدت چقدر است؟

۵- چگونگی حفظ نانولوله‌ها بعد از فرآوری

حفظ نانولوله‌ها بعد از فراوری بسیار مشکل است. تا به حال محیط انتخابی، محلول‌های متشکل از ماده پاک کننده وآب بوده است که حاوی کمتر از ۱ درصد حجمی نانولوله‌های پراکنده بوده و به وسیله محلول‌های پلیمری فراوری شده‌اند؛ چنین غلظت‌هایی برای استفاده در فرایندهای صنعتی به منظور ساخت الیاف‌های نانولوله‌ای بزرگ، بسیار پایین هستند. ضمناً دانشمندان هیچ راهی برای زدودن تمامی صابون و پلیمر و تبدیل نانولوله به شکل خالص پیدا نکرده‌اند. همچنین برای تولید مواد ماکرومقیاس از نانولوله‌ها، در فرایندهای شیمیایی نیز باید از مایعی استفاده کرد که بتواند محلولی با غلظت بالا از نانولوله‌ها به وجود آورد. گروه پاسکوئالی در دانشگاه رایس معتقدند که سوپر اسیدها (حاوی ۱۰ درصد وزنی از نانولوله‌های

www.ketab.ir

خالص) می‌توانند در تهیه الیاف‌ها و ورقه‌های نانولوله‌ای ماکرومقیاس با استفاده از روش‌های کاملاً مشابه با روش‌هایی که در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌کار گرفته شوند.

۶-کنترل رشد نانولوله‌ها

آن چیزی که در کنترل رشد مورد اهمیت می‌باشد این است که چگونه بتوانیم نانولوله‌هایی با شکل و ویژگی‌های دلخواه تولید کنیم. از آنجا که نانولوله‌ها هنگام تولید به صورت تک دیواره یا چند دیواره تشکیل می‌شوند و انتهای آن‌ها نیز بسته یا باز است، همچنین دارای طول و قطر یکنواخت نمی‌باشند و تعدادی از نانولوله‌ها رسانا و تعدادی غیررسانا هستند، لذا روشی برای کنترل دقیق نانولوله‌ها و تولید یک نوع محصول خاص از آن وجود ندارد. روش‌هایی که دانشمندان تا حالا ارائه کرده‌اند مربوط به جداسازی این مواد بعد از تولید (مثلاً روش‌های جداسازی نانولوله‌های رسانا از نیمه‌رسانا یا روش‌های بریدن نانولوله‌ها و هم اندازه کردن آن‌ها) بوده است، لذا تولید یک نانولوله با خواص کنترل شده را به صورت یک رویا باقی گذاشته‌اند.

عمده‌ترین کاوش‌ها در کنترل رشد نانولوله‌ها را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

الف- سنتز خوشه‌های کاتالیزوری مولکولی با شکل و ابعاد مشخص با دقت اتمی.

ب- رشد آرام.

ج- سنتز کاتالیزوری در دمای پایین.

د- توسعه رشد برنامه‌ریزی شده با امکان کنترل زیاد اندازه و جهت نانولوله‌ها، سنتز پیچیده.

ه- سازماندهی شده شبکه با آرایه‌هایی از نانولوله‌ها روی مواد درشت مقیاس.

بررسی‌های نظری در کنار کارهای آزمایشگاهی مسیرهای نوینی را برای دیگر پژوهشگران به منظور ایجاد مواد و فناوری‌های جدید با نانولوله‌ها فراهم خواهد آورد لذا راهبردهای کارکردی‌سازی نانولوله‌های کربنی برای دسترسی به این کاربردها بسیار حیاتی است، به ویژه توسعه برای کارکردی سازی نانولوله‌ها به صورت غیرکوالان، به منظور استفاده از خواص الکترونیکی و مکانیکی آن‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. لذا برای ساماندهی و

www.ketab.ir

دستکاری نانولوله‌ها در مقیاس نانو، لازم است تمامی ابزارهای موجود جهت افزایش کارایی مواد و وسایل به‌کار گرفته شود. یکی از این ابزار، شیمی تحلیلی، خصوصاً مدل‌سازی مولکولی و شبیه‌سازی است. حال شبیه‌سازی چطور می‌توانند برای نانوتکنولوژیست‌ها مفید واقع شود؟ محدودیت‌های آزمایشگر در مقیاس نانو زمانی آشکار می‌شود که شگفتی جهان دانشمندان نظری وارد عمل شود.

در اینجا هنگامی که دانشمندان قصد قرار دادن هر یک از اتم‌ها را در محل مورد نظر دارند قوانین کوانتوم وارد صحنه می‌شود. لذا برای تسریع در عمل تولید نانولوله‌ها لازم است شیمی‌دان‌ها نیز مانند تجربی کاران وارد عرصه شوند، چرا که شیمی‌دان‌ها می‌توانند با انجام آزمایش‌ها به وسیله رایانه، احتمال فعالیت‌های غیر مؤثر را از بین ببرند و گستره احتمالی موفقیت‌های آزمایشگاهی را وسعت دهند، نتیجه نهایی این امر کاهش اساسی در هزینه‌های آزمایشگاهی (مانند مواد، انرژی، تجهیزات) و زمان است.

با توجه به اهمیت نانولوله‌های کربنی به‌عنوان یکی از اجزاء مهم در مبحث نانوتکنولوژی، این کتاب با هدف جمع آوری موضوعات کامل مربوط به تکنولوژی نانولوله‌های کربنی گردآوری شده است. بنابراین تمام زمینه‌های مربوطه: ساختار نانولوله‌ها، روش‌های تولید و پیشرفت‌های صورت گرفته در آن، تکنیک‌های خالص‌سازی محصول سنتز شده، عاملی کردن و زمینه‌های کاربردی آن‌ها بطور کامل در این مجموعه گردآوری شده است. همچنین در گردآوری این مجموعه تلاش زیادی شده است تا مطالب به‌صورت قابل فهم بیان شوند.

در **فصل اول** با عنوان ساختار و سنتز نانولوله‌های کربنی، به تشریح ساختارهای ممکن نانولوله‌های کربنی و نواقص موجود در آن‌هاپرداخته شده و سپس روش‌های تولید نانولوله‌های کربنی و پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه بطور کامل بیان شده است.

در **فصل دوم** تحت عنوان خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی، روش‌های خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی با توجه به تاریخ ابداع آن‌ها و همچنین تعدادی از روش‌های بکارگرفته شده توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف جهت خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی سنتز شده، ارائه شده است.

www.ketab.ir

فصل سوم به‌عنوان یکی از مهمترین مباحث نانوتکنولوژی به بررسی روش‌های عاملی کردن نانولوله‌های کربنی و کاربردهای بالقوه آن پرداخته شده است. در این فصل همچنین تأثیر عاملی کردن نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی آن‌ها و نقص ایجاد شده طی این فرآیند نیز بطور کامل توضیح داده شده است.

در **فصل چهارم** تحت عنوان کاربرد نانولوله‌های کربنی، به بررسی کاربردهای واقعی نانولوله‌های کربنی پرداخته شده است. این کاربردها به مرحله وقوع پیوسته و بدور از هرگونه تخیل پردازی می‌باشند.

در **فصل پنجم** تحت عنوان ذخیرهٔ انرژی در نانولوله‌های کربنی، به بررسی جزئیات و مدل ذخیرهٔ انرژی در نانولوله‌های کربنی، به‌عنوان یکی از مهمترین کاربردها، پرداخته شده است. در این فصل ذخیرهٔ انرژی در نانولوله‌های کربنی بوسیله دو عنصر هیدروژن و لیتیم بطور کامل تشریح شده است.

در **فصل ششم** تحت عنوان الکترونیک مولکولی، به تشریح کامل کاربرد نانولوله‌های کربنی در قطعات الکترونیکی و مقایسه استفاده از این نانوساختارها نسبت به نمونه‌های قبلی اشاره شده است.

در **فصل هفتم** تحت عنوان تعیین خواص تک‌نانولوله کربنی، به بررسی روش‌ها و تکنیک‌های بکار گرفته شده جهت تعیین خواص مکانیکی، نوری و الکترونیکی یک تک نانولوله منفرد و همچنین نحوه به‌دست آوردن یک تک نانولوله منفرد جهت آنالیز خواص شرح داده شده است.

مراجع مورد استفاده: در گردآوری این کتاب از دورنمای کاملی تحت عنوان " دنیای شگفت انگیز نانولوله‌های کربنی/مروری کلی به تکنولوژی اخیر نانولوله‌های کربنی/" که توسط گروه تحقیقاتی

,B. Hamers (ST, Treasurer), P.G.A. ,M. Daenen (N),R.D. de Fouw (ST) *M.A.J. Veld (ST, Project Manager) و K. Schouteden (N) Janssen (ST)* در ۲۷ فوریه۲۰۰۳ منتشر شده است، استفاده کاملی شده است. به‌عنوان مثال، روش‌های تولید، ذخیرهٔ انرژی و تعیین خواص، بطور کامل از این مرجع می‌باشد. بنابراین مراجع به دو بخش تقسیم

www.ketab.ir

شده است. مراجع گروه اول به‌عنوان مراجعی هستند که توسط این گروه مورد استفاده قرار گردیده است. و سایر مراجعی توسط گردآورنده استفاده شده است. بنابراین از مرجع‌گذاری در متن پرهیز گردیده است.

بی‌شک این مجموعه، عاری از نقص و کاستی نبوده و لذا از خوانندگان عزیز تقاضا دارم با مطالعه این اثر، نقص‌های وارده را از هر لحاظ به اطلاع برسانند. در نهایت امیدوارم این مجموعه بتواند گامی هرچند کوچک در ارتقاع سطح علمی علاقه‌مندان به مباحث نانوتکنولوژی و بویژه علاقه‌مندان به مبحث نانولوله‌های کربنی، داشته باشد.

www.ketab.ir