

اثر لایه نازک نقره در نانوساختار $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ و استفاده از آن به عنوان نانوپوشش کم‌گسیل بر روی شیشه‌های ساختمانی با هدف ذخیره‌سازی انرژی

مینا ربیع زاده و محمد حسین احسانی*

دانشکده فیزیک دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده: این مطالعه، اثر تغییر ضخامت نقره به عنوان لایه میانی در ساختارهای سه لایه‌ای $\text{SnO}_2(100\text{nm})/\text{Ag}(t)/\text{SnO}_2(100\text{nm})$ را که بر زیرلایه شیشه و با استفاده از روش زاویه دید (GLAD) و به روش RF/DC مگنترون اسپاترینگ لایه‌نشانی شده‌اند را، مورد بررسی قرار می‌دهد. ویژگی‌های نوری، الکتریکی و گرمایی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ساختارهای سه لایه‌ای $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ ، شرایط لازم و مطلوبی برای کاربرد به عنوان پوشش‌های عایق گرما و ذخیره‌کننده انرژی بر پنجره‌های ساختمانی را دارند. به طوریکه با در نظر گرفتن ضخامت ۳۰ نانومتر برای نقره و ۱۰۰ نانومتر برای SnO_2 ، مقادیر گسیلندگی، مقادیر U و G، مینیمم و به ترتیب برابر ۰/۰۷، ۰/۴۴ و ۰/۴۸۱ $\text{W/m}^2\cdot\text{k}$ و ضخامت‌های ۲۵ و ۳۰ نانومتر ماکسیمم و به ترتیب برابر ۷۱/۱۸ و ۶۲/۳ درصد است.

واژگان کلیدی: ساختارهای سه لایه‌ای $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ ، مگنترون اسپاترینگ، ساختارهای کم‌گسیل

*Ehsani@semnan.ac.ir

فلزی را می‌توان با عناصر خارجی آرایش کرد به طوری که آنها رسانایی الکتریکی قابل مقایسه با فلزات را نشان می‌دهند. این اکسیدهای فلزی افزون بر این که هدایت الکتریکی مطلوبی دارند، به نور مرئی اجازه عبور با جذب ناچیز را می‌دهند. لایه‌های نازک اکسیدهای فلزی شفاف مانند ITO، SnO_2 و ZnO در بسیاری از محصولات الکترونیکی مصرفی، به ویژه در نمایشگرهای صفحه تخت، پنل‌های صفحه لمسی، دستگاه‌های فتوولتائیک، پنجره‌های کم‌گسیل و دستگاه‌های ذخیره‌کننده انرژی کاربرد دارند [۳۱]. به طور خاص، اکسید قلع ایندیم به دلیل خواص الکتریکی برجسته ($\sim 1 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$) و نوری ($\sim 90\%$ در ناحیه مرئی) به طور گسترده به عنوان اکسید رسانای

۱- مقدمه

نیم‌رساناهای اکسید فلزی، دسته‌ای از مواد هستند که به دلیل گاف انرژی قابل تنظیم، پایداری شیمیایی و مکانیکی عالی و ... در زندگی ما کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند. با پیشرفت فناوری، امکان تولید اکسیدهای فلزی به شکل لایه‌های نازک، نانوذرات، نانوسیم‌ها و نانومیله‌ها برای کاربرد در حسگرها، دستگاه‌های اپتوالکترونیک، کاتالیست‌ها، دستگاه‌های ذخیره‌سازی و تولید انرژی افزایش یافته است [۱-۳]. کاربرد جالب اکسیدهای فلزی نیم‌رسانا از این واقعیت ناشی می‌شود که برخی از اکسیدهای

مطالعات، مواد اکسیدی، از جمله AZO, ZnO, SnO₂, ITO, GZO, ZnS, Nb₂O₅, MoO₃, WO₃, TiO₂, ZnS, Nb₂O₅, MoO₃, WO₃, TiO₂, Au, Cu, Ag, Ni, Pt و Al نیز در لایه میانی استفاده شده اند [۱۰-۲۰]. SnO₂ از نظر حرارتی پایدار، غیر سمی، ارزان و فراوان است [۲۱]. افزودن بر این، فیلم SnO₂ دارای شفافیت بالایی در محدوده طول موج ۳۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر است. پوشش‌های SnO₂ پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر خوردگی عالی را در هر دو محیط اسیدی و قلیایی نشان می‌دهند [۲۲] و از نظر شیمیایی و حرارتی تحت فرایندهای پلاسمای هیدروژنی که معمولاً برای تولید سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود، پایدار است.

در لایه میانی، طلا، نقره و مس به صورت عملی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقایسه با نقره، طلا گران‌تر است و مس به اکسیژن حساس‌تر است. بنابراین در این مطالعه ساختارهای سه لایه‌ای SnO₂/Ag/SnO₂ را مورد مطالعه قرار دادیم. چندین مزیت از فیلم‌های سه لایه رسانای شفاف، با ضخامت به نسبت کمتر، نسبت به فیلم‌های اکسید رسانای شفاف تک لایه گزارش شده است [۲۳]. خواص نوری و الکتریکی ساختارهای سه لایه به طور قابل توجهی به ضخامت و شرایط لایه‌نشانی Ag بستگی دارد. لایه Ag برای عبور بالا و مقاومت کم، باید نازک، یکنواخت و پیوسته باشد. اکسیدهای رسانای شفاف سه لایه‌ای مانند SnO₂/Ag/SnO₂ دارای شفافیت نوری بالا در ناحیه مرئی و بازتاب بالا در ناحیه فروسرخ هستند. خواصی که آنها را برای پوشش محافظ فروسرخ مناسب می‌کند. در صنعت ساختمان‌سازی مهندسان معماری برای صرفه‌جویی در انرژی به دنبال راهکارهای متفاوت برای عایق‌بندی بهتر دیوارها و پنجره‌ها ساختمانی هستند و پنجره‌ها بیشترین مکان اتلاف انرژی در زمستان و تابستان به شمار می‌آیند. از این رو اخیراً محققان از پوشش‌های لایه نازک بر روی شیشه‌های ساختمانی برای جلوگیری از عبور گرما از پنجره‌ها استفاده می‌کنند [۲۴-۲۶]. هرچه بازتاب نور در ناحیه فروسرخ و فرابنفش و عبور نور در ناحیه مرئی بیشتر باشد، پوشش‌ها برای عایق‌بندی، مطلوب‌تر خواهند بود. برای بررسی کمی این ویژگی، از پارامترهای گسیلندگی، U-Value و G-Value استفاده می‌شود.

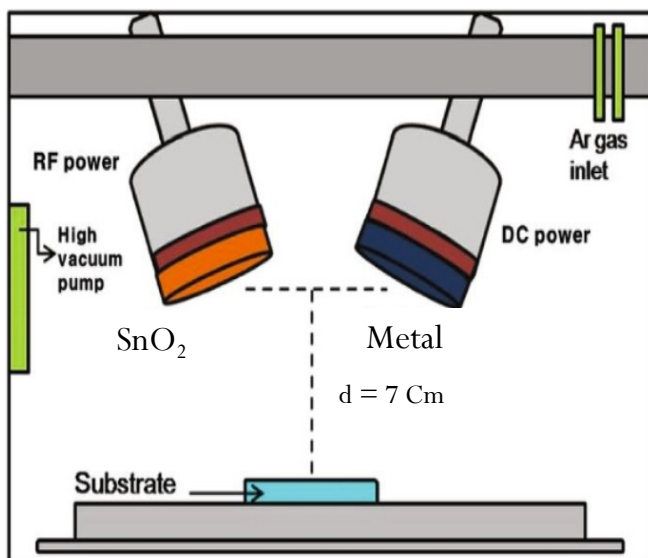
شفاف استفاده می‌شود [۴]. با این حال، اکسید قلع ایندیم به دلیل عرضه محدود ایندیم و افزایش تقاضا برای اکسید قلع ایندیم به طور پیوسته در حال افزایش قیمت است. افزودن بر این، به دلیل شکنندگی مکانیکی ضعیف آن، استفاده از فیلم اکسید قلع ایندیم که بر روی بسترهای پلیمری به عنوان اکسیدهای رسانای شفاف انعطاف‌پذیر لایه نشانی می‌شود، دشوار است. فیلم‌های اکسید قلع ایندیم بی‌شکل لایه‌نشانی شده در دمای اتاق به دلیل کاهش فعال‌سازی ناخالصی، هدایت الکتریکی ضعیفی دارند. الکترودهای شفاف انعطاف‌پذیر، از جمله گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های فلزی، لایه‌های نازک فلزی و شبکه‌های فلزی طرح‌دار، به‌طور گسترده به منظور حل این مسائل کلیدی اکسید قلع ایندیم اجرا شده‌اند [۴].

با این حال، موارد ذکر شده در بالا در جایگزینی اکسید قلع ایندیم مشکلاتی دارند. به عنوان مثال، بهبود رسانایی نانولوله‌های کربنی یا تولید گرافن در مقیاس بزرگ برای کاربردهای متفاوت دشوار است و نانوسیم‌های فلزی، لایه‌های فلزی نازک و شبکه‌های فلزی طرح‌دار دارای زبری سطح بالا، پایداری شیمیایی ضعیف و سطح تماس کوچک هستند. اخیراً، ساختارهای چندلایه اکسید/فلز/اکسید توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، زیرا می‌توانند ویژگی‌های اپتوالکتریکی فیلم‌های اکسید قلع ایندیم آمورف را بدون نیاز به گرمایش زیرلایه در طول لایه‌نشانی، بهبود بخشند. این ساختارها ضخامت کلی کمتری نسبت به یک فیلم اکسید رسانای شفاف تک لایه دارند (۵). همچنین دوام ساختاری الکترودهای شفاف را به دلیل شکل‌پذیری لایه فلزی تعبیه شده افزایش می‌دهند [۶]. افزودن بر این، خواص نوری یک ساختار چند لایه اکسید/فلز/اکسید را می‌توان با اثر ضد انعکاس ساختار اکسید/فلز/اکسید و اثر پلاسمون سطحی لایه فلز Ag ساندویچ شده بهبود بخشید [۷-۹]. لایه نازک Ag تعبیه شده بین لایه‌های نازک اکسید بالا و پایین در ساختار چند لایه اکسید/فلز/اکسید می‌تواند از ویژگی‌های الکتریکی و پایداری در برابر تخریب ناشی از اکسایش فلز در یک محیط شیمیایی محافظت کند [۴]. چندین محقق گزارش کرده‌اند که الکترودهای رسانای شفاف هیبریدی اکسید/فلز/اکسید دارای رسانایی الکتریکی و شفافیت نوری بهتری نسبت به فیلم‌های اکسید قلع ایندیم منفرد با ضخامت یکسان در دمای اتاق هستند. در این

در $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ با تغییر ضخامت نقره بررسی شد [۲۹]. در این مطالعه افزون بر بیان تغییرات خواص نوری و الکتریکی با تغییر ضخامت نقره، خواص گرمایی آنها و همچنین، با استفاده از نرم افزار ویندو به عنوان پوشش عایق حرارت و بازتابنده امواج فرورسرخ، شبیه سازی و مورد بحث قرار گرفتند.

۲- بخش تجربی

لایه نازک SnO_2 با استفاده از کندوپاش فرکانس رادیویی و با به کارگیری از روش زاویه دید با ضخامت ۱۰۰ نانومتر بر روی بستر شیشه‌ای لایه‌نشانی شده است. فرایند لایه‌نشانی با هدف SnO_2 (خریداری شده از Kurt Lesker با خلوص ۹۹/۹۹٪) با قطر، ضخامت و توان RF به ترتیب ۲ اینچ و ۶ میلی متر و ۸۰ وات آغاز شد. فاصله زیرلایه و هدف ۷۵ میلی متر در نظر گرفته شده و نسبت به محور معمولی هدف، ۷۵ درجه چرخیده است. لایه نازک Ag در زاویه شار معمولی در ضخامت‌های متفاوت ۸، ۱۵، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ نانومتر با استفاده از توان DC لایه‌نشانی شده و به ترتیب S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 و S_5 نامگذاری شده‌اند. پیش از هر لایه-نشانی، فشار محفظه تا مرتبه 2×10^{-3} تور کاهش پیدا کرده است و جهت پاکسازی سطح تارگت‌های نقره و SnO_2 ، پیش از لایه-نشانی اصلی، به مدت ۵ دقیقه پراکنده می‌شوند. طرح‌واره از فرایند لایه‌نشانی نمونه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: طرح‌واره از فرآیند لایه‌نشانی نمونه‌های $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$.

انرژی از سطح یک ماده می‌تواند عبور، جذب یا تابش داشته باشد. به توانایی ماده برای تابش انرژی گسیلندگی می‌گویند و مواد با گسیل پایین دارای شرایط مطلوب‌تری برای استفاده به عنوان پوشش شیشه‌های ساختمانی هستند. محصولات ساختمانی، معمولاً گرما را به شکل انرژی امواج مادون قرمز، ساطع یا تابش می‌کنند. کاهش انتشار حرارت محصول می‌تواند خواص عایق بودن آن را تا حد زیادی بهبود بخشد. شیشه استاندارد دارای تابش ۸۴٪ در طول موج بلند طیف است، به این معنی که ۸۴ درصد انرژی ممکن را در دمای خود ساطع می‌کند. همچنین به این معنی است که برای تابش امواج بلند (جایی که هیچ عبوری وجود ندارد) که به سطح شیشه برخورد می‌کند، ۸۴ درصد جذب شده و تنها ۱۶ درصد منعکس می‌شود. در مقایسه، پوشش‌های شیشه‌ای با گسیلندگی پایین، انتشار کمتر از ۲٪ دارند. این شیشه تنها ۲۰ درصد از انرژی ممکن را در دمای خود ساطع می‌کند و بنابراین، ۸۰ درصد از امواج مادون قرمز را منعکس می‌کند. فناوری‌های «پنجره هوشمند» بیش از یک دهه به صورت تجاری در دسترس قرار گرفته‌اند، که با قابلیت‌های غیرفعال ناشی از استفاده از پوشش‌های کم گسیل که تشعشعات فرابنفش و یا فرورسرخ را کاهش می‌دهند، شروع شده است [۲۷-۲۸].

ساختمان‌های دارای آب و هوای گرمسیری، تابش خورشیدی فراوان و گرمای بیش از حد در طول سال دریافت می‌کنند. خنک‌سازی غیرفعال را می‌توان با یک پوشش محافظ مادون قرمز با مسدود کردن تابش فرورسرخ بدست آورد.

در این مطالعه، به تاثیر ضخامت نقره در لایه میانی نمونه‌ها که با روش زاویه دید و با استفاده از دستگاه مگنترون اسپاترینگ لایه-نشانی شده است، بر روی ویژگی‌های نوری، الکتریکی و گرمایی نمونه‌ها با در نظر گرفتن ضخامت‌های ۸، ۱۵، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ نانومتر برای نقره و ۱۰۰ نانومتر برای SnO_2 در لایه بالا و پایین ساختار پرداختیم. تاکنون مطالعات زیادی بر روی خواص نوری و الکتریکی این نوع ساختار توسط پژوهشگران صورت گرفته است. اما تا به امروز این مواد به عنوان عایق حرارت و بازتابنده امواج فرورسرخ و کاربرد آنها در ساخت پوشش‌های عایق گرما در پنجره‌های ساختمانی مورد مطالعه و تحقیق قرار نگرفته است. در مطالعه قبلی ما، خواص نوری و الکتریکی ساختار

لایه Ag وجود داشته باشد و این امر را می‌توان به روش زاویه دید و ایجاد تخلخل بیشتر در لایه زیرین SnO₂ نسبت داد. مقاومت سطحی کلی ساختارهای چندلایه را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۳۴]:

$$\frac{1}{R_{sh}} = \frac{1}{R_{SnO_2}} + \frac{1}{R_{Ag}} + \frac{1}{R_{SnO_2}} \quad (1)$$

با توجه به این که مقاومت SnO₂ نسبت به نقره بسیار زیاد است، مقاومت کل وابسته به مقاومت نقره است. شکل ۲ مقاومت سطحی نمونه‌ها را برحسب ضخامت نقره نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، مقاومت نمونه S₁ دارای مقدار ۲/۲×۱۰^۶ Ω/sq است که با افزایش ضخامت نقره به ۱۵، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ نانومتر، به ترتیب مقاومت به ۳۱/۵ Ω/sq، ۷/۵۳ Ω/sq، ۵/۸۴ Ω/sq و ۸/۴۳ Ω/sq کاهش یافته است. همان طور که ذکر شد، علت مقاومت بالای نمونه S₁ می‌تواند وجود جزایر ناپیوسته نقره به دلیل پیروی از مدل والمر ویر در هنگام تشکیل باشد و با افزایش ضخامت نقره این ناپیوستگی‌ها کاهش و در نهایت، یک لایه پیوسته از نقره تشکیل می‌شود که در نتیجه آن، مقاومت کاهش زیادی خواهد داشت. در مقاله شهیدی و همکارانش، مقدار مقاومت سطحی نمونه SnO₂/Ag/SnO₂ با در نظر گرفتن ضخامت ۲۵ نانومتر برای نقره و لایه نشانی شده توسط روش زاویه دید، برابر ۵/۱۹ Ω/sq بدست آمد که با نتایج ما مطابقت دارد [۳۵].

۳-۲- محاسبه ضرایب بازتاب و عبور

با استفاده از داده‌های حاصل از طیف عبور و بازتاب نمونه‌های SnO₂/Ag/SnO₂ با ضخامت‌های متفاوت نقره در مقاله قبلی ما [۲۹]، ضرایب عبور و بازتاب آنها را در نواحی سولار (۲۵۰-۲۵۰۰ نانومتر)، مرئی (۴۰۰-۸۰۰ نانومتر) و فروسرخ (۸۰۰-۲۵۰۰ نانومتر) با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه و در جدول ۱ بیان کردیم [۳۶]. همچنین در شکل ۳ ضرایب عبور در نواحی مذکور در ضخامت‌های متفاوت نقره رسم شده است.

در این مطالعه برای محاسبه مقاومت سطحی از مقاومت‌سنج چهارنقطه‌ای و برای بررسی ویژگی‌های گرمایی نمونه‌ها، تعیین میزان عبور گرما و شبیه‌سازی سیستم‌های دوجداره کم گسیلی که با هر یک از نمونه‌های ما پوشیده شده باشند، از نرم افزار کامپیوتری ویندو استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه مقاومت سطحی

زمانی که ضخامت لایه Ag بسیار کوچک است، به صورت جزایر جدا از هم و با فواصل زیاد تشکیل می‌شود. با افزایش ضخامت لایه Ag، فاصله جزایر کوچک و به دنبال آن، یک لایه پیوسته از Ag تشکیل و رسانایی ساختار افزایش می‌یابد. مطالعات نشان دادند که رشد لایه نازک Ag بر روی لایه SnO₂ از مدل والمر ویر پیروی می‌کند [۳۰-۳۱]. براساس این مدل، هدایت متفاوت نمونه‌ها به ضخامت Ag در لایه میانی ساختارهای سه لایه وابسته است. در مواردی که فیلم‌های نقره، ناپیوسته و دارای جزایر هستند، وجود یک مدل مقاومت متفاوت یافت می‌شود که در آن تونل‌زنی کوانتومی، هدایت فلزی و هدایت اکسید فلزی دخالت دارند. در چنین شرایطی، پوشش سطح Ag تعیین کننده است که در تعیین رسانندگی، تونل‌زنی کوانتومی نقش اصلی را بازی می‌کند یا رسانندگی اکسید فلزی. به عنوان مثال، در موارد جزایر فلزی کوچک که فضای آزاد بین آنها زیاد است، نقش اکسید فلز در رسانندگی غالب است. با این حال، گسترش جزایر، فضا را کاهش می‌دهد و جزایر شروع به ترکیب شدن با یکدیگر می‌کنند و باعث تشکیل یک لایه پیوسته می‌شوند. در این شرایط تونل‌زنی کوانتومی نقش رسانایی را ایفا می‌کند. به طور کلی، در حضور جزایر بزرگتر با شکاف‌های کوچک، تونل‌زنی کوانتومی صورت می‌گیرد. در حالی که در فیلم‌های پیوسته، رسانایی توده‌ای رخ می‌دهد. در مطالعات پیشین، در طول فرایند لایه‌نشانی Ag، در ضخامت‌های کوچک تا ۱۰ نانومتر، ناپیوستگی در این لایه ایجاد نمی‌شود [۳۲، ۳۳]. اما در این مطالعه در ضخامت‌های ۸ و ۱۵ نانومتر، به دلیل مقاومت بالای ساختار، می‌توان گفت که ممکن است ناپیوستگی‌هایی در

$$(۳) \quad T_{av} = \frac{\int T(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int V(\lambda)d\lambda} \quad (۲)$$

$$R_{av} = \frac{\int R(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int V(\lambda)d\lambda}$$

که $V(\lambda)$ بازده طیفی و $T(\lambda)$ و $R(\lambda)$ به ترتیب درصد عبور و درصد بازتاب در طول موج معین است.

جدول ۱: ضرایب عبور و بازتاب نمونه $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ در ضخامت‌های مختلف نقره

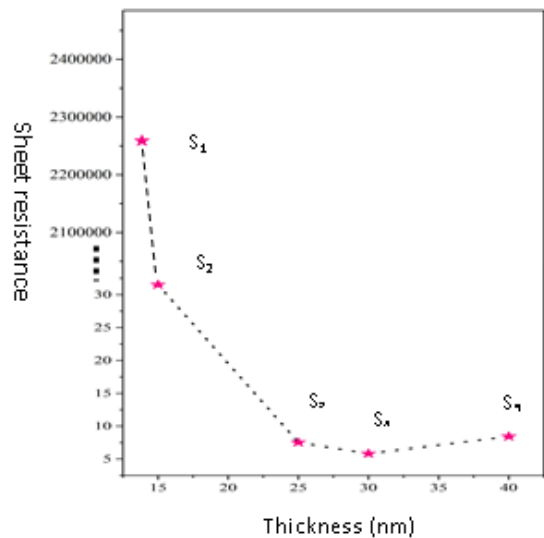
در نواحی سولار، فروسرخ و مرئی.

نمونه‌ها	$T_{\text{solar}}(\%)$	$R_{\text{solar}}(\%)$	$T_{\text{NIR}}(\%)$	$R_{\text{NIR}}(\%)$	$T_{\text{vis}}(\%)$	$R_{\text{vis}}(\%)$
S_1	۴۳/۲۸	۱۵/۳۰	۴۳/۷۱	۱۸/۱۷	۵۸/۷۸	۱۰/۱۱
S_2	۳۹/۸۶	۱۸/۱۹	۳۴/۹۸	۲۵/۷۳	۵۹/۱۳	۶/۱۰
S_3	۴۳/۰۱	۲۷/۵۳	۳۳/۸۹	۴۶/۳۱	۷۱/۱۸	۶/۷۰
S_4	۳۱/۸۶	۴۳/۰۸	۲۱/۶۶	۶۸/۵۸	۶۲/۳۴	۱۱/۷۶
S_5	۳۱/۶۰	۳۹/۷۵	۲۶/۰۶	۵۹/۳۲	۵۵/۸۴	۱۴/۲۹

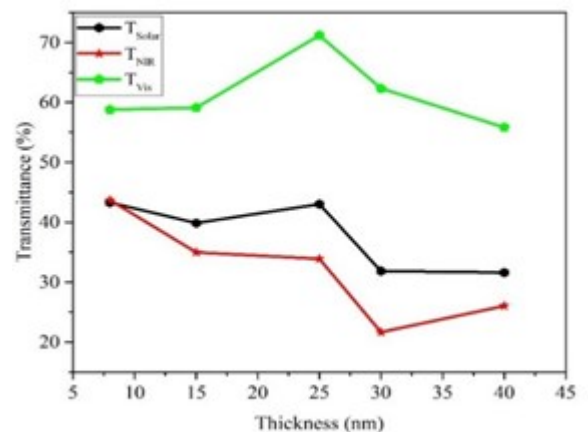
با توجه به نتایج بدست آمده از محاسبه ضرایب عبور و بازتاب نمونه‌ها در نواحی متفاوت، نمونه S_3 و S_4 به ترتیب بیشترین میزان ضریب عبور در ناحیه مرئی (۷۱/۱۸%) و رفلکت در ناحیه فروسرخ (۶۸/۵۸%) را دارند. با توجه به اینکه میزان بازتاب در محدوده سولار و در ناحیه فروسرخ برای نمونه S_4 بسیار بیشتر از سایر نمونه‌هاست، این نمونه برای اهداف ذخیره انرژی و استفاده به عنوان پوشش‌های عایق حرارت بسیار مطلوب‌تر است. کاهش عبور در ناحیه مرئی برای نمونه S_1 می‌تواند به علت افزایش پراکندگی در مرز جزایر و کاهش عبور در ضخامت ۴۰ نانومتر به دلیل افزایش ضخامت نقره و کاهش شفافیت نمونه باشد.

۳-۳- محاسبات ضریب شکست و خاموشی

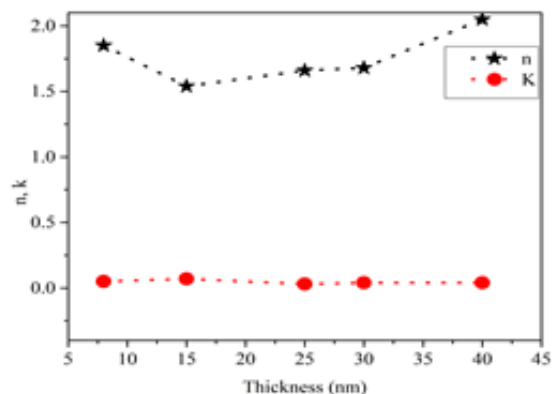
ضریب شکست ساختارهای سه لایه‌ای اکسید فلز/ فلز/ اکسید فلز را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۳۷-۳۸]:



شکل ۲: مقاومت سطحی نمونه $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ در ضخامت‌های مختلف نقره.



شکل ۳: مقایسه ضرایب عبور نمونه $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ در ضخامت‌های مختلف نقره در نواحی سولار، فروسرخ و مرئی



شکل ۴: ضرایب شکست و خاموشی نمونه $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{SnO}_2$ در ضخامت‌های مختلف نقره در ناحیه مرئی

سه لایه‌ای SnO₂/Ag/SnO₂ انجام نشده است. در مقاله شهیدی و همکارانش مقدار گسیلندگی برای این ساختار در ضخامت ۲۵ نانومتر نقره برابر ۰/۰۶۵ بدست آمده است [۳۵].

جدول ۲: گسیلندگی نمونه SnO₂/Ag/SnO₂ در ضخامت‌های مختلف نقره.

گسیلندگی	ϵ_1	ϵ_2
S ₁	۲/۲۴×۱۰ ^{-۸}	۲۳۳۴۲/۲۲
S ₂	۰/۳۳۹	۰/۳۳۴
S ₃	۰/۰۹۳	۰/۰۷۹
S ₄	۰/۰۷۳	۰/۰۶۱
S ₅	۰/۱۰۳۹	۰/۰۸۹

۳-۵- محاسبه ضریب بهره حرارتی خورشیدی (G-Value)، ضریب سایه (SC) و ضریب انتقال گرما (U-Value):

پنجره‌های ساختمان یکی از عوامل اصلی اتلاف انرژی در تابستان و زمستان است. در نتیجه، ساخت پوشش‌های کم گسیل برای پنجره‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است که توسط آن انتقال حرارت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. ماده مورد نظر باید شفافیت بالا $\alpha < 10^{-5} R^2$ و جذب حرارت کم $0.0129 R$ داشته باشد. برای بررسی کیفیت مواد برای ذخیره انرژی توسط پنجره‌های ساختمان، از پارامترهای U و G استفاده می‌شود.

مقدار U میزان انتقال حرارت از طریق شیشه را نشان می‌دهد. بنابراین، پوشش با مقدار U کمتر، می‌تواند عایق حرارتی بهتری باشد. افزون بر این، ضریب بهره حرارتی خورشیدی مقدار گرمای نور مستقیم خورشید است که از شیشه عبور می‌کند. هرچه G-Value کمتر باشد، انتقال حرارت (از نور مستقیم خورشید) در مقایسه با شیشه کمتر است. چنین نمونه‌هایی برای مکان‌هایی که نور خورشید به طور مستقیم تابش می‌کند مناسب هستند [۴۱]. در این پژوهش، برای محاسبه پارامتر U-Value و G-value و SC، یک سیستم دوجداره متشکل از دو لایه شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر و یک لایه شکاف حاوی گاز آرگون را با استفاده از نرم افزار ویندو شبیه‌سازی کردیم. این پارامترهای بدست آمده از

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \left[\left(\frac{R+1}{R-1} \right)^2 - (1+k^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

به طوری $k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi}$ ، $\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)}{T} \right]$ ، و d به ترتیب ضریب خاموشی، ضریب جذب و ضخامت کل است.

شکل ۴ ضریب شکست و خاموشی هریک از نمونه‌ها را در ناحیه مرئی (۵۵۰ نانومتر) نشان می‌دهد. ضریب خاموشی نمونه S₃ مینیمم و برابر ۰/۰۳ است و نشان‌دهنده شفافیت بالای ماده در ناحیه مرئی است.

۳-۴- گسیلندگی

گسیلندگی، نسبت انرژی تابش شده از سطح یک ماده به انرژی تابش شده از یک تابشگر کامل به نام جسم سیاه در دما و طول موج یکسان و تحت شرایط یکسان است. این عدد بدون بعد، بین صفر (برای یک بازتابنده کامل) و یک (برای یک تابنده کامل) است. استفاده از پنجره‌های کم گسیل از انتقال انرژی از بیرون به داخل ساختمان جلوگیری و انرژی گرمایشی/سرمایشی را حفظ می‌کند.

گسیلندگی وابسته به مقاومت سطحی است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۶، ۳۹-۴۰]:

این معادله برای نمونه‌هایی با $Z_0 \gg R_{sh}$ (امپدانس خلاء = ۳۷۷ اهم) و در طول موج $\lambda > 3$ میکرومتر، از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\epsilon_2 = \frac{4R_{sh}}{Z_0} \quad (۶)$$

مقادیر محاسبه گسیلندگی مربوط به هر یک از نمونه‌ها در جدول ۲ بیان شده است.

به دلیل وابستگی گسیلندگی به مقاومت سطحی و مینیمم بودن مقاومت نمونه S₄، مقدار آن برای این نمونه بسیار پایین و برابر ۰/۰۷ است. کم بودن مقدار گسیلندگی به معنی کاهش عبور گرما و امواج فروسرخ است. ویژگی که ماده را یک پوشش مطلوب برای بازتاب بالای امواج مادون قرمز و عایق گرما می‌کند. تا به امروز مطالعات زیادی بر روی تعیین مقدار گسیلندگی ساختارهای

۱۷۰۰ نانومتر به ترتیب مربوط به نمونه‌های S_3 و S_4 است. مقادیر گسیلندگی، T_{av} و R_{NIR} در سرعت انتقال حرارت از طریق ماده (U-value) و انتقال گرما از تابش مستقیم نور خورشید (G-value) بسیار موثر هستند. نمونه S_4 دارای کمترین مقدار U، G و گسیلندگی به ترتیب برابر ۱/۴۴، ۰/۴۸ و ۰/۰۷ است. بنابراین بهترین ضخامت در پوشش‌های عایق حرارتی $SnO_2/Ag/SnO_2$ در پنجره‌های هوشمند، ۳۰ نانومتر است.

مراجع

[1] Ellmer, Klaus. "Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes." *Nature Photonics* 6.12, 809-817(2012).

[2] D.S. Ginley, D.C. Paine, Handbook of transparent conductors, Springer, New York 2010.

[3] Dalapati, Goutam Kumar, et al. "Tin oxide for optoelectronic, photovoltaic and energy storage devices: a review." *Journal of Materials Chemistry A* (2021).

[4] Kong, Heon, Hyun-Yong Lee. "High performance flexible transparent conductive electrode based on ZnO/AgOx/ZnO multilayer." *Thin Solid Films* 696, 137759, (2020).

[5] Yu, Shihui, Weifeng Zhang, Lingxia Li, Dan Xu, Helei Dong, and Yuxin Jin. "Optimization of $SnO_2/Ag/SnO_2$ tri-layer films as transparent composite electrode with high figure of merit." *Thin Solid Films* 552: 150-154, (2014).

[6] J. Lewis, S. Grego, B. Chalamala, E. Vick and D. Temple, "Highly flexible transparent electrodes for organic light-emitting diode-based displays", *Appl. Phys. Lett.* 85,3450–3452, (2004).

[7] Y.H. Cho, N.S. Parmar, S. Nahm, J.W. Choi, "Full range optical and electrical properties of Zn-doped SnO_2 and oxide/metal/oxide multilayer thin films deposited on flexible PET substrate", *J. Alloy. Compd.* 694, 217–222, (2017).

[8] Jeong, Jin-A., Yong-Seok Park, and Han-Ki Kim. "Comparison of electrical, optical, structural,

شبه‌سازی مربوط به هر نمونه در جدول ۳ آمده است. شبیه‌سازی با استفاده از میزان عبور و بازتاب نمونه‌ها در ناحیه مرئی و سولار و همچنین، با استفاده از گسیلندگی انجام شده است. کمترین مقدار U، G و SC مربوط به نمونه S_4 است. بنابراین، نمونه S_4 ظرفیت عایق-پذیری بهتری در برابر گرمای محیط و گرمای حاصل از نور مستقیم خورشید دارد. در مطالعه‌ای که توسط هراتیان و همکارانش بر روی نمونه $ZnO/Ag/ZnO$ با ضخامت‌های متفاوت نقره صورت گرفته است، کمترین مقدار U برابر $1/5 W/m^2.k$ بدست آمده است [۳۶].

جدول ۳: محاسبه پارامترهای U-Value، G-Value و SC برای خاموشی نمونه

$SnO_2/Ag/SnO_2$ در ضخامت‌های مختلف نقره.

نمونه‌ها	G-Value	SC	U-Value ($W/m^2.k$)
S_1	۰/۶۱۴	۰/۷۰۶	۲/۵۶۱
S_2	۰/۶۲۲	۰/۷۱۵	۱/۹۴۸
S_3	۰/۵۹۵	۰/۶۸۳	۱/۴۸۳
S_4	۰/۴۸۱	۰/۵۵۳	۱/۴۴۵
S_5	۰/۴۹۷	۰/۵۷۲	۱/۵۱۱

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه خواص نوری، الکتریکی و حرارتی فیلم‌های سه-لایه $SnO_2/Ag/SnO_2$ با در نظر گرفتن ضخامت‌های ۸، ۱۵، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ نانومتر برای نقره در لایه میانی و ۱۰۰ نانومتر برای SnO_2 در لایه‌های بالا و پایین و لایه‌نشانی بر روی شیشه با استفاده از روش زاویه دید و روش اسپاترینگ مگنترون مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که کمترین میزان مقاومت مربوط به نمونه S_4 برابر $5/84 \Omega/sq$ است. همچنین، طیف ضرایب عبور و بازتاب نمونه‌ها نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر ضرایب عبور در ناحیه مرئی و ضرایب بازتاب در طول موج

room temperature”, ECS Solid State Lett. 3 , 33–36, (2014).

[17] Y. Yin, C. Lan, H. Guo, C. Li, “Reactive sputter deposition of WO₃/Ag/WO₃ film for indium tin oxide (ITO)-Free electrochromic devices”, ACS Appl. Mater. Interfaces 8, 3861–3867, (2016).

[18] H.W. Lu, C.W. Huang, P.C. Kao, S.Y. Chu, “ITO-free organic light-emitting diodes with MoO₃/Al/MoO₃ as semitransparent anode fabricated using thermal deposition method”, Appl. Surf. Sci. 347, 116–121, (2015).

[19] A. Dhar, T.L. Alford, “Optimization of Nb₂O₅/Ag/Nb₂O₅ multilayers as transparent composite electrode on flexible substrate with high figure of merit”, J. Appl. Phys. 112 103113, (2012).

[20] X. Liu, X. Cai, J. Qiao, J. Mao, N. Jiang, “The design of ZnS/Ag/ZnS transparent conductive multilayer films”, Thin Solid Films 441, 200–206, (2003).

[21] Sahu, Dipti Ranjan, and Jow-Lay Huang. "The properties of ZnO/Cu/ZnO multilayer films before and after annealing in the different atmosphere." Thin Solid Films 516.2-4, 208-211, (2007).

[22] Hong, C. H., Y. J. Jo, H. A. Kim, I-H. Lee, and J. S. Kwak. "Effect of electron beam irradiation on the electrical and optical properties of ITO/Ag/ITO and IZO/Ag/IZO films." Thin Solid Films 519, no. 20, 6829-6833, (2011).

[23] Vishwakarma, S. R., J. P. Upadhyay, and H. C. Prasad. "Physical properties of arsenic-doped tin oxide thin films." Thin Solid Films 176 1, 99-110, (1989).

[24] Kim, Jiwon, Sangwon Baek, Jae Yong Park, Kwang Ho Kim, and Jong- Lam Lee. "Photonic Multilayer Structure Induced High Near- Infrared (NIR) Blockage as Energy- Saving Window." Small 17, no. 29, 2100654, (2021).

[25] Liu, Yang, Qunfeng Chen, Gengmei Liu, Tao Tao, Haodong Sun, Zhenhui Lin, Lihui Chen, Qingxian Miao, and Jianguo Li. "Molecularly engineered CMC-caged PNIPAM for broadband

and interface properties of IZO-Ag-IZO and IZO-Au-IZO multilayer electrodes for organic photovoltaics." Journal of Applied Physics 107, no. 2, 023111, (2010).

[9] J.A. Jeong, H.K. Kim,” Low resistance and highly transparent ITO-Ag-ITO multilayer electrode using surface plasmon resonance of Ag layer for bulk heterojunction organic solar cells”, Sol. Energy Mat. Sol. Cells 93, 1801–1809, (2009).

[10] Ren, Ningyu, Jun Zhu, and Shiliang Ban. "Highly transparent conductive ITO/Ag/ITO trilayer films deposited by RF sputtering at room temperature." AIP Advances 7, no. 5, 055009, (2017).

[11] S. Yu, W. Zhang, L. Li, D. Xu, H. Dong, Y. Jin, “Optimization of SnO₂/Ag/SnO₂ tri-layer films as transparent composite electrode with high figure of merit, Thin Solid Films”, 552 150–154, (2014).

[12] J.H. Kim, J.H. Lee, S.W. Kim, Y.Z. Yoo, T.Y. Seong, “Highly flexible ZnO/Ag/ZnO conducting electrode for organic photonic devices”, Cerm. Int. 41, 7146–7150, (2015).

[13] D. Miao, S. Jiang, S. Shang, Z. Chen, “Infrared reflective properties of AZO/Ag/AZO trilayers prepared by RF magnetron sputtering”, Cerm. Int. 40, 12847–12853, (2014).

[14] Y.S. Park, H.K. Kim, “Flexible indium zinc oxide/Ag/indium zinc oxide multilayer electrode grown on polyethersulfone substrate by cost efficient roll-to-roll sputtering for flexible organic photovoltaics”, J. Vac. Sci. Technol. 28, 41–47, (2010).

[15] S.B. Heo, J.H. Jeon, T.K. Gong, H.J. Moon, S.K. Kim, B.C. Cha, J.H. Kim, U.C. Jung, S. Park, D. Kim, “Influence of a Ni interlayer on the optical and electrical properties of trilayer GZO/Ni/GZO films”, Ceram. Int. 41, 9668–9670, (2015).

[16] A. Dhar, T.L. Alford, “Optimization of TiO₂/Cu/TiO₂ multilayer as transparent composite electrode (TCE) deposited on flexible substrate at

Korean institute of surface engineering 54, no. 3 119-123. (2021)

[34] Wang, Wei, et al. "Fabrication and thermo stability of the SnO₂/Ag/SnO₂ tri-layer transparent conductor deposited by magnetic sputtering." *Ceramics International* 47.3, 3548-3552, (2021).

[35] Shahidi, M. M., H. Rezagholipour Dizaji, M. H. Ehsani, and M. E. Ghazi. "Effect of GLAD technique on optical and electrical properties of SnO₂/Ag/SnO₂ structure." *Infrared Physics & Technology* 106 103263. (2020).

[36] Nezhad, Elham Haratian, Hamid Haratizadeh, and Behrouz Mohammad Kari. "Influence of Ag mid-layer in the optical and thermal properties of ZnO/Ag/ZnO thin films on the glass used in Buildings as insulating glass unit (IGU)." *Ceramics International* 45.8, 9950-995, (2019).

[37] Tezel, Fatma Meydaneri, and İ Afşin Kariper. "Structural and Optical Properties of Undoped and Silver, Lithium and Cobalt-Doped ZnO Thin Films." *Surface Review and Letters* 27.04, 1950138, (2020).

[38] Mohamed, S. H. "Effects of Ag layer and ZnO top layer thicknesses on the physical properties of ZnO/Ag/ZnO multilayer system." *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 69. 10 , 2378-2384, (2008).

[39] Sharma, Vikas, Parmod Kumar, Ashish Kumar, K. Asokan, and K. Sachdev. "High-performance radiation stable ZnO/Ag/ZnO multilayer transparent conductive electrode." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 169, 122-131, (2017).

[40] Zhang, Congyu, Jiadong Zhao, Hao Wu, and Shengwen Yu. "The enhancement of thermal endurance in doped low emissive ZnO/Ag/ZnO multilayer thin film." *Journal of Alloys and Compounds* 832, 154983, Zhang, Congyu, Jiadong Zhao, Hao Wu, and Shengwen Yu. "The enhancement of thermal endurance in doped low emissive ZnO/Ag/ZnO multilayer thin film." *Journal of Alloys and Compounds* 832, 154983, , (2020).

light management in energy-saving window." *Carbohydrate Polymers*, 119056, (2022).

[26] Wang, Zhiqiang, Qi Tian, and Jie Jia. "Numerical study on performance optimization of an energy-saving insulated window." *Sustainability* 132, 935, (2021).

[27] Moghaddam, Saman Abolghasemi, Magnus Mattsson, Arman Ameen, Jan Akander, Manuel Gameiro Da Silva, and Nuno Simões. "Low-Emissivity Window Films as an Energy Retrofit Option for a Historical Stone Building in Cold Climate." *Energies* 14, no. 22 , 7584, (2021).

[28] Sun, Kewei, Dong Zhang, Hongfeng Yin, Lulu Cheng, Hudie Yuan, and Chunli Yang. "Preparation of AZO/Cu/AZO films with low infrared emissivity, high conductivity and high transmittance by adjusting the AZO layer." *Applied Surface Science* 578, 152051, (2022).

[29] Rabizadeh, M., M. H. Ehsani, and M. M. Shahidi. "Tuning the optical properties of SnO₂/Ag/SnO₂ tri-layers by changing Ag thickness." *Infrared Physics & Technology* 109 103421. (2020).

[30] Alhamd, M. W., Sadeq Naeem Atiyah, and Firas T. Almusawi. "Arrangement of Silver Nanostructures on Permeable Silicon and Examination of Their Optical Properties." *Iraqi Journal of Nanotechnology* 2, 1-6, (2021).

[31] Duguet, Thomas, et al. "DFT simulation of XPS reveals Cu/epoxy polymer interfacial bonding." *The Journal of Physical Chemistry C* 123.51, 30917-30925, (2019).

[32] Wang, Wei, Xiaojun Wei, Chuanshen Wang, Wencai Zhou, Bailin Zhu, Chongjie Wang, and Linfei Liu. "Fabrication and thermo stability of the SnO₂/Ag/SnO₂ tri-layer transparent conductor deposited by magnetic sputtering." *Ceramics International* 47, no. 3 3548-3552. (2021)

[33] Jang, Jin-Kyu, Hyun-Jin Kim, Jae-Wook Choi, Yeon-Hak Lee, Sung-Bo Heo, Yu-Sung Kim, Young-Min Kong, and Daeil Kim. "Influence of Ag Interlayer on the Optical and Electrical Properties of SnO₂ Thin Films." *Journal of the*

[41] Ramana, Maduru Venkata, and Shaik Saboor. "A novel glazing system filled with hydrogel granules: energy saving, diurnal illumination, color rendering, and CO₂ emission mitigation prospective." Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects", 1-16, , (2020).



Influence of silver thin film on SnO₂/Ag/SnO₂ nanostructure and its use as low-emission nanocoating on building glass for energy storage

Faculty of physics, University of Semnan, Semnan

Abstract:

This study investigates the effect of changing the thickness of silver as an intermediate layer in SnO₂(100nm)/Ag(t)/SnO₂(100nm) three-layer structures on glass substrate using glancing angle deposition (GLAD) technique and DC/RF Magnetron sputtering method. Optical, electrical and thermal properties of the samples were studied. The results showed that SnO₂ / Ag / SnO₂ three-layer structures have the necessary conditions for use as thermal insulation coatings and energy storage on building windows. Considering the thickness of 30 nm for silver and 100 nm for SnO₂, the values of Emissivity, U-Value and G-Value are minimal and equal to 0.07, 1.44 (W/m².k) and 0.481, respectively. As a result, heat transfer from the environment and sunlight from this coating is minimized. Also, the rate of passage in the visible area for thicknesses of 25 and 30 nm is maximum and equal to 71.18 and 62.3%, respectively.

Keywords: Multilayer structure, Magnetron sputtering, low emission structure