



فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی))

دوره ۱، شماره ۴، اسفند ۱۴۰۱

عنوان مقالات

مقاله پژوهشی

بهبود خاصیت گسیل میدانی نانولوله کربنی چند دیواره به وسیله انباشت اکسید روی برای استفاده در نانوگسیل کننده های میدانی

پیمان فرازمند^۱

۱. دانشجوی کارشناس ارشد برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مدرس دانشگاه خاتم الانبیا (ص)، تهران، ایران .

چکیده

آرایه ای از نانوگسیل کننده های میدانی برای استفاده در ابزارهایی مانند لامپ های خلاء که در تجهیزات نظامی مانند رادارها و سلاح های مبتنی بر امواج الکترومغناطیس به کار می روند، مورد استفاده قرار می گیرد. ساخت این آرایه ها مبتنی بر نانولوله های کربنی به انجام رسیده است. در اینجا نانوکامپوزیت نانولوله کربنی با اکسیدروی به طور موفقیت آمیزی با یک روش متفاوت تهیه شد. ابتدا نانولوله های کربنی چند دیواره (MWCNT) به روش انباشت شیمیایی بخار با پلاسمای افزایشی (PECVD) آماده و سپس اکسید روی بر نانولوله ها پوشانده شد. برای این منظور، از روش انباشت فیزیکی بخار گرمایی (TPVD) استفاده شد و لایه نازکی از روی انباشته و سپس اکسید گردید. طیفسنجی رامان نمونه های آماده شده، حضور اکسید روی را بر روی بدنه نانولوله های کربنی تأیید می کند. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، نانوذرات اکسید روی دانه مانند روی دیواره های نانولوله های کربنی دیده شد. به وسیله اندازه گیری های خاصیت گسیل میدانی مشاهده شد که نانولوله کربنی پوشیده شده با اکسید روی گسیل بهتری را از نانولوله های بدون پوشش نشان می دهند. از این کامپوزیت می توان در لامپ های خلاء که بر پایه خاصیت گسیل میدان کار می کنند به جای کاتد سرد استفاده نمود. قبل از این، چنین لامپ هایی با نانولوله کربنی خالص ساخته شده اند.

اطلاعات مقاله

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

نانوگسیل کننده های میدانی، نانولوله کربنی، اکسید روی، گسیل میدانی.



نویسنده مسئول:

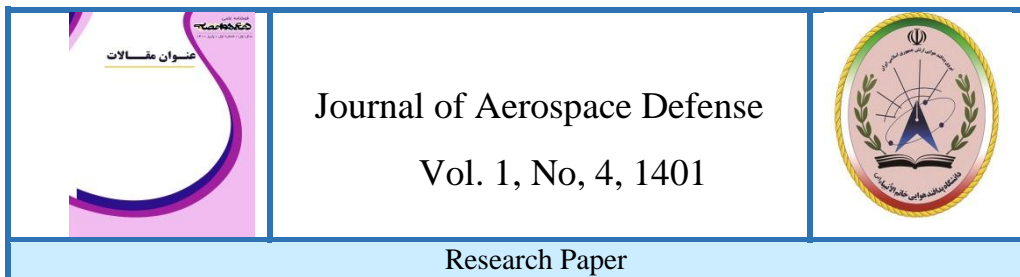
پیمان فرازمند

ایمیل:

peyman.farazmand@gmail.com

استناد به مقاله: پیمان فرازمند، بهبود خاصیت گسیل میدانی نانولوله کربنی چند دیواره به وسیله انباشت اکسید

روی برای استفاده در نانوگسیل کننده های میدانی، مجله علمی دفاع هوافضایی، دوره ۱، شماره ۴، اسفند ۱۴۰۱.



Improving the FEM properties of MWCNTs by deposition ZnO for use in field nanoemitters

Peyman Farazmand¹

1. Ph.D. student in physics, lecturer at Khatam Ol Anbia (PBU) University, Tehran, Iran.

Article Information

Accepted: 1401/12/23

Received: 1401/07/12

Keywords:

Nano-field emitters; Carbon nanotube; Zinc oxide; Field emission .



Corresponding author:

Peyman Farazmand

Email:

peyman.farazmand@gmail.com

Abstract

Array of nano-field emitters is used in devices such as vacuum tubes that are used in military equipment such as radars and electromagnetic weapons. These arrays have been realized based on carbon nanotubes (CNTs). In this article, carbon nanotube and zinc oxide (CNT–ZnO) nanocomposite were successfully synthesized with a different method. We have initially prepared multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) by the plasma enhanced chemical vapour deposition method. Alternatively, we used thermally physical vapour deposition for making thin Zn film to oxidize it later. Scanning electron microscopy and also Raman spectroscopy measurements of the prepared samples confirmed the presence of ZnO nano particles on the CNT bodies. By field emission (FE) measurements we found that ZnO deposited CNTs have a more efficient emissivity than that of CNTs alone. This composite can be used instead of cold cathode in vacuum tubes that work based on field emission properties. Before this, such tubes have been made with pure CNTs.

HOW TO CITE: Peyman Farazmand, Improving the FEM properties of MWCNTs by deposition ZnO for use in field nanoemitters, Journal of Aerospace Defense, Vol. 1, No. 4, 1401.

۱. مقدمه

گسیل میدانی یعنی کنده شدن الکترون‌ها از یک فیلامان در اثر میدان الکتریکی به قدر کافی بالا، یکی از روش‌هایی است که تحت عنوان کلی کاتد سرد برای منبع تولید الکترون‌ها در ابزارهای الکترونیکی مرتبط با خلاء مانند لامپ‌های توان بالا برای استفاده در تجهیزاتی مانند رادار، سلاح‌های الکترومغناطیسی و سایر تجهیزاتی از این دست مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد نانوساختار یک بعدی به واسطه خواص فیزیکی منحصر به فردشان و همچنین کاربردهای پتانسیلی در ساخت ابزارها در اندازه نانو با تکنولوژی بالا، همواره مورد توجه خاص قرار دارند [۱]. نانولوله‌ها و نانوسیم‌ها به‌عنوان منابع ایده‌آل گسیل میدانی الکترون گزینه‌های نویدبخشی هستند، به این دلیل که نسبت طول به قطر آن‌ها بالاست و شعاع انحنای نوک آن‌ها کوچک است [۲]. از زمان کشف نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ میلادی [۳]، در زمینه کاربرد آن‌ها به‌عنوان منابع گسیل میدانی الکترون در ابزارهای مختلف از نمایشگرهای صفحه تخت گرفته تا میکروسکوپ‌های الکترونی بررسی و تحقیق شده است [۴-۸].

همچنین ایده استفاده از نانولوله‌های کربنی یا کامپوزیت‌های مبتنی بر آن در تولید منابع تولید توان اولیه لامپ‌ها به این دلیل مورد توجه است که می‌توان با تولید یک گسیل‌کننده توان نانویی و سپس آرایه‌سازی آن‌ها، منابع تولید توان مورد نیاز برای انواع لامپ‌های مورد نیاز را تولید نمود. استفاده از آرایه‌ای از نانوسیم‌کننده‌های میدانی، مزایای زیادی نظیر فشردگی و کوچک بودن، زمان عبور کوتاه الکترون، چگالی جریان بالا و رسانایی بیشتر در مقایسه با همتایان گرمایی است [۹] و این امر باعث شده بسیاری از محققان روی ترکیب فناوری لامپ‌های موج رونده (TWT) و کلاسترها با مینای فناوری آرایه‌های نانوسیم‌کننده‌های میدانی در باند مایکروویو تحقیق و با موفقیت آن را به انجام برسانند.

لامپ‌های خلاء نانوکلاستر [۹]، موج رونده و ژیروتون [۱۰ و ۱۱]، نانوکلاسترهای نوین تترهترت [۱۲ و ۱۳]، نوسان‌ساز کلاستر بازتابی [۱۴] نتیجه همین تحقیقات است. روش‌های مختلفی نظیر تخلیه قوس، تبخیر لیزری، و انباشت شیمیایی بخار برای تولید نانولوله‌های کربنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که از بین این روش‌ها مؤثرترین روش برای تهیه فیلم‌های الگودار نازک از نانولوله‌های کربنی چند دیواره، روش انباشت شیمیایی بخار است. همچنین، بیشتر تحقیقات مشخصات گسیل میدانی الکترون نانولوله‌های کربنی، نظیر میدان روشن شدن، میدان آستانه، و فاکتور افزایش میدان را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۵-۱۷].

اکسید روی توجه گسترده‌ای را به خاطر عملکرد و کاربردش در سیستم‌های الکترونیکی، نوری و فوتونیک به خود جلب نموده است [۱۸]. از طرفی اکسید روی، به‌عنوان یک اکسید، به خاطر قدرت مکانیکی بالا، کیفیت نوری خوب، پایداری شیمیایی و ویژگی‌های پیزوالکتریکی فوق‌العاده خواص بسیار قابل توجهی نشان می‌دهد [۱۹].

در این مقاله نانوکامپوزیتی به شکل نانولوله‌های کربنی پوشیده شده با اکسید روی ساخته شده و خواص الکترونیکی آن بررسی گردیده است. تغییراتی در ساختار ظاهری نمونه‌ها و همچنین تغییراتی در خاصیت گسیل میدانی نمونه‌ها در مراحل مختلف این تحقیق مشاهده شد.

۲. بخش تجربی

نانولوله‌های کربنی جهت‌دار عمودی با روش PECVD آماده شده‌اند. بدین‌منظور، ابتدا یک لایه نیکل با ضخامت ۷ تا ۹ نانومتر به‌عنوان کاتالیست روی یک بستر سیلیکونی نوع P (۱۰۰) به‌وسیله انباشت پرتو الکترونی در یک محفظه با فشار 3×10^{-2} تور و دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد، انباشته شد. سپس بستر حاوی نیکل در محفظه انباشت شیمیایی بخار با پلاسمای افزایشی جریان مستقیم (DCPECVD) قرار داده و برای ۳۰ دقیقه در دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد بازپخت گردید. بازپخت در جریان گاز هیدروژن با شار ۱۰۰ سانتیمتر مکعب بر دقیقه استاندارد (sccm) انجام و فشار محفظه در مقدار ۷ تور کنترل شد. این بستر، به منظور تولید جزایر نانومتری که پایه رشد نانولوله هستند، تحت پلاسمای هیدروژن با توان ۰/۸۹ وات بر سانتیمتر مربع برای ۷ دقیقه قرار گرفت.

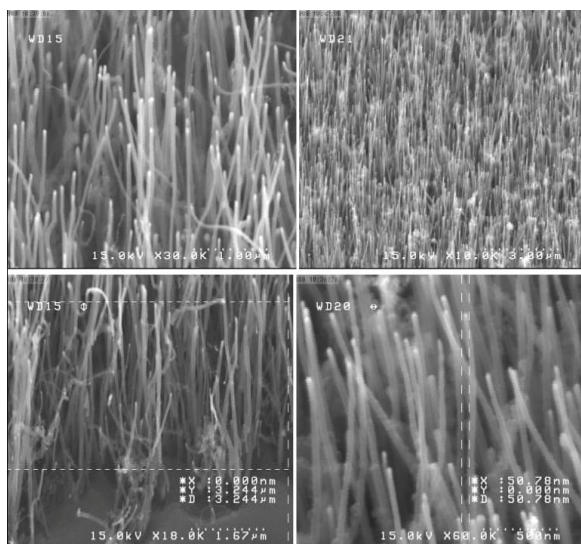
سپس گاز استیلن با شار ۴۵ sccm برای رشد نانولوله‌های کربنی وارد رآکتور شد. در مرحله بعد نمونه‌های نانولوله کربنی با اکسید روی پوشش داده شد. برای اینکار، ابتدا لایه‌های فلز روی بر نمونه‌های نانولوله کربنی به‌وسیله فرآیند انباشت بخار فیزیکی گرمایی انباشته و سپس این نانولوله‌های کربنی با پوشش در یک محفظه کوارتزی که در کوره افقی قرار داده شده، اکسید گردید. عمل اکسیداسیون در هوا و در دمای ۴۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. ساختار نانوکامپوزیت نانولوله کربنی با اکسید روی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) بررسی شدند، همچنین خواص نوری نمونه‌ها هم با طیف سنجی رaman تحقیق شد.

یکی از جالب‌ترین پدیده‌ها، که نتیجه مستقیمی از تونل‌زنی کوانتومی است، پدیده گسیل میدانی است. جریان گسیل میدانی از معادله فاؤلر-نوردیم بدست می‌آید. برای بررسی خواص نمونه‌ها، یک مدار طراحی شد. در این مدار، گسیل میدانی الکترون نانولوله‌ها و همچنین نانولوله کربنی با اکسید روی با یک چینش دیود مانند اندازه‌گیری شد. در این آرایش دیود مانند، نمونه‌های آماده شده روی بستر به‌عنوان کاتد و سیلیکون خام به‌عنوان آند قرار گرفتند.

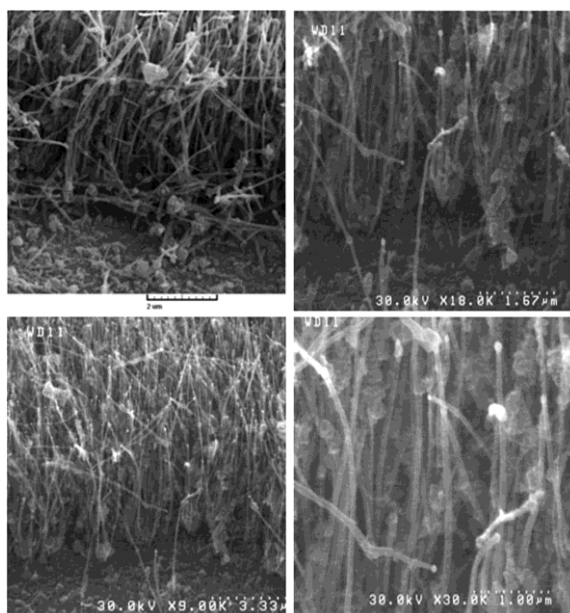
۳. نتایج و بحث

شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نانولوله‌های کربنی رشد یافته به صورت عمودی را نشان می‌دهد. در این شکل، نانولوله‌ها با طول تقریبی ۳ میکرومتر مشاهده می‌شود که به صورت عمودی روی بستر رشد یافته‌اند.

شکل ۲ با ساختار نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده با اکسید روی مرتبط است. اگرچه هیچ تغییر معناداری در ساختار نانولوله‌های کربنی این نمونه‌ها دیده نمی‌شود (به طور مثال، قطر لوله‌ها به طور تقریبی ثابت می‌ماند)، ولی به طور قابل توجهی، ذرات بسیار زیادی دانه مانند روی سطح نانولوله‌ها ظاهر شده است.



شکل ۱: تصاویر FESEM نانولوله‌های کربنی رشد یافته به صورت عمودی با طول تقریبی ۳ میکرومتر

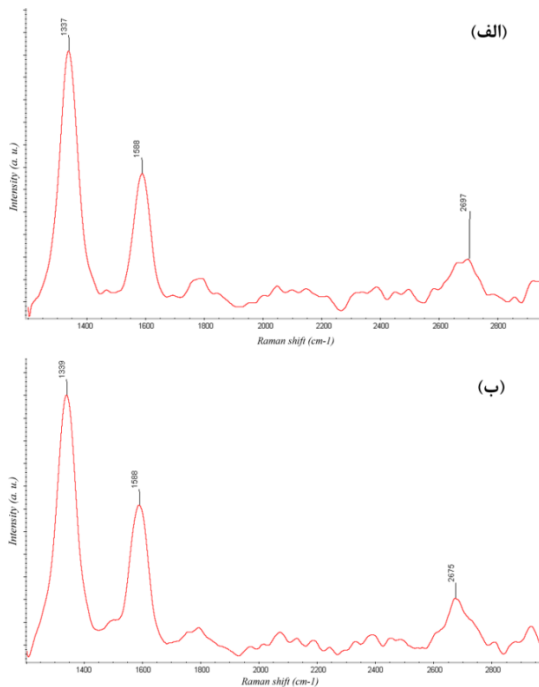


شکل ۲: تصاویر FESEM نانولوله‌های کربنی پوشیده شده با اکسیدروی

شکل ۳ و شکل ۴ نیز طیف رامان (با لیزر Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر) نمونه‌های نانولوله کربنی قبل و بعد از انباشت اکسید روی را نمایش می‌دهد. در شکل ۳ که برای عدد موج‌های بالای 1200 cm^{-1} است در قسمت (الف) این شکل، سه قله رامان واضح در 1337 cm^{-1} ، 1588 cm^{-1} و 2697 cm^{-1} وجود دارد. این سه قله از ویژگی‌های بارز نانولوله کربنی است و وجود نانولوله کربنی چند دیواره را تأیید می‌کند. قله موجود در 1337 cm^{-1} به‌عنوان نوار D، 1588 cm^{-1}

به عنوان نوار G و قله 2697 cm^{-1} به عنوان نوار G' قله‌های مرتبط با نانولوله کربنی شناخته شده هستند.

هر سه قله در شکل ۳ (ب) نیز برای نمونه پوشیده شده با اکسید روی ظاهر می‌شود و هیچ تغییر مشخصی نسبت به نمونه‌های بدون پوشش یافت نمی‌شود. به هر حال در محدوده عدد موج‌های زیر 1200 cm^{-1} [شکل ۴ (الف) و ۴ (ب)]، ۲ قله در 434 cm^{-1} و 586 cm^{-1} برای نمونه‌های با پوشش اکسید روی وجود دارد که در نمونه نانولوله کربنی خالص نیست. این قله‌ها با لایه اکسید روی مرتبط هستند. یک قله در این محدوده که به عنوان قله E1 (LO) شناخته می‌شود به خاطر ناخالصی‌ها و نقص‌های شبکه‌ای است اما طول موج بلندتر در 434 cm^{-1} به عنوان E2 (high) شناخته شده که این قله مرتبط با کیفیت خوب بلوری لایه‌های اکسید روی است.



شکل ۳: طیف رامان عدد موج‌های زیر 1200 cm^{-1} از (الف) نانولوله‌های کربنی (ب) نانولوله‌های کربنی پوشیده شده با اکسید روی

خاصیت گسیل میدانی نمونه‌ها شامل نانولوله‌های با پوشش اکسید روی و نانولوله‌های خالص اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های آماده شده روی بستر به عنوان کاتد و بستر سیلیکونی به عنوان آنود انتخاب شدند. به وسیله لایه‌ای عایق که روی لبه‌های کناری آنود قرار داده شد بین این دو الکترود فاصله میکرومتری ایجاد تا آرایش دیود مدار تأمین شود. مشخصه جریان-ولتاژ گسیل میدانی به وسیله معادله فاولر-نوردهیم (F-N) ساده‌سازی شده (معادله ۱) بررسی می‌شود:

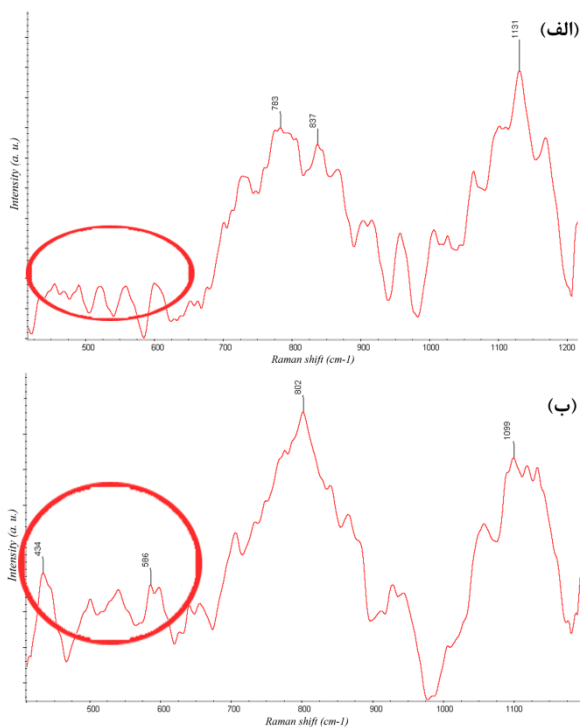
(۱)

$$J = \frac{A\beta^2 E^2}{\varphi^2} \exp\left(\frac{-B\varphi^3}{E\beta}\right)$$

که در این معادله، J چگالی جریان گسیل شده، E شدت میدان ماکروسکوپی، φ تابع کار گسیل کننده و A و B ثابت‌های معادله فاؤلر-نوردهیم با مقادیر زیر هستند:

$$A = 1.56 \times 10^{-10} \text{ AeV}^2$$

$$B = 6.83089 \text{ eV}^{-3/2} \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$$

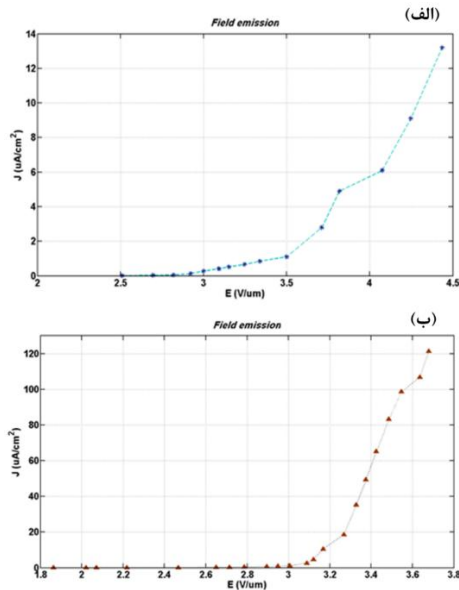


شکل ۴: طیف رامان برای عدد موجهای زیر 1200 cm^{-1} از (الف) نانولوله‌های کربنی (ب) نانولوله‌های کربنی پوشیده شده با اکسید روی.

از معادله (۱) واضح است که اگر تابع کار مشخص باشد آنگاه β فاکتور افزایش گسیل میدانی را، که پارامتر مرتبط کننده بین بزرگی میدان موضعی نزدیک به نوک گسیل کننده و مقدار میانگین بزرگی میدان ماکروسکوپی است، می‌توان از شیب نمودار فاؤلر-نوردهیم $[\ln(j/E^2)]$ بر حسب $1/E$ محاسبه نمود [۲].

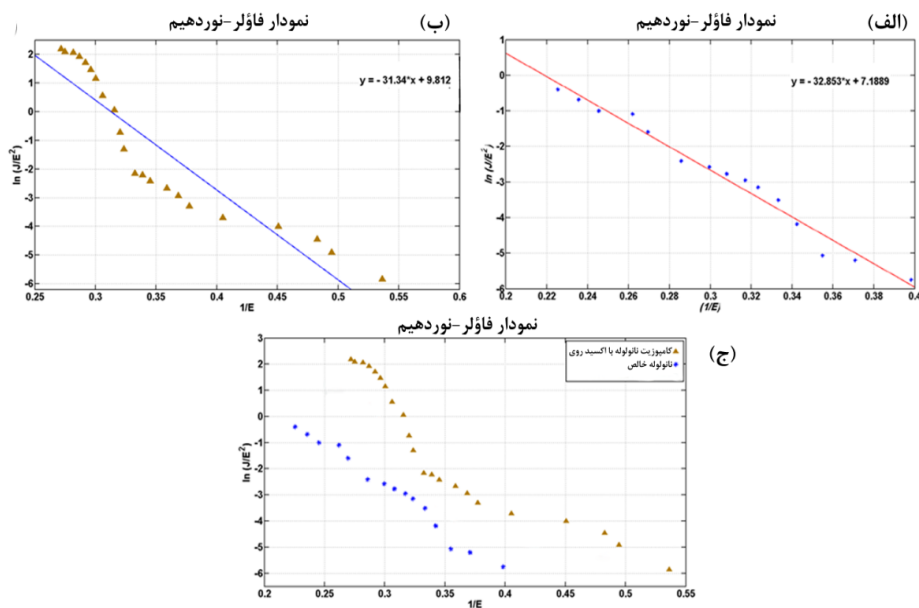
شکل ۵ نمودار چگالی جریان ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) را بر حسب شدت میدان الکتریکی بین دو الکتروود ($\text{V}/\mu\text{m}$) برای دو نمونه نشان می‌دهد. میدان روشن شدن برای یک گسیل کننده به عنوان میدان ماکروسکوپی خارجی مورد نیاز برای خروج چگالی جریان به میزان $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ تعریف می‌شود.

همانطور که دیده می شود میدان روشن شدن برای نانولوله های کربنی بدون پوشش $3/4 \text{ V}/\mu\text{m}$ و برای نانولوله های با پوشش اکسید روی $2/98 \text{ V}/\mu\text{m}$ است.



شکل ۵. نمودار چگالی جریان بر حسب شدت میدان الکتریکی ($\text{V}/\mu\text{m}$) بین دو الکتروود برای (الف) نانولوله های کربنی (ب) نانولوله های کربنی پوشش داده شده با اکسید روی.

شکل ۶ نیز نمودار فاولر-نوردهیم را برای دو نمونه مختلف مذکور نمایش می دهد. تابع کار برای نانولوله های کربنی ۵ الکترون ولت [۱۶]، و برای اکسید روی $5/3$ الکترون ولت [۲۰] فرض می شود، بنابراین مقدار تابع کار برای کامپوزیت نانولوله کربنی با اکسید روی به طور تقریبی $5/15$ الکترون ولت می باشد. از این رو مقدار فاکتور افزایش میدان β برای نانولوله های کربنی 2324 و برای نانولوله های کربنی با پوشش اکسید روی 2574 بدست می آید. با مقایسه بین خواص گسیل میدانی دو نمونه فهمیده می شود که کامپوزیت نانولوله های کربنی با اکسید روی نسبت به نمونه های نانولوله کربنی خالص توانایی گسیل میدانی بهتری دارند، زیرا این کامپوزیت میدان روشن شدن پایین تر و فاکتور افزایش میدان بالاتری نسبت به نانولوله های کربنی قبل از انباشت اکسید روی دارند و در نتیجه طبق مطالب پیش گفته کامپوزیت نانولوله کربنی پوشیده شده با اکسید روی در مجموع، گزینه به مراتب بهتری از نانولوله های کربنی بدون انباشت یا پوشش برای استفاده به عنوان نانوگسیل کننده های میدانی هستند.



شکل ۶: نمودار فاؤلر-نوردھیم برای (الف) نانولوله‌های کربنی (ب) کامپوزیت نانولوله‌ها با اکسید روی و (ج) نانولوله‌ها و کامپوزیت مذکور در یک نمودار برای مقایسه

تشکر و قدردانی

از تمامی دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص) که در این پژوهش به عنوان نمونه پژوهش حضورداشتند، تشکر و قدردانی می‌نماییم.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

۴. نتیجه گیری

آرایه‌ای از نانوسپیل‌کننده‌های میدانی برای استفاده به‌عنوان کاتد سرد در ابزارهای مبتنی بر خلاء مانند لامپ‌های موج رونده، لامپ کلايسترون، ژيروتون و همچنين نوسان‌سازهای بازتابی کلايسترون مورد توجه هستند. ساخت این آرایه‌ها مبتنی بر نانولوله‌های کربنی به انجام رسیده است. در این نوشتار خاصیت گسیل میدانی نانولوله‌های کربنی با نشان دادن اکسیدروی بر بدنه لوله‌ها بهبود یافت. میدان روشن شدن کاهش یافت و فاکتور افزایش میدان بالا رفت. از آنجایی‌که نانولوله‌های کربنی و اکسید روی تابع کار تقریباً یکسانی دارند، پس بهبود در خواص گسیل میدانی نمی‌تواند فقط ثمره حضور اکسید روی در این کامپوزیت باشد به این دلیل که ذره‌های اکسید روی دانه مانند که به صورت پراکنده روی بدنه نانولوله‌ها نشست‌اند، خودشان به‌عنوان منابع گسیل

میدان خوب، عمل می کنند. به عبارت دیگر نانوذرات اکسید روی دانه مانند در این کامپوزیت به عنوان مکان ها و منابع گسیل میدان اضافه بر نوک نانولوله ها عمل می کنند، زیرا آن ها اندازه کوچک و شکل کرووی دارند که باعث می شود نوک های تیز و کوچک زیادی روی بدنه نانولوله ها ایجاد شود و این منجر به ایجاد میداین الکتریکی موضعی اضافی در این نواحی نوک تیز گردد. بنابراین انتظار می رود که نانوذرات اکسید روی با پراکندگی مناسب که سایز کوچک و نوک کرووی دارند می توانند به عنوان گسیل کننده های مستقل روی سطح نانولوله های کربنی، علاوه بر نوک نانولوله های کربنی عمل کنند و بنابراین گسیل میدانی نانولوله های کربنی بعد از انباشت اکسید روی بهبود می یابد.

به همین علت می توان از این کامپوزیت به عنوان منابع گسیل میدان الکترون در ابزارهای مختلف الکترونیکی مورد استفاده در صنایع تجاری از جمله نمایشگرهای صفحه تخت، پروب های روبشی و ... یا در صنایع نظامی به عنوان آرایه نانوگسیل کننده های میدانی در لامپ های نانو کلاپسترون، ژیروتون و غیره برای استفاده در رادار، تفنگ الکترونی، سلاح های الکترومغناطیسی و سایر قطعاتی که بر پایه گسیل میدان الکترون عمل می کنند، استفاده نمود.

۵. منابع

- [1] Y. Xia, P. Yang, and et al. "One-dimensional nanostructures: Synthesis, characterization, and applications". *Adv. Matter.* (Weinheim, Ger.), 15, pp. 353-389, 2003.
- [2] C. S. Huang, C. Y. Yeh, and et al. "Field emission properties of CNT-ZnO composite materials". *Diamond & Relat. Mater.* 18 pp. 452-456, 2009.
- [3] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon". *Nature (London)*, 354, pp. 56-58, 1991.
- [4] W. A. de Heer, A. Châtelain, and et al. "A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source". *Science*, 270, pp. 1179-1180, 1995.
- [5] A. G. Rinzler, J. H. Hafner, and et al. "Unraveling Nanotubes: Field Emission from an Atomic Wire". *Science*, 269, pp. 1550-1553, 1995.
- [6] W. B. Choi, D. S. Chung, J. H. Kang, and et al. "Fully sealed, high-brightness Carbon-nanotube field-emission display". *Appl. Phys. Lett.*, 75, pp. 3129-3131, 1999.
- [7] N. de Jonge, Y. Lamy, and et al. "High brightness electron beam from a multi-walled carbon nanotube". *Nature (London)*, 420, pp. 393-395, 2002.
- [8] J. Jiao, L. F. Dong, and et al. "Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube Field Emitters". *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 706, pp. 113-117, 2002.
- [9] M. Balucani, S. Scafè, and et al. "Nano-Klystron: new Design and Technology for THz Source". 6th UK, Europe, China Millimeter Waves and THz Technology Workshop (UCMMT), Rome, Italy, 9 - 11 September 2013.
- [10] H. Lee, J. S. Kang, K. Park. "Fabrication of high current carbon nanotube emitters for gyrotron devices". 31st International Vacuum Nano electronics Conference (IVNC). Kyoto, Japan 9 - 13 July, 2018.
- [11] X. Yuan, W. Zhu, and et al. "A Fully-Sealed Carbon-Nanotube Cold-Cathode Terahertz Gyrotron". *Scientific reports*, 6, 32936, 2016.
- [12] H. M. Manohara, and et al. "Design and Fabrication of A THz NanoKlystron". In

- Proceedings of the Far-IR, Sub-mm & MM Detector Technology Workshop, Monterey, CA, USA, 1–3 April 2002.
- [13] H. M. Manohara, and et al. "Fabrication and emitter measurements for a nanoklystron: A novel THz micro-tube source". Third IEEE International Vacuum Electronics Conference (IEEE Cat. No.02EX524), pp. 28-29, 2002.
- [14] J.Li, Y. Zhang, and et al. "A Carbon-Nanotube Cold-Cathode Reflex Klystron Oscillator: Fabrication @ X-Band and Returning Electron Beam Realization". Electronics, 11. 1231, 2022.
- [15] W. Zhu, C. Bower, and et al. "Large current density from carbon nanotube field emitters". Appl. Phys. Lett.,75, pp. 873-875, 1999.
- [16] J. M. Bonard, J. P. Salvetat, and et al. "Field emission from carbon nanotubes: perspectives for applications and clues to the emission mechanism". Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.,69, pp. 245-254, 1999.
- [17] M. Sveningsson, R.E. Morjan, and et al. "Raman spectroscopy and field emission properties of CVD-grown carbon nanotube films". Appl. Phys. A, 73, pp. 409-418, 2001.
- [18] Z. L. Wang, "Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications". J. phys.: Condense. Matter,16, R829. 2001.
- [19] S. J. Pearton, D. P. Norton, and et al. "Recent progress in processing and properties of ZnO". Super lattice Microstructure., 34, pp. 3-32, 2003.
- [20] C. J. Lee, T. J. Lee, and et al. "Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature". Appl. Phys. Lett., 81, pp. 3648-3650, 2002.