

روش‌های سنتز نانولوله‌های کربنی و کاربردهای جدید آنها: مروری

جواد سلطان محمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک گرایش ذرات بنیادی و نظریه میدان ها دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران..

Javadsoltan966@gmail.com

بابک وکیلی

عضو هیات علمی گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

b.vakili@iauctb.ac.ir

شهرام سلیمانی

عضو هیات علمی گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

Shahram22s2000@yahoo.com

1

چکیده

نانولوله‌های کربنی (CNT) به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و الکترونیکی استثنایی‌شان در بخش‌های علمی و فناوری مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌ها آنها را کاندیدای عالی برای چندین کاربرد الکترونیکی می‌کند، مانند هدایت بالستیک، چگالی جریان بالا، مصرف انرژی کم، ظرفیت فوق‌العاده تک فوتون و تشدیدکننده‌های نانومکانیکی عالی. با این حال، ترکیب CNT ها در معماری های میکرو و نانو و ساختارهای ترکیبی خاص همچنان چالش برانگیز است. توسعه فناوری‌های ساخت و الگوبرداری، شامل CNT ها، که می‌توانند با استفاده از ویژگی‌های استثنایی‌شان مقیاس پذیر شوند، در دو دهه اخیر توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. رویکردهای مختلفی از جمله روش‌های بالا به پایین و پایین به بالا مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تکنیک‌های جدیدی برای دستیابی به تولید CNT های انتخابی از طریق الگوسازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توسعه مداوم فناوری های الگوسازی برای بهره برداری کامل از کاربرد عملی CNT ها حیاتی است. این بررسی کوچک به پیشرفت‌های اخیر در ساخت و الگودهی نانولوله‌های کربنی با وضوح میکرو و نانو، مانند استفاده از زیرلایه‌های از پیش الگو، دی‌الکتروفورز، اچ کردن اکسیداتیو، و تولید و رشد انتخابی برای CNT ها، یا چاپ مستقیم جوهرهای حاوی CNT و غیره می‌پردازد. مقاله مزایا و محدودیت های رویکردهای مختلف برای دستیابی به الگوی CNT دقیق و مقیاس پذیر را مورد بحث قرار می‌دهد. غلبه بر چالش‌های ساخت، راه را برای استفاده گسترده از CNT ها در کاربردهای مختلف از جمله الکترونیک، فوتونیک، دستگاه های مکانیکی و زیست پزشکی و سیستم های هیبریدی و غیره هموار می‌کند.

واژگان کلیدی: نانولوله‌های کربنی، روش‌های سنتز، دستگاه های نانولوله کربنی

مقدمه

نانولوله های کربنی (CNTs) اولین بار توسط Sumio Iijima در سال ۱۹۹۱ کشف شد، به دلیل خواص برجسته خود به سرعت در جامعه علمی مورد توجه قرار گرفتند (Iijima, 1991).

آلوتروپ های کربنی که شامل گرافیت، الماس و فولرن هستند، خواص مکانیکی، الکتریکی، نوری و شیمیایی قابل توجهی دارند (Kroto et al., 1985; Saito and Dresselhaus, 1998; Kataura et al., 1999; Dai, 2002b; Novoselov,)
(2009; Zhou et al., 2009; Aqel et al., 2012; Ibrahim, 2013; Zheng, 2017)، با این حال نانولوله های کربنی منحصر به فرد هستند زیرا مدت ها تصور می شد که آنها به عنوان اجزای سازنده ممکن به عنوان اتصالات و/یا عناصر فعال دستگاه های الکترونیکی هستند. با این حال، CNT هایی که به طور تصادفی مونتاژ می شوند، رسانایی الکتریکی کمتری از خود نشان می دهند که بر عملکرد دستگاه و سیستم تأثیر منفی می گذارد. الگوسازی CNT ها برای طراحی و مهندسی دستگاه های جدید و سیستم های هیبریدی با عملکردهای بهبود یافته ضروری است. به عبارت دیگر، دقت و کنترل در نحوه طراحی و ساخت CNT ها تا حد زیادی به روش هایی بستگی دارد که برای الگوسازی استفاده می شود. الگوسازی CNT امکانات جدیدی را برای الکترونیک با کارایی بالا، سیستم های ذخیره انرژی، حسگرهای حساس و دیگر کاربردهای جدید معرفی می کند (Hong et al., 2010;)
(Hu et al., 2010; Volder et al., 2010; Chen et al., 2011). به عنوان مثال، در CNT های تراز شده الگو، الکترون ها می توانند با کارایی بیشتری حرکت کنند، که رسانایی الکتریکی و عملکرد ترانزیستورهای اثر میدان (FETs) را بهبود می بخشد (Javey et al., 2004; Patil et al., 2009a; Patil et al., 2009b; Freer et al., 2010; Ono et al., 2010;)
(Chandra et al., 2011). علاوه بر این، ترکیب CNT ها با نیمه هادی ها، نانوذرات و پلیمرهای مختلف می تواند خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی CNT ها را برای ایجاد انواع جدیدی از مواد ناهم ساختار و دستگاه های هیبریدی بهبود بخشد. (Whitsitt and Barron, 2003; Fan et al., 2010; Dong et al., 2011; Liang et al., 2012; Cao et al., 2013;)
(Chinnappan et al., 2016; Wu et al., 2017; Hameed et al., 2019).

با این وجود، حفظ کنترل بر الگوسازی دقیق در مقیاس میکرو و نانومتری همچنان چالش برانگیز است. ترانزیستورهای لایه نازک، فیلم های رسانای شفاف، دستگاه های پوشیدنی، رابط های انسان و ماشین، کاربردهای پزشکی و نمایشگرهای انعطاف پذیر نیاز به قرار دادن دقیق CNT ها دارند. روش های الگوسازی خوب توسعه یافته می توانند چگالی توان، اندازه ها، هزینه ها و کارایی فرآیند ساخت را بهبود بخشند. تکنیک های مختلف، از جمله کاتالیزورهای رشد CNT از پیش الگو، اچ اکسیداتیو شبکه های CNT، و الگوبرداری با استفاده از محلول های CNT از پیش پراکنده، در گذشته اخیر مورد بررسی قرار گرفته اند. در بخش های بعدی بحث، این تکنیک ها دسته بندی هایی مانند پایین به بالا در مقابل بالا به پایین با تجزیه و تحلیل بعدی مزایا و محدودیت های آنها خواهند بود.

انواع و ساختار CNT ها

CNT ها به سه نوع طبقه بندی می شوند: CNT تک جداره (SWCNT)، CNT دو جداره (DWCNT) و CNT چند جداره (MWCNT) (Iijima and Ichihashi, 1993; Zhao et al., 1997; Dai, 2002a; Aqel et al., 2012; Moore et al., 2015). SWCNT ها از یک لایه گرافن تشکیل شده و یک استوانه بدون درز با خواص الکترونیکی بر اساس یک بردار کایرال تشکیل می دهند. بردارهای کایرال تعیین می کنند که SWCNT ها فلزی یا نیمه هادی هستند (Hodge et al.,)
(2012; Tilmaciu and Morris, 2015). شکاف نواری SWCNT های نیمه هادی با قطر آن نسبت معکوس دارد، قطر لوله کوچکتر، شکاف باند بزرگتر است (Kataura et al., 1999; Wu et al., 2004; Dresselhaus et al., 2005; Turaeva)

(MWCNT et al., 2023) ها دارای چندین لایه متحدالمرکز از سیلندرهای گرافن هستند که ساختار لوله در لوله روی هم قرار گرفته اند و عمدتاً فلزی هستند.

خواص الکتریکی CNT ها به عواملی مانند کایرالیته، قطر، طول و چگالی نقص بستگی دارد. SWCNT های فلزی رسانایی الکتریکی بالایی دارند، در حالی که SWCNT های نیمه هادی رسانایی کمتری در دمای اتاق دارند (Tans et al., 1998; White and Todorov, 1998; Kociak et al., 2001). در CNT ها، الکترون های با چگالی نقص کم به دلیل محصور شدن یک بعدی (D۱) به صورت بالستیک حرکت می کنند، بنابراین آنها را کاندیدهای خوبی برای دستگاه های با تحرک الکترون بالا می کند (Liang et al., 2001). CNT ها همچنین دارای سطوح انرژی و رسانایی کوانتیزه شده هستند (Odom et al., 2000; Javey et al., 2004). روش های جدید برای سنتز کنترل شده و ادغام CNT ها در دستگاه ها، تحقیقات مداوم را در بسیاری از حوزه های تکنولوژیکی هدایت می کند.

سنتز و ساخت CNTs

روش های مختلفی برای تولید CNT وجود دارد که هر کدام مزایا و معایبی دارند. در روش اول، تخلیه قوس، از دو الکترود گرافیتی برای تشکیل یک قوس پلاسما، در اتمسفر گاز بی اثر استفاده می شود (Iijima, 1991; Zhao et al., 1997). این روش عمدتاً MWCNT تولید می کند و بازده تولید نسبتاً بالایی را ارائه می دهد اما ناخالصی ایجاد می کند. روش دیگر، فرسایش لیزری شامل تابش یک هدف کربنی با یک کاتالیزور فلزی واسطه با استفاده از پرتو لیزر قدرتمند است (Guo et al., 1995; Arepalli, 2004). این اجازه می دهد تا کنترل دقیق تری بر روی قطر CNT و کایرالیته داشته باشیم که منجر به SWCNT های برتر می شود. با این حال، عملکرد کم و چالش های مقیاس پذیری بر تولید در مقیاس بزرگ تأثیر می گذارد. رسوب بخار شیمیایی (CVD) روشی انتخابی است که کنترل دقیق تری بر شرایط رشد و CNT های حاصله مورد نیاز است. (Baker, 1989; José-Yacamán et al., 1995; Li et al., 1996; Volder et al., 2013). چند راه مختلف برای پیاده سازی این تکنیک مقیاس پذیر وجود دارد. اینها عبارتند از CVD حرارتی، CVD تقویت شده با پلاسما و CVD رشته داغ (Wang et al., 2002; Meyyappan et al., 2003; Li et al., 2004; Kumar and Ando, 2010). در سنتز CVD از کاتالیزورهای فلزات واسطه برای شکستن گاز هیدروکربنی استفاده می شود. CNT ها عموماً از طریق مکانیسم رشد بخار-مایع-جامد (VLS) رشد می کنند، با اتم های کربن جذب شده روی کاتالیزور (Baker et al., 1973; Gavillet et al., 2001). کنترل پارامترهای فرآیند به محققان اجازه می دهد تا قطر، کایرالیته و تراز CNT ها را از طریق انتخاب دقیق کاتالیزورها، بستر و محیط (مانند دما یا فشار و غیره) تنظیم کنند (Turaeva and Kuljanishvili, 2021). به طور کلی CVD مسیری را برای رشد مقیاس پذیر و انتخابی SWCNT ها و MWCNT های با کیفیت بالا فراهم می کند. در حالی که پیشرفت های زیادی در این زمینه حاصل شده است، تولید SWCNT های بدون نقص با بازده بالا، کایرالیته مطلوب، همچنان چالش برانگیز است. بنابراین، هنگامی که CNT هایی با ویژگی های هدفمند مورد نظر هستند، مرتب سازی و پردازش پس از رشد اغلب مورد نیاز است.

الگوبرداری در مقیاس میکرو و نانو نلوله های کربنی

کنترل چیدمان و جهت گیری CNT ها برای اجرای موفقیت آمیز آنها در کاربردهای دستگاه های مختلف حیاتی است. دو دسته اصلی الگوبرداری وجود دارد: از بالا به پایین و پایین به بالا. به طور خلاصه، روش های پایین به بالا در بیشتر موارد شامل کاتالیزورهای فلزی و بستر هستند. سپس CNT ها با استفاده از فرآیندی مانند CVD روی بستر رشد می کنند. فرآیند رشد را می توان برای تولید CNT با ابعاد و جهت گیری های خاص کنترل کرد. روش های بالا به پایین با CNT های پراکنده در محلولی مانند حلال یا ماتریس پلیمری شروع می شود. سپس محلول بر روی بستر قرار می گیرد و CNT ها با استفاده از خود مونتاژ یا دی الکتروفورز (DEPs) در الگوی مورد نظر مونتاژ می شوند. انتخاب روش الگوبرداری به ویژگی های مورد نظر آرایه های CNT بستگی دارد.

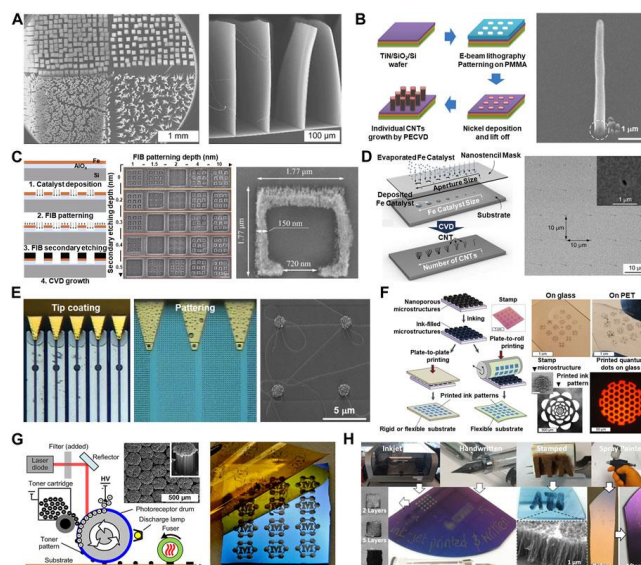
الگوسازی CNT ها می تواند یک فرآیند پیچیده و چالش برانگیز باشد، با این حال، رویکردهای جدید به طور مداوم در حال توسعه هستند. برخی از رایج ترین روش های الگوبرداری در زیر توضیح داده شده است.

از پایین به بالا

رویکرد پایین به بالا ظرفیت ایجاد الگوهای وضوح زیر میکرون را نشان داده است. معمولاً فرآیند الگودهی قبل از رشد CNT رخ می دهد که از طریق سنتز CVD به دست می آید. کاتالیزورهای رشد، معمولاً نانوذرات فلزات واسطه، برای ایجاد الگوهای خاص استفاده می شوند. با این حال، درجه حرارت (600°C – 900°C) مورد نیاز در طول سنتز CNT بسترها را محدود می کند. با وجود این محدودیت، روش های الگوبرداری از پایین به بالا همچنان سودمند هستند زیرا می توانند الگوهای CNT با چگالی بالا ایجاد کنند و انتخاب پذیری و سازماندهی CNT ها را با توجه به بستر کنترل کنند.

الگوی لیتوگرافی کاتالیست برای رشد CNTs

کاتالیزورهای الگو را می توان از طریق فتولیتوگرافی، لیتوگرافی پرتو الکترونی (EBL) و لیتوگرافی پرتو یونی متمرکز (FIBL) تهیه کرد و متعاقباً در طول رشد CNT تولید کرد. (Ishida et al., 2004 ; Imaizumi et al., 2005 ; Häffner et al., 2008 ; Liang et al., 2019). در مطالعات اخیر، تلاش هایی برای غلبه بر معایب این فرآیندهای لیتوگرافی مرسوم صورت گرفته است. همانطور که در شکل A1 نشان داده شده است، فتولیتوگرافی کاتالیستی یکی از سنتی ترین روش ها برای رشد جنگل های CNT با ترکیب رسوب کاتالیست معمولی با اچ کاتالیستی است. (Ahn et al., 2019). این تکنیک امکان کنترل فضایی دقیق بر روی خواص سطح و رسوب انتخابی پیش سازهای کاتالیزور را فراهم کرد (Tawfik et al., 2010).



شکل ۱. روش های پایین به بالا الگوبرداری از پیش ساز کاتالیزور برای تولید CNT (الف) جنگل های MWCNT با ساختارهای مختلف که با الگوبرداری پیش کاتالیزوری با فناوری فتولیتوگرافی رشد کرده اند (Ahn et al., 2019) (Copyright 2019; Springer). (ب) MWCNT های منفرد رشد کرده روی کاتالیزورهای نهشته شده بر روی بستری EBL (Jung and Lee, 2014) (Copyright 2014; Hindawi). (ج) مورفولوژی CNT ها با توجه

به عمق الگوی کاتالیزوری با استفاده از FIB (Pander et al., 2017) (Copyright 2017; Springer) (د) .
 نانولوله‌های کربنی منفرد رشد کرده در جزایر کاتالیزوری که با یک ماسک سایه شابلون رسوب می‌کنند (Choi et al., 2013) (Copyright 2013; Springer) .
 کاتالیزوری که روی ناحیه از پیش تعریف شده توسط یک کاوشگر AFM نوشته شده است (Kuljanishvili et al., 2009) (Copyright 2009; Wiley-VCH) چاپ مستقیم الگوهای جوهر کلونیدی فوق نازک با استفاده از تمبرهای نانومتخلخل ریزساختار (Kim et al., 2016b) (Copyright 2016; Science) . (ز) چاپ لیزری اصلاح شده برای ساخت ریز الگوهای جنگل‌های MWCNT با استفاده از تونرهای نانوذرات کاتالیزوری (Polson et al., 2013) (Copyright 2013; American Chemical Society) (H) .
 چاپ جوهر افشان، مهر زنی لاستیکی، پوشش اسپری و قلم‌نویسی (King et al., 2020) (Copyright 2020; American Chemical Society) .

همانطور که در شکل B۱ نشان داده شده است، EBL امکان ایجاد الگوهای کاتالیزور را بر روی بسترها با دقت نانومتری فراهم می‌کند (Jung and Lee, 2014) . بنابراین، CNT های منفرد جدا شده می‌توانند به طور انتخابی در مکان های دقیق رشد کنند (Liang et al., 2019) . در مطالعه دیگری، EBL می‌تواند بستر رشد را برای بی حرکت کردن کاتالیزور در ناحیه اصلاح شده اصلاح کند (Carpena-Núñez et al., 2018) . زیرلایه‌های یاقوت کبود طرح‌دار C-cut مورد تابش EBL قرار گرفتند و زبری سطح را در ناحیه تحت تابش افزایش دادند. این روش از رسیدن استوالد به نانوذرات کاتالیز شده با فلز جلوگیری می‌کند، بنابراین امکان تشکیل جنگل های CNT دقیق در طول رشد را فراهم می‌کند.

FIBL یکی دیگر از تکنیک های لیتوگرافی دقیق است که برای الگوبرداری در مقیاس نانو استفاده می‌شود. این می‌تواند الگوهای را با دقت در مقیاس نانو با کندوپاش / رسوب یا حذف مواد از یک بستر با استفاده از یک پرتو یون متمرکز ایجاد کند. همانطور که در شکل C۱ نشان داده شده است (Pander et al., 2017) ، FIBL برای ایجاد ترانشه ها یا حفره هایی در اندازه نانو در زیرلایه استفاده شد که می‌تواند به عنوان الگویی برای رشد جنگل های CNT تراز شده باشد. با این حال، FIBL دارای محدودیت هایی است، مانند آسیب به بستر و رسوب مجدد زباله ها که بر کیفیت کلی الگو تأثیر می‌گذارد. هر یک از تکنیک‌های الگوبرداری توصیف شده دارای قدرت و محدودیت‌هایی هستند و وضوحها، کنترل کلی و مقیاس‌پذیری متفاوتی را ارائه می‌دهند و به مجموعه ابزارهای متنوعی برای تولید CNT های الگودار در مقیاس‌های مختلف و برای کاربردهای مختلف کمک می‌کنند.

رشد الگوی CNT ها با استفاده از رویکرد ماسک سایه

محققان روش‌های خودآرایی را برای الگوبرداری از پیش‌سازهای کاتالیزور برای رشد CNT با استفاده از ماسک‌های سایه ایجاد کرده‌اند (Fan et al., 1999 ; Javey and Dai, 2005) . این روش‌ها امکان الگودهی همزمان کل بستر را فراهم می‌کنند، اما در مواجهه با الگوهای مختلف می‌توانند چالش‌برانگیز باشند. در یک مطالعه، نشان داده شد که ماسک سایه ساخته شده از غشای نیتريد با تنش کم، الگوهای وضوح نانومتری یک CNT های جداگانه یا همراه را تولید می‌کند، همانطور که در شکل D۱ نشان داده شده است (Choi et al., 2013) . کاتالیزور آهن در نانو منافذ (قطر ۴۰ نانومتر و فاصله ۲۶۰ نانومتر)، ماسک سایه با شکاف رابط به شدت کنترل شده بین بستر و ماسک سایه قرار داده شد. چندین مطالعه دیگر از ماسک های سایه مختلف برای دستیابی به آرایه های CNT الگودار استفاده کردند. نانوکره‌های خود مونتاژ شده روی بستر به عنوان یک ماسک سایه استفاده می‌شد که منجر به فاصله و تراکم کنترل شده آرایه‌های جنگلی MWCNT شد (Lee et al., 2008) . نشان داده شد که آرایه‌های دوره‌ای

از معماری منفرد MWCNT، بازتاب رنگی قوی را نشان می‌دهند و رفتار کریستال‌های شکاف باند فوتونیک دوبعدی را نشان می‌دهند (Kempa et al., 2003). در مطالعه‌ای دیگر، پوشش اسپینی تک‌لایه‌های نانوکره، رسوب الگوهای کاتالیست دوره‌ای با وضوح جانبی نانومتری را امکان‌پذیر کرد، که منجر به رشد آرایه‌های SWCNT منفرد با قطرهای 1.0 ± 1.8 نانومتر شد (Papadopoulos and Omrane, 2008). خود مونتاژ کوپلیمرهای بلوک نیز برای ساختن نانوقالب‌های دوره‌ای برای کاتالیزورهای الگو استفاده شده است. با این حال، فقط می‌تواند الگوهای خاصی بسازد که بر اساس کوپلیمر بلوک خاص و شرایط استفاده شده در طول الگوسازی متفاوت است. به عنوان مثال، محققان از ماسک‌های سایه‌ای در مقیاس میکرومتر برای الگوبرداری از کاتالیزورهای آهن استفاده کردند. این آرایه‌های نانوحفره‌ای یکنواخت با اندازه و فاصله منافذ کنترل‌شده برای سنتز CVD یا SWCNT‌های بعدی تولید کرد.

رشد CNT ها با استفاده از جوهرهای کاتالیزوری طرح دار

جوهرهای سفارشی را می‌توان برای الگوسازی با پراکندگی نانوذرات کاتالیزوری در حلال‌های مایع مختلف استفاده کرد. سپس جوهر می‌تواند به محلول کلونیدی یا سوسپانسیون یا محلول مولکولی تبدیل شود. اندازه، شکل و توزیع نانوذرات در چنین جوهرهایی به طور قابل توجهی بر CNT های حاصل تأثیر می‌گذارد. کنترل دقیق بر روی رسوب کاتالیست برای دستیابی به الگوهای رشد مطلوب حیاتی است و بنابراین فرمول جوهر باید بر این اساس بهینه شود. انتخاب مناسب حلال همچنین ویسکوزیته و نرخ تبخیر جوهر را کنترل می‌کند و می‌تواند به طور قابل توجهی بر دقت رسوب کاتالیزور در طول الگوسازی تأثیر بگذارد.

شکل E۱ روش نانولیتوگرافی با قلم غوطه‌وری (DPN) را برای ایجاد الگوهای روی یک بستر با استفاده از نوک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) غوطه‌ور در جوهر مولکولی نشان می‌دهد (Piner et al., 1999 ; Hu et al., 2017). با توانایی ایجاد الگوها در مقیاس میکرو تا زیر ۱۰۰ نانومتر، DPN و تکنیک‌های مستقیم نوشتن مشابه در الگوبرداری و رشد کاتالیزورهای مختلف SWCNT های جداگانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Li et al., 2008; Kuljanishvili et al., 2009; Schaper et al., 2021). این روش‌های بدون ماسک می‌توانند آرایه‌های دلخواه از الگوها را در شرایط محیطی تولید کنند. کولجانیشویلی و همکاران این رویکرد را با استفاده از جوهرهای کاتالیست مولکولی مبتنی بر آهن با الگوبرداری موازی با استفاده از کنسول‌های AFM چند قلمی برای رشد تک تک SWCNT های با کارایی بالا نشان داد. لیتوگرافی قلمی پلیمری و لیتوگرافی کوپلیمری بلوک پروب اسکن روش‌های دیگری برای ساختن الگوهای کاتالیزوری در مقیاس ویفر و رشد آرایه‌های لوله جداگانه بر روی بسترهای کوارتز هستند. عمران و همکارانش راهی برای استفاده از یک نانوپیت شیشه‌ای برای رسوب مستقیم کاتالیزور ابداع کردند که از مخزن جوهر کاتالیزوری بزرگتر برای الگوبرداری طولانی مدت مناطق وسیع را پوشش می‌دهد (Papadopoulos and Omrane, 2008). مهر زنی جوهر کاتالیست روشی است که با انتقال جوهر کاتالیست به یک بستر، الگوهای کاتالیزوری کاملاً تعریف شده را ایجاد می‌کند (Kind et al., 1999 ; Huang et al., 2000 ; Bennett et al., 2006 ; Ding et al., 2006). این تکنیک جنبه‌های چاپ میکروکنتاکت را با عملیات سطح زیرلایه خاص، نیروی تماس و زمان به عنوان پارامترهای کنترلی ترکیب می‌کند. جوهر حاوی کاتالیزور معمولاً از پلیمر، الاستومر یا مواد نرم دیگر ساخته می‌شود. این الگو با استفاده از ریزماشین کاری، لیتوگرافی یا روش‌های دیگر بر روی تمبر ایجاد می‌شود. این رویکرد امکان رشد انتخابی و محلی یا استناد ویژه جنگل‌ها یا بسته‌های CNT را فراهم می‌کند و ایجاد ساختارهای پیچیده با CNT ها را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، نتایج تحقیقات اخیر الگوبرداری با وضوح بالا با ضخامت ۵-۵۰ نانومتر را با استفاده از مهرهای نانومتخلخل (شکل F۱) محقق کرده است (Kim et al., 2016b). همانطور که در شکل‌های G۱، H نشان داده شده است، سایر فناوری‌هایی که از جوهرهای کاتالیزوری استفاده می‌کنند شامل روش‌های

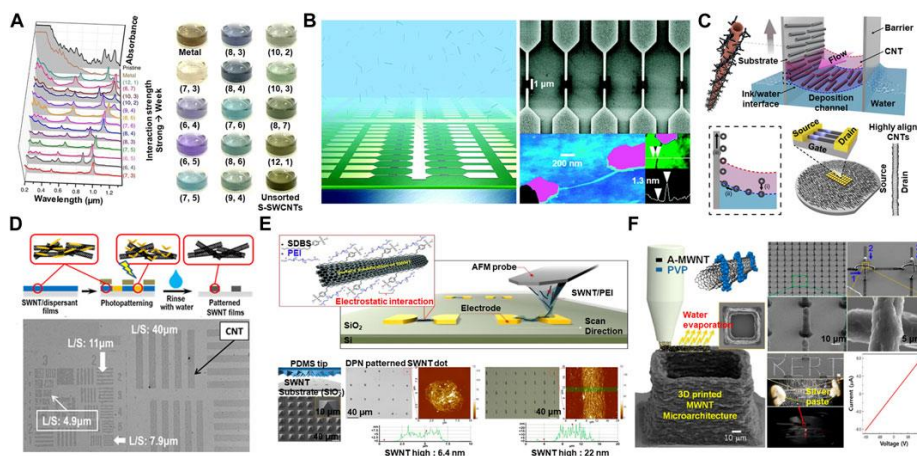
چاپ جوهرافشان یا لیزر جت هستند که می‌توانند در محیط‌های صنعتی استفاده شوند (King et al., 2013 ; Polsen et al., 2020).

این روش‌های چاپ مستقیم این مزیت را دارند که می‌توانند کاتالیزورها را الگوبرداری کنند و متعاقباً CNT های با کیفیت را در مناطق بزرگ‌تر به شیوه‌ای دوره‌ای از پیش تعریف‌شده رشد دهند. رسوب دقیق جوهر کاتالیزوری با در نظر گرفتن عواملی مانند ویسکوزیته جوهر، ترکیب، خواص زیرلایه و پارامترهای چاپ مورد نیاز است. توزیع ناسازگار کاتالیزور می‌تواند باعث رشد غیر یکنواخت CNT ها شود که بر کیفیت ساختاری و عملکرد آنها تأثیر می‌گذارد.

از بالا به پایین

روش های الگوبرداری از CNT های از پیش سنتز شده بر روی یک بستر مورد نظر از بالا به پایین در نظر گرفته می‌شود. به طور معمول، CNT ها از بستر رشد حذف می‌شوند، مرتب شده و در محلول یا موارد دیگر، قبل از الگوبرداری، پراکنده می‌شوند. همانطور که در شکل A2 نشان داده شده است (Liu et al., 2011)، یک استراتژی جداسازی و خالص سازی CNT ها برای تهیه یک پراکندگی CNT با قطر یکنواخت است (Zheng et al., 2003; Arnold et al., 2006; Nish et al., 2007;). مرتب سازی و خالص سازی CNT ها (Tu et al., 2009; Liu et al., 2011; Bati et al., 2018; Zeng et al., 2018) بر اساس کایرالیته، طول و قطر، کنترل دقیق کیفیت مواد را تضمین می‌کند. فن آوری های بالا به پایین عبارتند از DEP، جوهر افشان، صفحه نمایش، و چاپ فلکسوگرافی. این روش‌ها شبکه‌های CNT رسانا را روی بسترهای انعطاف‌پذیر ایجاد می‌کنند، اما وضوح و ویژگی‌های الکترونیکی ممکن است به دلیل نیازهای توان عملیاتی آسیب بینند.

7



شکل ۲. روش های الگوبرداری از بالا به پایین با استفاده از CNT های حاوی جوهر. (الف) جداسازی SWCNT در مقیاس بزرگ با روش کروماتوگرافی ژل (Liu et al., 2011) (Copyright 2011; Nature). (ب) SWCNT های منفرد به طور انتخابی بین الکترودهای طلا در یک منطقه بزرگ با روش DEP رسوب می‌کنند (Vijayaraghavan et al., 2007) (Copyright 2007; American Chemical Society). (ج) SWCNT های با خوبی تراز شده در مقیاس ویفر با روش خودآرایی سطحی جریان مماسی دوبعدی (Jenkins et al., 2021) (Copyright 2021; Science). (د) لایه‌های نازک SWCNT دارای الگوی عکس با استفاده از فرآیندهای جذب/واجذبی

پراکنده‌کننده‌های عملکردی نوری (Matsuzawa et al., 2016) (Copyright 2016; American Chemical Society) (E) بسته‌های SWCNT با بازده بالا از طریق فرآیند DPN نوشتن مستقیم با استفاده از جوهر مرکب (Lee et al., 2016) (Copyright 2016; American Chemical Society) SWCNT/SDBS/PEI الگوبرداری شده‌اند (F). چاپ سه بعدی ریزمعماری MWCNT های بسیار رسانا ساخته شده با جوهرهای سیال (Kim et al., 2016a) (Copyright 2016; American Chemical Society)

الگوبرداری / مونتاژ CNT ها با استفاده از دی الکتروفورز (DEP)

DEP یک روش الگوبرداری CNT است که امکان قرار دادن دقیق یک CNT را با دقت بالا فراهم می‌کند (Fishbine, 1996) (Yamamoto et al., 1996 ; Krupke et al., 2003 ; Baik et al., 2004). مطالعه دیگری نشان داد که DEP برای جمع‌آوری گروه/مجموعه ۵۰ SWCNT با چگالی بالا بین الکترودهای گرافن که با ۱ میکرومتر از هم جدا شده‌اند استفاده می‌شود (Engel et al., 2018). یک مطالعه اخیر نشان داد که یک دستگاه SWCNT منفرد را می‌توان با چگالی بالا در یک منطقه بزرگ روی یک تراشه با استفاده از یک DEP تولید کرد که تنها یکی از الکترودهای سطح آن مستقیماً به منبع RF متصل است، در مقایسه با هندسه سنتی دو الکتروده. (شکل B۲) (Vijayaraghavan et al., 2007). به طور کلی، تکنیک‌های الگوبرداری DEP مقیاس‌پذیر هستند و می‌توانند برای ساخت دستگاه‌های پیشرفته مورد استفاده قرار گیرند، اما نیاز به پردازش دسته‌ای و بستری خاص با الکترودهای از پیش طرح‌دار تا حدودی کاربردها را محدود می‌کند.

الگوبرداری لیتوگرافی فیلم های CNT روی بسترها

برای ساخت و الگودهی نانولوله‌های کربنی یکنواخت و هم‌تراز بر روی بستر مورد نظر و اطمینان از آرایش دقیق و سازمان‌یافته، محققان برشی، فیلتراسیون خلاء، تبخیر هدایت‌شده، خودآرایی تبخیری، آزادسازی الاستومری، خود تراز با ابعاد محدود، هدایت DNA را آزمایش کرده‌اند. اسمبلی، روش های لانگمویر-بلاجت، و لانگمویر-شفر و غیره، برای ساخت آرایه های هم تراز از CNT ها (Xiong et al., 2007; Abdulla and Pullithadathil, 2020; Bodik et al., 2020; Liu et al., 2020). روش خودآرایی سطحی جریان، که اخیراً گزارش شده است، می‌تواند مجموعه‌های SWCNT با چگالی بالا (آرایه‌ها) با تراز عالی ایجاد کند همانطور که در شکل C۲ نشان داده شده است (Jenkins et al., 2021).

در روش دیگری، محققان از SWCNT های پراکنده در محلولی حاوی پراکنده حساس به نور استفاده کردند (Matsuzawa et al., 2016). پوشاندن این محلول بر روی یک بستر و قرار گرفتن در معرض نور UV از طریق یک ماسک نوری باعث می‌شود که SWCNT ها روی بستر در مناطق دارای الگوی UV جمع شوند (شکل D۲)، در حالی که مناطقی که در معرض نور UV قرار نمی‌گیرند به راحتی در آب حل می‌شوند و حذف می‌شوند. وانگ و همکاران روش مشابهی را با استفاده از یک کوپلیمر مبتنی بر پلی فلورن حساس به نور به عنوان یک عامل پراکنده جایگزین نشان داد که تنها زمانی که بستر در معرض نور UV قرار می‌

گیرد واکنش نشان می‌دهد و به آن می‌چسبد (Wang et al., 2020). بسیاری از این تکنیک‌ها می‌تواند مقیاس‌پذیر هستند و قادر به دستیابی به ویژگی‌های نانومقیاس با تجهیزات پیشرفته لیتوگرافی UV و عوامل پراکنده مناسب هستند.

الگوسازی و چاپ CNT های حاوی جوهر

همانطور که توضیح داده شد، فناوری DPN با استفاده از کنسول‌های مختلف می‌تواند SWCNT های منفرد را در وضوح نانو با استفاده از جوهرهای پیش‌ساز کاتالیزور الگوبرداری کند (Chen et al., 2011; Farahani et al., 2012). با این حال، همانطور که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، چنین فرآیندهای الگوبرداری سریالی می‌توانند با استفاده از آرایه‌های نوک چند قلمی به توان عملیاتی بالاتری دست یابند (Kuljanishvili et al., 2009). مطالعات اخیر نشان داد که چگونه از آرایه‌های نوک چند قلمی (تقریباً ۹۰۰۰۰ آرایه قلم PDMS) برای الگوبرداری از بسته‌های SWCNT حاوی جوهر بر روی بستر استفاده شد (شکل E۲) (Lee et al., 2016). نویسندگان از جوهر ساخته شده از SWCNT های مخلوط با پلی اتیلن ایمین (PEI) در آب برای ایجاد الگوهای SWCNT بر روی بسترهای SiO₂ / Si استفاده کردند. عرض خط آرایه SWCNT الگودار از ۲ میکرومتر تا ۸ نانومتر متغیر بود. نویسندگان چندین الگوی نقطه و خط بانند SWCNT را با توان عملیاتی بالا نشان دادند.

پیشرفت‌ها در فناوری‌های چاپ، همچنین الهام‌بخش تکنیک‌های ساده و ارزان برای تولید الگوهای CNT است (Compton and Lewis, 2014; Lewicki et al., 2017). نویسندگان روشی را برای روشی سریع و اقتصادی برای چاپ مدارهای الکتریکی بر روی بسترهای انعطاف‌پذیر با استفاده از جوهرهای پراکندگی MWCNT توصیف می‌کنند (Kim et al., 2016a). شکل F۲ یک روش چاپ سه بعدی هدایت شده با منیسک را نشان می‌دهد که برای ساخت ریزمعماری MWCNT با وضوح فضایی بالا، با استفاده از جوهرهای پراکندگی MWCNTs با ویسکوزیته پایین استفاده شده است. جوهر از MWCNT های مخلوط شده با پلی وینیل پیرولیدون (PVP) که به عنوان تثبیت کننده استفاده می‌شود، به دست آمد و غلظت ۱۷ درصد وزنی PVP برای ویسکوزیته مناسب جوهر بهینه گزارش شد و الگوی یکنواخت را تضمین کرد. این مطالعه ساخت ریزساختارهای سه بعدی MWCNT مختلف از جمله ستون‌ها، پل‌ها، دیوارها، پله‌ها و اشکال الفبایی را نشان داد. این روش‌های چاپ، در حالی که سریع و مقرون به صرفه هستند، محدودیت‌هایی را بر محصولات به دست آمده تحمیل می‌کنند که ممکن است در طول زمان از تخریب ساختاری و عملکردی رنج ببرند.

برنامه کاربردی دستگاه مبتنی بر CNT

نانولوله‌های کربنی در دستگاه‌های الکترونیکی با کارایی بالا، که گاهی اوقات از مواد معمولی پیشی می‌گیرند، نوید زیادی را نشان داده‌اند. کاربردها شامل SWCNT های نیمه هادی طرح دار و طرح‌های مدار مجتمع ساده (IC) با CNT ها (McEuen, 1998; Tans et al., 1998; Franklin et al., 2012; 2022; Franklin, 2013; Wu et al., 2013).

CNTFET ها همچنین دستگاه‌های RF مناسبی هستند و با فناوری بی‌سیم موج میلی‌متری G۵ سازگار هستند (Zong et al., 2019). همچنین، کار اخیر نشان داده است که CNFET ها جریان‌های بالاتری نسبت به دستگاه‌های سیلیکونی ارائه می‌دهند (Yao et al., 1999; Collins et al., 2001; Misewich et al., 2003; Park et al., 2012; Cao et al., 2017; Yang et al., 2017).

نسبت سطح به حجم بالا و رسانایی الکتریکی خوب نانولوله‌های کربنی آنها را برای کاربردهای حسگر ایده‌آل می‌کند (Wong et al., 2016). تثبیت مولکول‌های زیستی روی CNT ها، تشخیص سریع و دقیق گاز و سنجش زیستی را ممکن می‌سازد و استحکام مکانیکی آن‌ها

پایداری و طول عمر سنسور را افزایش می‌دهد. ترکیب نانولوله‌های کربنی با سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) و دستگاه‌های میکروسیال، دستگاه‌ها/حسگرها را دقیق‌تر می‌کند و برای کاربردهای پزشکی در نقطه مراقبت، و همچنین در کاربردهای نوری و فوتونیک مناسب‌تر می‌شود (Rutherglen and Burke, 2007; Rueckes et al., 2000; Fennimore et al., 2003; Stampfer et al., 2006).

برخلاف FET های سنتی/معمولی مبتنی بر سیلیکون، CNTFET ها را می‌توان با بسترهای انعطاف پذیر برای وسایل الکترونیکی پوشیدنی استفاده کرد (Feng et al., 2010; Lipomi et al., 2011; Noh et al., 2011; Sun et al., 2011; Wang et al., 2012; Son et al., 2015). با این حال، روش‌های الگوسازی با وضوح بالا فعلی در بیشتر موارد به بسترهای سفت و سخت محدود می‌شوند و شامل فرآیندهای کند و پرهزینه می‌شوند؛ فوتولیتوگرافی یا EBL. توسعه تکنیک‌های نوآورانه با توان بالا و الگوبرداری با وضوح بالا برای ساخت CNTهایی با چگالی بالا، هم‌ترازی، انتخاب کایرال، و یکپارچگی ساختاری، برای تحقق پتانسیل کامل ICهای مبتنی بر CNT حیاتی است.

پیشرفت‌های اخیر در محاسبات، محاسبات کوانتومی و نورومورفیک را الهام گرفته است. این رویکردهای نوآورانه از اصول مکانیک کوانتومی استفاده می‌کنند و از ساختار شبکه عصبی بیولوژیکی تقلید می‌کنند. محاسبات کوانتومی از اصولی مانند برهم نهی و درهم تنیدگی برای انجام محاسبات به روشی استفاده می‌کند که کامپیوترهای معمولی نمی‌توانند. محققان از ویژگی‌های کوانتومی CNTهای جداگانه برای ایجاد کیوبیت‌ها استفاده می‌کنند که واحدهای اساسی اطلاعات کوانتومی هستند (Gao et al., 2018; Kim et al., 2017; Tanaka et al., 2018; Tanim et al., 2022; Xia et al., 2022; Liu et al., 2023). ترکیب هر دو روش می‌تواند به سیستم‌های هوش مصنوعی پیشرفته‌تری منجر شود که از محاسبات کوانتومی برای سرعت بخشیدن به پردازش و ساختارهای نورومورفیک برای یادگیری و تطبیق سریع استفاده می‌کنند. با این حال، برای درک کامل پتانسیل محاسبات کوانتومی و نورومورفیک با استفاده از فناوری‌های CNTهای الگو، باید بر چالش‌ها غلبه کرد. به دلیل نویز محیطی و ناپیوستگی، اطمینان از ثبات و کنترل حالات کوانتومی در کیوبیت‌های نانولوله‌ای که دارای نقص یا جای خالی هستند، دشوار است. پلتفرم‌های محاسباتی جدید که توسط CNTها فعال می‌شوند می‌توانند یک دستاورد فناوری پیشگامانه باشند که می‌توانند بسیاری از زمینه‌ها را از هوش مصنوعی و محاسبات شناختی گرفته تا رمزگذاری و بهینه‌سازی متحول کنند.

پژوهش‌های داخلی

در ایران هم پژوهش‌های زیادی بر روی این موضوع صورت گرفته است که چند نمونه از آنها را به شرح ذیل داریم: در سال ۱۳۸۸ مولوی و همکارانش در مقاله‌ای به موضوع سنتز نانو لوله‌های کربنی به روش تخلیه قوس الکتریکی در محیط مایع پرداختند. در این مقاله، از روش تخلیه قوس الکتریکی ساده شده، برای تولید نانو لوله‌های کربنی چند جداره استفاده شده است. این روش، به علت عدم نیاز به تجهیزات خلا، سیستم مبدل حرارتی و گازهای فعال یا بی اثر، نسبت به روش تخلیه قوس الکتریکی در فاز گازی، به مراتب ساده‌تر و ارزان‌قیمت‌تر است. با استفاده از این روش، نانو لوله‌های کربنی با ایجاد تخلیه قوس الکتریکی بین دو الکترود گرافیتی که در داخل یک محلول آبی قرار دارند، تولید می‌شوند. در این مقاله، اثرات ناشی از کاربرد کاتالیست‌های مختلف بر روی کیفیت رشد نانو لوله‌ها با استفاده از محلول NaCl به عنوان محیط انجام واکنش، بررسی شده است. همچنین، غلظت‌های مختلفی از کاتالیست ترکیبی Ni-Mo در سنتز این ساختارها به کار برده شده است. نتایج محصولات بدست آمده در این آزمایشات، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی رامان و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)



مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. (مولوی و همکارانش، ۱۳۸۸)

در سال ۱۳۸۹ رحیمی پور و منافی در مقاله‌ای به موضوع سنتز نانولوله های کربنی چند دیواره به روش مکانوترمال برای استفاده در نانوکامپوزیت ها پرداختند. در این مقاله، شناسایی فازهای بلورین، توسط روش پراش پرتو ایکس و مورفولوژی پودر تولید شده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی شد. آنالیز شیمیایی و ریزساختار پودرها توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا تعیین شد. برای تایید سنتز نانولوله های کربنی، از روش رامان استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش اخیر شرایط سنتز نانولوله های کربنی چند دیواره را برای کاربردهای گوناگون، به ویژه مواد تقویت کننده فراهم می کند. (رحیمی پور و منافی، ۱۳۸۹)

در سال ۱۳۹۳ بدیعی و همکارانش مقاله‌ای با عنوان سنتز نانولوله های کربنی بوسیله روش نشست شیمیایی فاز بخار (CVD) و کاتالیست آهن - روی بر پایه آلومینا ارائه دادند. در این مقاله، نانولوله کربنی سنتز شده بوسیله آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، آنالیز حرارتی (TGA) و طیف بینی رامان مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر SEM به خوبی نشان داد که با افزایش میزان روی در کاتالیست قطر نانولوله ها کاهش می یابد. در طیف سنجی رامان دو نوار مربوط به نانولوله ی کربنی مشاهده شد. (بدیعی و همکارانش، ۱۳۹۳)

در سال ۱۳۹۵ سلطانی و طاهر در پژوهشی به موضوع سنتز نانولوله های کربنی مغناطیسی اصلاح شده به عنوان یک جاذب سبز برای استخراج و پیش تغلیظ تالیم از نمونه های حقیقی و اندازه گیری توسط دستگاه جذب اتمی کوره گرافیتی پرداختند. در این مطالعه تکنیک آنالیزی FT-IR و تصویر SEM بر روی نانوذرات به منظور بررسی دقیق انجام شد. این روش ساده، گزینش پذیر و حساس است و برای تعیین تالیم در نمونه های مختلف کاربرد دارد. (سلطانی و طاهر، ۱۳۹۵)

در سال ۱۴۰۱ نیشابوری محمدآبادی و همکاران پژوهشی با عنوان سنتز نانو پودر نیکل در حضور نانولوله کربنی به روش سنتز احتراقی در محلول انجام دادند. در این تحقیق از روش سنتز احتراقی در محلول، که روشی ساده، سریع و مقرون به صرفه می باشد برای نشان دادن بیشترین نانولوله کربنی بر روی نیکل خالص بدون ایجاد اکسید نیکل استفاده شده است. بررسی صحت ایجاد نیکل فلزی بدون تشکیل اکسید نیکل در پودر سنتز شده توسط میکروسکوپ های FE-SEM و تفرق اشعه ایکس، طیف سنجی رامان صورت گرفت. نتایج تحقیقات بیانگر این موضوع می باشد که ذرات نیکل خالص در حضور ۱۰٪ نانولوله کربنی بدون تشکیل اکسید نیکل سنتز شده اند. (نیشابوری محمدآبادی و همکارانش، ۱۴۰۱)

بحث و نتیجه گیری

پیشرفت های مستمر در ساخت و الگودهی نانولوله های کربنی در مقیاس میکرو و نانو، کلید ایجاد دستگاه هایی با کارایی بالا است که می تواند بسیاری از صنایع را متحول کند. چندین نقطه عطف باید به دست آید مانند سنتز کنترل شده در مقیاس بزرگ، تولید مداوم CNT های با کیفیت بالا که توسط مرتب سازی پس از سنتز ارائه می شود، یا از طریق سنتز کنترل شده انتخابی. پیشرفت های مستمر در روش های مصنوعی رشد و الگوسازی یا CNT ها مورد نیاز خواهد بود. همانطور که محققان به بهبود تکنیک های تولید، کاهش چالش های تکنولوژیکی و بهره برداری کامل از این رویکردها ادامه می دهند، عصر جدیدی در محاسبات می تواند به پیشرفت های دگرگون کننده در علم و فناوری منجر شود.

منابع

- مولوی، هدی، شریعتی نیاسر، مجتبی، و جهان شاهی، محسن. (۱۳۸۸). سنتز نانو لوله های کربنی به روش تخلیه قوس الکتریکی در محیط مایع. نشریه مهندسی شیمی و نفت (نشریه دانشکده فنی)، ۴۳(۱)، ۸۱-۸۷.
- منافی، صاحبعلی، و رحیمی پور، محمدرضا. (۱۳۸۹). سنتز نانولوله های کربنی چند دیواره به روش مکانوترمال برای استفاده در نانوکامپوزیت ها. فرآیندهای نوین در مهندسی مواد (مهندسی مواد مجلسی)، ۴(۴) (پیاپی ۱۵)، ۱-۶.
- بدیعی، علیرضا، ازمرد، مظاهر، کریمی، مهدی، و زرآبادی پور، پژمان. (۱۳۹۳). سنتز نانولوله های کربنی بوسیله روش نشست شیمیایی فاز بخار (CVD) و کاتالیست آهن - روی بر پایه آلومینا. نانو ساختارها، ۴(۳)، ۲۵۹-۲۶۵.
- دهقانی سلطانی، مریم، طاهر، محمدعلی. (۱۳۹۵). سنتز نانولوله های کربنی مغناطیسی اصلاح شده به عنوان یک جاذب سبز برای استخراج و پیش تغلیظ تالیم از نمونه های حقیقی و اندازه گیری توسط دستگاه جذب اتمی کوره گرافیتی. شیمی کاربردی، ۱۱(۳۹)، ۲۵-۳۸.
- نیشابوری محمدآبادی، عطیه، صاحبیان سقی، سمانه، حدادسبزواری، محسن، وحدتی خاکی، جلیل. (۱۴۰۱). سنتز نانو پودر نیکل در حضور نانولوله کربنی به روش سنتز احتراقی درمحلول. در IMAT2022
- Abdulla, S., and Pullithadathil, B. (2020). Unidirectional Langmuir–Blodgett-Mediated alignment of polyaniline-functionalized multiwalled carbon nanotubes for NH₃ gas sensor applications. *Langmuir* 36, 11618–11628.
- Ahn, J. H., Na, M., Koo, S., Chun, H., Kim, I., Hur, J. W., et al. (2019). Development of a fully automated desktop chemical vapor deposition system for programmable and controlled carbon nanotube growth. *Micro Nano Syst. Lett.* 7, 11.
- Aqel, A., El-Nour, K. M. A., Ammar, R. A. A., and Al-Warthan, A. (2012). Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. *Arabian J. Chem.* 5, 1–23.
- Arepalli, S. (2004). Laser ablation process for single-walled carbon nanotube production. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 4, 317–325.
- Arnold, M. S., Green, A. A., Hulvat, J. F., Stupp, S. I., and Hersam, M. C. (2006). Sorting carbon nanotubes by electronic structure using density differentiation. *Nat. Nanotechnol.* 1, 60–65.
- Baik, S., Usrey, M., Rotkina, L., and Strano, M. (2004). Using the selective functionalization of metallic single-walled carbon nanotubes to control dielectrophoretic mobility. *J. Phys. Chem. B* 108, 15560–15564.
- Baker, R. T. K. (1989). Catalytic growth of carbon filaments. *Carbon* 27, 315–323. d
- Baker, R. T. K., Harris, P. S., Thomas, R. B., and Waite, R. J. (1973). Formation of filamentous carbon from iron, cobalt and chromium catalyzed decomposition of acetylene. *J. Catal.* 30, 86–95.

Bati, A. S. R., Yu, L., Batmunkh, M., and Shapter, J. G. (2018). Synthesis, purification, properties and characterization of sorted single-walled carbon nanotubes. *Nanoscale* 10, 22087–22139.

Baydin, A., Tay, F., Fan, J., Manjappa, M., Gao, W., and Kono, J. (2022). Carbon nanotube devices for quantum technology. *Materials* 15, 1535.

Bennett, R. D., Hart, A. J., Miller, A. C., Hammond, P. T., Irvine, D. J., and Cohen, R. E. (2006). Creating patterned carbon nanotube catalysts through the microcontact printing of block copolymer micellar thin films. *Langmuir* 22, 8273–8276.

Besteman, K., Lee, J.-O., Wiertz, F. G. M., Heering, H. A., and Dekker, C. (2003). Enzyme-coated carbon nanotubes as single-molecule biosensors. *Nano Lett.* 3, 727–730.

Bodik, M., Maxian, O., Hagara, J., Nadazdy, P., Jergel, M., Majkova, E., et al. (2020). Langmuir–Scheaffer technique as a method for controlled alignment of 1D materials. *Langmuir* 36, 4540–4547.

Cao, Q., Tersoff, J., Farmer, D. B., Zhu, Y., and Han, S.-J. (2017). Carbon nanotube transistors scaled to a 40-nanometer footprint. *Science* 356, 1369–1372.

Cao, Q., Yu, Q., Connell, D. W., and Yu, G. (2013). Titania/carbon nanotube composite (TiO₂/CNT) and its application for removal of organic pollutants. *Clean Technol. Environ. Policy* 15, 871–880.

Carpena-Núñez, J., Davis, B., Islam, A. E., Brown, J., Sargent, G., Murphy, N., et al. (2018). Water-assisted, electron-beam induced activation of carbon nanotube catalyst supports for mask-less, resist-free patterning. *Carbon* 135, 270–277.

Chandra, B., Park, H., Maarouf, A., Martyna, G. J., and Tulevski, G. S. (2011). Carbon nanotube thin film transistors on flexible substrates. *Appl. Phys. Lett.* 99, 072110.

Chen, P., Fu, Y., Aminirad, R., Wang, C., Zhang, J., Wang, K., et al. (2011). Fully printed separated carbon nanotube thin film transistor circuits and its application in organic light emitting diode control. *Nano Lett.* 11, 5301–5308.

Chinnappan, A., Baskar, C., Kim, H., and Ramakrishna, S. (2016). Carbon nanotube hybrid nanostructures: future generation conducting materials. *J. Mat. Chem. A* 4, 9347–9361.

Choi, J., Koh, K., and Kim, J. (2013). Scalable and number-controlled synthesis of carbon nanotubes by nanostencil lithography. *Nanoscale Res. Lett.* 8, 281.

Collins, P. G., Arnold, M. S., and Avouris, P. (2001). Engineering carbon nanotubes and nanotube circuits using electrical breakdown. *Science* 292, 706–709.

Compton, B. G., and Lewis, J. A. (2014). 3D-Printing of lightweight cellular composites. *Adv. Mat.* 26, 5930–5935.

Cubaynes, T., Delbecq, M. R., Dartiailh, M. C., Assouly, R., Desjardins, M. M., Contamin, L. C., et al. (2019). Highly coherent spin states in carbon nanotubes coupled to cavity photons. *npj Quantum Inf.* 5, 47.

Dai, H. (2002a). Carbon nanotubes: opportunities and challenges. *Surf. Sci.* 500, 218–241.

Dai, H. (2002b). Carbon nanotubes: synthesis, integration, and properties. *Acc. Chem. Res.* 35, 1035–1044.

De Volder, M. F. L., Tawfick, S. H., Baughman, R. H., and Hart, A. J. (2013). Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science* 339, 535–539.

Ding, L., Zhou, W., Chu, H., Jin, Z., Zhang, Y., and Li, Y. (2006). Direct preparation and patterning of iron oxide nanoparticles via microcontact printing on silicon wafers for the growth of single-walled carbon nanotubes. *Chem. Mat.* 18, 4109–4114.

Dong, X., Li, B., Wei, A., Cao, X., Chan-Park, M. B., Zhang, H., et al. (2011). One-step growth of graphene–carbon nanotube hybrid materials by chemical vapor deposition. *Carbon* 49, 2944–2949.

Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Saito, R., and Jorio, A. (2005). Raman spectroscopy of carbon nanotubes. *Phys. Rep.* 409, 47–99

Engel, M., Farmer, D. B., Azpiroz, J. T., Seo, J.-W. T., Kang, J., Avouris, P., et al. (2018). Graphene-enabled and directed nanomaterial placement from solution for large-scale device integration. *Nat. Commun.* 9, 4095.

Fan, S., Chapline, M. G., Franklin, N. R., Tomblor, T. W., Cassell, A. M., and Dai, H. (1999). Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties. *Science* 283, 512–514.

Fan, Z., Yan, J., Zhi, L., Zhang, Q., Wei, T., Feng, J., et al. (2010). A three-dimensional carbon nanotube/graphene sandwich and its application as electrode in supercapacitors. *Adv. Mater.* 22, 3723–3728.

Farahani, R. D., Dalir, H., Le Borgne, V., Gautier, L. A., El Khakani, M. A., Lévesque, M., et al. (2012). Direct-write fabrication of freestanding nanocomposite strain sensors. *Nanotechnology* 23, 085502.

Feng, C., Liu, K., Wu, J., Liu, L., Cheng, J., Zhang, Y., et al. (2010). Flexible, stretchable, transparent conducting films made from superaligned carbon nanotubes. *Adv. Funct. Mat.* 20, 885–891.

Fennimore, A. M., Yuzvinsky, T. D., Han, W.-Q., Fuhrer, M. S., Cumings, J., and Zettl, A. (2003). Rotational actuators based on carbon nanotubes. *Nature* 424, 408–410.

Fishbine, B. H. (1996). Carbon nanotube alignment and manipulation using electrostatic fields. *Fullerene Sci. Technol.* 4, 87–100.

Franklin, A. D., Hersam, M. C., and Wong, H.-S. P. (2022). Carbon nanotube transistors: making electronics from molecules. *Science* 378, 726–732.

Franklin, A. D., Luisier, M., Han, S.-J., Tulevski, G., Breslin, C. M., Gignac, L., et al. (2012). Sub-10 nm carbon nanotube transistor. *Nano Lett.* 12, 758–762.

Franklin, A. D. (2013). The road to carbon nanotube transistors. *Nature* 498, 443–444.

Freer, E. M., Grachev, O., Duan, X., Martin, S., and Stumbo, D. P. (2010). High-yield self-limiting single-nanowire assembly with dielectrophoresis. *Nat. Nanotechnol.* 5, 525–530.

Gao, W., Li, X., Bamba, M., and Kono, J. (2018). Continuous transition between weak and ultrastrong coupling through exceptional points in carbon nanotube microcavity exciton–polaritons. *Nat. Photonics* 12, 362–367.

Gavillet, J., Loiseau, A., Journet, C., Willaime, F., Ducastelle, F., and Charlier, J.-C. (2001). Root-growth mechanism for single-wall carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 87, 275504.

Gielen, G., Van Rethy, J., Marin, J., Shulaker, M. M., Hills, G., Wong, H.-S. P., et al. (2016). Time-based sensor interface circuits in CMOS and carbon nanotube technologies. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.* 63, 577–586.

Gooding, J. J. (2005). Nanostructuring electrodes with carbon nanotubes: A review on electrochemistry and applications for sensing. *Electrochimica Acta* 50, 3049–3060.

Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D. T., and Smalley, R. E. (1995). Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chem. Phys. Lett.* 243, 49–54.

Häffner, M., Haug, A., Weitz, R. T., Fleischer, M., Burghard, M., Peisert, H., et al. (2008). E-beam lithography of catalyst patterns for carbon nanotube growth on insulating substrates. *Microelectron. Eng.* 85, 768–773.

Hameed, A., Mukhtar, A., Shafiq, U., Qizilbash, M., Khan, M. S., Rashid, T., et al. (2019). Experimental investigation on synthesis, characterization, stability, thermo-physical properties and rheological behavior of MWCNTs-kapok seed oil based nanofluid. *J. Mol. Liq.* 277, 812–824.

Hodge, S. A., Bayazit, M. K., Coleman, K. S., and Shaffer, M. S. P. (2012). Unweaving the rainbow: A review of the relationship between single-walled carbon nanotube molecular structures and their chemical reactivity. *Chem. Soc. Rev.* 41, 4409–4429

Hong, S. W., Banks, T., and Rogers, J. A. (2010). Improved density in aligned arrays of single-walled carbon nanotubes by sequential chemical vapor deposition on quartz. *Adv. Mat.* 22, 1826–1830.

Hu, H., Kim, H., and Somnath, S. (2017). Tip-based nanofabrication for scalable manufacturing. *Micromachines* 8, 90.

Hu, L., Hecht, D. S., and Gruner, G. (2010). Carbon nanotube thin films: fabrication, properties, and applications. *Chem. Rev.* 110, 5790–5844.

Huang, S., Mau, A. W. H., Turney, T. W., White, P. A., and Dai, L. (2000). Patterned growth of well-aligned carbon nanotubes: A soft-lithographic approach. *J. Phys. Chem. B* 104, 2193–2196.

Ibrahim, K. S. (2013). Carbon nanotubes-properties and applications: A review. *Carbon Lett.* 14, 131–144.

Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354, 56–58.

Iijima, S., and Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature* 363, 603–605.

Imaizumi, Y., Arakawa, Y., Arai, F., and Fukuda, T. (2005). “Local growth of carbon nanotubes on the cantilever by chemical vapor deposition with fib assist etching,” in 5th IEEE Conf. Nanotechnol., 2005, Nagoya, Japan, 15-15 July 2005 (IEEE), 1–4.

Ishida, M., Hongo, H., Nihey, F., and Ochiai, Y. (2004). Diameter-controlled carbon nanotubes grown from lithographically defined nanoparticles. *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, L1356–L1358.

Javey, A., and Dai, H. (2005). Regular arrays of 2 nm metal nanoparticles for deterministic synthesis of nanomaterials. *J. Am. Chem. Soc.* 127, 11942–11943.

Javey, A., Guo, J., Farmer, D. B., Wang, Q., Yenilmez, E., Gordon, R. G., et al. (2004). Self-aligned ballistic molecular transistors and electrically parallel nanotube arrays. *Nano Lett.* 4, 1319–1322.

Jenkins, K. R., Foradori, S. M., Saraswat, V., Jacobberger, R. M., Dwyer, J. H., Gopalan, P., et al. (2021). Aligned 2D carbon nanotube liquid crystals for wafer-scale electronics. *Sci. Adv.* 7, eabh0640.

José-Yacamán, M., Terrones, H., Rendón, L., and Domínguez, J. M. (1995). Carbon structures grown from decomposition of a phenylacetylene and thiophene mixture on Ni nanoparticles. *Carbon* 33, 669–678.

Jung, H. K., and Lee, H. W. (2014). Effect of catalytic layer thickness on diameter of vertically aligned individual carbon nanotubes. *J. Nanomater.* 2014, 1–6.

Kataura, H., Kumazawa, Y., Maniwa, Y., Umez, I., Suzuki, S., Ohtsuka, Y., et al. (1999). Optical properties of single-wall carbon nanotubes. *Synth. Met.* 103, 2555–2558.

Kempa, K., Kimball, B., Rybczynski, J., Huang, Z. P., Wu, P. F., Steeves, D., et al. (2003). Photonic crystals based on periodic arrays of aligned carbon nanotubes. *Nano Lett.* 3, 13–18.

Khivrich, I., and Ilani, S. (2020). Atomic-like charge qubit in a carbon nanotube enabling electric and magnetic field nano-sensing. *Nat. Commun.* 11, 2299.

Kim, J. H., Lee, S., Wajahat, M., Jeong, H., Chang, W. S., Jeong, H. J., et al. (2016a). Three-dimensional printing of highly conductive carbon nanotube microarchitectures with fluid ink. *ACS Nano* 10, 8879–8887.

Kim, S., Choi, B., Lim, M., Yoon, J., Lee, J., Kim, H.-D., et al. (2017). Pattern recognition using carbon nanotube synaptic transistors with an adjustable weight update protocol. *ACS Nano* 11, 2814–2822.

Kim, S., Sojoudi, H., Zhao, H., Mariappan, D., McKinley, G. H., Gleason, K. K., et al. (2016b). Ultrathin high-resolution flexographic printing using nanoporous stamps. *Sci. Adv.* 2, e1601660.

Kind, H., Bonard, J. M., Emmenegger, C., Nilsson, L. O., Hernadi, K., Maillard-Schaller, E., et al. (1999). Patterned films of nanotubes using microcontact printing of catalysts. *Adv. Mat.* 11, 1285–1289.

King, S. G., McCafferty, L., Tas, M. O., Snashall, K., Chen, J. S., Shkunov, M., et al. (2020). Low-cost catalyst ink for simple patterning and growth of high-quality single- and double-walled carbon nanotubes. *ACS Appl. Mat. Interfaces* 12, 11898–11906.

Kociak, M., Kasumov, A. Yu., Guéron, S., Reulet, B., Khodos, I. I., Gorbatov, Yu. B., et al. (2001). Superconductivity in ropes of single-walled carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 86, 2416–2419.

Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., and Smalley, R. E. (1985). C₆₀: buckminsterfullerene. *Nature* 318, 162–163.

Krupke, R., Hennrich, F., Weber, H. B., Kappes, M. M., and v Löhneysen, H. (2003). Simultaneous deposition of metallic bundles of single-walled carbon nanotubes using Ac-dielectrophoresis. *Nano Lett.* 3, 1019–1023.

Kuljanishvili, I., Dikin, D. A., Rozhok, S., Mayle, S., and Chandrasekhar, V. (2009). Controllable patterning and CVD growth of isolated carbon nanotubes with direct parallel writing of catalyst using dip-pen nanolithography. *Small* 5, 2523–2527.

Kumar, M., and Ando, Y. (2010). Chemical vapor deposition of carbon nanotubes: A review on growth mechanism and mass production. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 10, 3739–3758.

Kunitoshi Yamamoto, K. Y., Seiji Akita, S. A., and Yoshikazu Nakayama, Y. N. (1996). Orientation of carbon nanotubes using electrophoresis. *Jpn. J. Appl. Phys.* 35, L917.

- Lee, D. H., Shin, D. O., Lee, W. J., and Kim, S. O. (2008). Hierarchically organized carbon nanotube arrays from self-assembled block copolymer nanotemplates. *Adv. Mat.* 20, 2480–2485.
- Lee, J.-H., Najeeb, C. K., Nam, G.-H., Shin, Y., Lim, J.-H., and Kim, J.-H. (2016). Large-scale direct patterning of aligned single-walled carbon nanotube arrays using dip-pen nanolithography. *Chem. Mat.* 28, 6471–6476.
- Lewicki, J. P., Rodriguez, J. N., Zhu, C., Worsley, M. A., Wu, A. S., Kanarska, Y., et al. (2017). 3D-Printing of meso-structurally ordered carbon fiber/polymer composites with unprecedented orthotropic physical properties. *Sci. Rep.* 7, 43401.
- Li, B., Goh, C. F., Zhou, X., Lu, G., Tintang, H., Chen, Y., et al. (2008). Patterning colloidal metal nanoparticles for controlled growth of carbon nanotubes. *Adv. Mater.* 20, 4873–4878.
- Li, W. Z., Xie, S. S., Qian, L. X., Chang, B. H., Zou, B. S., Zhou, W. Y., et al. (1996). Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes. *Science* 274, 1701–1703.
- Li, Y.-L., Kinloch, I. A., Shaffer, M. S. P., Geng, J., Johnson, B., and Windle, A. H. (2004). Synthesis of single-walled carbon nanotubes by a fluidized-bed method. *Chem. Phys. Lett.* 384, 98–102.
- Liang, J., Chen, R., Ramos, R., Lee, J., Okuno, H., Kalita, D., et al. (2019). Investigation of Pt-Salt-Doped-Standalone- multiwall carbon nanotubes for on-chip interconnect applications. *IEEE Trans. Electron Devices* 66, 2346–2352.
- Liang, R.-P., Wang, Z.-X., Zhang, L., and Qiu, J.-D. (2012). A label-free amperometric immunosensor for alpha-fetoprotein determination based on highly ordered porous multi-walled carbon nanotubes/silica nanoparticles array platform. *Sensors Actuators B Chem.* 166-167, 569–575.
- Liang, W., Bockrath, M., Bozovic, D., Hafner, J. H., Tinkham, M., and Park, H. (2001). Fabry - perot interference in a nanotube electron waveguide. *Nature* 411, 665–669.
- Lipomi, D. J., Vosgueritchian, M., Tee, B. C.-K., Hellstrom, S. L., Lee, J. A., Fox, C. H., et al. (2011). Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. *Nat. Nanotechnol.* 6, 788–792.
- Liu, H., Nishide, D., Tanaka, T., and Kataura, H. (2011). Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography. *Nat. Commun.* 2, 309.
- Liu, L., Han, J., Xu, L., Zhou, J., Zhao, C., Ding, S., et al. (2020). Aligned, high-density semiconducting carbon nanotube arrays for high-performance electronics. *Science* 368, 850–856.

Liu, R., Kim, J. G., Dhakal, P., Li, W., Ma, J., Hou, A., et al. (2023). Neuromorphic properties of flexible carbon nanotube/polydimethylsiloxane nanocomposites. *Adv. Compos. Hybrid. Mat.* 6, 14.

Matsuzawa, Y., Takada, Y., Jintoku, H., Kihara, H., and Yoshida, M. (2016). Photopatterned single-walled carbon nanotube films utilizing the adsorption/desorption processes of photofunctional dispersants. *ACS Appl. Mat. Interfaces* 8, 28400–28405.

McEuen, P. L. (1998). Carbon-based electronics. *Nature* 393, 15–17.

Meyyappan, M., Delzeit, L., Cassell, A., and Hash, D. (2003). Carbon nanotube growth by PECVD: A review. *Plasma Sources Sci. Technol.* 12, 205–216.

Misewich, J. A., Martel, R., Avouris, Ph., Tsang, J. C., Heinze, S., and Tersoff, J. (2003). Electrically induced optical emission from a carbon nanotube FET. *Science* 300, 783–786.

Modi, A., Koratkar, N., Lass, E., Wei, B., and Ajayan, P. M. (2003). Miniaturized gas ionization sensors using carbon nanotubes. *Nature* 424, 171–174.

Moore, K. E., Tune, D. D., and Flavel, B. S. (2015). Double-Walled carbon nanotube processing. *Adv. Mat.* 27, 3105–3137.

Nish, A., Hwang, J.-Y., Doig, J., and Nicholas, R. J. (2007). Highly selective dispersion of single-walled carbon nanotubes using aromatic polymers. *Nat. Nanotechnol.* 2, 640–646.

Noh, J., Jung, M., Jung, K., Lee, G., Kim, J., Lim, S., et al. (2011). Fully gravure-printed D flip-flop on plastic foils using single-walled carbon-nanotube-based TFTs. *IEEE Electron Device Lett.* 32, 638–640.

Novoselov, K. (2009). Beyond the wonder material. *Phys. World* 22, 27–30.

Odom, T. W., Huang, J.-L., Kim, P., and Lieber, C. M. (2000). Structure and electronic properties of carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. B* 104, 2794–2809.

Ono, Y., Kishimoto, S., Ohno, Y., and Mizutani, T. (2010). Thin film transistors using PECVD-grown carbon nanotubes. *Nanotechnology* 21, 205202.

Pander, A., Hatta, A., and Furuta, H. (2017). FIB secondary etching method for fabrication of fine CNT forest metamaterials. *Nano-Micro Lett.* 9, 44.

Papadopoulos, C., and Omrane, B. (2008). Nanometer-scale catalyst patterning for controlled growth of individual single-walled carbon nanotubes. *Adv. Mat.* 20, 1344–1347.

Park, H., Afzali, A., Han, S.-J., Tulevski, G. S., Franklin, A. D., Tersoff, J., et al. (2012). High-density integration of carbon nanotubes via chemical self-assembly. *Nat. Nanotechnol.* 7, 787–791.

Patil, N., Lin, A., Myers, E. R., Ryu, K., Badmaev, A., Zhou, C., et al. (2009a). Wafer-scale growth and transfer of aligned single-walled carbon nanotubes. *IEEE Trans. Nanotechnol.* 8, 498–504.

Patil, N., Lin, A., Zhang, J., Wei, H., Anderson, K., Wong, H.-S. P., et al. (2009b). “Vmr: VLSI-compatible metallic carbon nanotube removal for imperfection-immune cascaded multi-stage digital logic circuits using carbon nanotube FETs,” in 2009 IEEE int. Electron devices meet. (IEDM), 1–4.

Piner, R. D., Zhu, J., Xu, F., Hong, S., and Mirkin, C. A. (1999). “Dip-Pen” nanolithography. *Science* 283, 661–663.

Pistolesi, F., Cleland, A. N., and Bachtold, A. (2021). Proposal for a nanomechanical qubit. *Phys. Rev. X* 11, 031027.

Polsen, E. S., Stevens, A. G., and Hart, A. J. (2013). Laser printing of nanoparticle toner enables digital control of micropatterned carbon nanotube growth. *ACS Appl. Mat. Interfaces* 5, 3656–3662.

Rueckes, T., Kim, K., Joselevich, E., Tseng, G. Y., Cheung, C.-L., and Lieber, C. M. (2000). Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing. *Science* 289, 94–97.

Rutherglen, C., and Burke, P. (2007). Carbon nanotube radio. *Nano Lett.* 7, 3296–3299.

Saito, R., and Dresselhaus, M. S. (1998). *Physical properties of carbon nanotubes*. London: Imperial College Press.

Schaper, N., Alameri, D., Kim, Y., Thomas, B., McCormack, K., Chan, M., et al. (2021). Controlled fabrication of quality ZnO NWs/CNTs and ZnO NWs/gr heterostructures via direct two-step CVD method. *Nanomaterials* 11, 1836.

Son, D., Koo, J. H., Song, J.-K., Kim, J., Lee, M., Shim, H. J., et al. (2015). Stretchable carbon nanotube charge-trap floating-gate memory and logic devices for wearable electronics. *ACS Nano* 9, 5585–5593.

Stampfer, C., Helbling, T., Oberfell, D., Schöberle, B., Tripp, M. K., Jungen, A., et al. (2006). Fabrication of single-walled carbon-nanotube-based pressure sensors. *Nano Lett.* 6, 233–237.

Sun, D., Timmermans, M. Y., Tian, Y., Nasibulin, A. G., Kauppinen, E. I., Kishimoto, S., et al. (2011). Flexible high-performance carbon nanotube integrated circuits. *Nat. Nanotechnol.* 6, 156–161.

Tanaka, H., Akai-Kasaya, M., TermehYousefi, A., Hong, L., Fu, L., Tamukoh, H., et al. (2018). A molecular neuromorphic network device consisting of single-walled carbon nanotubes complexed with polyoxometalate. *Nat. Commun.* 9, 2693.

- Tanim, M. M. H., Vicenciodelmoral, A. Y., Templin, Z., Zhao, X., and Zhao, F. (2022). "Honey-CNT based resistive switching device for neuromorphic computing applications," in 2022 IEEEACM int. Conf. Big data comput., appl. Technol. (BDCAT), 182–183.
- Tans, S. J., Verschueren, A. R. M., and Dekker, C. (1998). Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube. *Nature* 393, 49–52.
- Tawfick, S., Deng, X., Hart, A. J., and Lahann, J. (2010). Nanocomposite microstructures with tunable mechanical and chemical properties. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 12, 4446–4451.
- Tîlmaciu, C.-M., and Morris, M. C. (2015). Carbon nanotube biosensors. *Front. Chem.* 3, 59.
- Tu, X., Manohar, S., Jagota, A., and Zheng, M. (2009). DNA sequence motifs for structure-specific recognition and separation of carbon nanotubes. *Nature* 460, 250–253.
- Turaeva, N., Kim, Y., and Kuljanishvili, I. (2023). An extended model for chirality selection in single-walled carbon nanotubes. *Nanoscale Adv.* 5, 3684–3690.
- Turaeva, N., and Kuljanishvili, I. (2021). Effects of electronic structure of catalytic nanoparticles on carbon nanotube growth. *Carbon Trends* 5, 100092.
- Vijayaraghavan, A., Blatt, S., Weissenberger, D., Oron-Carl, M., Hennrich, F., Gerthsen, D., et al. (2007). Ultra-large-scale directed assembly of single-walled carbon nanotube devices. *Nano Lett.* 7, 1556–1560.
- Volder, M. D., Reynaerts, D., Hoof, C. V., Tawfick, S., and Hart, A. J. (2010). "A temperature sensor from a self-assembled carbon nanotube microbridge," in 2010 IEEE sens, 2369–2372.
- Wang, C., Chien, J.-C., Takei, K., Takahashi, T., Nah, J., Niknejad, A. M., et al. (2012). Extremely bendable, high-performance integrated circuits using semiconducting carbon nanotube networks for digital, analog, and radio-frequency applications. *Nano Lett.* 12, 1527–1533.
- Wang, K., Dong, H., Zhou, D., Ito, Y., Hu, L., Zhang, Z., et al. (2020). Facile fabrication of semiconducting single-walled carbon nanotubes patterns on flexible substrate based on a photoimmobilization technique. *ACS Appl. Mat. Interfaces* 12, 8722–8729.
- Wang, Y., Wei, F., Luo, G., Yu, H., and Gu, G. (2002). The large-scale production of carbon nanotubes in a nano-agglomerate fluidized-bed reactor. *Chem. Phys. Lett.* 364, 568–572.
- White, C. T., and Todorov, T. N. (1998). Carbon nanotubes as long ballistic conductors. *Nature* 393, 240–242.
- Whitsitt, E. A., and Barron, A. R. (2003). Silica coated single walled carbon nanotubes. *Nano Lett.* 3, 775–778.

Wong, S. S., Joselevich, E., Woolley, A. T., Cheung, C. L., and Lieber, C. M. (1998). Covalently functionalized nanotubes as nanometre-sized probes in chemistry and biology. *Nature* 394, 52–55.

Wu, Y., Lin, X., and Zhang, M. (2013). Carbon nanotubes for thin film transistor: fabrication, properties, and applications. *J. Nanomater.* 2013, 1–16.

Wu, Z., Chen, Z., Du, X., Logan, J. M., Sippel, J., Nikolou, M., et al. (2004). Transparent, conductive carbon nanotube films. *Science* 305, 1273–1276.

Wu, Z., Gao, S., Chen, L., Jiang, D., Shao, Q., Zhang, B., et al. (2017). Electrically insulated epoxy nanocomposites reinforced with synergistic core-shell SiO₂@MWCNTs and montmorillonite bifillers. *Macromol. Chem. Phys.* 218, 1700357.

Xia, F., Xia, T., Xiang, L., Ding, S., Li, S., Yin, Y., et al. (2022). Carbon nanotube-based flexible ferroelectric synaptic transistors for neuromorphic computing. *ACS Appl. Mat. Interfaces* 14, 30124–30132.

Xiong, X., Jaberansari, L., Hahm, M. G., Busnaina, A., and Jung, Y. J. (2007). Building highly organized single-walled-carbon-nanotube networks using template-guided fluidic assembly. *Small* 3, 2006–2010.

Yang, Y., Ding, L., Han, J., Zhang, Z., and Peng, L.-M. (2017). High-performance complementary transistors and medium-scale integrated circuits based on carbon nanotube thin films. *ACS Nano* 11, 4124–4132.

Yao, Z., Kane, C. L., and Dekker, C. (2000). High-field electrical transport in single-wall carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 84, 2941–2944.

Zeng, X., Yang, D., Liu, H., Zhou, N., Wang, Y., Zhou, W., et al. (2018). Detecting and tuning the interactions between surfactants and carbon nanotubes for their high-efficiency structure separation. *Adv. Mat. Interfaces* 5, 1700727.

Zhao, X., Ohkohchi, M., Wang, M., Iijima, S., Ichihashi, T., and Ando, Y. (1997). Preparation of high-grade carbon nanotubes by hydrogen arc discharge. *Carbon* 35, 775–781.

Zheng, M., Jagota, A., Semke, E. D., Diner, B. A., Mclean, R. S., Lustig, S. R., et al. (2003). DNA-assisted dispersion and separation of carbon nanotubes. *Nat. Mater.* 2, 338–342.

Zheng, M. (2017). Sorting carbon nanotubes. *Top. Curr. Chem. Collect.*, 129–164.

Zhong, D., Shi, H., Ding, L., Zhao, C., Liu, J., Zhou, J., et al. (2019). Carbon nanotube film-based radio frequency transistors with maximum oscillation frequency above 100 GHz. *ACS Appl. Mat. Interfaces* 11, 42496–42503.

Zhou, W., Bai, X., Wang, E., and Xie, S. (2009). Synthesis, structure, and properties of single-walled carbon nanotubes. *Adv. Mat.* 21, 4565–4583.