

ORIGINAL ARTICLE

Fabrication of a Highly Conductive Copper Wire Reinforced with Single-Walled Carbon Nanotubes and Resin

Hossein Ghaforyan^{1,2}, Habib Khalilpour^{1,2}, Majid Ebrahimzadeh^{1,2}, Mehmet Ertugrul³, Emin Argun Oral⁴, Fatma Nur Tuzluca Yesilbag⁵, Yasar Ozkan Yesilbag⁵, Sedanur Keles⁶

1 Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2 Center for International Scientific Studies and Collaborations (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Islamic Republic of Iran.

3 Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Trabzon, Turkey.

4. Ataturk University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering Department, Erzurum, Türkiye.

5 Department of Physics, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan 24100, Turkey.

6 Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Trabzon, Turkey.

Correspondence

Hossein Ghaforyan

Email: hghaforyan@pnu.ac.ir

How to cite

Ghaforyan, H. Khalilpour, H. Ebrahimzadeh, M. Ertugrul, M. Oral, E.A. Tuzluca Yesilbag, F.N. Ozkan Yesilbag, Y. (2025). Fabrication of a Highly Conductive Copper Wire Reinforced with Single-Walled Carbon Nanotubes and Resin, Optoelectronic, 7(4), 19-26.

ABSTRACT

In this study, the electrical and thermal performance of composite wires made of copper coated with single-walled carbon nanotubes and a thermally conductive resin investigated. Raman spectroscopy confirmed the successful synthesis of single-walled carbon nanotubes with an ordered crystalline structure, and scanning electron microscopy revealed a uniform distribution of the nanotubes and resin layer on the copper wire surface. The results from the resistivity and temperature versus current density and current intensity plots demonstrated that the composite wire outperformed the reference copper wire. Specifically, it exhibited lower resistivity at high current levels and maintained structural stability at higher temperatures. This enhanced performance can be attributed to the high electrical and thermal conductivity of the nanotubes, as well as the resin's stabilizing and heat-dissipating properties. Overall, the integration of carbon nanotubes and conductive resin into copper wire structures significantly improves thermal stability and current-carrying capacity, making this composite highly suitable for high-power applications, transmission lines, and sensitive electronic systems.

KEY WORDS

Copper Wire, Composite, Single-Walled Carbon Nanotubes, Resistivity.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

ساخت سیم مس تقویت شده با نانولوله های کربنی تک جداره و رزین با رسانایی بالا

حسین غفوریان^{۱*}، حبیب خلیل پور^۲، مجید ابراهیم زاده^۳، محمت ارتوگرول^۴، امین آرگون اورال^۵، فاطما نور توزلوجا یاشیل باغ^۶، یاشار اوزکان یاشیل باغ^۶، سدانور کلش^۶

چکیده

در این پژوهش، عملکرد الکتریکی و حرارتی سیم های کامپوزیتی ساخته شده از مس با پوشش نانولوله های کربنی تک دیواره و رزین رسانای حرارتی بررسی شد. طیف سنجی رامان حضور موفق نانولوله های کربنی تک دیواره با ساختار بلوری منظم را تأیید کرد و تصویر میکروسکوپ الکترونی، توزیع یکنواخت نانولوله ها و لایه رزین را بر سطح سیم مسی نشان داد. نتایج حاصل از نمودارهای مقاومت ویژه و دما در برابر چگالی جریان و شدت جریان نشان داد که سیم کامپوزیتی نسبت به سیم مسی مرجع عملکرد بهتری دارد؛ به گونه ای که در جریان های بالا، مقاومت ویژه کمتری از خود نشان می دهد و تا دماهای بالاتری بدون تخریب ساختاری پایدار می ماند. این بهبود عملکرد را می توان به هدایت الکتریکی و حرارتی بالای نانولوله ها و نقش تثبیت کننده و خنک کننده رزین نسبت داد. در مجموع، استفاده از نانولوله های کربنی و رزین رسانا در ساختار سیم های مسی منجر به بهبود چشمگیر پایداری حرارتی و تحمل جریان شده و این ترکیب را برای کاربردهای توان بالا، خطوط انتقال و سیستم های الکترونیکی حساس بسیار مناسب می سازد.

واژه های کلیدی

سیم مس، کامپوزیت، نانولوله های کربنی تک دیواره، مقاومت ویژه.

۱ گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۲ مرکز مطالعات و همکاری های علمی بین المللی (CISSC)، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، جمهوری اسلامی ایران.
۳ دانشگاه فنی کارادینیز، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد، ترابزون، ترکیه.
۴ دانشکده مهندسی، مهندسی برق و الکترونیک، گروه الکترونیک، دانشگاه آتاتورک، ارzurum، ترکیه.
۵ گروه فیزیک، دانشگاه ارزینجان بینالی بیلدیریم، ارزینجان ۲۴۱۰۰، ترکیه.
۶ دانشگاه فنی کارادینیز، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد، ترابزون، ترکیه.

نویسنده مسئول:

حسین غفوریان

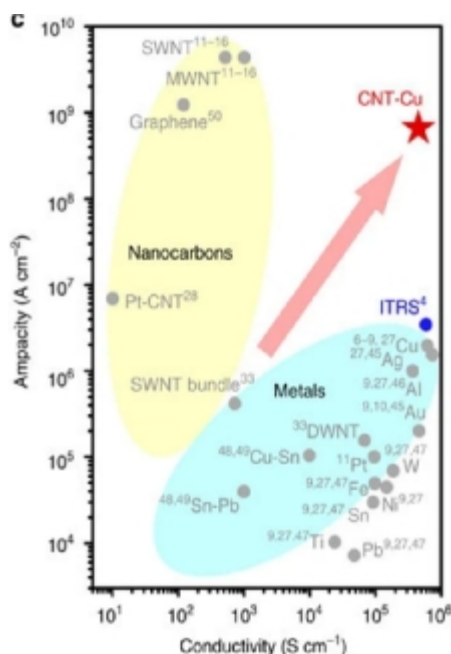
رایانامه: hghaforyan@pnu.ac.ir

استناد به این مقاله:

حسین غفوریان، حبیب خلیل پور، مجید ابراهیم زاده، محمت ارتوگرول، امین آرگون اورال، فاطما نور توزلوجا یاشیل باغ، یاشار اوزکان یاشیل باغ، سدانور کلش (۱۴۰۴). ساخت سیم مس تقویت شده با نانولوله های کربنی تک جداره و رزین با رسانایی بالا. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۱۹-۲۶.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

کربنی می‌توانند ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر ظرفیت حمل جریان بالاتری داشته باشند (شکل ۱)، که آن‌ها را به مواد امیدبخشی برای تولید سیم‌های فوق‌رسانا تبدیل کرده است [۱۵-۱۸].



شکل ۱. نمودار ظرفیت حمل جریان (آمپاسیته) و هدایت الکتریکی را برای مواد مختلف از جمله فلزات، کربن‌ها و کامپوزیت‌ها [۱۹].

نانولوله‌های کربنی فلزی نسبت به مس خالص، هدایت الکتریکی و ظرفیت حمل جریان بالاتری دارند و به واسطه این ویژگی‌ها، مزایای قابل توجهی در انتقال انرژی الکتریکی ارائه می‌دهند. بنابراین، کامپوزیت‌های نانوساختار کربنی- فلزی دارای پتانسیل بالایی در ظرفیت حمل جریان و هدایت الکتریکی هستند [۲۰]. بنابراین سیم‌های کامپوزیتی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی می‌توانند به‌عنوان هادی‌های جایگزین برای سیم‌های مسی و آلومینیومی در نظر گرفته شوند. ظرفیت حمل جریان سیم کامپوزیتی مس- نانولوله‌های کربنی فوق‌رسانا تقریباً ۱۰۰ برابر بیشتر از سیم مسی خالص است. همچنین هدایت الکتریکی سیم فوق‌رسانای نانولوله کربنی در دمای اتاق نسبت به فلزات خالص کمی پایین‌تر است. یکی از دلایل اصلی این امر، عدم توانایی نانولوله‌های کربنی فوق‌رسانا در برقراری تماس الکتریکی با یکدیگر است [۲۱]. با این حال، در دماهای بالا هدایت الکتریکی سیم مس- نانولوله‌های کربنی فوق‌رسانا به‌طور قابل توجهی از سیم مس خالص بهتر می‌شود. علاوه بر این، با افزایش دما هدایت الکتریکی سیم مس خالص به سرعت کاهش می‌یابد، در حالی که در سیم‌های فوق‌رسانا این کاهش هدایت به‌طور کندتری رخ می‌دهد. بنابراین در این مقاله

مقدمه

انتقال انرژی الکتریکی به‌صورت قابل اعتماد و کارآمد یکی از ارکان اساسی توسعه زیرساخت‌های مدرن در بخش‌های مختلف صنعت، حمل‌ونقل، ارتباطات و بسیاری از جنبه‌های روزمره زندگی انسانی محسوب می‌شود. با افزایش تقاضای جهانی برای تولید انرژی الکتریکی و توسعه فناوری‌های نوین، فشار بر سیستم‌های انتقال موجود افزایش یافته است. این امر نیازمند بهره‌گیری از مواد بهتر و پیشرفته‌تر برای هدایت الکتریکی بالاتر، مقاومت مکانیکی بیشتر و اتلاف انرژی کمتر است [۱۰]. سیم‌های مسی (Cu) و آلومینیومی (Al)، به‌عنوان مواد غالب در خطوط انتقال انرژی الکتریکی، به دلیل هدایت الکتریکی بالا و دسترسی نسبتاً گسترده، در سراسر جهان استفاده می‌شوند. با این حال، این مواد دارای محدودیت‌هایی از نظر ظرفیت حمل جریان (آمپاسیته)، وزن، هدایت الکتریکی و مقاومت در برابر عوامل محیطی هستند. به‌ویژه در خطوط انتقال بلند، مشکلاتی مانند گرمایش بیش از حد هادی‌ها، افت ولتاژ، اتلاف انرژی ناشی از مقاومت الکتریکی و مکانیکی به چالش‌های عمده‌ای تبدیل شده‌اند که ضرورت توسعه مواد هادی نسل جدید را برجسته می‌کند [۳-۶].

در این میان، مفهوم فوق‌رساناها به‌عنوان دسته‌ای از مواد کامپوزیتی نوظهور، به دلیل توانایی بالقوه‌شان در کاهش چشمگیر تلفات انرژی و بهبود عملکرد خطوط انتقال، مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از این مواد می‌تواند علاوه بر بهبود ویژگی‌های الکتریکی، موجب بهینه‌سازی در مصرف فلزاتی چون مس و آلومینیوم در زیرساخت‌های انتقال توان گردد و در نتیجه، به کاهش هزینه‌های کلی و افزایش بهره‌وری منجر شود [۷-۱۰]. افزون بر این، محدودیت‌های عملکردی مس در دماهای بالا و تحت جریان‌های شدید، نظیر ناپایداری حرارتی و افت خواص الکتریکی، انگیزه‌ای برای توسعه مواد جدید با ظرفیت بالاتر در حمل جریان فراهم کرده است. در این راستا، ساختارهای نانولوله کربنی به دلیل ویژگی‌های برجسته الکتریکی، حرارتی و مکانیکی خود، به‌عنوان جایگزین‌های امیدبخش برای بهبود عملکرد هادی‌های فلزی شناخته شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که این ساختارها قادرند ظرفیت حمل جریانی تا چند برابر بیشتر از فلزات معمول ارائه دهند که آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای طراحی سیم‌های فوق‌رسانا یا فوق‌رسانا‌تر تبدیل می‌کند [۱۱-۱۴].

ساختارهای نانولوله کربنی به‌خاطر ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی خارق‌العاده خود، پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد رساناهای فلزی دارند. در مقایسه با فلزات، ساختارهای نانولوله

ویژگی های الکتریکی، حرارتی و ساختاری سیم مسی کامپوزیتی با نانولوله های کربنی تک دیواره و رزین رسانای حرارتی بررسی می شود.

روش آزمایش

سیم های مسی استفاده شده، سیم های استاندارد در تأسیسات داخلی ساختمان ها هستند (با قطر ۱ میلی متر). به منظور از بین بردن آلودگی ها و لایه های اکسیدی سطح سیم ها و آماده سازی سطح مناسب برای رسوب گذاری نانولوله کربنی، فرآیندهای ساییدن و تمیزکاری انجام شدند. در صورتی که آلودگی ها از سطح نمونه ها حذف نشوند، این آلودگی ها می توانند تأثیر منفی بر انباشت نانولوله کربنی روی سطح بگذارند. بنابراین سیم هایی از جنس مس برای ۱۰ دقیقه تحت فرآیند تمیزکاری فراصوتی در آب مقطر با اضافه کردن مواد شوینده قرار گرفتند. سپس به طور متوالی، سیم ها برای ۱۰ دقیقه در ایزوپروپیل الکل و اتانول تحت فرآیند تمیزکاری فراصوتی قرار گرفتند. اسیدشویی یک فرآیند رایج برای اصلاح سطح و فعال سازی سطح مواد است. این روش با استفاده از محلول های اسیدی قوی انجام می شود تا ویژگی های مطلوب روی سطح مواد فلزی حاصل شود. فرآیند اسیدشویی با از بین بردن لایه اکسیدی سطح، افزایش زبری و اصلاح انرژی سطح، یک مورفولوژی سطحی مناسب برای فرآیندهای پوشش دهی فراهم می آورد.

بنابراین برای تمیزکاری سطح سیم های مسی با استفاده از فرآیند اسیدشویی با اسید نیتریک (HNO_3)، ابتدا سیم های مسی در محلول رقیق شده اسید نیتریک به نسبت ۱:۱ غوطه ور شدند. این فرآیند رقیق سازی به منظور کنترل سرعت سایش و کاهش انتشار گاز سمی NO_2 انجام گردید. پس از اسیدشویی، سیم های مسی برای از بین بردن باقی مانده های اسید نیتریک سه بار با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس به منظور اطمینان از باقی نماندن هیچ گونه آلودگی بر سطح، سیم ها با استون و ایزوپروپانول شسته شده و سپس با گاز N_2 خشک شدند.

عامل دار کردن نانولوله های کربنی تک دیواره و پوشش دهی آنها روی سطح مس با استفاده از روش رسوب گذاری الکتریکی جهت تولید سیم های فوق رسانا اهمیت بسیاری دارد. همچنین توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی تک دیواره در محلول، چسبندگی بهتر آنها به سطح فلز و افزایش پایداری آنها در فرآیند رسوب گذاری الکتریکی را تضمین می کند.

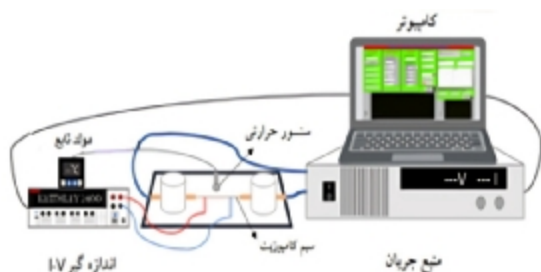
برای تهیه نانولوله های کربنی تک دیواره عامل دار شده، محلول هایی از H_2SO_4 (۹۸٪) و HNO_3 (۷۰٪) به نسبت ۱:۳ مخلوط گردید. به این محلول مقدار معینی نانولوله کربنی تک دیواره افزوده شد و با استفاده از همزن مغناطیسی، در دمای

اتاق و به مدت ۱۸ ساعت مخلوط شد. سپس محلول چندین بار با آب مقطر شسته شد و فرآیند تا رسیدن pH به ۷ تکرار شد. سپس نمونه ها، خشک شده و فرآوری گردیدند. در نتیجه این فرآیند، گروه های کربوکسیل (COOH) و هیدروکسیل (OH) روی سطح نانولوله های کربنی ایجاد می شوند و نانولوله ها فعال شدند. این عامل دار کردن باعث بهبود ویژگی های پخش شدگی نانولوله ها شده و امکان استفاده موثرتر آنها را به عنوان یک جزء فعال در کامپوزیت های مبتنی بر فلز یا پلیمر فراهم می آورد. این موضوع نه تنها موجب افزایش یکنواختی لایه پوششی می شود، بلکه با افزایش تماس الکتریکی و حرارتی بین نانولوله ها و بستر فلزی، انتقال مؤثرتر جریان و گرما را نیز ممکن می سازد.

انباشت نانولوله های کربنی تک دیواره عامل دار شده روی سیم مسی با استفاده از یک روش رسوب دهی الکتروفوریتیک هیبریدی تقویت شده با جریان الکتریکی متناوب فرکانس بالا انجام شد. سوسپانسیون پایدار از نانولوله های کربنی عامل دار شده در ایزوپروپیل الکل از طریق هم زدن فراصوت آماده شد. سیم مسی به طور مرکزی در داخل یک الکترود استوانه ای رسانا با استفاده از یک محرک خطی با کنترل دقیق نصب شد تا پوشش یکنواخت تضمین شود (شکل ۲).

بنابراین ولتاژ جریان مستقیم ۱۵ ولت در سراسر سلول الکتروشیمیایی اعمال شد، به طوری که محفظه استوانه ای به عنوان الکترود منفی (کاتد) و سیم مس به عنوان الکترود مثبت (آنود) به مدت ۱۰ دقیقه عمل کرد تا مهاجرت الکتروفوریتیک و رسوب دهی نانولوله های کربنی روی سیم تسهیل شود.

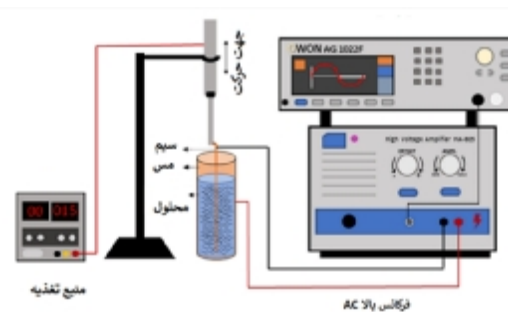
به طور همزمان، یک میدان الکتریکی AC با فرکانس بالا، با محدوده فرکانس ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوهرتز و دامنه ۵۰ ولت (قله به قله)، در سراسر الکترودها اعمال شد تا هم تراز و توزیع یکنواخت نانولوله های رسوب داده شده در امتداد محور سیم را تقویت کند. این رویکرد هیبریدی منجر به پوشش نانولوله های کربنی تک دیواره با چسبندگی قوی و توزیع یکنواخت روی بستر سیم مسی شد. سیم مسی پوشش داده شده با نانولوله های کربنی تک دیواره روی یک نگهدارنده عمودی نصب و به موتور چرخان با سرعت ۵ دور در دقیقه متصل شد. رزین رسانای حرارتی^۱ با غوطه ور کردن سیم در رزین به مدت ۱۰ تا ۲۰ ثانیه انباشت شد. پس از غوطه وری، سیم به آرامی با سرعت کنترل شده ۰/۵ تا ۱ میلی متر بر ثانیه خارج شد و به رزین اجازه داده شد تا کشیده شده و یک لایه یکنواخت



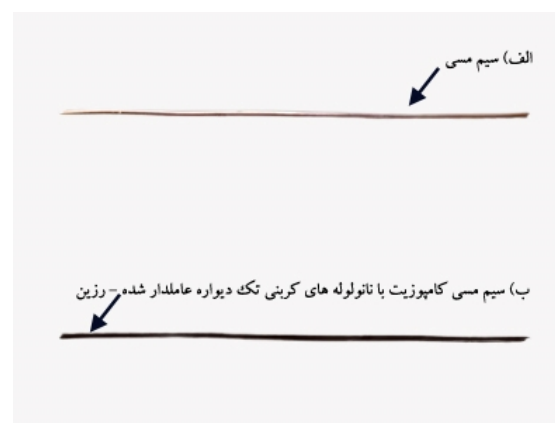
شکل ۴. شماتیک سامانه اندازه‌گیری جریان-ولتاژ

در شکل ۵ طیف رامان مربوط به نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره سنتز شده روی بستر مس است و اطلاعات ارزشمندی درباره ساختار، نظم بلوری و کیفیت این نانوساختارها ارائه می‌دهد. این طیف شامل چهار قله اصلی در نواحی مختلف از طیف جابه‌جایی رامان است که هر یک نمایانگر ویژگی‌های خاصی از ساختار نانولوله‌ها هستند. در ناحیه پایین‌تر از 1 cm^{-1} ، 300 cm^{-1} ، قله‌ای با برجستگی C مشاهده می‌شود که مربوط به مد ارتعاشی شعاعی یا همان مد تنفسی (RBM) است. این قله خاص نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره بوده و حضور آن تأییدی بر تشکیل نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره در نمونه است. در حدود 1350 cm^{-1} ، قله D مشاهده می‌شود که بیانگر وجود بی‌نظمی‌ها و نقص‌های ساختاری در ساختار کربنی است. قله G که در حدود 1580 cm^{-1} ظاهر می‌شود، معرف مد کششی ارتعاشی (E_{2g}) اتم‌های کربن در ساختارهای شش‌ضلعی گرافیتی است و نشانه‌ای از نظم بلوری و کیفیت بالای ساختار کربنی است. این قله نشان‌دهنده ویژگی‌های گرافنی نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره است و از حضور ساختارهای منظم و پیوسته خبر می‌دهد. در ناحیه حدود 2700 cm^{-1} ، قله G' یا $2D$ قرار دارد که مد درجه دوم است و از پراکندگی دو فونونی ناشی می‌شود. این قله معمولاً در ساختارهای گرافنی با نظم بالا و تعداد لایه‌های کم ظاهر می‌شود. در مورد نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره، حضور قله G' قوی و متقارن نشان‌دهنده ساختاری بسیار منظم و با بلورینگی بالا است. همچنین در شکل ۶، تصویر انباشت نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره بر بستر مس و انباشت رزین بر ساختار نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره - مس نشان داده شده است.

تشکیل دهد. سپس سیم پوشش‌داده شده چرخید تا توزیع یکنواخت لایه رزین تضمین شود. هر مرحله پوشش‌دهی منجر به ضخامت لایه‌ای مناسبی شد. البته با فرض ویسکوزیته استاندارد رزین بدون هیچ رقیق‌سازی، نمونه پوشش‌داده شده در دمای 80°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت آنیل گردید تا فرآیند پخت کامل شده و پایداری مکانیکی و حرارتی لایه رزین افزایش یابد (شکل ۳).



شکل ۵. سامانه سیستم پوشش‌دهی نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره با استفاده از جریان متناوب با فرکانس بالا

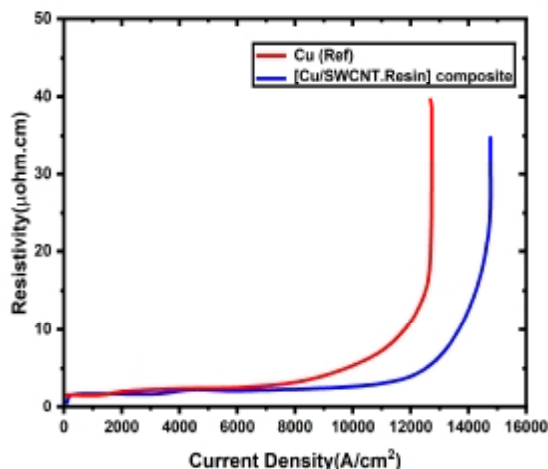


شکل ۶. (الف) سیم مسی بدون پوشش (ب) سیم مسی کامپوزیت شده با نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره عاملدار شده و رزین

نتایج

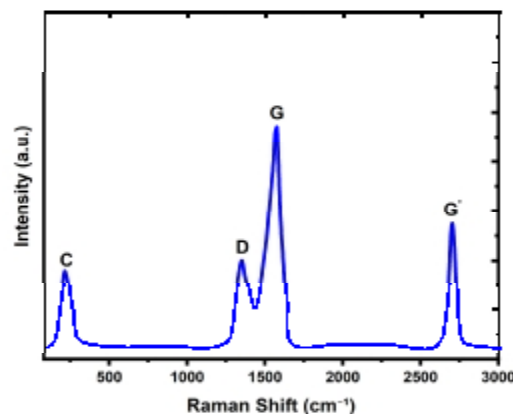
اندازه‌گیری‌های جریان-ولتاژ (I-V) سیم‌های کامپوزیتی تولید شده با استفاده از روش پراب چهار نقطه‌ای که در شکل ۴ نشان داده شده است، انجام گردید. در این سیستم، از منبع تغذیه جریان مستقیم استفاده شده که ویژگی‌های آن شامل $7/5$ ولت، 300 آمپر و $1/5$ کیلووات است. اندازه‌گیری‌های I-V با دستگاه اندازه‌گیری KEITHLEY 2400 انجام شد. همچنین از نرم‌افزار لب و یو^۱ برای کنترل و ثبت داده‌ها استفاده گردید.

می‌ماند. با این حال، با افزایش چگالی جریان، نمودار سیم مسی خالص افزایش شدید و غیرخطی در مقاومت ویژه را از خود نشان می‌دهد، در حالی که نمونه کامپوزیتی دارای افزایش ملایم‌تری است و تا چگالی‌های جریان بالاتر، پایداری بهتری از خود نشان می‌دهد.

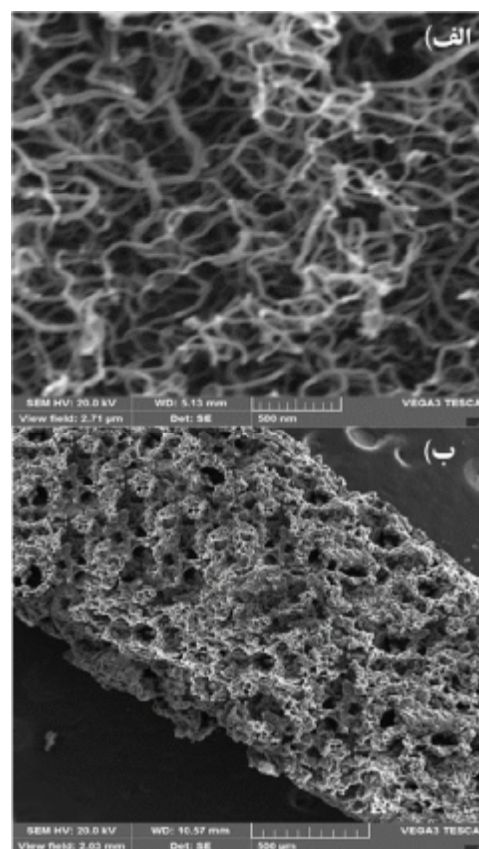


شکل ۷. نمودار تغییرات مقاومت ویژه برحسب چگالی جریان برای سیم مسی و سیم مسی با پوشش نانولوله‌های کربنی تک دیواره و رزین

این رفتار را می‌توان به مزایای ساختاری نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و رزین نسبت داد. نانولوله‌های کربنی با رسانایی الکتریکی بالا، ساختار تقویت‌شده و قابلیت انتقال حرارت عالی، موجب توزیع یکنواخت‌تر جریان و کاهش نقاط داغ در ساختار سیم شده‌اند. همچنین رزین رسانای حرارتی استفاده‌شده به عنوان ماتریس تثبیت‌کننده، به انتقال مؤثر حرارت از سطح سیم به محیط کمک کرده و از داغ شدن بیش از حد جلوگیری می‌کند. در نتیجه، افت مقاومت ویژه در چگالی‌های جریان بالا نسبت به سیم مسی خالص به مراتب کمتر است. از لحاظ کاربردی، این ویژگی بسیار مهم است، چرا که نشان می‌دهد سیم کامپوزیتی ساخته شده قابلیت تحمل چگالی‌های جریان بالاتر را بدون افزایش شدید مقاومت ویژه دارد؛ به این معنا که افت توان و تولید گرما در شرایط بارگذاری سنگین کاهش یافته است. این خصوصیت آن را برای کاربردهای الکترونیکی با توان بالا، خطوط انتقال میکروالکترونیکی، یا تجهیزات حرارتی الکتریکی بسیار مناسب می‌سازد. در شکل ۸ تغییرات دمایی سیم‌ها در برابر جریان الکتریکی نشان داده شده است. در جریان‌های پایین‌تر از حدود ۸۰ آمپر، هر دو سیم رفتاری تقریباً مشابه و دمایی تقریباً یکنواخت از خود نشان می‌دهند که در محدوده دمایی کمتر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط بار کم، مقاومت اهمی دو سیم تفاوت زیادی با یکدیگر ندارد و گرمای ناشی از عبور



شکل ۵. طیف رامان نانولوله‌های کربنی تک دیواره روی سیم مسی



شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الف) نانولوله‌های کربنی تک دیواره بر بستر سیم مس (ب) رزین انباشت شده بر نانولوله‌های کربنی تک دیواره-مس

نمودار ارائه‌شده در شکل ۷، تغییرات مقاومت ویژه^۱ بر حسب چگالی جریان^۲ را برای دو نمونه مختلف از سیم‌ها نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که در چگالی‌های جریان پایین کمتر از حدود ۸۰۰۰ A/cm²، هر دو نمونه رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند و مقاومت ویژه آن‌ها در حد کمینه باقی

1 Resistivity
2 Current Density

اندازه‌گیری‌های الکتریکی، طیف‌سنجی رامان، تصویربرداری میکروسکوپی و تحلیل‌های حرارتی-جریانی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره به همراه رزین رسانای حرارتی در ساختار سیم‌های مسی، منجر به بهبود قابل توجه ویژگی‌های الکتریکی و حرارتی آن‌ها شده است. طیف رامان تأیید می‌کند که نانولوله‌های سنتز شده از نوع تک‌دیواره با ساختار بلوری منظم هستند و نقش مؤثری در انتقال مؤثر الکترون و گرما ایفا می‌کنند. نمودارهای عملکرد نشان می‌دهند که در چگالی‌های جریان بالا، سیم کامپوزیتی در مقایسه با سیم مسی خالص، مقاومت ویژه پایین‌تری دارد و از پایداری بهتری برخوردار است.

همچنین، این سیم توانسته دمای بیشتری را پیش از رسیدن به نقطه شکست حرارتی تحمل کند، که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت تحمل گرمایی آن است. بنابراین ترکیب نانولوله‌های کربنی تک دیواره و رزین رسانا نه تنها موجب بهبود انتقال الکتریسته و حرارت شده، بلکه موجب افزایش تحمل جریان و کاهش خطر تخریب ساختاری در شرایط بارگذاری شدید شده است. این ویژگی‌ها سیم‌های کامپوزیتی را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای پیشرفته در صنایع الکترونیک، انتقال توان بالا و تجهیزات حساس حرارتی تبدیل می‌نماید.

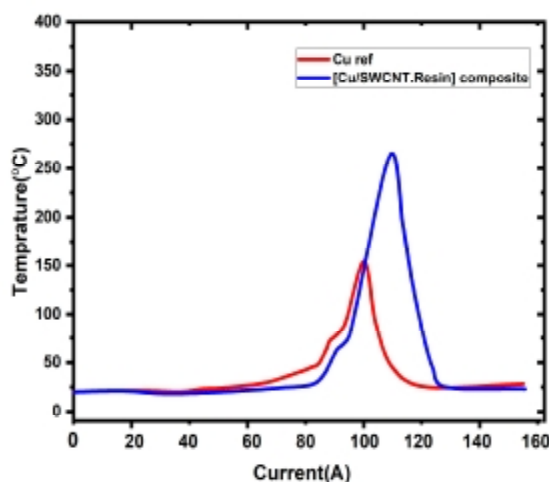
قدردانی

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی و بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ایران و همچنین با حمایت مالی شورای تحقیقات علمی و فناوری ترکیه (TUBITAK) با شماره مجوز ۱۲۲۸۹۶۹ انجام شده است. نویسندگان از مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی و بین‌المللی وزارت عتف ایران و توبیتاک ترکیه (TUBITAK) به خاطر حمایت مالی‌شان سپاسگزاری می‌کنند.

Acknowledgment

This project was supported by the Center for Scientific and International Studies and Cooperation of the Ministry of Science, Research and Technology of Iran and by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the grant number 122N969. The authors would like to thank the Center for Scientific and International Studies and Cooperation of the Ministry of Science, Research and Technology of Iran and TUBITAK for their financial support.

جریان در هر دو کنترل شده است. اما با افزایش جریان به بالای ۸۰ آمپر، تفاوت‌های اساسی میان عملکرد حرارتی دو نمونه آشکار می‌شود. سیم مسی مرجع دمایی حدود ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد را در جریان نزدیک به ۱۰۵ آمپر تجربه می‌کند و پس از آن به سرعت دمای آن کاهش می‌یابد، که می‌تواند نشان‌دهنده تخریب ساختاری یا ذوب موضعی باشد. نمودار فوق دارای قله‌ای باریک‌تر است، که نشان می‌دهد فرآیند خنک‌سازی سریع‌تر و مؤثرتری در آن رخ داده است. در مقابل، سیم کامپوزیتی با وجود افزایش شدید دما، حداکثر دمایی در حدود ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد را در جریان کمی بیشتر از سیم مرجع تحمل می‌کند.



شکل ۸. نمودار تغییرات دما با جریان ورودی برای سیم مسی مرجع و سیم مسی با روکش نانولوله‌های کربنی و لایه رزین

افزایش دمای بیشتر در سیم کامپوزیتی نشانگر این است که این سیم توانایی تحمل جریان بیشتری را قبل از آسیب حرارتی دارد. این موضوع از آن جهت مهم است که نشان می‌دهد پوشش نانولوله‌های کربنی و رزین رسانای حرارتی موجب افزایش ظرفیت تحمل گرمایی سیم شده است. همچنین شکل منحنی حرارتی سیم کامپوزیتی در ناحیه قله (نزدیک ۱۰۰ تا ۱۱۵ آمپر) بسیار تیزتر و باریک‌تر است، در حالی که منحنی دمایی سیم مسی مرجع پهن‌تر است. این پدیده بیانگر آن است که در سیم کامپوزیتی، با وجود افزایش دما، فرآیند خنک‌سازی سریع‌تری اتفاق می‌افتد که می‌تواند ناشی از پخش سریع‌تر گرما توسط نانولوله‌های کربنی تک دیواره و رزین باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ساخت سیم کامپوزیتی مس/نانولوله‌های کربنی تک دیواره - رزین انجام گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از

References

منابع

- [1] Gür TM. Review of electrical energy storage technologies, materials, and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & environmental science*. 2018;11(10):2696-767.
- [2] Hadjipaschalis I, Poullikkas A, Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2009 Aug 1;13(6-7):1513-22.
- [3] Czerwinski F. Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Materials Science*. 2024 Aug;59(32):14847-92.
- [4] Murashkin MY, Sabirov I, Sauvage X, Valiev RZ. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity. *Journal of Materials Science*. 2016 Jan;51(1):33-49.
- [5] Ujah CO, Kallon DV, Aigbodion VS. Overview of electricity transmission conductors: challenges and remedies. *Materials*. 2022 Nov 15;15(22):8094.
- [6] Mao Q, Liu Y, Zhao Y. A review on copper alloys with high strength and high electrical conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024 Apr 9:174456.
- [7] Raabe D, Tasan CC, Olivetti EA. Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*. 2019 Nov 7;575(7781):64-74.
- [8] Zhang L, Xu Z. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*. 2016 Jul 20;127:19-36.
- [9] Zhang X, Lu W, Zhou G, Li Q. Understanding the mechanical and conductive properties of carbon nanotube fibers for smart electronics. *Advanced Materials*. 2020 Feb;32(5):1902028.
- [10] Zhang S, Nguyen N, Leonhardt B, Jolowsky C, Hao A, Park JG, Liang R. Carbon-nanotube-based electrical conductors: fabrication, optimization, and applications. *Advanced Electronic Materials*. 2019 Jun;5(6):1800811.
- [11] Lekawa-Raus A, Patmore J, Kurzepa L, Bulmer J, Koziol K. Electrical properties of carbon nanotube-based fibers and their future use in electrical wiring. *Advanced Functional Materials*. 2014 Jun;24(24):3661-82.
- [12] Li Y, Huang X, Zeng L, Li R, Tian H, Fu X, Wang Y, Zhong WH. A review of the electrical and mechanical properties of carbon nanofiller-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science*. 2019 Jan;54:1036-76.
- [13] Bandaru PR. Electrical properties and applications of carbon nanotube structures. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2007 Apr 1;7(4-5):1239-67.
- [14] Terrones M. Carbon nanotubes: synthesis and properties, electronic devices and other emerging applications. *International materials reviews*. 2004 Dec 1;49(6):325-77.
- [15] Oluwalowo A, Nguyen N, Zhang S, Park JG, Liang R. Electrical and thermal conductivity improvement of carbon nanotube and silver composites. *Carbon*. 2019 May 1;146:224-31.
- [16] Oluwalowo A, Nguyen N, Zhang S, Park JG, Liang R. Electrical and thermal conductivity improvement of carbon nanotube and silver composites. *Carbon*. 2019 May 1;146:224-31.
- [17] Oluwalowo A, Nguyen N, Zhang S, Park JG, Liang R. Electrical and thermal conductivity improvement of carbon nanotube and silver composites. *Carbon*. 2019 May 1;146:224-31.
- [18] Fu S, Chen X, Liu P. Preparation of CNTs/Cu composites with good electrical conductivity and excellent mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2020 Jan 13;771:138656.
- [20] Paradise M, Goswami T. Carbon nanotubes—production and industrial applications. *Materials & design*. 2007 Jan 1;28(5):1477-89.
- [21] Jarosz P, Schauerma C, Alvarenga J, Moses B, Mastrangelo T, Raffaele R, Ridgley R, Landi B. Carbon nanotube wires and cables: near-term applications and future perspectives. *Nanoscale*. 2011;3(11):4542-53.