بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و ساخت پوشش‌های اپتیکی بازتاب‌دهنده گرمایی $MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3$ برای آب‌وهوای گرم

محسن قاسمی ورنامخواستی[۲،۱]، اسماعیل شهریاری[۲،۱] ، سحر اکبری[۱،*]
[۱]گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
[۲] مرکز پژوهشی فناوری نانو، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

چکیده - در این مقاله، به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها، پوشش نانومتری چندلایه‌ای با آرایش $MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3$ را طراحی کردیم و به روش تبخیر حرارتی ساختیم. در فرایند طراحی با استفاده از نرم افزار *Film wizard* ضخامت بهینه لایه‌های Ag و MoO_3 به ترتیب ۹ و ۳۲ nm به‌دست آمد. خواص الکتریکی و اپتیکی از جمله میزان تراگسیل و بازتاب اپتیکی، ضریب شایستگی و مقاومت سطحی این پوشش در نمونه طراحی و ساخته شده باهم مقایسه شدند و نشان دادیم که هم‌خوانی خوبی با هم دارند. میزان عبور و بازتاب اپتیکی این پوشش نشان‌دهنده کارکرد مناسب آن برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در آب‌وهوای گرم می‌باشد.

کلید واژه- تراگسیل و بازتاب اپتیکی، ضریب شایستگی، مقاومت سطحی، بازتاب دهنده گرمایی، طول موج پلاسما.

Design and fabrication of $MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3$ heat reflecting optical films for warm climate

Mohsen Ghasemi Varnamkhasti[1,2], Esmaeil Shahriari[1,2], Sahar Akbari[1]

[1]Department of Physics, Faculty of Sciences, Shahrekord University, P.O. Box 115, Shahrekord, Iran

[2]Nanotechnology Research Center, Shahrekord University, 8818634141 Shahrekord, Iran

Abstract- In this paper, in order to optimization energy consumption in buildings, we have designed $MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3$ multilayer nanometric coatings and fabricated by thermal evaporation technique. In the design process, by using film wizard code the optimum thickness of Ag and MoO_3 layers were obtained 9 and 32 nm, respectively. Eelectrical and optical properties of this coating such as the optical transmittance, reflectance, figure of merit and sheet resistance of designed and fabricated sample were compared. We have shown that the results are in good agreement. The optical transmission and reflection of this coating demonstrate that this structure has good performance for optimization energy consumption in warm climate.

Keywords: optical transmittance and reflectance, figure of merit, sheet resistance, plasma wavelength

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

۱-مقدمه

طی چند دهه گذشته به معماری ساختمان‌ها به ویژه پنجره‌ها توجه ویژه‌ای شده است. فضاهای بسته با پنجره-ها یا ابزارهایی مثل سلول خورشیدی که در معرض تابش خورشید هستند به‌طور چشمگیری مورد توجه‌اند. یکی از طرح‌های انجام شده در این زمینه ایجاد پوشش‌های نازک و شفافی است که عملکرد گرمایی پنجره‌های شیشه‌ای را بهبود می‌بخشد. برای جلوگیری از ورود گرما به محیط از راه پنجره نیازمند موادی هستیم که امواج IR (امواج حرارتی) را از سطح شیشه بازتاب کند. کارایی پوشش‌های پنجره گرمایی به کاربرد آن‌ها در شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد. برای توصیف پوشش‌های پنجره گرمایی دو حالت را بررسی می‌کنیم:

حالت اول: در آب‌وهوای سرد می‌خواهیم پنجره‌ای داشته باشیم که برای تابش خورشید شفاف باشد تا بتوان حداکثر بهره را از گرمای خورشیدی گرفت و هم‌چنین گسیل گرما از داخل به خارج کم باشد. بنابراین پوششی با تراگسیل بالا در $\lambda\langle 3\mu m$ و بازتاب ماکزیمم در $\lambda\rangle 3\mu m$ را جست‌وجو می‌کنیم.

حالت دوم: در آب‌وهوای گرم وضعیت کاملاً متفاوت است. در اینجا انرژی خورشید که از پنجره وارد می‌شود باعث بالا رفتن دمای اتاق می‌شود بنابراین در این مورد به پوششی نیاز داریم که شفافیت بالایی در ناحیه مرئی $\lambda\langle 0.7\mu m$ داشته باشد، در حالی که نور IR خورشید $0.7\mu m\langle\lambda\langle 3\mu m$ را بازتاب کند. به چنین پوششی «پوشش کنترل خورشیدی» گفته می‌شود[۱]. وضعیت بین این دو حالت برای آب‌وهوای معتدل بکار می‌رود.

برای ساخت این پوشش‌ها بسته به نوع آب‌وهوا مواد مناسب انتخاب و تعداد لایه‌های آن تعیین می‌شود. سپس با توجه به مواد انتخابی روش ساخت مناسب برگزیده می-شود. روش‌های انباشت لایه‌های نازک به‌طور عمده به دو گروه فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. تجربیات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که انباشت لایه‌های نازک با استفاده از روش‌های فیزیکی، با کیفیت و یکنواختی بالا و درجه خلوص بیشتری همراه است[۲]. روش‌های فیزیکی شامل تبخیر حرارتی، تبخیر پرتو الکترونی، تبخیر لیزری، کندوپاش دو قطبی، کندوپاش با منبع RF و ... می باشد [۲و۳]. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که ساختارهای چندلایه‌ای نسبت به پوشش‌های تک لایه‌ای خواص بازتاب کنندگی بهتری از خود نشان می‌دهند. مواد مورد استفاده برای ساخت این پوشش‌ها، فلزات همراه با نیم-رساناهای اکسیدی و یا دی‌الکتریک‌ها هستند. رساناهای شفاف بر روی شیشه‌های پنجره، مصرف انرژی را کنترل می کنند زیرا الکترون‌های آزاد، 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 [۴]. در این پوشش‌ها با افزایش تعداد حامل بار و افزایش رسانندگی در لایه های نازک اپتیکی ، میزان بازتاب امواج فروسرخ نزدیک بیشتر می‌شود; بنابراین در بین فلزات مختلف، از نقره به‌دلیل خواص اپتیکی مناسب و بالا بودن حامل‌های بار برای انعکاس پرتوهای فروسرخ به‌عنوان لایه فلزی و از اکسید مولیبدن به‌دلیل پایداری و مقاومت شیمیایی بالا به‌عنوان لایه دی‌الکتریک استفاده می‌کنیم. در این مقاله ما پوششی با آرایش $MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3$ را طراحی کرده و به روش تبخیر حرارتی می‌سازیم و خواص الکتریکی و اپتیکی آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. لازم به‌ذکر است که این ساختار برای اولین بار به‌عنوان پوشش بازتاب دهنده گرمایی طراحی می‌شود.

۲- طراحی و شبیه‌سازی

به‌منظور طراحی پوشش بازتاب دهنده گرمایی با استفاده از آرایش چند لایه‌ای از کد Film wizard استفاده کرده-ایم. یکی از پارامترهای مهم برای بهینه کردن خواصی مانند تراگسیل بالا در ناحیه مرئی و بازتاب بالا در ناحیه فروسرخ ضخامت لایه‌ها می‌باشد [۵]، که ما به‌عنوان پارامتر طراحی در نظر گرفته‌ایم. از طرفی برای عملکرد مطلوب این پوشش‌ها، مقاومت سطحی و ضریب شایستگی فاکتورهای مهمی هستند که به‌ترتیب از معادلات زیر قابل محاسبه هستند:

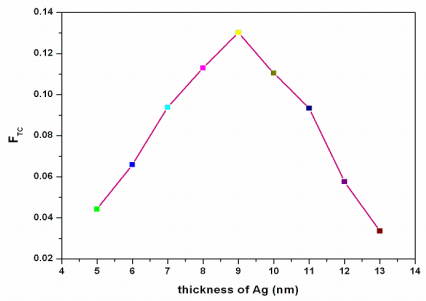
$$R = (1 + 2\,{R_{sh}}/{Z_0})^{-2} \qquad (1)$$

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

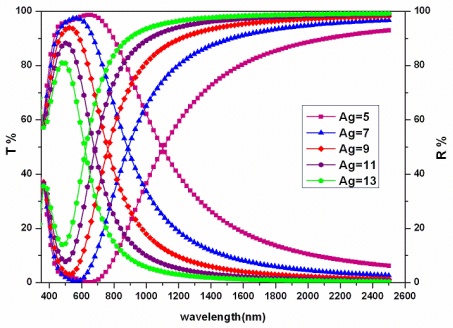
به‌طوریکه R بازتاب در ناحیه فروسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی، Z_0=۳۷۷ Ω امپدانس فضای آزاد، F_{TC} ضریب

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

شایستگی و T تراگسیل پوشش‌های رسانای شفاف در طول موج ۵۵۰ nm است. بازتاب در طول موج ۱۷۰۰ nm می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه فروسرخ استفاده شود [۶]. برای پوشش‌های بازتاب-دهنده گرمایی مقاومت سطحی کمتر از (Ω/□) ۳۰ نیاز است [۵]. ضریب شایستگی شاخص مهمی است که رابطه بین خواص الکتریکی و اپتیکی پوشش‌های رسانای شفاف را نشان می‌دهد که هرچقدر F_{TC} بزرگ‌تر باشد، ماده خواص اپتیکی بهتری از خود نشان می‌دهد [۷]. برای طراحی این پوشش، ما ضخامت لایه‌های MoO_3 را در یک مقدار دلخواه (۳۵ nm) ثابت گرفته‌ایم و ضخامت لایه Ag را آنقدر تغییر می‌دهیم که ضریب شایستگی این پوشش‌ها به ماکزیمم مقدار خود برسد. شکل ۱ نمودار F_{TC} محاسبه شده را برحسب ضخامت لایه Ag نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، بهترین F_{TC} زمانی به‌دست می‌آید که ضخامت لایه Ag، ۹ nm باشد.

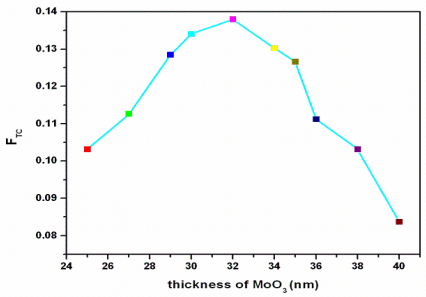


شکل ۱: نمودار ضریب شایستگی برحسب ضخامت لایه Ag



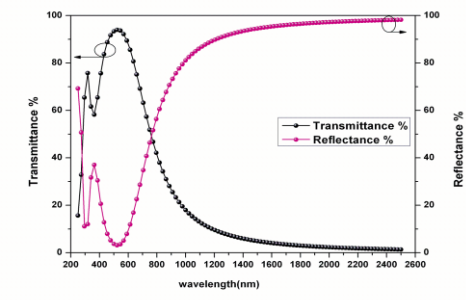
شکل ۲: تراگسیل و بازتاب اپتیکی ساختار $MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3$ برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag برحسب طول موج

نتایج محاسباتی تراگسیل و بازتاب اپتیکی، ساختار **MoO_3(35)/Ag(X nm)/MoO_3(35)/Ag(X nm)/MoO_3(35)** برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag در شکل۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تراگسیل اپتیکی این سیستم چندلایه‌ای با افزایش ضخامت لایه Ag از ۵ تا ۹ nm بهبود می‌یابد و از آن پس با افزایش بیشتر ضخامت لایه Ag، کاهش می‌یابد. حال ضخامت لایه Ag را در ۹ nm ثابت می‌گیریم و ضخامت لایه‌های MoO_3 را از ۲۵ تا ۴۰ nm تغییر می‌دهیم تا به ضخامت بهینه برسیم. شکل۳ نمودار F_{TC} محاسبه شده را برحسب ضخامت لایه MoO_3 نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست ضخامت بهینه برای MoO_3 برابر ۳۲ nm می‌باشد.



شکل ۳: نمودار ضریب شایستگی برحسب ضخامت لایه MoO_3

بنابراین طراحی ساختار چندلایه‌ای بهینه شده به‌صورت MoO_3(32 nm)/Ag(9 nm)/MoO_3(32 nm)/Ag(9 nm)/MoO_3(32 nm) می‌باشد که میزان تراگسیل و بازتاب لایه بهینه شده در شکل۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: تراگسیل و بازتاب اپتیکی سیستم چندلایه‌ای بهینه شده MoO_3(32nm)/Ag(9nm)/MoO_3(32nm)/Ag(9nm)/MoO_3(32nm) برحسب طول موج

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان عبور درناحیه مرئی و بازتاب در ناحیه فروسرخ بالای ۹۰٪ است که میزان خوبی را نشان می‌دهد. مقاومت سطحی نمونه بهینه شده (Ω/□) ۳/۶ به‌دست آمده که مقدار مناسبی برای این پوشش‌ها به‌حساب می‌آید. با توجه به این‌که طول موج

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

پلاسما در ۸۰۰ nm رخ داده است، این ساختار برای آب-وهوای گرم مناسب می‌باشد.

۳-روش ساخت

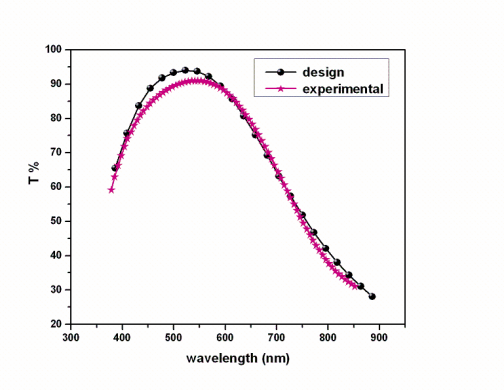
زیرلایه‌های شیشه‌ای به‌صورت پی‌درپی در استون، اتانول، متانول و دی‌کلرمتان به‌مدت ده دقیقه تمیز می‌شوند. سپس قبل از آن‌که درمحفظه خلأ قرار بگیرند، با آب مقطر شستشو و با گاز نیتروژن خشک می‌شوند. پودر Ag و MoO_3 با خلوص بالا (بالای ۹۹٪) به‌عنوان مواد منبع استفاده می‌شوند. ساختار چندلایه‌ای بهینه‌شده MoO_3(32nm)/Ag(9nm)/MoO_3(32nm)/Ag(9nm)/MoO_3(32nm)(با روش تبخیر حرارتی بدون شکستن خلأ در دمای اتاق به‌صورت پی‌درپی روی زیرلایه‌های شیشه‌ای انباشت می‌شوند. قبل از انباشت لایه‌ها، محفظه در ۳×۱۰^{-۵} میلی بار تخلیه شده است. میزان انباشت و ضخامت هریک از لایه‌ها با استفاده از یک نمایشگر ضخامت کریستال کوارتز کنترل می‌شوند. مقاومت سطحی این پوشش با گمانه چهارنقطه‌ای و تراگسیل و بازتاب اپتیکی این پوشش‌ها با یک اسپکتروفتومتر دوپرتویی (shimadzu uv-3100) اندازه‌گیری شد. در نهایت برای شفاف کردن این پوشش‌ها در کوره تحت دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در هوا حرارت دادیم.

۴- مقایسه و بحث در نتایج

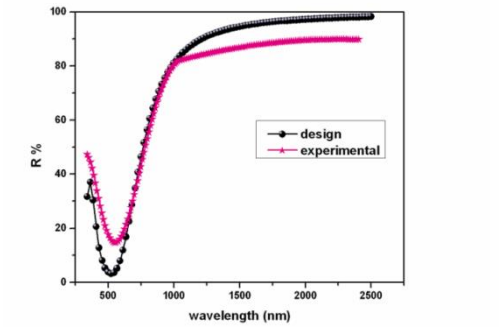
میزان تراگسیل و بازتاب نمونه طراحی و ساخته شده ساختار MoO_3/Ag/MoO_3/Ag/MoO_3 در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل، می‌بینیم که تراگسیل و بازتاب اپتیکی نمونه ساخته شده مطابقت خوبی با نمونه طراحی شده دارد. در نمونه ساخته شده میزان عبور در ناحیه مرئی بیش از ٪۸۵ و بازتاب در ناحیه فروسرخ بیش از ٪۹۰ می‌باشد و مقاومت سطحی (□/Ω)۴/۸ به‌دست آمد که تطابق خوبی با مقدار محاسبه شده دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ما پوششی با ساختار MoO_3(32nm)/Ag(9nm)/MoO_3(32nm)/Ag(9nm)/MoO_3(32nm) را ابتدا طراحی کردیم و سپس ساختیم و نشان دادیم که پارامترهای اپتیکی در نمونه تئوری و تجربی هم‌خوانی خوبی باهم دارند. این پوشش برای اولین بار به‌منظور صرفه‌جویی مصرف انرژی در آب‌وهوای گرم طراحی و ساخته شده است.



شکل ۵: تراگسیل اپتیکی نمونه بهینه شده و ساخته شده



شکل ۶: بازتاب اپتیکی نمونه بهینه شده و ساخته شده

سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت تحصیلات تکمیلی و پژوهشکده نانو دانشگاه شهرکرد برای حمایت‌های انجام شده تشکر می-کنند.

مراجع

[1] Hamberg I., Granqvist C. G., Evaporated Sn-doped In2O3 films: Basic optical properties and applications to energy efficient windows, **J. Appl. Phys**. 60 (11), R123, (1986).
[2] Holland L., *Vacuum deposition of thin films*, **Chapman AND Hall**, 1965.
[3] Reichelt K., Jiang X., *The preparation of thin films by physical vapour deposition methods*, **Thin Solid Films**, 191, PP., (1990) 91-126.
[4] Ederth J., Johnsson P., Niklasson G.A., Hoel A., Hultaker A., Heszler P., *Electrical and optical properties of thin films consisting of tin-doped indium oxide nanoparticles*, **Physical Review B**, 68 (2003) 155410-1–155410-10.
[5] Fallah H. R., Ghasemi Varnamkhasti 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.
[6] Lio X., Cai X., Mao J., *The design of ZnS/Ag/ZnS transparent conductive multilayer film*, **Thin Solid Films** 441 (2003) 200-206.
[7] Haack G., *New figure of merit for transparent conductors*, **Journal Of Applied Physics**, 47 (1978) 4086-4089.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]