

ساخت مبدل گرمایی موجود در موتور ترموآکوستیک به وسیله لایه‌های نازک از نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا

ثامراسعدی^{**}، محمد رضا وحدانی، رضا مردانی
مجتمع دانشگاهی هوا دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز، ایران

چکیده: در این پژوهش نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا با روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار در فشار اتمسفری بر روی زیرلایه‌ای از جنس سیلیکون برای استفاده در موتورهای ترموآکوستیک به عنوان مبدل گرمایی تولید شدند. از گاز استیلن (C_2H_2) به عنوان منبع کربنی، گاز آرگون (Ar) به عنوان گاز حامل، گاز هیدروژن (H_2) برای احیای نانوذره‌ها و از نانوذره‌های آهن به عنوان منبع کاتالیستی برای رشد آرایه‌ای نانولوله‌های کربنی استفاده شده است. واکنش درون یک لوله کوارتز به طول ۴۸ cm انجام شده و گازها با آهنگ شارش مشخص به درون آن تزریق شدند. با افزایش زمان رشد از ۱۰ تا ۳۰ min، تغییر چندانی در توزیع قطر و تراکم آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده ایجاد نشد. این در حالی است که ضخامت (طول) آرایه‌ها از مقدار ۱۵/۶۲ تا ۱۶/۷۶ μm افزایش یافت. نانولوله‌های کربنی رشد داده شده در زمان ۳۰ min رشد بهینه‌تری داشتند. ضخامت (طول) آرایه‌های نانولوله‌های کربنی هم راستای سنتز شده در دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰ °C به ترتیب دارای مقدارهای ۷۵/۴۲ و ۶۰/۹۸ μm بودند. به طور کلی نمونه سنتز شده در زمان و دمای رشد بهینه برابر با ۳۰ min و ۷۵۰ °C بر روی زیرلایه سیلیکونی لایه نشانی شده (با نانوذره‌های آهن) توسط روش کندوپاش مغناطیسی برای استفاده به عنوان مبدل ترموآکوستیک به طور کامل مناسب بودند.

واژگان کلیدی: مبدل گرمایی ترموآکوستیک، نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای، نانوذره‌های آهن، رسوب‌دهی شیمیایی بخار، زمان رشد، دمای رشد.

KEYWORDS: Thermoacoustic heat exchanger, Array carbon nanotubes, Iron nanoparticles, Chemical vapor deposition, Growthtime, Temperature of growth.

مقدمه

موج متحرک (تشکیل شده است (شکل ۱) [۱]. بسته به نوع موتور می‌توان از یک محرک و یا بلندگو برای تولید امواج صوتی استفاده نمود. دو موج با فرکانس‌های مشخص که در دو سوی مخالف حرکت می‌کنند می‌توانند با هم تدریج کنند، این تدریج باعث رزونانس می‌شود که یک موج ایستاده ایجاد می‌کند. رزونانس تنها

موتورهای ترموآکوستیک^۱ دستگاه‌های هستند که از امواج صوتی با دامنه بالا برای پمپاژ گرما از یک مکان به مکان دیگر و یا برعکس از اختلاف گرما برای ایجاد امواج صوتی با دامنه بالا استفاده می‌کنند. دستگاه ترموآکوستیک از مبدل‌های گرمایی^۲، یک تشدیدکننده^۳ و یک دودکش (در دستگاه‌های موج ساکن) و یا ریژنراتور^۴ (در دستگاه‌های

*عهده‌دار مکاتبات

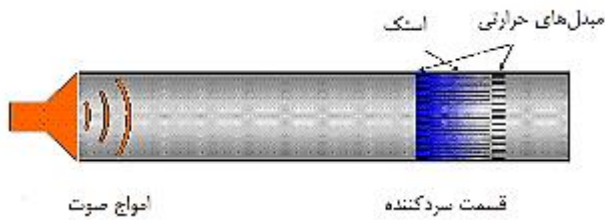
+Email: samer.asadi@yahoo.com

(۱) Thermoacoustic

(۳) Resonator

(۲) Heat exchanger

(۴) Regenerator



شکل ۱ - شمای دستگاه ترمواکوستیک [۱]

(قطبش‌دهنده)، فیلم رسانای شفاف و منابع نوری پلاریزه استفاده می‌شوند [۳، ۶]. البته در آینده این ورق‌ها می‌توانند به صورت الیاف متراکم فشرده شوند که این الیاف متراکم می‌توانند دارای استحکام کششی و مدول یانگ بالایی باشند [۵، ۸]. همچنین به عنوان یک انتخاب خوب برای منابع انتشار الکترون هستند [۹]. هیچ شکی وجود ندارد که کاربردهای بیش‌تری از این نوع ورق‌ها در آینده کشف خواهد شد. این در حالی است که برای یافتن کاربردهای گسترده ورق‌های نانولوله‌های کربنی هم‌سو دو چالش اصلی وجود دارد. اولین چالش در چگونگی مقیاس‌بندی سنتز نانولوله‌های کربنی هم‌سو است که از جمله این مقیاس‌بندی‌ها شامل توسعه سطح آرایه‌ها و دستیابی به رشد دسته‌ای می‌باشد. در سال ۲۰۰۵ میلادی گروهی از پژوهشگران موفق به سنتز نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم‌سو بر روی فیلم سیلیکون به قطر ۴ اینچ در دستگاه رسوب‌دهی شیمیایی بخار با فشار کم (LPCVD) شدند [۴]. با وجود این یافته‌ها این حقیقت باقی می‌ماند که تنها نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای هم‌سو سنتز شده شامل نانولوله‌های کربنی چند دیواره با قطرهای در بازه ۱۰ تا ۱۵ nm توانایی ایجاد ورقه‌های هم‌سو را دارند [۸-۳]. روش مورد استفاده برای رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا مورد نظر در این پژوهش از نوع روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار در فشار اتمسفری می‌باشد. این روش افزون بر توانایی کنترل برای رشد نانولوله‌ها، یک روش ساده و اقتصادی برای تولید نانولوله‌های کربنی در دماهای پایین و فشار محیط است [۱۱، ۱۰]. هدف اصلی این مقاله، سنتز نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا برای استفاده به عنوان مبدل گرمایی در موتورهای ترمواکوستیک می‌باشد.

بخش تجربی

مواد

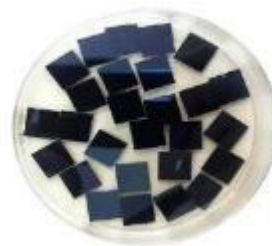
زیرلایه‌های سیلیکون (Si) با مشخصه (۱۰۰) p-type به منظور لایه‌نشانی ساختار کاتالیستی مورد استفاده قرار گرفت که این زیرلایه‌ها

در فرکانس‌های خاصی به نام فرکانس رزونانس رخ می‌دهد که به‌طور معمول بر حسب طول رزوناتور یا تشدیدکننده تعیین می‌شود. استک قطعه‌ای است که از کانال‌های موازی کوچکی تشکیل شده است. زمانی که استک در یک مکان خاص در رزوناتور قرار می‌گیرد، در حالی که یک موج ایستاده در رزوناتور وجود دارد، می‌تواند یک تفاوت دما را در طول استک اندازه‌گیری کرد. با قراردادن مبدل‌های گرمایی در هر طرف استک، می‌توان گرما را منتقل کرد. برعکس این هم با ایجاد اختلاف دما در طول استک می‌تواند یک موج صوتی القا کرد. بنابراین هر چه مبدل گرمایی موجود در موتور ترمواکوستیک هادی گرمایی بهتری باشد؛ میزان انتقال گرما بیش‌تر و در نتیجه شدت القا موج صوتی نیز افزایش چشمگیری خواهد یافت. نانولوله‌های کربنی دارای توانایی بالایی در انتقال گرما هستند و همچنین رشد دسته‌ای نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا و متراکم می‌تواند میزان رسانایی گرمایی را چندین برابر افزایش دهد [۲]. بنابراین در این مطالعه سعی می‌شود نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا بر روی زیرلایه سیلیکونی (Si) با اندازه‌های ۱×۱ سانتی‌متر رشد داده تا به عنوان مبدل ترمواکوستیک استفاده شود. برای ایجاد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا به صورت دسته‌ای (ورقه‌ای) نیاز است که شرایط عملیاتی بهینه از جمله زمان و دمای رشد به منظور تنظیم طول و قطر این مبدل ساخته شده (شامل نانولوله‌های آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا) تعیین شود.

نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا به نانولوله‌هایی گفته می‌شود که با آرایش هم‌سو و در یک‌راستا سنتز شوند. رشد آرایه‌ای به طور کامل هم‌راستا به نانولوله‌ها این امکان را می‌دهد که دارای ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی یگانه‌ای باشند. از ویژگی‌های کلیدی نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای هم‌سو این است که ورقه‌های یک‌سو پیوسته از یک لایه نازک شامل نانولوله‌های کربنی خالص موازی تشکیل می‌شود [۸-۳]. شرط لازم برای این نانولوله‌های هم‌سوی عمودی برای تبدیل به فیلم‌های نازک افقی این است که نانولوله‌ها در آرایه‌های هم‌سو دارای سطوح به طور کامل صاف و برهمکنش و اندروالسی باشند [۴]. این ورقه‌های تولید شده به عنوان یک رسانای قوی و با قابلیت عبوردهی بالایی نور هستند که به خاطر طبیعت به طور کامل هم‌سوی‌شان از نانولوله‌های کربنی با رشد تصادفی متمایز می‌شوند و با تشکیل فیلم‌های نازک در کنار هم به صورت موازی قرار گرفته‌اند. تعداد زیادی از کاربردهای نهفته این نانولوله‌ها به اثبات رسیده است، برای نمونه به عنوان پلاریزه‌کننده



شکل ۴ - قرص آهن با خلوص ۹۹/۹ درصد، ضخامت ۰/۱ mm و قطر ۲ in مورد استفاده به عنوان تارگت در دستگاه کندوپاش مغناطیسی



شکل ۲ - شمایی از زیرلایه سیلیکونی (Si) با مشخصه p-type (۱۰۰)



شکل ۵ - شمایی از دستگاه رسوب‌دهی شیمیایی بخار در فشار اتمسفری مورد استفاده



شکل ۳ - محلول‌های (الف) استون و (ب) ایزوپروپانول با خلوص ۹۹ درصد برای شستشوی زیرلایه‌های سیلیکونی (Si)

روش لایه‌نشانی

برای لایه‌نشانی زیرلایه‌ها توسط نانوذره‌های آهن لازم است که زیرلایه‌ها به طور کامل تمیز باشند. بدین منظور نخست زیرلایه سیلیکونی که به صورت قطعه‌های 1×1 سانتی‌متر برش داده شده‌اند، درون ظرفی دارای استون به مدت ۱۵ دقیقه در حمام مجهز به موج فراصوت قرار داده و پس از آن با آب یون‌زدایی شده شست و شو و سپس همین مرحله‌ها با ایزوپروپانول تکرار شد. سرانجام برای خشک کردن زیرلایه‌ها از گاز نیتروژن استفاده شد. پس از تمیز شدن زیرلایه‌ها، لایه‌نشانی آن‌ها با تارگت آهن توسط روش کندوپاش مغناطیسی انجام شد.

استفاده از کندوپاش برای ساخت یک لایه نازک، اولین بار در سال ۱۸۵۲ میلادی گزارش شد و از آن زمان دوره‌های متفاوت و کم توجهی را به لحاظ اقتصادی و علمی گذرانده است [۱۲]. در فرایند کندوپاش، با استفاده از ذره‌های پراثری (۱۰۰-۵۰ الکترون ولت) سطح هدف بمباران می‌شود [۱۲]. در نتیجه برخورد ذره‌های پراثری به هدف، اتم‌های هدف تهییج شده و کنده می‌شوند. متداول‌ترین و دقیق‌ترین روش لایه‌نشانی، روش کندوپاش

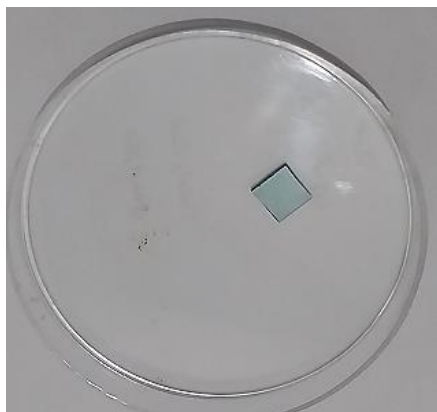
روش‌ها

دستگاه رسوب‌دهی شیمیایی بخار مورد استفاده

دستگاه مورد استفاده در این پژوهش برای رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل یک راستا از نوع دستگاه رسوب‌دهی شیمیایی بخار در فشار اتمسفری^۲ می‌باشد که دارای دو ناحیه گرم (دو مکان رشد) به طول ۲۴ cm است (شکل ۵). همچنین این دستگاه شامل یک لوله کوارتز به طول ۴۸ cm، قطر درونی ۴/۲ cm و قطر خارجی ۴/۸ cm می‌باشد. در این پژوهش از ناحیه گرم نزدیک به ورودی گازها به منظور تأثیرگذاری بیش‌تر استفاده شد.

(۱) Magnetron sputtering

(۲) Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition



شکل ۶- نمایی از زیرلایه لایه‌نشانی شده با روش کندوپاش مغناطیسی

هیدروژن و مانده زمان برای رشد توسط منبع کربنی استیلن) که دما در 800°C ثابت باشد، تنظیم می‌شود. سرانجام گام سوم (Step 3) برای کاهش دمایی تا 50°C در 20 min تنظیم می‌شود. در گام اول گاز آرگون با شدت جریان 352 sccm تا زمانی که دمای کوره در مدت زمان 50 min به 800°C برس وارد لوله کوارتز می‌شود. در گام دوم همزمان با جریان گاز آرگون با شدت جریان 352 sccm ، گاز هیدروژن با شدت جریان 26 sccm برای احیا زیرلایه لایه‌نشانی شده (احیای نانوذره‌های آهن) در مدت زمان 5 min وارد و سپس در مدت زمان‌های 10 ، 20 و 30 min باقی‌مانده، جریان گاز هیدروژن قطع و جریان منبع کربنی استیلن با آهنگ شارش 28 sccm برای رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل یک راستا به طور جداگانه روی سه زیرلایه سیلیکونی لایه‌نشانی شده شارش می‌یابد. سپس جریان منبع کربنی قطع و در مرحله پایانی (گام سوم) در حضور شارش گاز آرگون، دمای کوره تا 50°C در 20 min کاهش خواهد یافت.

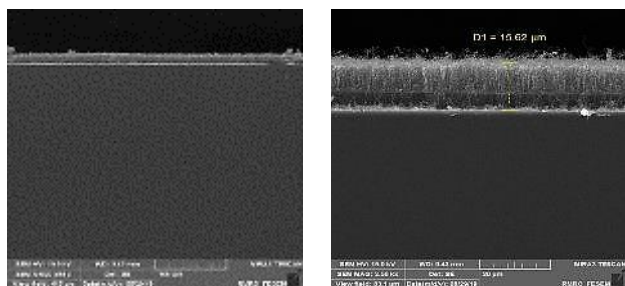
بررسی اثر دمای رشد بر کیفیت رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا
در این حالت (پس از گذاشتن زیرلایه سیلیکونی لایه‌نشانی شده در لوله کوارتز) گام اول دمایی-زمانی کوره در دماهای 700 ، 750 و 800°C به طور جداگانه برای سه زیرلایه در مدت زمان 50 min تنظیم می‌شود. در گام دوم به مدت زمان بهینه (5 min) برای مرحله احیا و مابقی مدت زمان بهینه برای مرحله رشد، دما در مقادیرهای 700 ، 750 و 800°C برای هر زیرلایه ثابت نگه داشته می‌شود. مرحله سوم نیز به عنوان مرحله خنک‌سازی برای کاهش دما تا 50°C به مدت زمان 20 min تنظیم می‌شود. آهنگ‌های شارش آرگون (به عنوان گاز حامل)، هیدروژن (به عنوان گاز احیا) در مرحله احیا و استیلن (به عنوان منبع کربنی) در مرحله رشد به ترتیب برابر

مغناطیسی است. میدان مغناطیسی مورد استفاده در این روش با افزایش چگالی پلاسما، چگالی جریان در هدف یا کاتد را افزایش می‌دهد و در نتیجه آهنگ کندوپاش افزایش می‌یابد. از آنجایی که برای رشد نانولوله‌های کربنی به صورت به طور کامل هم راستا نیاز به یک لایه‌نشانی با دقت بالا و به طور کامل مترکم است به همین دلیل در این پژوهش از این روش استفاده شده است. در شکل ۶ زیرلایه لایه‌نشانی شده با نانوذره‌های آهن به ضخامت $3-6\text{ nm}$ توسط روش کندوپاش مغناطیسی نشان داده شده است.

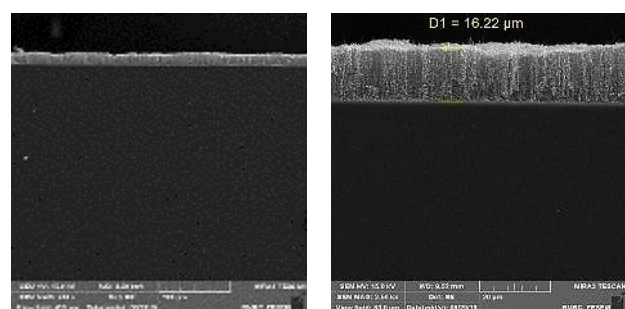
روش کلی آزمایش

هدف از این پژوهش تعیین مقدار بهینه دما و زمان رشد برای بهبود کیفیت نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل یک راستا رشد داده شده بر روی زیرلایه سیلیکونی لایه‌نشانی شده (با نانوذره‌های آهن) می‌باشد. بدین منظور محفظه اصلی واکنش که لوله کوارتز است، درون کوره با دمای مشخص (بسته به نوع آزمایش) قرار گرفته و گازهای واکنش به درون آن وارد می‌شوند. منبع کربنی مورد استفاده در این پژوهش، گاز استیلن می‌باشد. از گاز آرگون نیز به عنوان گاز حامل و از گاز هیدروژن برای احیای نانوذره‌های استفاده می‌شود. این گازها با استفاده از جریان سنج‌هایی که در مسیرشان قرار گرفته با آهنگ شارش مشخص به درون لوله کوارتز تزریق می‌شوند.

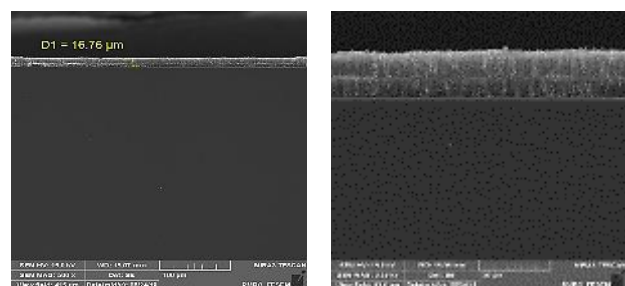
بررسی اثر زمان رشد بر کیفیت رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا
برای بررسی تأثیر زمان رشد بر کیفیت رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا، نخست شیر کپسول‌های گازی شامل استیلن، هیدروژن و آرگون باز می‌شود می‌کنیم؛ برای این منظور شیر درون اتاق باز و سپس شیر بیرون باز می‌شود که این مسئله به منظور تنظیم شدت جریان گازها و همچنین اطمینان به دست آوردن از وجود گاز درون کپسول‌ها انجام می‌شود. سپس همه شیرهای درون اتاق محکم بسته شده و پس از گذاشتن زیرلایه لایه‌نشانی شده با نانوذره‌های آهن (توسط روش کندوپاش مغناطیسی) در وسط کوره (وسط ناحیه گرم نزدیک به ورودی گازها یا محل شعله کوره)، پیچ‌های مورد نظر در دو طرف کوره محکم بسته می‌شود (برای جلوگیری از نشست گاز و ورود هوا به درون لوله کوارتز). پیش از روشن شدن کوره باید گام‌های دمایی-زمانی کوره تعریف شود. گام اول (Step 1) برای مدت زمان 50 min برای افزایش دما تا 800°C و سپس گام دوم (Step 2) برای مدت زمان‌های 15 ، 25 و 35 min (مدت زمان احیا توسط گاز



شکل ۸ - تصویرهای FESEM از مقطع عرضی نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در زمان رشد ۱۰ min

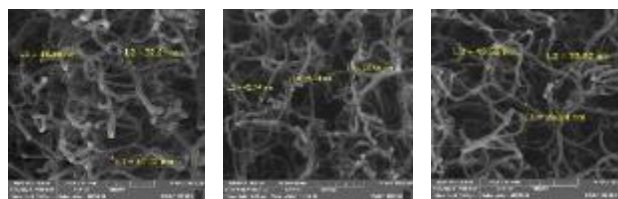


شکل ۹ - تصویرهای FESEM از مقطع عرضی نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در زمان رشد ۲۰ min



شکل ۱۰ - تصویرهای FESEM از مقطع عرضی نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در زمان رشد ۳۰ min

در مقیاس‌های ۲۰ و ۱۰۰ μm از مقطع‌های عرضی این نانولوله‌ها در هر سه زمان رشد تصویربرداری شده است (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰). از این شکل‌ها چنین برداشت می‌شود که هر چه رشد نانولوله‌ها در مدت زمان بیشتری انجام شود ضخامت (طول) آرایه‌ها از مقدار ۱۵/۶۲ تا ۱۶/۷۶ μm افزایش می‌یابد، که این می‌تواند به علت فرصت زمانی لازم برای تشکیل بیش‌تر پیوندهای کربنی sp^2 باشد. این در حالی است که هم راستایی آرایه‌ها بهبود چندانی پیدا نکرده است. به طور کلی با توجه به این که نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای رشد داده شده با طول بلندتر دارای ویژگی گرمایی مناسب‌تری می‌باشند [۲]



شکل ۷ - تصویر FESEM از سطح نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در زمان‌های رشد برابر یا (الف) ۱۰، (ب) ۲۰ و (ج) ۳۰ min

با ۳۵۲، ۲۶ و ۱۸ sccm (آهنگ شارش بهینه منبع کربنی به دست آمده در کار پژوهشی پیشین [۱۳]) می‌باشند.

روش تجزیه و تحلیل نتیجه‌ها

در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر نتیجه‌های به دست آمده از رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل یک راستا از دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی^۱ با مدل MIRA3TESCAN-XMU (موجود در آزمایشگاه متالورژی رازی) استفاده می‌شود [۱۰].

نتیجه‌ها و بحث

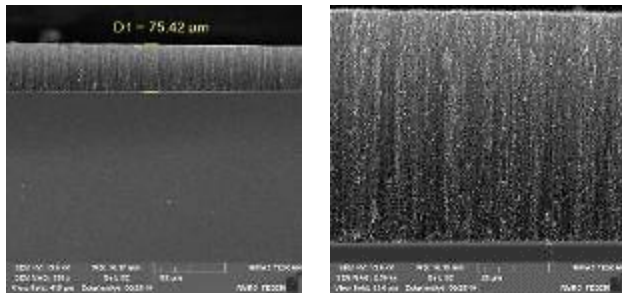
تأثیر زمان رشد بر روی کیفیت رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا

از آنجایی که در مطالعه‌های پیشین زمان رشد بهینه برای سنتز نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا بسته به نوع دستگاه رسوب دهی شیمیایی بخار و شرایط عملیاتی حاکم در بازه ۱۰-۳۰ min می‌باشد [۳-۸]؛ به همین دلیل در این بخش سعی بر آن می‌شود که بهترین زمان رشد (در این بازه زمانی بهینه) برای سنتز آرایه‌های به طور کامل هم راستا بر روی زیرلایه سیلیکونی لایه نشانی شده با نانوذره‌های آهن به دست آید.

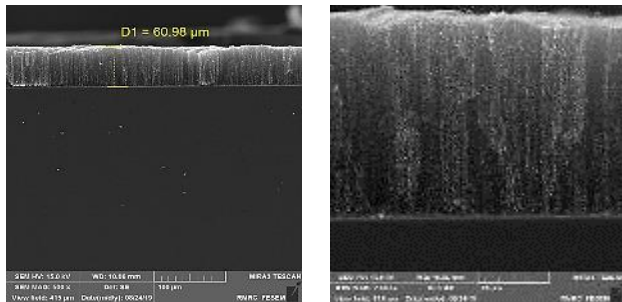
شکل ۷ تصویر FESEM از نقاط سطحی نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده را در زمان‌های رشد برابر با (الف) ۱۰، (ب) ۲۰ و (ج) ۳۰ min نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود با افزایش زمان رشد، تغییر چندانی در توزیع قطر آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده ایجاد نمی‌شود. افزون میزان تراکم آرایه‌ها نیز نسبت به زمان رشد حساس نیستند.

برای مشخص شدن میزان تغییر طول و هم راستایی آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده، با استفاده از دستگاه FESEM

(۱) Field Emission Scanning Electron Microscope



(الف)

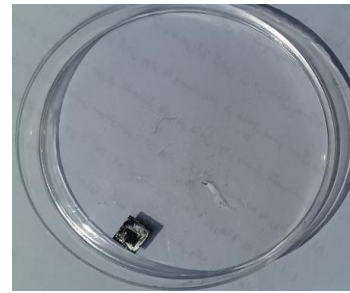


(ب)

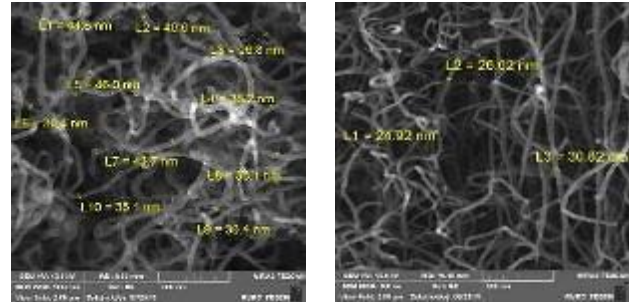
شکل ۱۲- تصویرهای FESEM از مقاطع عرضی دو نمونه رشد داده شده در دماهای (الف) ۷۵۰ °C و (ب) ۸۰۰ °C

امکان رشد هم راستای این نانولوله‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش قطر متوسط نانولوله‌ها، آزادی حرکت این آرایه‌ها هنگام رشد بیشتر می‌شود که این عمل باعث در هم پیچیدگی این نانولوله‌ها می‌شود [۳-۸]. بنابراین (به دلیل توانایی بیش‌تر در ایجاد ورقه‌های به طور کامل هم‌سو توسط نانولوله‌های کربنی دارای توزیع قطر کم‌تر) نانولوله‌های کربنی رشد داده شده در دمای ۷۵۰ °C می‌توانند دارای کیفیت بالاتری از نظر تراکم و هم راستایی نسبت به حالت دلخواه در بخش‌های پیشین باشند. این در حالی است که با کاهش دمای رشد تا ۷۰۰ °C (با وجود اعمال شرایط عملیاتی بهینه به دست آمده در مرحله‌های پیشین)، رشد خاصی بر روی زیرلایه به دست نمی‌آید. این مسئله می‌تواند به علت نبود دمای مورد نیاز برای تجزیه گرمایی منبع کربنی استیلن باشد.

از آن جایی که در دمای ۷۰۰ °C در عمل رشدی بر روی زیرلایه سیلیکونی (شامل نانوذره‌های کاتالیستی آهن) رخ نداده است، به همین دلیل در شکل ۱۲ تصویرهای FESEM از مقطع‌های عرضی دو نمونه رشد داده شده در دماهای (الف) ۷۵۰ °C و (ب) ۸۰۰ °C تهیه شده است. از این شکل چنین برداشت می‌شود که ضخامت (طول) آرایه‌های نانولوله‌های کربنی هم راستای سنتز شده در دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰ °C به ترتیب دارای مقدارهای ۷۵/۴۲ و ۶۰/۹۸ میکرومتر می‌باشند. بنابراین نانولوله‌های کربنی رشد داده شده در دمای ۷۵۰ C



(الف)



(ج)

(ب)

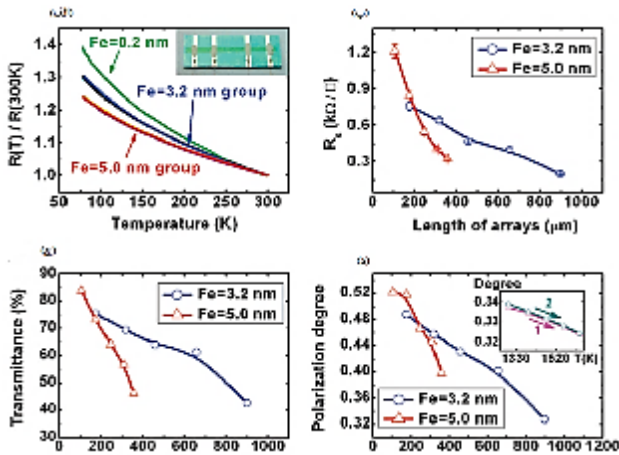
شکل ۱۱- تصویرهای سطحی از نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در دماهای رشد (الف) ۷۰۰ °C، (ب) ۷۵۰ °C و (ج) ۸۰۰ °C

پس زمان رشد برابر با ۳۰ min بهینه‌ترین حالت ممکن در بازه زمانی یادشده می‌باشد.

تأثیر دمای رشد بر روی کیفیت رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا

در این بخش تأثیر دمای رشد بر روی کیفیت رشد آرایه‌ای نانولوله‌های کربنی سنتز شده بر روی زیرلایه سیلیکونی لایه نشانی شده با نانوذره‌های آهن در شرایط عملیاتی بهینه به دست آمده در بخش پیشین (زمان رشد و آهنگ شارش منبع کربنی به ترتیب برابر با ۳۰ min و ۱۸ sccm) بررسی می‌شود تا مناسب‌ترین ورقه‌های نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا با قطر و طول مناسب (برای استفاده در موتورهای ترمواکوستیک) به دست آید.

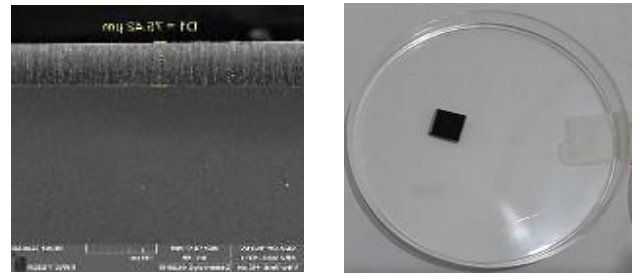
شکل ۱۱ تصویرهای سطحی از نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در دماهای رشد (الف) ۷۰۰ °C، (ب) ۷۵۰ °C و (ج) ۸۰۰ °C را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود نانولوله‌های کربنی سنتز شده در دمای ۷۵۰ °C دارای توزیع قطر کم‌تری (۳۰/۸۲-۲۴/۹۲ nm) نسبت به آرایه‌های دلخواه رشد داده شده در بخش‌های پیشین (در دمای ۸۰۰ °C) می‌باشد. نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده با توزیع قطر کم‌تر، تراکم و دانسیته بیش‌تری دارند؛ به همین دلیل فضای بین نانولوله‌ها کاهش یافته و در نتیجه



شکل ۱۳- تأثیر طول و قطر آرایه‌های نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا بر روی ویژگی‌های فیزیکی ((الف) مقاومت گرمایی، (ب) رسانای الکتریکی، (ج) میزان عبوردهی و (د) قطبش پذیری نور) ورقه‌های سنتز شده [۱۴، ۱۵]

طول و قطر آرایه‌های نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا را بر روی ویژگی‌های فیزیکی ((الف) مقاومت گرمایی، (ب) رسانای الکتریکی، (ج) میزان عبوردهی و (د) قطبش پذیری نور) ورقه‌های تولید شده نشان می‌دهد [۱۴، ۱۵]. ورقه‌های نانولوله تشکیل شده بر روی فیلم نازک‌تر آهن دارای مقاومت گرمایی بیشتری با کاهش دما هستند. با توجه به این که با نازک‌تر شدن فیلم آهن، قطر آرایه‌های نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا کاهش پیدا می‌کند، بنابراین از شکل ۱۴ (الف) چنین برداشت می‌شود که ورقه‌های نانولوله کربنی هم راستا با قطر (تعداد دیواره) کمتر دارای حساسیت بیشتری نسبت به دما هستند (افزایش مقاومت گرمایی با کاهش دما). همچنین همان‌گونه که در نمودار دیده می‌شود وابستگی دمایی مقاومت ورقه نسبت به طول آرایه‌های سنتز شده بر روی فیلم‌های آهن با ضخامت گوناگون تغییر چندانی نمی‌کند. از آنجایی که نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای سنتز شده در این پژوهش در بازه قطر کمتر (۳۰/۸۲-۲۴/۹۲ nm) دارای کیفیت رشد دلخواه از نظر تراکم و هم راستایی می‌باشند، بنابراین از نظر وابستگی دمایی مقاومت ورقه نیز در وضعیت بسیار مناسبی قرار دارند.

با افزایش طول آرایه‌های نانولوله‌های کربنی هم راستا، مقاومت ویژه الکتریکی، میزان عبوردهی و قطبش پذیری نور کاهش چشمگیری می‌یابد (شکل ۱۴ (ب)، (ج) و (د)). این مطلب به این مفهوم است که نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا با طول آرایه‌های بلندتر رسانای الکتریکی بهتری هستند، در صورتی که میزان عبوردهی و قطبش‌پذیری نور در آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. همچنین



شکل ۱۴- نمونه پایانی ساخته شده شامل نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا و متراکم برای استفاده به عنوان مبدل گرمایی در موتورهای ترموآکوستیک

دارای طول مناسب‌تری می‌باشند. به علاوه در این شکل به آسانی قابل دیدن است که آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده در دمای 750°C از لحاظ تراکم و هم راستایی دارای کیفیت مناسب‌تری نسبت به هم نوع خود در دمای 800°C هستند.

از آنجایی که هدف از این پژوهش ساخت مبدل ترموآکوستیک توسط لایه‌های نازک نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای می‌باشد و از سویی دیگر برای ساخت این مبدل نیاز به سنتز نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا و متراکم با قطر و طول بهینه است. بدین منظور نمونه سنتز شده در زمان و دمای رشد بهینه به ترتیب برابر با ۳۰ min و 750°C بر روی زیرلایه سیلیکونی لایه نشانی شده (با نانوذره‌های آهن) توسط روش کندوپاش مغناطیسی به طور کامل دلخواه می‌باشد. این نمونه ساخته شده سرانجام در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

تأثیر طول و قطر آرایه‌های نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا بر روی ویژگی‌های فیزیکی (مقاومت گرمایی، رسانای الکتریکی، میزان عبوردهی و قطبش‌پذیری نور) ورقه‌های ایجاد شده

در مطالعه‌های پیشین بررسی‌های لازم در مورد تأثیر قطر و طول آرایه‌های نانولوله کربنی به طور کامل هم راستا بر روی ویژگی‌های فیزیکی (مقاومت گرمایی، رسانای الکتریکی، میزان عبوردهی و قطبش‌پذیری نور) ورقه‌ها انجام شده است [۳، ۵، ۱۴]. بنابراین در این بخش به استناد این مطالعه‌ها، قطر و طول بهینه آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده با در نظر گرفتن عملکرد مناسب فیزیکی آن‌ها تعیین می‌شود.

با تغییر قطر (تعداد دیواره‌ها) و طول آرایه‌های نانولوله‌های کربنی به طور کامل هم راستا می‌توان ویژگی‌های نوری و الکتریکی ورقه‌های نانولوله کربنی یک راستای تولید شده را تنظیم کرد. این مسئله کمک شایانی به کاربردهای متفاوت آن‌ها مانند فیلم‌های رسانا با مقاومت و میزان عبور نور گوناگون می‌کند. شکل ۱۴ تأثیر

آرایه‌ها نیز بدون تغییر ماند. این در حالی است که ضخامت (طول) آرایه‌ها از مقدار $۱۵/۶۲$ تا $۱۶/۷۶$ میکرومتر افزایش یافت که این می‌تواند به علت مدت زمان لازم برای تشکیل بیش‌تر پیوندهای کربنی sp^2 باشد. زمان رشد برابر با ۳۰ min بهینه‌ترین حالت ممکن در بازه زمانی یادشده بود.

نانولوله‌های کربنی سنتز شده در دمای ۷۵۰°C دارای توزیع قطر کم‌تری ($۳۰/۸۲-۲۴/۹۲ \text{ nm}$) نسبت به آرایه‌های رشد داده شده در دمای ۸۰۰°C بود. این در حالی است که با کاهش دمای رشد تا ۷۰۰°C ، رشد خاصی بر روی زیرلایه سیلیکونی به دست نیامد. ضخامت (طول) آرایه‌های نانولوله‌های کربنی هم راستای سنتز شده در دماهای ۷۵۰°C و ۸۰۰°C به ترتیب دارای مقدارهای $۷۵/۴۲$ و $۶۰/۹۸$ میکرومتر بودند. آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده در دمای ۷۵۰°C از لحاظ تراکم و هم راستایی دارای کیفیت مناسب‌تری نسبت به سایر دماها هستند.

به طور کلی نمونه سنتز شده در زمان و دمای رشد بهینه برابر با ۳۰ min و ۷۵۰°C بر روی زیرلایه سیلیکونی لایه نشانی شده (با نانوذره‌های آهن) توسط روش کندوپاش مغناطیسی برای استفاده به عنوان مبدل ترمواکوستیک به طور کامل مناسب بودند. همچنین ویژگی‌های فیزیکی (مقاومت گرمایی، رسانای الکتریکی، میزان عبوردهی و قطبش پذیری نور) این ورقه‌ها نیز بهینه بود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳

از این نمودارها استنباط می‌شود که قطر آرایه‌ها تأثیر چندانی بر روی ویژگی‌های فیزیکی ورقه‌ها ندارد. نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا با طول آرایه‌های کوچک‌تر از ۲۰۰ میکرومتر از نظر میزان عبوردهی و قطبش پذیری نور در بهینه‌ترین حالت می‌باشند. بنابراین نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای با کیفیت ساختاری به طور کامل مطلوب سنتز شده در این پژوهش که دارای ضخامت (طول) آرایه برابر با $۷۵/۴۲$ میکرومتر می‌باشند نیز از این ویژگی بهینه برخوردار هستند.

نتیجه‌گیری

هر چه مبدل گرمایی موجود در موتور ترمواکوستیک هادی گرمایی بهتری باشد، میزان انتقال گرما بیش‌تر و در نتیجه شدت القای موج صوتی نیز افزایش چشمگیری خواهد یافت. نانولوله‌های کربنی دارای توانایی بالایی در انتقال گرما هستند و همچنین رشد دسته‌ای نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا و متراکم می‌تواند میزان رسانایی گرمایی را چندین برابر افزایش دهد [۲]. بنابراین در این پژوهش تلاش شد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا بر روی زیرلایه سیلیکونی (Si) با اندازه ۱×۱ سانتی‌متر (به روش نشست شیمیایی بخار در فشار اتمسفری) رشد داده تا به عنوان مبدل ترمواکوستیک استفاده شود. برای ایجاد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا به صورت دسته‌ای (ورقه‌ای) نیاز بود که شرایط عملیاتی بهینه از جمله زمان و دمای رشد به منظور تنظیم طول و قطر این مبدل ساخته شده (شامل نانولوله‌های آرایه‌ای به طور کامل هم راستا) تعیین شود.

با افزایش زمان رشد، تغییر چندانی در توزیع قطر آرایه‌های نانولوله‌های کربنی سنتز شده ایجاد نشد. همچنین میزان تراکم

مراجع

- [1] Rott N., *Thermoacoustics*, *Adv. Appl. Mech.*, **20**: 135-175 (1980).
- [2] Shaikh S., Li L., Lafdi K., Huie J., *Thermal Conductivity of an Aligned Carbon Nanotube Array*, *Carbon*, **45(13)**: 2608-2613 (2007).
- [3] Gerasimenko A.Y., Kitsyuk E.P., Kuksin A.V., Ryazanov R.M., Savitskiy A.I., Savelyev M.S., Pavlov A.A., *Influence of Laser Structuring and Barium Nitrate Treatment on Morphology and Electrophysical Characteristics of Vertically Aligned Carbon Nanotube Arrays*, *Diamond and Related Materials*, **96**: 104-111 (2019).
- [4] Jiang K., Li Q., Fan S., *Nanotechnology: Spinning Continuous Carbon Nanotube Yarns*, *Nature*, **419**: 801- 809 (2002).

- [5] Guaglianoni W.C., Florence C.L., Bonatto F., Venturini J., Arcaro S., Alves A.K., Bergmann C.P., [Novel Nanoarchitected Cobalt-Doped TiO₂ and Carbon Nanotube Arrays: Synthesis and Photocurrent Performance](#), *Ceramics International*, **45**: 2439-2445 (2019).
- [6] Zhang X.B., Jiang K.L., Teng C., Liu P., Zhang L., Kong J., Zhang T.H., Li Q.Q., Fan S.S., [Spinning and Processing Continuous Yarns from 4-Inch Wafer Scale Super-Aligned Carbon Nanotube Arrays](#), *Advanced Materials*, **18**: 1505-1510 (2006).
- [7] Yamagiwa K., Kuwano J., [One-Step Liquid-Phase Synthesis of Platinum Nanocatalysts Supported on Aligned Carbon Nanotube Arrays](#), *Materials Chemistry and Physics*, **204**: 323-327 (2018).
- [8] Zhang M., Atkinson K.R., Baughman R.H., [Multifunctional Carbon Nanotube Yarns by Downsizing an Ancient Technology](#), *Science*, **306**: 1358-1361 (2004).
- [9] Ajayan P.M., [Nanotubes from carbon](#), *Chemical Review*, **99**: 1787-1799 (1999).
- [10] Szabo A., Perri C., Csato A., Giordano G., Vuono D., Nagy J.B., [Synthesis Methods of Carbon Nanotubes and Related Materials](#), *Materials*, **3**: 3092-3140 (2010).
- [11] Sahithi R., Harshit B., Mansi K., Ganesh B., [A Review on Synthesis of CNTs and its Application in Conductive Paints](#), *International Advanced Research Journal in Science Engineering and Technology*, **2**: 50-55 (2015).
- [12] Stoffel A., Kovács A., Kronast W., Müller B., [LPCVD Against PECVD for Micromechanical Applications](#), *J. Micromech. Microeng.*, **6**: 20-33 (1996).
- [۱۳] اسعدی ث.، مردانی ر.، وحدانی م.ر.، [تأثیر آهنگ شارش منبع کربنی بر کیفیت رشد نانولوله‌های کربنی آرایه‌ای به طور کامل هم راستا به روش نشست شیمیایی بخار، دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین در علوم و مهندسی شیمی و نفت، شیراز، ایران، ۳۰ مردادماه \(۱۳۹۸\).](#)
- [14] Liu K., Sun Y., Chen L., Feng C., Feng X., Jiang K., Zhao Y., Fan S., [Controlled Growth of Super-Aligned Carbon Nanotube Arrays for Spinning Continuous Unidirectional Sheets with Tunable Physical Properties](#), *Nano Letters*, **8**: 700-705 (2007).
- [15] Tavasoli A., Irani M., Nakhaeipour A., Mortazavi Y., Khodadadi A.A., Dalai A.K., [Preparation of a Novel Super Active Fischer-Tropsch Cobalt Catalyst Supported on Carbon Nanotubes](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **28(1)**: 37-48 (2009).