

طراحی و ساخت پوشش‌های چندلایه‌ای نانومتری بازتاب دهنده گرمایی $ZrO_2/Ag/ZrO_2$ برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در آب و هوای گرم

محسن قاسمی و رنامخواستی*، اسماعیل شهریاری؛

دانشگاه شهرکرد، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

دریافت ۹۳/۱۱/۱ پذیرش ۹۴/۴/۳۰

چکیده

در این مقاله، به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها، پوشش نانومتری چندلایه‌ای با آرایش $ZrO_2/Ag/ZrO_2$ (ZAZ) طراحی شده است. ضخامت بهینه برای لایه‌های ZrO_2 و Ag با استفاده از نرم افزار Film Wizard محاسبه شده است. در نمونه بهینه شده، لایه ZrO_2 با روش اسپاترینگ Rf و لایه Ag با روش تبخیر حرارتی انباشت شدند. خواص الکتریکی و اپتیکی سیستم ZAZ بهینه شده از قبیل مقاومت سطحی، ضریب شایستگی، بازتاب و تراگسیل اپتیکی این پوشش در نمونه طراحی و ساخته شده بررسی و با پیش‌گویی‌های تئوری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که هم‌خوانی خوبی بین آن‌ها وجود دارد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای تراگسیل در ناحیه مرئی و بازتاب در ناحیه فروسرخ به ترتیب ۹۳٪ و ۹۰٪ است. هم‌چنین مقاومت الکتریکی سطحی سیستم ساخته شده $(\Omega/\square)$ ۱۳/۱ به دست آمده که مقداری مناسب برای این پوشش‌ها محسوب می‌شود. میزان عبور و بازتاب اپتیکی این پوشش نشان‌دهنده کارکرد مناسب آن برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در آب و هوای گرم است.

واژه‌های کلیدی: سیستم چندلایه، تراگسیل اپتیکی، بازتاب اپتیکی، مقاومت سطحی، بازتاب دهنده گرمایی.

مقدمه

شیشه به دلیل شفاف بودن در برابر نور مرئی محبوبیت زیادی در صنعت خودرو و ساختمان دارد. اما به دلیل این‌که امواج گرمایی (فروسرخ) را از خود عبور می‌دهد، باعث اتلاف انرژی ساختمان و اتومبیل در تابستان و زمستان می‌شود. تحقیقات در اروپا نشان می‌دهد، اگر شیشه‌هایی که مصرف انرژی مؤثر دارند را به جای شیشه‌های استاندارد تک‌جداره و دوجداره استفاده کنند، سالانه ۱/۱ میلیون گیگاژول انرژی ذخیره خواهد شد. طی سال‌های گذشته حوزه جدید و مهمی از تکنولوژی در رشته معماری ابداع شده و هم‌چنان در حال توسعه است. یکی از طرح‌های انجام شده، ایجاد پوشش‌های نازک و شفاف بود که عمل‌کرد گرمایی پنجره‌های شیشه‌ای را بهبود می‌بخشد [۱]، [۲]. پوشش‌های رسانای شفاف^۱ در به‌کارگیری انرژی خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان‌ها کاربردهای بسیاری دارند. از این پوشش‌ها در وسیله‌های اپتوالکترونیک متنوعی از جمله پنجره‌های گرمایی، دیود گسیلنده نوری، نمایش‌گرهای صفحه

* نویسنده مسئول ghasemi.mohsen@sci.sku.ac.ir

تخت، به‌عنوان فیلترهای اپتیکی، آینه‌های گرمایی و پوشش‌های حفاظتی و زینتی استفاده می‌شوند. این پوشش‌ها دارای شفافیت زیادی در گستره مرئی است و در برابر سایش مقاوم و چسبندگی خوبی روی انواع زیرلایه‌ها دارند [۳].

پوشش‌های بازتاب‌دهنده گرمایی به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که بسته به نوع آب و هوا، پرتوهای ناحیه مرئی را از خود عبور و پرتوهای فروسرخ را بازتاب دهند. پوششی که بتواند امواج گرمایی خورشید در محدوده طول موج $0.7-3 \mu\text{m}$ را بازتاب کند و شفافیت زیادی در ناحیه مرئی داشته باشد، می‌تواند در شرایط آب و هوایی گرم از ورود امواج گرمایی خورشید به‌داخل ساختمان و اتومبیل جلوگیری کند. به چنین پوششی "پوشش کنترل خورشیدی" گفته می‌شود. پوششی که امواج گرمایی در طول موج‌های بیش‌تر از $3 \mu\text{m}$ را بازتاب کند در آب و هوای سرد، گرمای داخل ساختمان را به داخل ساختمان بازتاب می‌کند و مانع از اتلاف گرمای تولیدی به‌وسیله گرم‌کننده‌ها می‌شود [۱]. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که ساختارهای چندلایه‌ای نسبت به پوشش‌های تک‌لایه‌ای خواص بازتاب‌کنندگی بهتری از خود نشان می‌دهند. مواد استفاده شده برای ساخت پوشش‌های چندلایه‌ای، فلزات همراه با نیم‌رساناهای اکسیدی و یا دی‌الکتریک‌ها هستند. از فلزات به‌دلیل تراکم حامل‌های بار و خاصیت بازتابی زیاد، برای بازتاب پرتوهای فروسرخ استفاده می‌کنیم. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش ضریب شکست دی‌الکتریک، میزان عبور نور مرئی بیش‌تر می‌شود. به‌همین دلیل به دی‌الکتریک‌هایی با ضریب شکست بالا نیاز است [۲]. یکی از پارامترهای مهم برای بهینه کردن خواصی مانند تراگسیل زیاد در ناحیه مرئی و بازتاب زیاد در ناحیه فروسرخ ضخامت لایه‌هاست. کارایی این پوشش‌ها به نوع مواد انتخابی، ضخامت و تعداد لایه‌ها بستگی دارد. با توجه به مواد انتخابی روش ساخت مناسب برگزیده می‌شود. روش‌های انباشت لایه‌های نازک به‌طور عمده به دو گروه فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. تجربه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که انباشت لایه‌های نازک با استفاده از روش‌های فیزیکی، با کیفیت و یک‌نواختی زیاد و درجه خلوص بیش‌تری همراه است. روش‌های فیزیکی شامل تبخیر حرارتی، تبخیر پرتوالکترونی، تبخیر لیزری، کندوپاش دو قطبی، کندوپاش با منبع RF و... است [۴]. طی دهه گذشته، به پوشش‌های چندلایه‌ای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک، توجه شده است. مواد استفاده شده برای ساخت این پوشش‌ها، فلزات همراه با نیم‌رساناهای اکسیدی و یا دی‌الکتریک‌ها هستند. لایه‌های $\text{ZrO}_2/\text{Ag}/\text{ZrO}_2$ و $\text{ZnS}/\text{Au}/\text{ZnS}$ به‌عنوان الکتروُد شفاف [۵]، [۶]، [۷]، سیستم چندلایه‌ای $\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{ZnS}$ به‌عنوان آند در دیودهای نورگسیل [۸] و لایه‌های $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ به‌عنوان کاتد در سلول‌های فوتوولتائیک آلی طراحی و ساخته شدند [۹]. رساناهای شفاف روی شیشه‌های پنجره، مصرف انرژی را کنترل می‌کنند زیرا حامل‌های بار، تابش مادون قرمز را برای طول موج‌های بلندتر از طول موج پلاسما بازتاب می‌کنند. طول موج پلاسما طول موجی است که در آن عبور از لایه عایق در ناحیه مرئی با بازتاب از لایه فلزی در ناحیه فروسرخ برابر است یعنی جایی که $T=R$ است [۳]. در این مقاله در بین فلزات مختلف از نقره به‌دلیل زیاد بودن حامل‌های بار برای انعکاس پرتوهای فروسرخ به‌عنوان لایه فلزی و از اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) به‌دلیل ضریب شکست بالا، مقاومت شیمیایی عالی، استحکام زیاد، رسانندگی گرمایی کم و مقاوم در برابر سایش به‌عنوان لایه نیم‌رسانای اکسیدی استفاده می‌کنیم. به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی،

پوشش‌هایی را با آرایش سه‌لایه‌ای $ZrO_2/Ag/ZrO_2$ (ZAZ) به‌گونه‌ای طراحی کنیم که هم‌زمان بتواند پرتوهای مرئی را از خود عبور و پرتوهای فروسرخ نزدیک را بازتاب‌دهند. با استفاده از روش شبیه‌سازی، ضخامت بهینه هر یک از لایه‌ها را در این سیستم تعیین و لایه بازتاب‌دهنده گرمایی مناسب به‌منظور استفاده در آب و هوای گرم را طراحی می‌کنیم. لازم به ذکر است که این ساختار برای اولین بار به‌عنوان پوشش بازتاب‌دهنده گرمایی طراحی و ساخته می‌شود.

روش ساخت

زیرلایه‌های شیشه‌ای در استون، اتانول، متانول و دی‌کلرمتان به‌صورت پی‌درپی و در هر کدام از این مواد به‌مدت ده دقیقه در دستگاه آلتراسونیک تمیز شدند. سپس قبل از آن‌که در محفظه خلأ قرار بگیرند، با آب مقطر شستشو و با گاز نیتروژن خشک شدند. لایه‌های اکسید زیرکونیوم با روش اسپاترینگ فرکانس رادیویی (RF) انباشت شدند. در این روش از ماده فلزی Zr با خلوص ۹۹/۵٪ به‌عنوان ماده هدف استفاده شد. گازهای Ar با خلوص ۹۹٪ و گاز اکسیژن با خلوص ۹۹/۵٪ به‌طور جداگانه با کنترل‌کننده فشار جرمی وارد محفظه خلأ شدند. میزان غلظت اکسیژن در گاز اسپاترینگ ۵٪ انتخاب شد. لایه Ag نیز از پودر این ماده با خلوص بالا (۹۹/۵٪) با روش تبخیر حرارتی لایه‌نشانی شد. ساختار چندلایه‌ای بهینه شده حاصل از طراحی ZrO_2 (35 nm) / Ag(13 nm) / ZrO_2 (35 nm) با روش تبخیر حرارتی بدون شکستن خلأ در دمای اتاق به‌صورت پی‌درپی روی زیرلایه‌های شیشه‌ای انباشت شد. قبل از انباشت لایه‌ها، محفظه تا فشار 3×10^{-5} میلی‌بار تخلیه شد. فشار محفظه در حین لایه‌نشانی به‌روش اسپاترینگ 4×10^{-2} میلی‌بار و برای لایه $Ag 8 \times 10^{-5}$ میلی‌بار قرار داشت. میزان انباشت و ضخامت هر یک از لایه‌ها با استفاده از یک نمایش‌گر ضخامت کریستال کوارتز کنترل شدند. مقاومت سطحی این پوشش با گمانه چهارنقطه‌ای و تراگیل و بازتاب اپتیکی این آن‌ها با یک اسپکتروفتومتر دوپرتویی مدل (shimadzu uv-3100) اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

به‌منظور طراحی پوشش‌های بازتاب‌دهنده گرمایی با استفاده از آرایش چندلایه‌ای، از کد Film Wizard استفاده کردیم. در فرآیند طراحی، ضخامت هرلایه به‌عنوان پارامتر طراحی، برای حصول بازتاب و تراگیل مطلوب به‌کار می‌رود. از طرفی، مقاومت سطحی سیستم چندلایه‌ای برای عمل‌کرد مطلوب پوشش‌های بازتاب‌دهنده گرمایی، فاکتور مهمی است. برای این پوشش‌ها مقاومت سطحی کمتر از $30 (\Omega/\square)$ نیاز است [۳]. مقاومت سطحی این پوشش‌ها، از معادله (۱) قابل محاسبه است [۹]، [۱۰]:

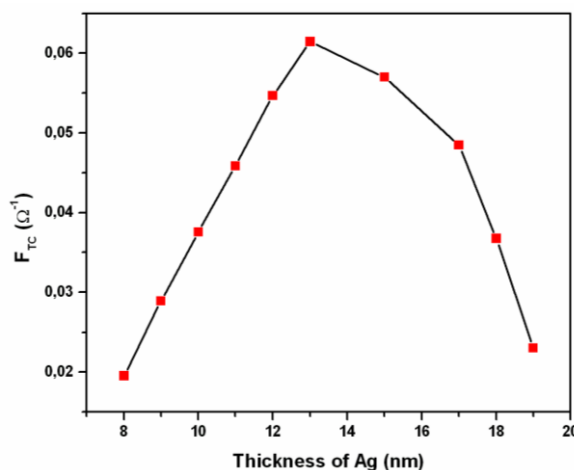
$$R = (1 + 2 \frac{R_{sh}}{Z_0})^{-2} \quad (1)$$

که در آن R بازتاب در ناحیه فروسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی و $Z_0 = 377 \Omega$ امپدانس فضای آزاد است. این رابطه نشان می‌دهد که بازتاب در ناحیه فروسرخ به غلظت الکترون در این پوشش‌ها بستگی دارد. بازتاب در طول موج ۱۷۰۰ nm می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه فروسرخ استفاده شود [۹]. ضریب شایستگی (FTC) شاخص مهمی است

که رابطه بین خواص الکتریکی و اپتیکی پوشش‌های رسانای شفاف را نشان می‌دهد. این کمیت را h_a^1 به صورت معادله (۲) تعریف کرده است [۱۱]:

$$F_{TC} = \frac{T^{10}}{R_{sh}} \quad (2)$$

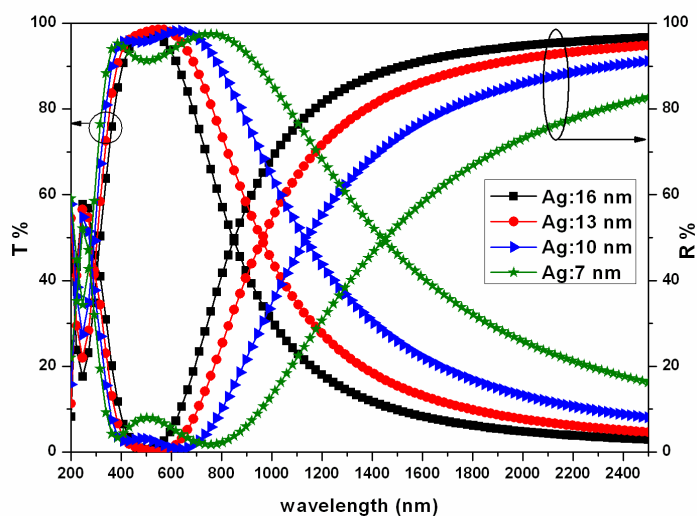
که در آن T تراگسیل پوشش‌های رسانای شفاف در طول موج 550 nm و R_{sh} مقاومت سطحی لایه را نشان می‌دهد. دورانی^۲ نشان داد که در ساختارهای متقارن دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک هنگامی که ضخامت لایه‌های اول و سوم باهم برابر باشند، تراگسیل لایه‌ها ماکزیمم است [۲]. با این فرض، ما ضخامت لایه‌های ZrO_2 را در یک مقدار دل‌خواه (25 nm) ثابت گرفته‌ایم و ضخامت لایه Ag را تا جایی تغییر می‌دهیم که ضریب شایستگی (F_{TC}) این پوشش‌ها به بیش‌ترین مقدار خود برسد. شکل ۱ نمودار F_{TC} محاسبه شده را بر حسب ضخامت لایه Ag نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمودار ضریب شایستگی F_{TC} بر حسب ضخامت لایه نقره

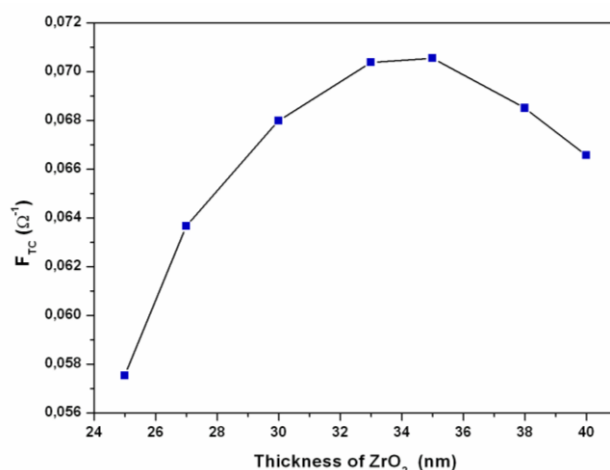
از این نمودار دیده می‌شود که در ساختار فوق بهترین F_{TC} زمانی به دست می‌آید که ضخامت لایه Ag 13 nm باشد. نتایج محاسباتی تراگسیل و بازتاب اپتیکی، ساختار $ZrO_2 (25 \text{ nm})/Ag (x \text{ nm})/ZrO_2 (25 \text{ nm})$ برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag در شکل ۲ نشان داده شده است.

چنان‌که دیده می‌شود، تراگسیل اپتیکی سیستم چندلایه‌ای ZAZ با افزایش ضخامت لایه Ag از ۷ تا 13 nm بهبود می‌یابد و پس از آن با افزایش بیش‌تر ضخامت لایه Ag ، کاهش می‌یابد. رسانایی سیستم چندلایه‌ای اساساً به واسطه لایه فلزی است. لایه همگن و پیوسته Ag دارای جذب کم و رسانایی الکتریکی زیاد است. رفتار الکتریکی لایه Ag به گذار از جزایر مجزای اتم‌های Ag به شکل‌گیری یک لایه پیوسته نسبت داده می‌شود [۱۲]. [۱۳] هم‌چنین گزارش شده است که ضخامت بحرانی لایه Ag برای گذار از جزایر مجزا به پوشش‌های پیوسته معمولاً بین ۱۰ تا 20 nm است [۱۴]، [۱۵]. در این مقاله، مقدار ضخامت بهینه لایه Ag در طراحی سیستم ZAZ، 13 nm است که کاملاً در محدوده گزارش شده است.



شکل ۲: تراگسیل و بازتاب اپتیکی ساختار ZAZ برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag بر حسب طول موج

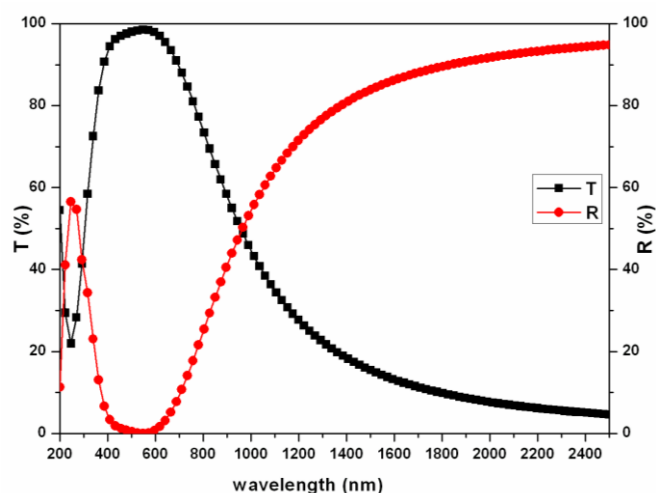
حال ضخامت لایه Ag را در ۱۳ nm ثابت می‌گیریم و ضخامت لایه ZrO_2 را از ۱۰ تا ۱۲۰ nm تغییر می‌دهیم تا بهترین ضریب شایستگی F_{TC} به دست آید. شکل ۳ نمودار محاسبه شده را بر حسب ضخامت‌های مختلف لایه ZrO_2 از ۲۵ تا ۴۰ nm نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌بینیم که ضخامت بهینه لایه ZrO_2 برابر ۳۵ nm است. بنابراین ساختار چندلایه‌ای بهینه شده ZAZ به صورت ZrO_2 (35 nm)/Ag (13 nm)/ ZrO_2 (35 nm) است. بیش‌ترین مقدار F_{TC} به دست آمده در این پژوهش بزرگ‌تر از مقادیر گزارش شده برای برخی ساختارهای مشابه گزارش شده به وسیله محققان دیگر است [۵]، [۸]. میزان تراگسیل و بازتاب لایه بهینه شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



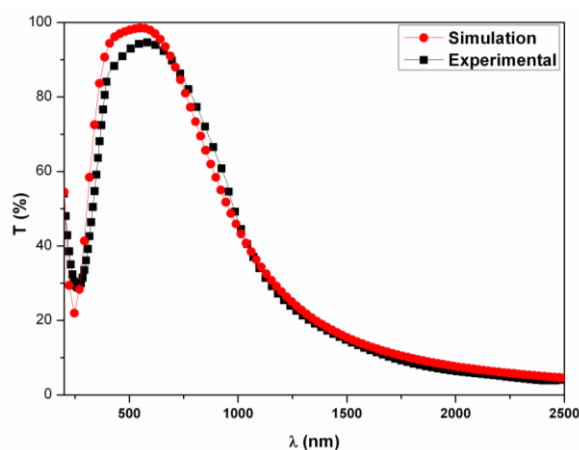
شکل ۳: ضریب شایستگی (F_{TC}) بر حسب ضخامت لایه ZrO_2

چنان‌که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمونه بهینه شده، امواج در ناحیه مرئی را بیش از ۹۳٪ عبور می‌دهد و در محدوده طول موج فروسرخ نزدیک را بیش از ۹۰٪ بازتاب می‌کند. همچنین مقدار تئوری مقاومت سطحی نمونه بهینه شده $12/2 \text{ } (\Omega/\square)$ به دست آمده که مقدار مناسبی برای این پوشش‌ها به حساب می‌آید. حال پس از بهینه‌سازی و

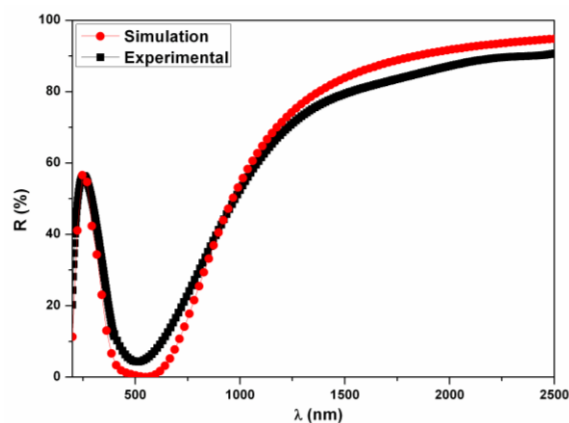
تعیین ضخامت نمونه نهایی، با روش توصیف شده آن را ساختیم. شکل ۶ و ۷ مقایسه میزان تراگسیل و بازتاب نمونه طراحی و ساخته شده با ساختار ZrO_2 (35 nm)/Ag(13 nm)/ ZrO_2 (35 nm) را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تراگسیل و بازتاب سیستم چندلایه‌ای بهینه شده ZrO_2 (35 nm)/Ag(13 nm)/ ZrO_2 (35 nm) بر حسب طول موج



شکل ۶: تراگسیل اپتیکی نمونه بهینه شده و ساخته شده ساختار ZrO_2 (35 nm)/Ag(13 nm)/ ZrO_2 (35 nm)



شکل ۷: بازتاب اپتیکی نمونه بهینه شده و ساخته شده ساختار ZrO_2 (35 nm)/Ag(13 nm)/ ZrO_2 (35 nm)

چنان‌که از شکل‌های ۶ و ۷ پیداست طیف تراگسیل و بازتاب نمونه تجربی با نمونه طراحی شده مطابقت خوبی دارد. مقدار بازتاب در ناحیه فروسرخ بالای ۹۰٪ و عبور در ناحیه مرئی بالای ۸۵٪ می‌رسد. هم‌چنین مقاومت سطحی نمونه ساخته شده $(\Omega/\square)$ ۱۳/۱ به‌دست آمد که نزدیک به مقدار محاسبه شده است و در گستره مقدار مناسب مقاومت سطحی گزارش شده (کم‌تر از $(\Omega/\square)$ ۳۰ مرجع [۳]) برای پوشش‌های بازتاب‌دهنده گرمایی قرار دارد. هم‌چنین مقدار مقاومت سطحی به‌دست آمده در این پژوهش بسیار نزدیک به مقدار مقاومت سطحی برخی ساختارهای چندلایه‌ای مشابه دیگر به‌وسیله سایر محققان است [۵]، [۱۶]. بنابراین، با توجه به خواص الکترواپتیکی به‌دست آمده، این پوشش قابلیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و اتومبیل، در فصل‌های گرم سال را دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ما سیستم سه‌لایه‌ای $ZrO_2/Ag/ZrO_2$ (ZAZ) را به‌منظور بازتاب گرما در ناحیه فروسرخ نزدیک و صرفه‌جویی مصرف انرژی در شرایط آب و هوای گرم، طراحی کردیم. ضخامت بهینه برای لایه میانی Ag، ۱۳ nm و برای لایه ZrO_2 ، ۳۵ nm به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه ساخته شده تراگسیل در ناحیه مرئی ۹۳٪ و بازتاب در محدوده فروسرخ نزدیک، بیش از ۸۵٪ است. مقاومت سطحی این‌گونه پوشش‌ها نیز $(\Omega/\square)$ ۱۳/۱ است که دلالت بر تراکم بالای حامل‌های بار در این سیستم چندلایه‌ای دارد. بنابراین پوشش طراحی شده قابلیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و اتومبیل را در آب و هوای گرم دارد.

قدردانی

این تحقیق با همکاری مرکز پژوهشی نانو فناوری در دانشگاه شهرکرد انجام شده است، از این رو نویسندگان از معاونت پژوهشی و مرکز پژوهشی نانوفناوری دانشگاه شهرکرد به‌دلیل حمایت‌هایشان صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنند.

منابع

1. Hammarberg E., Roos A., Antireflection treatment of low-emitting glazing for energy efficient windows with high visible transmittance, Thin Solid Film, 442 (2003) 222-226.
2. Durrani S. M. A., Khawaja E. E., Al-Shukri A. M., Al-kuhaili M. F., Dielectric/Ag/dielectric coated energy-efficient glass windows for warm climates, EnergyBuildings, 36 (2004) 891-898.
3. Fallah H. R., GhasemiVarnamkhasti M., Vahid M. J., Substrate temperature effect on transparent heat reflecting nanocrystalline ITO films prepared by electron beam evaporation, Renewable Energy, 35 (2010) 1527-1530.
4. Holland L., Vacuum deposition of thin films, Chapman and Hall (1965).
5. Dimova-Malinovska D., Lovchinov K., Petrov M., Karashanova D., Angelov O., Structural, Optical and Electrical Properties of Multilayer Stacks $ZnO:Al/Ag/ZnO:Al$ and $ZrO_2/Ag/ZrO_2$, Energy Procedia, 60 (2014) 143-147.

6. Ghorashi S. M. B., Behjat A., Neghabi M., Mirjalili G., Effects of air annealing on the optical, electrical, and structural properties of nanostructured ZnS/Au/ZnS films, *Applied Surface Science*, 257 (2010) 1602-1606.
۷. قرشی، سیدمحمدباقر؛ بهجت، عباس؛ نقابی، مینا؛ میرجلیلی، غضنفر؛ شبیه‌سازی و ساخت لایه‌های نانوساختار ZnS/Metal/ZnS و بررسی خواص ساختاری و اپتیکی آن‌ها، *مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران* (۱۳۹۱) ۱۶۹-۱۷۸.
8. Kermani H., Fallah H. R., Hajimahmoodzadeh M., Basri N., Design and construction of an improved nanometric ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS transparent conductive electrode and investigating the effect of annealing on its characteristics, *Thin Solid Films*, 539 (2013) 222-225.
9. Varnamkhasti M. Gh., Shahriari E., Design and fabrication of nanometric TiO₂/Ag/TiO₂/Ag/TiO₂ transparent conductive electrode for inverted organic photovoltaic cells application, *Superlattices and Microstructures*, 69 (2014) 231-238.
10. Zhao P., Su W., Wang R., Xu X., Zhang F., Properties of thin silver films with different thickness, *Physica E*, 41 (2009) 387-390.
11. Haacke G., New figure of merit for transparent conductors, *Journal of Applied Physics*, 47 (1978) 4086-4089.
12. Neghabi M., Behjat A., Ghorashi S. M. B., Salehi S. M. A., The effect of annealing on structural, electrical and optical properties of nanostructured ZnS/Ag/ZnS films, *Thin Solid Films*, 519 (2011) 5662-5666.
13. GhasemiVarnamkhasti M., Fallah H. R., Mostajaboddavati M., Hassanzadeh A., Influence of Ag thickness on electrical, optical and structural properties of nanocrystalline MoO₃/Ag/ITO multilayer for optoelectronic applications, *Vacuum*, 86 (2012) 1318-1322.
14. Al-Kuhaili M. F., Al-Aswad A. H., Durrani S. M. A., Bakhtiari I. A., Transparent heat mirrors based on tungsten oxide–silver multilayer structures, *Solar Energy*, 83 (2009) 1571-1577.
15. Jeong J. A., Kim H. K., Low resistance and highly transparent ITO-Ag-ITO multilayer electrode using surface plasmon resonance of Ag layer for bulk-heterojunction organic solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93 (2009) 1801-1809.
16. Zadsar M., Fallah H. R., HajiMahmoodzadeh M., Tabatabaei S. V., The effect of Ag layer thickness on the properties of WO₃/Ag/MoO₃ multilayer films as anode in organic light emitting diodes, *Journal of Luminescence*, 132 (2012) 992-997.