

## بررسی اثر باز پخت بر روی خواص الکتریکی و نوری لایه‌های نازک شفاف رسانای ساخته شده از نانولوله‌های کربنی - نانو سیم نقره

امیر زیلایی و منصور فرید

گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

پست الکترونیکی: zilaie\_a@scu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۴/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱/۱۸)

### چکیده

لایه‌های نازک شفاف رسانا از نانولوله‌های کربنی چند جداره/ نانوسیم نقره با استفاده از پوشش دهی چرخشی ساخته شدند. اثر بازپخت نمونه‌های ساخته شده از دمای اتاق تا دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه به منظور بهبود خواص الکتریکی و نوری لایه‌ها بررسی گردید. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌داد که بازپخت لایه‌های نازک ساخته شده در بهبود خواص لایه‌ها مؤثرند. دمای بازپخت بهینه برای بهبود خواص مذکور، دمای  $285^{\circ}\text{C}$  به دست آمد. رفتار ضخامت لایه‌ها از ۸۹ تا ۱۸۳ نانومتر نشان داد حضور نانوسیم‌ها باعث بهبود خواص الکتریکی در تمام بازه‌های دمایی می‌شود. بهترین نسبت رسانندگی الکتریکی جریان ثابت توده به رسانندگی نوری که عدد شایستگی لایه نازک را تعریف می‌کند، برای تمام درصد‌های نقره در دمای  $285^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شد. مقاومت الکتریکی سطحی و شفافیت نوری به ترتیب با روش چهار میله و طیفسنجی نورفرابنفش - مرئی اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت سطحی، عدد شایستگی لایه نازک، روش چهار میله، طیفسنجی نور فرابنفش - مرئی

### ۱. مقدمه

تحت تنش‌های ضعیف و عدم امکان پوشش دهی آنها روی زیر لایه‌های قابل انعطاف می‌باشد. این ضعف‌ها باعث می‌شود تا کارایی آنها برای ساخت لایه‌های شفاف رسانا با محدودیت همراه شود [۷، ۸]. بنابراین تلاش برای جایگزین کردن لایه‌هایی که بتوانند بر مشکلات بالا فائق آمده و همچنین کارایی لایه‌های ایجاد شده با اکسید قلع - ایندیم را داشته باشد یک امر مهم می‌باشد. پلیمرهای شفاف رسانا نظیر: پلی ۳،۴- اتیلن داکسی تیفون و پلی ۴- استرین سولفانات گروه دیگری

لایه‌های نازک شفاف رسانا کاربردهای وسیعی در ساخت ادوات الکترونیک نوری [۱]، سلول‌های خورشیدی [۲] و نمایش‌گرهای لمسی [۳، ۴] دارند. یکی از لایه‌های شفاف رسانا که امروزه کاربرد وسیعی برای موارد ذکر شده دارد، لایه‌های ساخته شده از اکسید ایندیم - قلع می‌باشد [۵، ۶]. استفاده از اکسید ایندیم - قلع جهت ساخت ادوات مذکور دارای یک سری محدودیت‌ها از جمله شکننده بودن لایه‌های ساخته شده

قطری کمتر از ۱۰ نانومتر هستند. جهت رفع ناخالصی‌ها و عامل دار کردن نانولوله‌های کربنی به ترتیب از اسید کلریدریک همراه با حمام فراصوتی (۲۴ کیلوهرتز، ۱۰۰ وات) در مدت یک ساعت و مخلوط اسیدهای قوی شامل اسید سولفوریک و نیتریک به نسبت ۱:۳ در مدت ۳۰ دقیقه استفاده گردید. این عمل منجر به تشکیل گروه‌های کربوکسیل بر روی سطح جانبی نانولوله‌های کربنی و بر روی انتهای آنها شد [۱۶]. برای بررسی خواص الکتریکی و نوری لایه‌های ساخته شده، مقدار یک میلی گرم از نانولوله‌های کربنی بازتاب شده درون یک میلی لیتر اتانول در حمام فراصوتی به مدت ۱۵ دقیقه پخش گردید. محلول حاوی نانولوله‌های کربنی پس از عملیات فراصوتی به منظور جدا کردن رشته‌های سنگین تر نانولوله‌های کربنی به مدت ۳۰ دقیقه با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ گردیدند.

### ساخت نانوسیم‌های نقره

جهت سنتز نانوسیم‌های نقره، ۱۱/۱ میلی لیتر اتیلن گلاکولیک از محلول ۰/۱۵ مولار پلی وینیل پیرولین پس از اضافه کردن ۰/۱ میلی مولار از کلرید سدیم با استفاده از تابش فراصوتی به هم زده می شود. محلول مخلوط شده با یک پمپ سرنگی با آهنگ ۴۵ میلی لیتر بر ساعت درون یک ظرف شامل ۱۱/۱ محلول اتیلن گلاکولیک با ۰/۱ مولار نیترات نقره تزریق می گردد. محلول به دست آمده به مدت ۵ دقیقه مخلوط شده و سپس به درون اتوکلاو ۵۰ میلی لیتری منتقل می شود و به مدت ۲/۵ ساعت درون کوره در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس نگهداری می شود. سپس اتوکلاو تا دمای اتاق خنک می گردد. جهت جداسازی نانوسیم‌های نقره سنتز شده محتوای اتوکلاو به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۳۵۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از این کار نانوسیم‌های نقره با استون شستشو می شود و به منظور پایدار ماندن، نانوسیم‌ها درون اتانول جهت عملیات بعدی نگهداری شد.

مقادیر ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۳۰ میکرو لیتر از نانوسیم‌های نقره با غلظت ۱/۸ میلی گرم بر میلی لیتر حلال در اتانول درون ۲

از رساناهای شفاف می باشند که استفاده از آنها نیز دارای محدودیت‌هایی است، از جمله اینکه رسانندگی الکتریکی لایه‌های ایجاد شده از این ساختارها بر روی زیر لایه‌های قابل انعطاف در اثر تنش‌های ضعیف مکانیکی و حرارتی کاهش می یابد [۹، ۱۰]. نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های نقره و گرافین نسل جدیدی از لایه‌های شفاف رسانا می باشند که نه تنها دارای رسانندگی و شفافیت بالایی نظیر اکسید ایندیم-قلع هستند بلکه دارای محدودیت‌های بالا نمی باشند [۱۱-۱۴]. در بین این سه گروه، از نانولوله‌های کربنی و گرافین می توان در ساخت لایه‌های شفاف بر روی زیر لایه‌های قابل انعطاف استفاده کرد که به الکترونیک نوری قابل انعطاف کمک شایانی می کند. انتقال بار در نانولوله‌های کربنی یکی متأثر از مقاومت ذاتی نانولوله‌های کربنی چند جداره و دیگری ناشی از مقاومت اتصال نانولوله-نانولوله می باشد [۱۵]. استفاده از نانوسیم‌های نقره جهت تزئین کردن سطح نانولوله‌ها و ایجاد پل بین نانولوله‌های کربنی جدا از هم، رسانندگی الکتریکی لایه‌های نازک و ضخیم را افزایش می دهد. در این کار تحقیقی علاوه بر ساخت لایه‌های نازک و ضخیم از نانولوله‌های کربنی، اثر بازپخت را در بازه‌های مختلف دمایی با نانولوله‌های کربنی چند جداره بازتاب شده در محیط اسید سولفوریک و اسید نیتریک با نسبت ۱:۳ که توسط نانوسیم‌های نقره آلییده شده‌اند بررسی خواهیم کرد. بدین منظور برای تولید لایه‌های مذکور از روش آسان پوشش دهی چرخشی کمک گرفته شده است. مقاومت سطحی و شفافیت نوری در ۵۵۰ نانومتر برای تمامی نمونه‌ها بررسی خواهد شد. با توجه به این که بررسی لایه‌های شفاف رسانا در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است، بنابراین وسط این طیف که ۵۵۰ نانومتر است به عنوان طول موج مورد بررسی برای طیف مرئی مد نظر است.

### مواد و روش‌ها

#### آماده سازی نانولوله‌ها

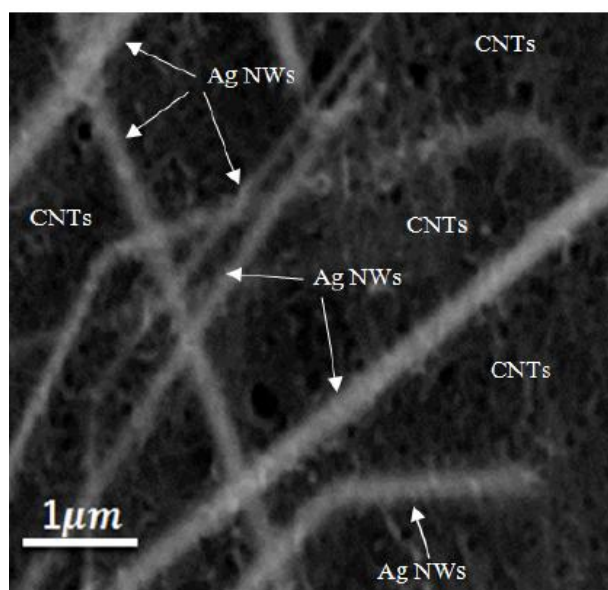
نانولوله‌های کربنی استفاده شده در این تحقیق به روش انباشت بخار شیمیایی سنتز شده و دارای طول اولیه ۱۵-۵ میکرومتر و

ساخته شده با ضخامت‌های ۸۹ تا ۱۸۳ نانومتر جهت بررسی خواص الکتریکی و نوری و عملیات حرارتی مورد استفاده قرار گرفتند. مقاومت سطحی و شفافیت نوری به ترتیب با استفاده از روش چهار میله با آرایش مربعی و طیفسنجی نورفرابنفش- مرئی اندازه‌گیری شد.

### نتایج و بحث

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نانوسیم‌های نقره درون نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد. همان طوری که از شکل ۱ مشهود است حضور نانوسیم‌های نقره با درصد‌های زیاد تعداد اتصالات بین نانولوله‌ها را زیاد می‌کند. نتایج اندازه‌گیری بر روی لایه‌های با ضخامت زیر ۱۰۰ نانومتر این مهم را نشان داد که رسانندگی الکتریکی نسبت به درصد‌های کمتر از ۱۰/۵ درصد نقره کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. این روند البته برای درصد‌های ۱/۸، ۳/۵ و ۵/۱ درصد نقره نیز مشاهده گردید ولی آهنگ کند شدن مقاومت نسبت به ۱۰/۵ درصد کمتر بود. از طرف دیگر با افزایش ضخامت لایه‌ها از حالت نازک به ضخیم (بالای ۱۰۰ نانومتر) مشاهده گردید کاهش مقاومت در لایه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف نه تنها ناشی از حضور نانوسیم‌های نقره می‌باشد بلکه برهم نهی خود نانولوله‌ها کربنی نیز در کاهش مقاومت سهیم می‌باشد.

شکل ۲ مقاومت سطحی را برای درصد‌های مختلف نقره شامل ۵/۰، ۱۰/۵ درصد وزنی را بر حسب دمای بازپخت نشان می‌دهد. از شکل ۲ پیداست با زیاد شدن مقدار نقره مقاومت سطحی کاهش پیدا می‌کند ولی آهنگ کاهش مقاومت برای درصد‌های مختلف متفاوت است. همین طور رفتار مقاومت سطحی بر حسب دمای حرارت‌دهی نیز نشان می‌دهد. کمترین مقاومت‌ها برای تمام ضخامت‌ها در دمای  $285^{\circ}\text{C}$  اتفاق می‌افتد در صورتی که با افزایش دمای حرارت‌دهی از  $285^{\circ}\text{C}$  به بعد مقاومت سطحی افزایش پیدا می‌کند که حکایت از قطع شدن نانوسیم‌های نقره و قطع پل‌های ایجاد شده و همچنین جدا شدن نانولوله‌ها از روی سطح می‌باشد. همان طوری که از شکل ۲ پیداست در ضخامت‌های کمتر،

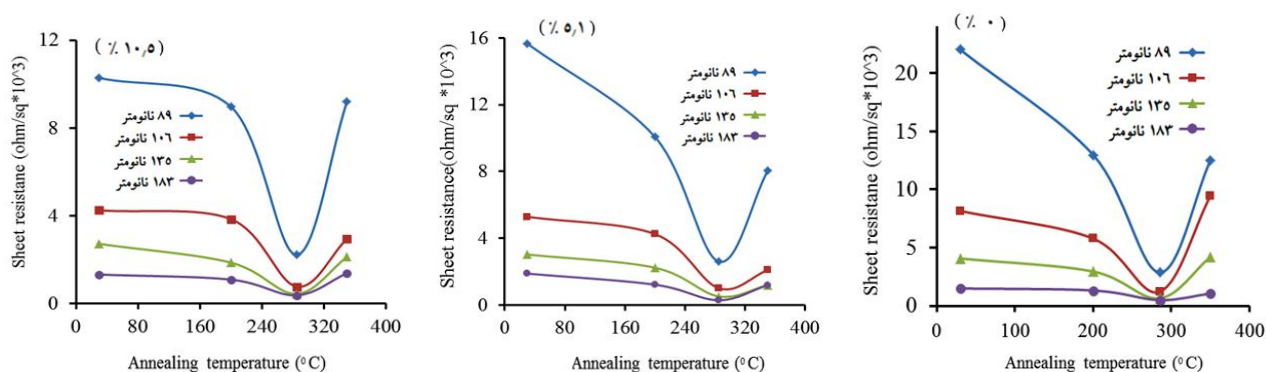


شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی نانولوله‌های کربنی با حضور نانوسیم‌های نقره.

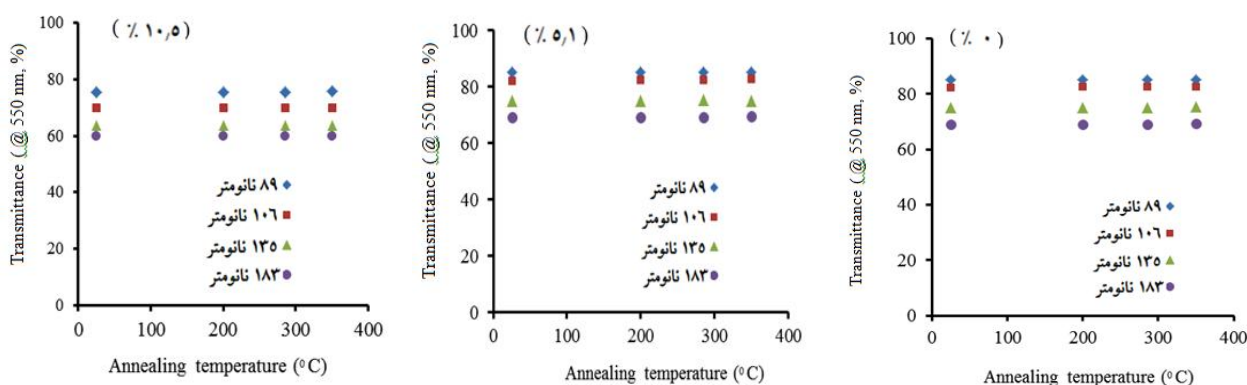
میلی لیتر از نانولوله‌های کربنی با غلظت یک میلی‌گرم بر میلی لیتر حلال در اتانول مخلوط شده و محلول نانولوله-نانوسیم با درصد‌های وزنی ۰، ۱/۸، ۳/۵، ۵/۱ و ۱۰/۵ تهیه شدند.

### روش تهیه لایه‌های نازک

با توجه به این که چسبندگی نانولوله‌های کربنی به سطح شیشه به عنوان زیر لایه ضعیف بود به منظور افزایش چسبندگی، زیر لایه‌ها توسط بایندر ۳- آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان عامل دار شدند. برای این کار ابتدا زیر لایه‌ها با استفاده از آب یون‌زدایی شده، استون و ۲- پروپانل به مدت ۱۵ دقیقه در حضور حمام فراصوتی به صورت مراحل جداگانه شستشو گردیدند. سپس به منظور عامل‌دار کردن سطح زیر لایه‌ها، آنها درون محلول نیم درصد حجمی ۳- آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان حلال در آب یون‌زدایی به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. زیر لایه‌های آماده شده جهت ساخت لایه‌های نازک از نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۴۹۲۰ دور بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفتند. زمان استفاده شده برای لایه‌نشانی چرخشی ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. لایه‌های



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقاومت سطحی لایه‌های با ضخامت‌ها و درصد‌های نقره متفاوت بر حسب دمای بازپخت.

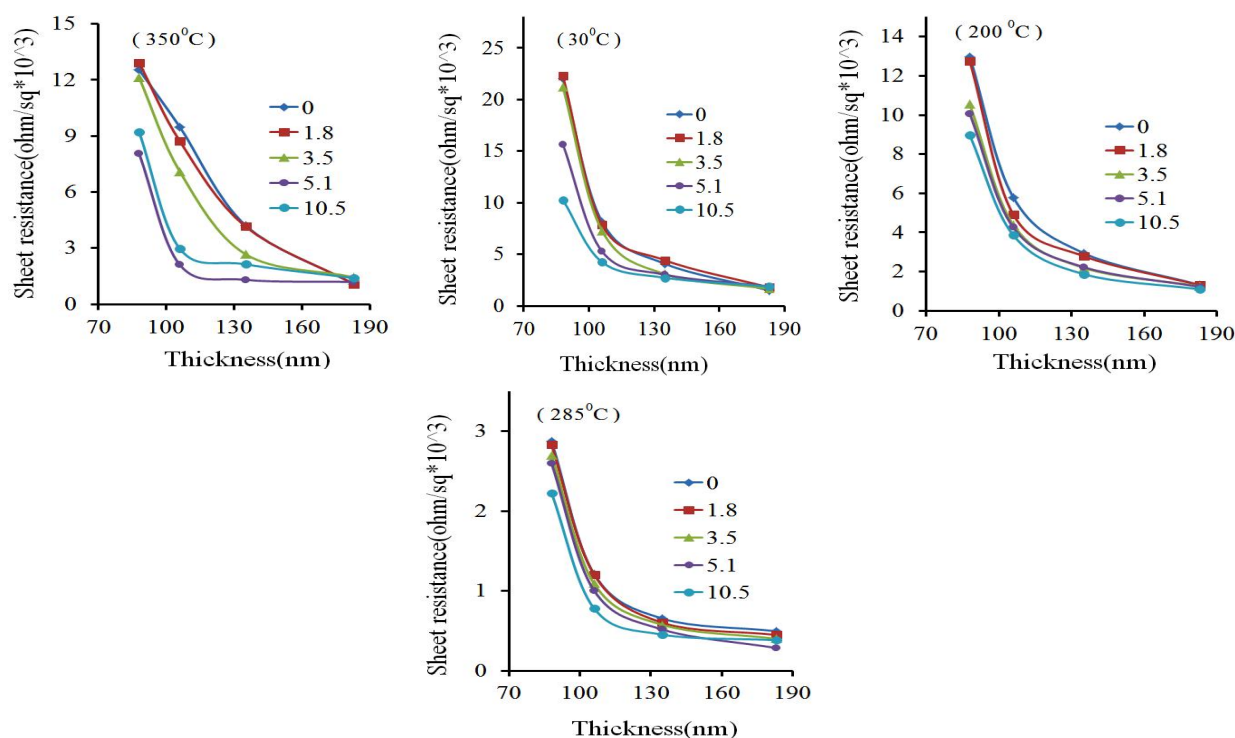


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شفافیت نوری در طول موج ۵۵۰ نانومتر بر حسب دماهای حرارت دهی به ازای درصد‌های وزنی ۱۰٫۵ و ۵٫۱ و ۰ نقره.

شکل ۴ مقاومت سطحی را بر حسب ضخامت لایه‌های ساخته شده برای دماهای مختلف بازپخت شامل ۳۰، ۲۰۰، ۲۸۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. از محور عمودی شکل ۴ پیداست با زیاد شدن ضخامت در هرکدام از دماهای بازپخت مقاومت سطحی کاهش پیدا می‌کند. کمترین مقدار مقاومت در دمای ۲۸۵°C اندازه‌گیری گردید که حکایت از این موضوع است که در این دما بیشترین تعداد اتصالات لازم برای تامین رسانندگی به وجود آمده است و با بالا رفتن دمای بازپخت بیشتر از ۲۸۵°C، پل‌های ایجاد شده بین نانولوله‌های کربنی با نانوسیم‌های نقره از بین می‌رود. برای نمونه بدون بازپخت (۳۰°C) مقدار مقاومت سطحی بر حسب ضخامت لایه‌ها زیاد است که البته رفتار کاهش آن با افزایش ضخامت شبیه دیگر مقادیر مختلف نقره است. در ضخامت‌های زیر ۱۰۰ نانومتر مقاومت سطحی از مقدار

در حدی که لایه‌ها به عنوان لایه نازک محسوب می‌شوند یعنی در ۸۹ نانومتر، افت مقاومت با شیب خیلی زیادی صورت می‌گیرد. زیاد بودن این شیب برای دمای بالاتر از ۲۸۵°C نشان می‌دهد نانوسیم‌های نقره که اتصالات بین نانولوله‌ها را تامین کرده بودند با زیاد شدن دما قطع شده و مقاومت افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند.

شکل ۳ شفافیت نوری اندازه‌گیری شده در ۵۵۰ نانومتر را بر حسب دمای بازپخت برای ۱۰٫۵ و ۵٫۱ و ۰ درصد نقره درون نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد. از شکل ۳ پیداست که برای درصد‌های ۰ و ۵٫۱ درصد وزنی نقره دمای بازپخت تأثیر زیادی بر شفافیت نوری لایه‌ها نداشته است. با زیاد شدن مقدار نقره به ۱۰٫۵ درصد، مقدار شفافیت نوری کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد که حکایت از پر شدن فضای خالی بین نانولوله‌ها توسط نقره است.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقاومت سطحی لایه‌های نازک حرارت دهی شده در دماهای مختلف بر حسب ضخامت آنها و برای درصدهای مختلف نقره.

برابر ۱۰۲۸۲/۱ اهم بر مربع است و میزان شفافیت ۷۵/۷ درصد کاهش می‌یابد که یک کاهش ۱۰ درصدی در شفافیت نوری نسبت به نمونه ۵/۱ درصد نقره است. لازم به ذکر است که شفافیت لایه ۸۹ نانومتری برای درصدهای ۱/۸ و ۳/۵ درصد نقره نیز ۸۵/۲۰۰ و ۸۵/۲۰۷ به دست آمده است که نسبت به ۵/۱ درصد نقره تفاوت خیلی ناچیزی را نشان می‌دهد در صورتی که مقاومت سطحی برای درصدهای فوق به ترتیب برابر با ۲۲۳۰۷/۷ و ۲۱۲۰۰/۰ اهم بر مربع است که نسبت به ۵/۱ درصد نقره دارای مقاومت بالایی می‌باشند. همین طور نیز از شکل ۴ پیداست که با افزایش ضخامت لایه‌ها، افت مقاومت سطحی برای درصدهای مختلف دارای تفاوت کمتری می‌باشند و به نظر می‌رسد با افزایش ضخامت لایه‌ها چون که لایه‌ها به سمت لایه ضخیم سوق پیدا می‌کنند مقاومت سطحی، ناشی از وجود نانولوله‌های کربنی می‌باشد و حضور نانوسیم‌های نقره تأثیر قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد. اصولاً چون که نانولوله‌های کربنی دارای رسانندگی خیلی بالایی نسبت به سایر

۲۲۰۳۴/۵ اهم بر مربع به ازای صفر درصد نقره به مقدار ۱۰۲۸۲/۱ اهم بر مربع به ازای ۱۰/۵ درصد نقره افت پیدا می‌کند. این کاهش نشان می‌دهد زیر ۱۰۰ نانومتر که لایه‌ها به عنوان لایه نازک عمل می‌کنند و طبیعتاً مقدار کمتری از نانولوله‌های کربنی حاوی نانوسیم‌های نقره روی سطح را پوشانده‌اند، ورود نانوسیم‌های نقره تشکیل مسیرهای رسانای بیشتری داده و افت شدیدی در مقاومت سطحی ایجاد می‌کنند. این افت شدید مقاومت که به معنی افزایش رسانایی است، اهمیت زیادی دارد و یکی از اهداف ساخت لایه‌های نازک رسانا، افزایش این رسانندگی است ولی چون مقدار ۱۰/۵ درصد نقره باعث کاهش شفافیت نوری شده است، لذا به عنوان یک لایه نازک شفاف رسانا مد نظر قرار نمی‌گیرد. بهترین وضعیت به ازای ۵/۱ درصد نقره اتفاق می‌افتد که برای لایه‌ای با ضخامت ۸۸ نانومتر مقاومت سطحی ۱۵۶۶۶/۷ اهم بر مربع به ازای شفافیت نوری معادل ۸۵/۲۳ درصد می‌باشد در حالی که برای همین ضخامت به ازای ۱۰/۵ درصد نقره مقاومت سطحی

درصد نقره مقاومت سطحی  $2601/0$  اهم بر مربع به ازای  $85/29$  درصد در طول موج  $550$  نانومتر می‌باشد، برای نمونه بازپخت شده در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت  $30$  دقیقه و در فشار محیط، اندازه‌گیری مقاومت سطحی بر حسب ضخامت لایه‌ها نشان می‌دهد که در این دما مقاومت سطحی نسبت به دمای بازپخت  $285^{\circ}\text{C}$  شروع به افزایش کرده است و به نظر می‌رسد نانوسیم‌های نقره اکسیده و از یکدیگر جدا شده و مسیره‌های رسانای تولید شده در دماهای بازپخت کمتر نیز از بین رفته است. با زیاد شدن دمای حرارت دهی بیشتر از  $285^{\circ}\text{C}$  مشاهده گردید که منحنی  $10/5$  درصد وزنی نقره با منحنی  $5/1$  درصد وزنی نقره جابه‌جا می‌شود و به نظر می‌رسد در نمونه  $10/5$  درصد وزنی نقره تعداد اتصالات بیشتر و بنابراین حرارت دهی باعث قطع اتصالات مربوطه و افزایش ناگهانی مقاومت می‌شود، که پایین بودن مقاومت سطحی برای این درصد در دماهای کمتر از  $285^{\circ}\text{C}$  گویای این حقیقت است. به طور کلی علت فیزیکی کاهش مقاومت سطحی برای تمام دماها بر حسب ضخامت لایه‌ها و با حضور درصدهای متفاوت نقره به خاطر افزایش تابع کار نانولوله‌های کربنی-نانوسیم نقره و طبیعتاً کاهش سد شاتکی می‌باشد.

به منظور بررسی عدد شایستگی لایه‌ها، از رابطه ۱ که شفافیت نوری اندازه‌گیری شده را بر حسب مقاومت الکتریکی سطحی تعریف می‌کند [۱۷] استفاده می‌شود.

$$T = \left( 1 + \frac{Z_0 \sigma_{op}}{2R_s \sigma_{DC,B}} \right)^{-2} \quad (1)$$

در این رابطه،  $Z_0$  به عنوان امپدانس فضای آزاد ( $377$  اهم)،  $\sigma_{op}$  به عنوان رسانندگی نوری و  $\sigma_{DC,B}$  به عنوان رسانندگی الکتریکی توده می‌باشد. به منظور بررسی اثر غلظت نانوسیم‌های نقره این معادله به لایه‌هایی که از درصدهای مختلف نانوسیم‌های نقره ساخته شده بود اعمال گردید. برای بررسی لایه‌های نازک شفاف رسانا، عدد شایستگی لایه با نسبت رسانندگی الکتریکی جریان ثابت توده به رسانندگی نوری نمونه داده می‌شود که قابلیت کاربردی صنعتی آنها با این معیار سنجیده می‌شود. حضور نانوسیم‌های نقره با تشکیل

رساناها می‌باشند، با افزایش ضخامت، تعداد مسیره‌های رسانای ایجاد شده ناشی از خود نانولوله‌های کربنی بوده و برای ضخامت‌های بالا، مقاومت سطحی تمام درصدهای مختلف نقره به سمت یک مقدار واحد میل می‌کنند.

برای نمونه‌ای که در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  در مدت  $30$  دقیقه و در فشار محیط بازپخت گردیده است رفتار مقاومت سطحی بر حسب ضخامت مانند حالت بدون بازپخت است. همان طوری که پیداست در اثر عملیات حرارتی در این دما در مقایسه با حالت بدون بازپخت، مقاومت سطحی کاهش چشم‌گیری را به ازای تمام درصدهای مختلف نقره نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد با انجام عملیات حرارتی، برای نانوسیم‌های نقره ذوب جزئی رخ می‌دهد و در نتیجه اتصالات بیشتری بین نانولوله‌های کربنی ایجاد شده و بنابراین افت در مقاومت سطحی را مشاهده خواهیم کرد، در این وضعیت برای درصدهای کمتر از  $10/5$  درصد نقره نیز تفاوت ناچیزی بین مقاومت سطحی لایه‌های ساخته شده وجود ندارد. در این مرحله از عملیات حرارتی نیز برای تمام ضخامت‌های نازک و ضخیم افت مقاومت سطحی را با افزایش ضخامت مشاهده می‌کنیم. ولی میزان افت مقاومت در این مرحله نسبت به حالت بدون عملیات حرارتی بیشتر است. برای نمونه‌ای که در دمای  $285^{\circ}\text{C}$  و به مدت  $30$  دقیقه در فشار محیط بازپخت گردیده است مقاومت سطحی برای تمام درصدهای نقره افت خیلی شدیدی نسبت به وضعیت بدون بازپخت را نشان می‌دهد. در این دمای بازپخت همان طوری که از محور عمودی یعنی محور مقاومت سطحی مشهود است بیشترین افت مقاومت در این دمای بازپخت مشاهده گردید و به نظر می‌رسد میزان جوش نانوسیم‌های نقره به نانولوله‌های کربنی در این وضعیت به بیشترین مقدار خود رسیده است و میزان ذوب جزئی نانوسیم‌ها در این حالت نیز بیشترین است. مقاومت سطحی برای ضخامت زیر  $100$  نانومتر از مقدار  $2876/8$  اهم بر مربع به ازای شفافیت  $85/2$  درصد در طول موج  $550$  نانومتر برای صفر درصد نقره به مقدار  $2229/7$  اهم بر مربع به ازای شفافیت نوری  $75/63$  درصد در طول موج  $550$  نانومتر رخ داده است و این در صورتی است که برای  $5/1$

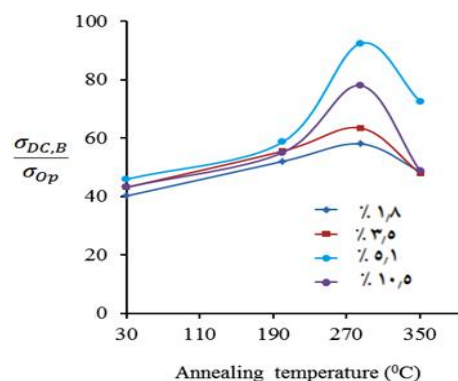
نشان می‌دهد میزان اتصال نانوسیم‌ها به نانولوله‌های کربنی در این دما بیشترین مقدار بوده است، زیرا با افزایش دما بعد از  $285^{\circ}\text{C}$  عدد شایستگی نمونه‌ها کاهش یافته است یعنی با افزایش دمای بازپخت بیشتر از  $285^{\circ}\text{C}$  به دلیل قطع شدن نانوسیم‌ها از یکدیگر مقاومت سطحی نمونه افزایش یافته است. با توجه به این که بیشترین عدد شایستگی که نسبت رسانندگی الکتریکی جریات ثابت توده به رسانندگی نوری تعریف می‌شود برای نانولوله‌های کربنی بین  $50-100$  به دست آمده است [۱۸] بنابراین عدد شایستگی حاصل که برابر با  $92/4$  می‌باشد نتیجه خیلی خوبی است.

### نتیجه‌گیری

استفاده از نانوسیم‌های نقره به عنوان پلی بین نانولوله‌های کربنی باعث تقویت رسانندگی الکتریکی گردید که علت آن افزایش تابع کار نانولوله‌ها- فلز و کوچک شدن سد شاتکی می‌باشد. همچنین دماهای متفاوت حرارت دهی نشان داد دمای بهینه بازپخت برای بهبود خواص الکتریکی و نوری لایه‌های ساخته شده به ازای درصد‌های مختلف نقره  $285^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. عدد شایستگی لایه‌های ساخته شده اولیه و بازپخت شده تا  $350^{\circ}\text{C}$  محاسبه گردید و نتایج نشان داد که نمونه‌ای که دارای بیشترین معیار عدد شایستگی است، نمونه با  $5/1$  درصد نقره و بازپخت شده در دمای  $285^{\circ}\text{C}$  می‌باشد.

### سپاس‌گزاری

از دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر حمایت مالی جهت انجام این کار و همچنین از سازمان آب و برق خوزستان به خاطر استفاده از آزمایشگاه تشکر و قدردانی می‌نمایم.



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نسبت رسانندگی الکتریکی جریان ثابت توده به رسانندگی نوری بر حسب دمای بازپخت برای نمونه با ضخامت‌های ۸۹، ۱۰۶، ۱۳۵ و ۱۸۳ نانومتر.

پل بین نانولوله‌های بازتاب شده و همچنین کاهش سد شاتکی باعث افزایش نسبت رسانندگی به ازای تمام درصد‌های مختلف نقره می‌شوند. شکل ۵ نسبت رسانندگی الکتریکی جریان ثابت توده به رسانندگی نوری را بر حسب دمای بازپخت برای ضخامت‌های ۸۹، ۱۰۶، ۱۳۵ و ۱۸۳ نانومتر نشان می‌دهد. روشن است با افزایش درصد نقره نسبت رسانندگی‌ها یا شکل عدد شایستگی افزایش می‌یابد ولی بیشترین مقدار آن به ازای  $5/1$  درصد نقره و در دمای  $285^{\circ}\text{C}$  برابر  $92/4$  مشاهده گردید. نسبت رسانندگی‌ها برای درصد‌های مختلف نقره شامل  $1/8$ ،  $3/5$  و  $10/5$  در دمای  $285^{\circ}\text{C}$  به ترتیب برابر  $58$ ،  $63/4$  و  $78$  به دست آمد. در این دما جوش نانوسیم‌ها با نانولوله‌ها به حداکثر مقدار خود رسیده و باعث افزایش تابع کار نانولوله- نانوسیم و کاهش سد شاتکی تشکیل شده است. با توجه به این که مقاومت اتصال در نانولوله‌های کربنی بزرگ است به نظر می‌رسد حضور نانوسیم‌های نقره با ایجاد پل رسانا بین نانولوله‌ها باعث کاهش مقاومت سطحی در تمام دماهای بازپخت می‌شود. کاهش حداکثری مقاومت سطحی در دمای  $285^{\circ}\text{C}$

## مراجع

11. A D Pasquire and S Fang, *Science* **309** (2005) 1215.
12. D Sukanta, T M Higgins, P E Lyon, E M Doherty, P N Nirmalraj, W J Blau, J J Boland, and J N Coleman, *ACS Nano* **3** (2009) 1767.
13. J Y Lee, S T Connor, Y Cui, and P Peumans, *Nano Lett.* **8** (2008) 689.
14. S Bae, H Kin, Y lee, X Xu, J S Park, Y Zheng, J Balakumar, T Lei, and H R Kim, *Nanotechnol.* **5** (2010) 574.
15. A Thess, R Lee, P Nikolaev, H Dai, P Petit, J Robert, C Xu, Y H Lee, S G Kim, and A G Rinzler, *Science* **273** (1996) 483.
16. M Farbod, S Khajehpour Tadavani, and A Kiasat, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng Aspects* **384** (2011) 685
17. M Dressel, and G Gruner, “*Electrodynamics of Solids: Optical Properties of Electrons in Matter*”, Cambridge University Press: Cambridge (2002).
18. G Irvin, L Hu, and D S Hecht, *Adv Mater* **23** (2011) 513.
1. I Hancox, *et al.*, *The Journal of Physical Chemistry C* **117** (2012) 49.
2. J H Chen and Jun-Yu Chen *Jpn. J. Appl. Phys* **52** (2013) 6.
3. L Shie-Heng, T Chih-Chun, M Chen-Chi, M Ma, W Ikai, *Journal of Colloid and Interface Science* **364** (2011) 1.
4. T Takehiro, N Masaya, *J Jinting and S Katsuaki, Nanoscale Research Lett.* **7** (2012) 28.
5. J Mao-xiang, H Chong, L Min, and S Xiang-qian, *Nanoscale Res Lett.* **9** (2014) 588.
6. J Ham, J L Lee. *Adv Energy Mater.* **4** (2014) 11.
7. S Iijima, T Ichihashi, *Nature* **363** (1993) 603.
8. Q B Zheng, Z G Li, J H Yang, J K Kim. *Progress in Mater Sci.* **64** (2014) 200.
9. S T Hsiao, H W Tien, W H Liao, Y S Wang, S M Li, C C Ma, Y H Yu, and W P Chuang. *J Mater Chem C.* **2** (2014) 7291.
10. Y S Kim, M H Chang, E J Lee, D W Ihm, and J Y Kim, *Synthetic Metals.* **195** (2014) 69.