

طراحی و بهبود عملکرد الکتروود رسانای شفاف با استفاده از نانو ساختار چند لایه‌ای و آینه‌ای شکل $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$

میلاذ رزم‌پوش و بهرام عابدی روان*

۱-دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲-دانشکده علوم پایه، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش، الکتروود رسانای شفاف چند لایه با استفاده از نانو ساختار چند لایه‌ای D/M/D/M/D روی بستر شیشه‌ای طراحی و بهینه‌سازی شد. هدف اصلی این طراحی، بهبود خواص تراگسیلی اپتیکی و مقاومت الکتریکی بود. با استفاده از نرم‌افزار Essential Macleod، جنس و ضخامت بهینه هر لایه بررسی شد. سپس خواص الکتریکی و اپتیکی نانو ساختار چند لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. خواصی مانند مقاومت الکتریکی سطحی، تراگسیلی نوری و بازتاب اندازه‌گیری شدند. با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین ساختار $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ بود که ضخامت لایه‌های نقره ۱۰nm، ضخامت لایه‌های ZnS، ۳۰nm و ضخامت لایه‌های TiO_2 ۲۰ نانومتر به دست آمد. در این شرایط، ضریب شایستگی $F_{TC} = 0.1026 \Omega^{-1}$ بدست آمد که بیشترین مقدار آن است و نشان‌دهنده بهترین کارایی ساختار است. همچنین، مقاومت الکتریکی سطحی حدود $5/624 \Omega/\text{sq}$ و تراگسیلی در ناحیه مرئی برابر با ۹۴٫۶۵٪ به دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهند که این ساختار مناسب برای استفاده به عنوان الکتروود رسانای شفاف در کاربردهای نورالکترونیکی است. بنابراین، ساختار $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ می‌تواند به عنوان یک بستر مناسب در فناوری‌های نانو الکترونیکی و نورالکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد. در واقع الکتروود ۵ لایه با تقارن آینه ای مبتنی بر لایه‌های D/M/D/M/D در این مقاله بررسی و تاثیر عوامل مختلف از جمله جنس لایه ها، ضخامت و چیدمان لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و ساختار مناسب تر بهیته سازی شده است که ساختار $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ دارای بیشترین شفافیت و رسانایی بوده است.

واژگان کلیدی: الکتروودهای چند لایه، ساختارهای چند لایه متقارن، نانو ساختارهای نوری شفاف، آینه‌ای شکل

*abedi@modares.ac.ir

می‌کنند و در عین حال مقاومت الکتریکی کمتری نسبت به فلزات دارند. همچنین، این مواد خواص الکتریکی دی‌الکتریکی را نیز از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، افزون بر رسانایی الکتریکی، قابلیت انتقال الکترونیکی و جریان الکتریکی در حالت عدم فعالیت را نیز دارند [۱].

۱- مقدمه

اکسیدهای رسانای شفاف (TCOs)^۱ موادی هستند که بین فلزات و مواد دی‌الکتریک قرار می‌گیرند. آنها دارای گاف انرژی بزرگتر از ۳eV و شفافیت بالایی هستند، به طوری که مانند فلزات رفتار

^۱ Transparent Conductive Oxide

اکسیدهای رسانای شفاف دارای خاصیت بسیار شفاف در ناحیه مرئی (بین ۴۰۰ تا ۷۰۰nm) هستند. این به این معنی است که این مواد قادر به انتقال بیشترین میزان نور قابل رویت بوده و به طور تقریبی برای چشم انسان غیرمشهود هستند. این خاصیت شفافیت ناشی از داشتن گاف انرژی بسیار بزرگتر از حداقل انرژی مورد نیاز (۳ eV) در این مواد است. به عبارت دیگر، اکسیدهای رسانای شفاف به دلیل گاف انرژی بزرگتر، به ندرت قادر به جذب نور مرئی هستند. به همین دلیل، در برنامه‌ها و صنایعی که نیاز به شفافیت بالا و عدم جذب نور مرئی دارند، استفاده از این مواد مناسب است. به طور خلاصه، TCO ها با داشتن شفافیت در ناحیه مرئی و همچنین، رسانای الکتریکی بسیار بالا، نقش مهمی در صنعت الکترونیک و فناوری ایفا می‌کنند [۲].

فیلم‌های اکسید رسانای شفاف از اهمیت بسیاری در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی برخوردارند. این فیلم‌ها در حوزه‌های گوناگونی از جمله حسگرهای گازی [۳]، فتوکاتالیست‌ها [۴]، پنجره‌های انرژی‌بخش [۵]، دیودهای گسیل شونده نوری آلی (OLED) [۶]، صفحات نمایش تخت (FPD) [۷] و سلول‌های فتوولتائیک لایه نازک [۸] استفاده می‌شوند. این فیلم‌ها با توجه به ویژگی‌های متمایزی مثل شفافیت و رسانایی الکتریکی به طور گسترده در این دستگاه‌ها به کار می‌روند و بهبود عملکرد و کارایی آنها را فراهم می‌کنند. از این رو، تحقیقات و بهینه‌سازی‌های جدید در جهت یافتن مواد و ساختارهای جدید با خواص نوری و الکتریکی برتر و عملکرد بهتر در دستگاه‌های با مساحت بزرگ اهمیت بالایی دارند. در بین تمام مواد TCO موجود، اکسید قلع ایندیم (ITO^۴) به عنوان یکی از الکترودهای شفاف پرکاربرد در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی شناخته شده است. با این وجود، این ماده دارای برخی نقاط ضعف است که شامل کمبود منابع ایندیم، هزینه‌های بالا، خطر تمام شدن ذخایر ایندیم و کمبود انعطاف‌پذیری مکانیکی می‌شود. این محدودیت‌ها باعث می‌شود که کاربردهای آن در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی محدود شوند [۹ و ۱۰]. امروزه، یافتن مواد و ساختارهای جدید با

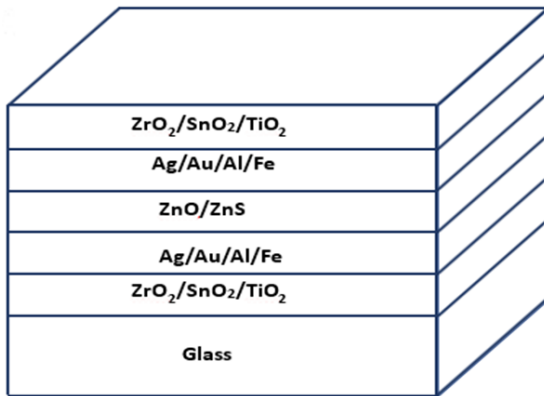
ویژگی‌های نوری و الکتریکی بالا برای استفاده در دستگاه‌های منطقه بزرگ با عملکرد بهبود یافته به دلیل پیشرفت فناوری و نیازهای مدرن، بسیار ضروری است. هدف از این تلاش‌ها، پیدا کردن جایگزینی کارآمد و اقتصادی برای ITO و تولید مواد الکترودهای شفاف است که علاوه بر داشتن ویژگی‌های نوری و الکتریکی برتر، از منابع قابل تجدید و در دسترس استفاده کند. با این تحولات، می‌توان تغییرات مهمی در عرصه اپتوالکترونیکی به وجود آورد و کاربردهای گسترده‌تری را برای این تکنولوژی فراهم کرد تا به نیازهای مدرن و پیشرفته‌ترین دستگاه‌های منطقه بزرگ پاسخ دهد.

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که ساختارهای چندلایه، از جمله ساختارهای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (DMD)، به علت داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی مانند مقاومت الکتریکی پایین‌تر و انتقال نوری بالاتر، توسعه یافته‌اند [۱۱]. این ساختارها از طریق استفاده از لایه‌های جایگزین فلز و دی‌الکتریک یا نیم-رسانا، توانسته‌اند عملکرد بهتری را در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی ارائه دهند. با کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش انتقال نور، این ساختارها به تحقق عملکردهای بهبود یافته و کاربردهای گسترده‌تر در دستگاه‌های نوری و الکترونیکی کمک می‌کنند. در چنین ساختارهایی، از فیلم فلزی بسیار نازک به عنوان یک عنصر کلیدی استفاده می‌شود تا هدایت الکتریکی بهبود یابد. این فیلم فلزی قادر است به طور موثر انتقال الکترون‌ها را فراهم کند و در نتیجه عملکرد سیستم را بهبود دهد. همچنین، از لایه‌های نیم-رسانا یا دی‌الکتریک برای کاهش انعکاس فلز و افزایش شفافیت در ناحیه قابل رویت استفاده می‌شود. برای این منظور، استفاده از نانوموادمانند ZnO ، ZrO_2 ، ZnS ، TiO_2 که دارای ضریب شکست بالا، شفافیت در ناحیه قابل رویت، هزینه کم و پایداری بالا هستند، مورد توجه قرار می‌گیرد. در انتخاب فیلم فلزی، نقره (Ag) و طلا (Au) به دلیل مقاومت کم و جذب نور کمتر در ناحیه قابل رویت انتخاب مناسبی هستند. این فیلم‌های فلزی قادرند به عنوان الکترودهای ترانزیستورها، سلول‌های خورشیدی و سایر دستگاه‌های الکترونیکی استفاده شوند. به طور کلی، این ساختار با ترکیب مناسبی از فیلم فلزی و لایه‌های نیمه‌هادی یا دی‌الکتریک، توانسته است خواص الکترونیکی و نوری مناسبی را

^۴ Organic Light-Emitting Diode

^۲ Electronic Paper Display

^۴ Indium Tin Oxide



شکل ۱: طرحواره اولیه ساختار الکتروکود رسانای شفاف

۳- بحث و نتایج

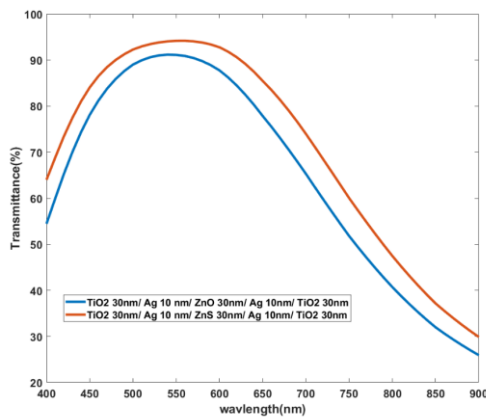
در نرم افزار Macleod، شبیه سازی های مربوط به ساختارهای پوششی نوری بر اساس معادلات ماکسول و نظریه الکترومغناطیس حل می شوند. این نرم افزار از روش های تحلیلی و عددی برای محاسبه و پیش بینی رفتار نور در ساختارهای پوششی استفاده می کند. ضخامت لایه های نازک رسانای شفاف می تواند تأثیر مستقیمی بر بازتاب و تراگسیل نور داشته باشد. هنگامی که ضخامت لایه ها به طور ایده آل تنظیم می شود، بازتاب نور به حداقل و تراگسیل به حداکثر ممکن می رسد. بازتاب نور به معنای بازگشت نور از مرز بین دو محیط مختلف است. هرچه بازتاب نور کمتر باشد، بیشترین میزان نور از لایه رسانا و شفاف عبور می کند و به صورت تراگسیل نور از آن عبور می کند. این ویژگی مهم استفاده از لایه های نازک رسانای شفاف را در ساختارهای نوری مورد توجه قرار می دهد، زیرا می تواند بهبود کارایی ساختار و افزایش کاربردهای آن را امکان پذیر کند. ضخامت لایه های نازک رسانای شفاف همچنین تأثیر مستقیمی بر مقاومت الکتریکی سطحی دارد. مقاومت الکتریکی سطحی نشان دهنده مقاومت الکتریکی در سطح لایه است. ضخامت مناسب لایه ها می تواند منجر به کاهش مقاومت الکتریکی سطحی شود. این امر برای انتقال بهتر جریان الکتریکی از طریق لایه ها و بهبود کارایی ساختار بسیار حائز اهمیت است. با کاهش مقاومت الکتریکی سطحی، انرژی الکتریکی کمتری در ساختار رسانا و شفاف از دست می رود و عملکرد بهبود می یابد. به طور کلی، در طراحی لایه های نازک رسانای شفاف، برای دستیابی به

برای کاربردهای مختلف فراهم کند. همچنین، با توجه به پایداری بالا و عمر طولانی این ساختار، آن را می توان در شرایط مختلف محیطی استفاده کرد تا از زوال و کاهش عملکرد در طول زمان جلوگیری شود [۱۲ و ۱۳]. علاوه بر این، می توان از ماده TiO_2 به عنوان لایه بافر بین کاتد و ماده آلی در سلول های فتوولتائیک لایه نازک معکوس استفاده کرد. این لایه بافر نقش مهمی در بهبود عملکرد و کارایی سلول های فتوولتائیک لایه نازک دارد. با قرار دادن لایه TiO_2 بین کاتد و ماده آلی، عملکرد الکترونیکی و جریان الکترونی در سلول بهبود می یابد. علاوه بر این، لایه TiO_2 به عنوان یک بافر الکترونیکی عمل می کند و کمک می کند تا الکترون های تولید شده در سلول به طور موثر از کاتد به ماده آلی منتقل شوند. از این رو، استفاده از TiO_2 به عنوان لایه بافر در سلول های فتوولتائیک لایه نازک معکوس، باعث بهبود عملکرد و کارایی این سلول ها می شود [۱۴].

در این تحقیق یک ساختار پنج لایه ای ساندویچ شده با استفاده از مواد فلزی Ag, Au, Al, Fe و مواد دی الکتریک TiO_2, ZnO, ZnS که در دو طرف لایه دی الکتریک ZnO و ZnS به صورت تصویر آینه ای شبیه سازی شد و در ادامه خواص ضریب شایستگی، شفافیت و رسانایی برای آن بررسی شد.

۲- طراحی لایه های ساختار

در این تحقیق یک ساختار پنج لایه ای ساندویچ شده با استفاده از مواد فلزی Ag, Au, Al, Fe در لایه های دوم و چهارم و مواد دی الکتریک TiO_2, ZnO, ZnS در لایه های اول و پنجم که در دو طرف لایه دی الکتریک ZnO و ZnS (لایه سوم) به صورت تصویر آینه ای توسط نرم افزار Essential Macleod طبق شکل ۱، بر روی بستر شیشه ای شبیه سازی شد. طوری که ساختار دارای بیشترین ضریب شایستگی، شفافیت و رسانایی باشد. برای بهبود عملکرد ساختار، ضخامت بهینه هر کدام از لایه ها مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت ضخامت بهینه هر کدام از لایه های فلزی و دی الکتریک در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۲: تراگسیل نوری ساختار TiO_2 30nm/Ag 10nm/(ZnO,ZnS) بهترین ماده دی‌الکتریک برای استفاده در لایه‌های سوم دی‌الکتریک ساختار آینه‌ای پنج لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختار، از دی‌الکتریک TiO_2 برای لایه‌های اول و پنجم استفاده شده است، در حالی که برای لایه‌های فلزی دوم و چهارم از نقره استفاده شده است و برای لایه دی‌الکتریک سوم نیز از ZnS و ZnO استفاده شده است. ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک 30nm و ضخامت لایه‌های فلزی نقره 10nm در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، استفاده از ZnS به عنوان لایه دی‌الکتریک لایه سوم منجر به بیشترین شفافیت در ناحیه مرئی می‌شود. استفاده از ماده ZnS در لایه سوم به جای ماده ZnO در ساختار الکتروود رسانای شفاف باعث داشتن شفافیت نوری بالاتر در ناحیه مرئی می‌شود. دلیل این امر مربوط به خواص نوری و نوری این دو ماده است. روی سولفید (ZnS) و اکسید روی (ZnO) هر دو از مواد نیمه‌رسانا هستند، اما خواص نوری آنها در ناحیه مرئی متفاوت است. از آنجایی که هدف طراحی الکتروود رسانای شفاف افزایش تراگسیل نور در ناحیه مرئی است، استفاده از ماده‌ای با شفافیت بالا در این ناحیه می‌تواند منجر به بهبود عملکرد ساختار شود. ماده ZnO به طور کلی شفافیت خوبی در ناحیه مرئی دارد و به عنوان یک ماده نیمه‌رسانا و رسانا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما ماده ZnS در ناحیه مرئی شفافیت بیشتری نسبت به ZnO دارد. این به معنای این است که ZnS بیشترین میزان نور را در ناحیه مرئی از خود عبور می‌دهد و

عملکرد بهینه، ضخامت هر لایه باید به دقت انتخاب شود. این بررسی می‌تواند به منظور بهبود بازتاب و تراگسیل نور، کاهش مقاومت الکتریکی سطحی و افزایش کارایی ساختارهای نوری صورت گیرد. همچنین، نیازهای و کاربردهای خاص می‌توانند نقشی در تعیین ضخامت مناسب لایه‌ها داشته باشند. بنابراین، در هر طراحی خاص، باید به این نکته توجه کرد و ضخامت لایه‌های نازک رسانای شفاف را براساس نیازهای کاربردی مشخص کرد.

مقاومت سطحی لایه‌های نازک رسانای شفاف را می‌توانیم از معادله‌ی زیر حساب کنیم [۱۵ و ۱۶]:

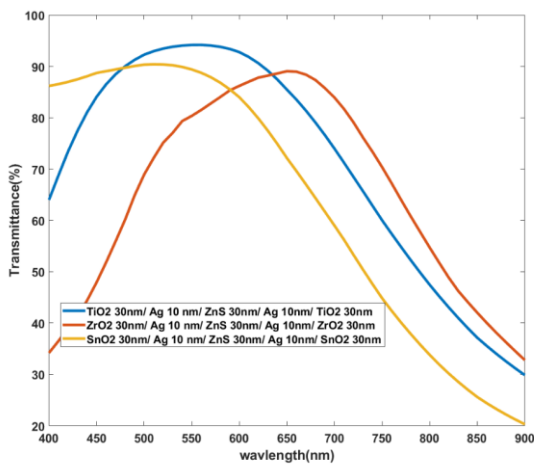
$$R_{sh} = \frac{Z_0}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{R}} - 1 \right) \quad (1)$$

که در آن R بازتاب در ناحیه‌ی فروسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی و $Z_0 = 377\Omega$ امپدانس فضای آزاد است. این رابطه نشان می‌دهد که بازتاب در ناحیه‌ی فروسرخ به غلظت الکترون در این پوشش‌ها بستگی دارد. بازتاب در طول موج 1700nm می‌تواند به عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه‌ی فروسرخ استفاده شود [۱۷]. ضریب شایستگی (F_{TC}) شاخص مهمی است که رابطه بین خواص الکتریکی و نوری پوشش‌های رسانای شفاف را نشان می‌دهد. این کمیت را هاک به صورت معادله‌ی (۲) تعریف کرده است [۱۸]:

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

که در آن T تراگسیل پوشش‌های رسانای شفاف در طول موج 550nm و R_{sh} مقاومت سطحی لایه را نشان می‌دهد [۱۹].

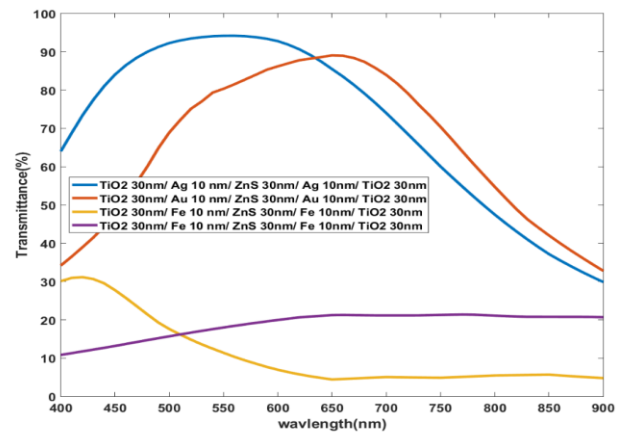
به نقره دارند. در ناحیه مرئی، آلومینیوم و آهن بازتابندگی بسیار بالایی دارد و تراگذرایی نور را به حداقل می‌رساند. این به معنای بازتاب بیشتر نور مرئی و کاهش عبور آن از ساختار است. بنابراین، استفاده از آلومینیوم به جای نقره، به ویژه به دلیل بازتاب بالا در ناحیه مرئی، منجر به کاهش شفافیت ساختار می‌شود. نقره یک ماده رسانا است و رسانایی الکتریکی بالایی دارد، به این معنی که جریان الکتریکی را به خوبی انتقال می‌دهد. بنابراین، استفاده از نقره در لایه‌های دوم و چهارم ساختار الکتروود رسانای شفاف می‌تواند شفافیت ساختار را افزایش دهد و باعث تراگذرایی نوری بیش از ۹۰ درصد طبق شکل ۳ شود. از سوی دیگر، آلومینیوم، آهن و طلا رسانایی الکتریکی کمتری نسبت به نقره دارند، به این معنی که جریان الکتریکی را کمتر منتقل می‌کنند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، استفاده از آلومینیوم و طلا به جای نقره در لایه‌های دوم و چهارم منجر به کاهش رسانایی الکتریکی و در نتیجه کاهش شفافیت الکتریکی ساختار می‌شود. با توجه به شکل ۳ و مطالب گفته شده، در ساختار پنج لایه‌ای مورد بررسی از فلز نقره برای لایه‌های فلزی استفاده شده است.



شکل ۴: تراگسیل نوری ساختار $(\text{TiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{SnO}_2) 30\text{nm}/\text{Ag} 10\text{nm}/\text{ZnS}$ در ناحیه طول موج ۴۰۰-۹۰۰ نانومتر

در شکل ۴، به بررسی شفافیت نوری ساختار پنج لایه‌ای آینه‌ای شکل، برای حالتی که از مواد TiO_2 ، ZrO_2 و SnO_2 برای لایه‌های دی‌الکتریک اول و پنجم استفاده شده است، پرداخته

کمترین میزان بازتاب را دارد. بنابراین، با استفاده از ZnS به جای ZnO در لایه سوم، ساختار الکتروود رسانای شفاف شما دارای شفافیت نوری بالاتری در ناحیه مرئی خواهد بود. این بهبود شفافیت به دلیل شفافیت بیشتر ZnS در ناحیه مرئی نسبت به ZnO است. با این تغییر، میزان تراگسیل نور از طریق ساختار افزایش می‌یابد و بازتاب نور کاهش می‌یابد، که بهبود کارایی و عملکرد الکتروود را به همراه دارد.

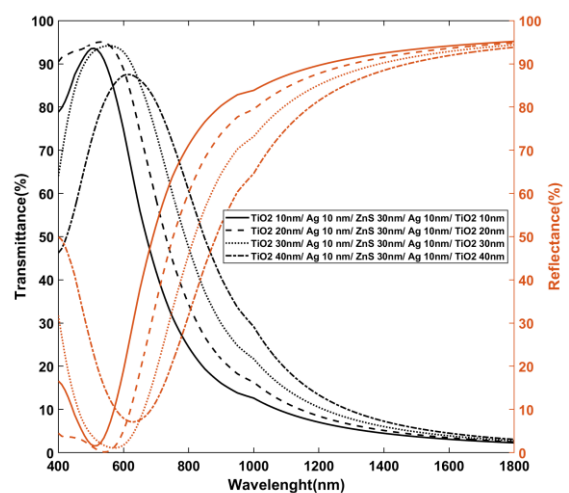


شکل ۳: تراگسیل نوری ساختار $\text{TiO}_2 30\text{nm}/(\text{Ag}, \text{Au}, \text{Al}, \text{Fe}) 10\text{nm}/\text{ZnS}$ در ناحیه طول موج ۴۰۰-۹۰۰ نانومتر

با توجه به شکل ۳، بهترین فلز برای استفاده در لایه‌های فلزی ساختار آینه‌ای شکل پنج لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختار، از دی‌الکتریک TiO_2 برای لایه‌های اول و پنجم و از دی‌الکتریک ZnS برای لایه سوم استفاده شده است، در حالی که برای لایه‌های فلزی دوم و چهارم از نقره، طلا، آهن و آلومینیوم استفاده شده است. ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک ۳۰nm و ضخامت لایه‌های فلزی ۱۰nm در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، استفاده از نقره به عنوان لایه‌های فلزی منجر به بیشترین شفافیت در ناحیه مرئی می‌شود. نقره خواص نوری مناسبی در ناحیه مرئی دارد و بازتابندگی بسیار کمی دارد، به طوری که اکثر نور مرئی را از خود عبور می‌دهد. به عبارت دیگر، نقره حداقل بازتاب را دارد و نور را از ساختار عبور می‌دهد. این ویژگی شفافیت را در ناحیه مرئی افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، آلومینیوم، آهن و طلا خواص نوری متفاوتی نسبت

در شکل ۵ به بررسی تراگسیلی نور در ناحیه مرئی برای ساختار $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ به ازای ضخامت لایه‌های فلزی نقره بین ۱۰ نانومتر و ضخامت لایه دی‌الکتریک ZnS ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک TiO_2 از ۱۰ تا ۴۰ نانومتر پرداخته شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنیم با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 از ۱۰ نانومتر به ۲۰ نانومتر، شفافیت نوری نمونه افزایش پیدا کرده و سپس با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 از ۲۰ تا ۴۰ نانومتر شفافیت نوری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. و با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 از ۱۰ تا ۴۰ نانومتر، بازتاب در ناحیه مرئی و مادون قرمز کاهش یافته است. با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 ، مسیر طی شده توسط نور در ساختار بیشتر می‌شود. با افزایش مسیر طی شده توسط نور، احتمال جذب و پراکندگی نور در مواد ساختار بیشتر می‌شود. این باعث کاهش شفافیت نوری نمونه می‌شود، زیرا کمترین میزان نور از ساختار عبور می‌کند. افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 منجر به افزایش اختلاف راه نوری بین لایه‌های TiO_2 و لایه‌های دیگر مانند Ag و ZnS می‌شود. این اختلاف باعث افزایش بازتاب نور در مرزهای جداکننده لایه‌ها می‌شود. با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 تا ۲۰ نانومتر، میزان نوری که از بالای ساختار عبور می‌کند، افزایش می‌یابد. این به دلیل داشتن TiO_2 از شفافیت نوری بالا در ناحیه مرئی است. لذا نور به خوبی از طریق ساختار عبور می‌کند و کمتر بازتاب می‌شود. اختلاف ضریب شکست بین لایه‌های TiO_2 و لایه‌های دیگر مانند Ag و ZnS باعث کاهش بازتاب نور در مرزهای جداکننده لایه‌ها می‌شود. این باعث می‌شود که نور کمتری بازتاب شود و بیشتر از ساختار عبور کند. بنابراین، با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 تا ۲۰ نانومتر، شفافیت نوری نمونه افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت بیشتر، شفافیت کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 ، بازتاب در ناحیه مرئی و مادون قرمز افزایش می‌یابد. این تفاوت‌ها در شفافیت و بازتاب نور به دلیل تغییر مسیر طی شده توسط نور و اختلاف ضریب شکست در ساختار است. در واقع با افزایش ضخامت لایه TiO_2 بیش از ۲۰ نانومتر، مسیر طی شده با نور در ساختار بیشتر می‌شود. با افزایش مسیر طی شده با نور، احتمال جذب و پراکندگی نور در

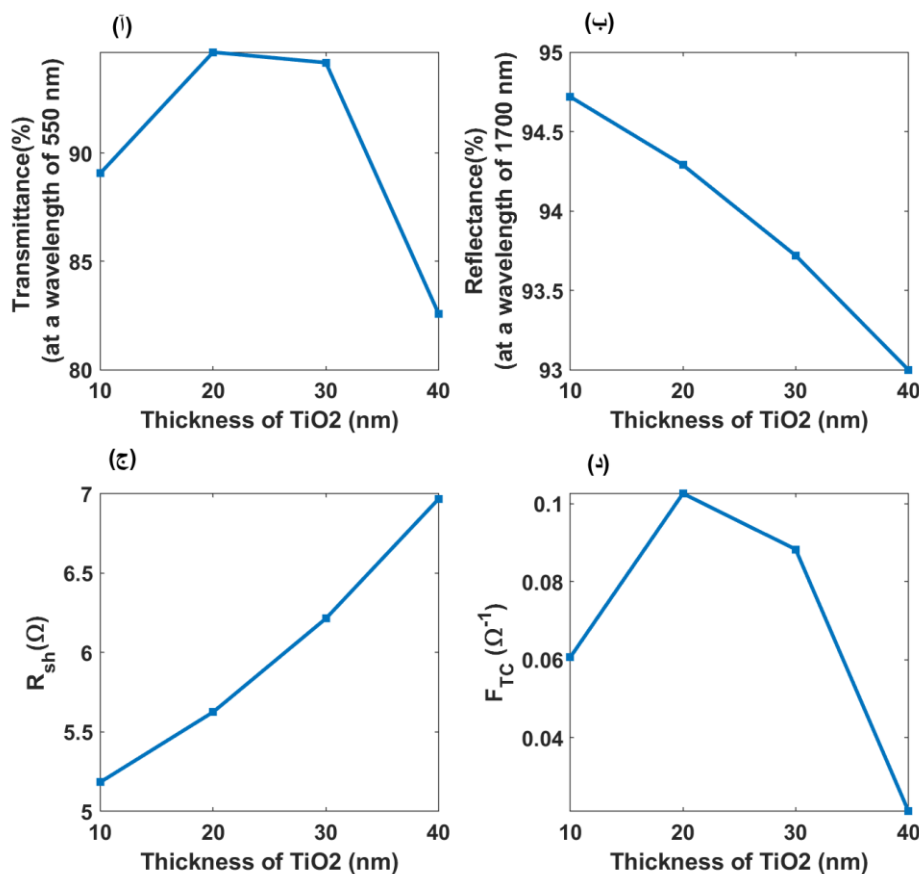
شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود وقتی از ماده‌ی TiO_2 برای لایه‌های دی‌الکتریک اول و پنجم استفاده شده است، ساختار در ناحیه مرئی دارای بیشترین شفافیت است. در اینجا برای بررسی بهترین ماده برای لایه‌های دی‌الکتریک اول و پنجم، ضخامت لایه‌های اول، سوم و پنجم ۳۰ نانومتر و ضخامت لایه‌های فلزی دوم و چهارم ۱۰ نانومتر انتخاب شده‌اند TiO_2 دارای شفافیت نوری بسیار بالا در ناحیه مرئی است. به طوری که نور مرئی را به خوبی عبور می‌دهد و بازتاب آن را به حداقل می‌رساند. با استفاده از TiO_2 به عنوان لایه دی‌الکتریک اول و پنجم در ساختار، نور مرئی که از بالای ساختار عبور می‌کند، به خوبی از طریق لایه دی‌الکتریک TiO_2 عبور می‌کند و به لایه بعدی می‌رسد. این امر باعث افزایش شفافیت ساختار در محدوده نور مرئی می‌شود. در واقع، TiO_2 دارای ضریب شکست بسیار بالاتری نسبت به مواد ZrO_2 و SnO_2 در محدوده نور مرئی است. ضریب شکست بالا به این معنی است که کمترین میزان نور در مرزهای جداسازی لایه‌ها بازتاب می‌شود. با استفاده از TiO_2 به عنوان لایه دی‌الکتریک، بازتاب نور در محدوده نور مرئی کاهش می‌یابد و نور به خوبی از طریق ساختار عبور می‌کند. این امر نیز به افزایش شفافیت نوری ساختار کمک می‌کند. بنابراین، در این ساختار پنج لایه‌ای مورد بررسی از مواد TiO_2 برای لایه‌های اول و پنجم استفاده شده است.



شکل ۵: تراگسیل و بازتاب نوری ساختار پنج لایه‌ای $\text{TiO}_2 \times \text{nm} / \text{Ag} / \text{ZnS} / \text{Ag} / \text{TiO}_2 \times \text{nm}$

شفافیت نوری و افزایش بازتاب نور در ناحیه مرئی و مادون قرمز می‌شود. بنابراین، با توجه به تأثیر جذب و راه نوری لایه TiO_2 و تداخل سازنده در ساختار، ضخامت بهینه لایه TiO_2 ۲۰nm بوده است. در این حدود، جذب نور در لایه TiO_2 بهینه شده و شفافیت نوری بالاتری حاصل می‌شود. با افزایش ضخامت بیشتر از این مقدار، تداخل سازنده افزایش یافته و بازتاب نور در ساختار افزایش می‌یابد که منجر به کاهش شفافیت نوری می‌شود.

مواد ساختار بیشتر می‌شود. این باعث کاهش شفافیت نوری نمونه می‌شود، زیرا کمترین میزان نور از ساختار عبور می‌کند. همچنین، افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 بیش از ۲۰nm به افزایش اختلاف راه نوری بین لایه‌های TiO_2 و لایه‌های دیگر مانند Ag و ZnS منجر می‌شود. این اختلاف باعث افزایش بازتاب نور در مرزهای جداکننده لایه‌ها می‌شود. با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 ، میزان نوری که از بالای ساختار عبور می‌کند نیز کاهش می‌یابد. بطور کلی با افزایش ضخامت لایه‌های TiO_2 بیش از ۲۰nm در ساختار مذکور منجر به کاهش



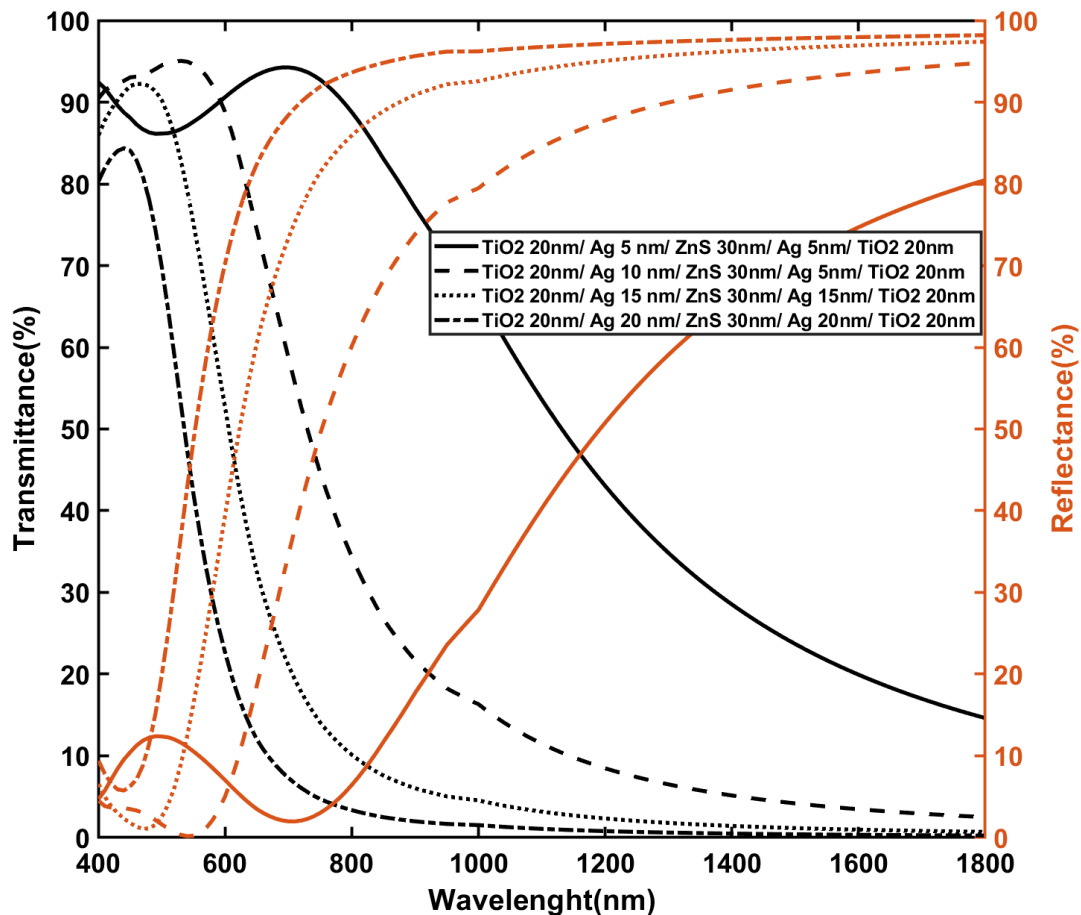
شکل ۶ (أ) تراگسیلی نوری در طول موج ۵۵۰ نانومتر، (ب) بازتاب نوری در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر، (ج) مقاومت الکتریکی سطحی و (د) ضریب شایستگی برای ساختار $\text{TiO}_2 \times \text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{ZnS} 30\text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{TiO}_2 \times \text{nm}$ حسب ضخامت لایه TiO_2

جدول ۱: مقدار عددی تراگسیل و بازتاب نوری، مقاومت الکتریکی سطحی و ضریب شایستگی ساختار $\text{TiO}_2 \times \text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{ZnS} 30\text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{TiO}_2 \times \text{nm}$

ساختار	Tmax% (at 550nm)	R% (at 1700nm)	R _{sh} (Ω/sq)	F _{TC} (Ω ⁻¹)
TiO ₂ 10nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/TiO ₂ 10nm	۸۹/۰۷	۹۴/۷۲	۵/۱۸۳	۰/۰۶۰۶
TiO ₂ 20nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/TiO ₂ 20nm	۹۴/۶۵	۹۴/۲۹	۵/۶۲۴	۰/۱۰۲۶
TiO ₂ 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/TiO ₂ 30nm	۹۴/۱۷	۹۳/۷۲	۶/۲۱۳	۰/۰۸۸۳
TiO ₂ 40nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/TiO ₂ 40nm	۸۲/۵۹	۹۳	۶/۹۷	۰/۰۲۱۲

دی الکتریک TiO₂ برابر با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰nm هست، بازتاب نور در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر به ترتیب ۹۴/۷۲، ۹۴/۲۹، ۹۴/۱۷ و ۸۲/۵۹ درصد است و با توجه به این نکته انتظار می رود که مقاومت الکتریکی سطحی با افزایش ضخامت لایه دی الکتریک TiO₂ افزایش یابد و رسانایی ساختار کاهش یابد که این نکته در شکل ۶-ج نیز قابل مشاهده است. در ساختار فوق برای حالتیکه ضخامت لایه TiO₂ ۲۰ نانومتر است، ساختار دارای بیشترین ضریب شایستگی هست. هرچند برای ساختار فوق وقتیکه ضخامت لایه TiO₂ ۱۰ نانومتر است دارای کمترین مقاومت الکتریکی سطحی است ولی در این ساختار پنج لایه ای، ضخامت بهینه ۲۰nm برای لایه دی الکتریک TiO₂ است.

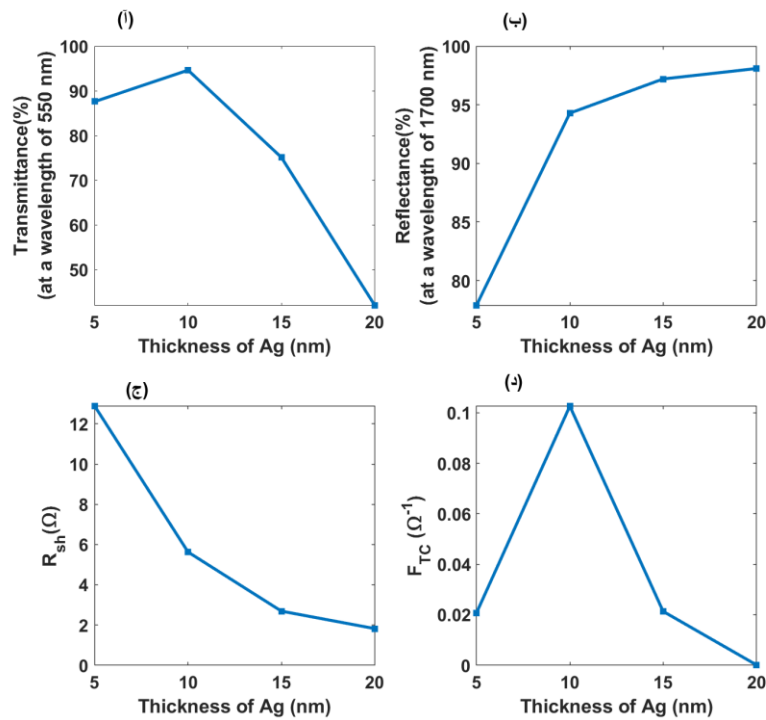
طبق شکل ۶-آ و جدول ۱، برای ساختار $\text{TiO}_2 \times \text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{ZnS} 30\text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{TiO}_2 \times \text{nm}$ وقتیکه ضخامت لایه دی الکتریک TiO₂ برابر با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰nm هست، در طول موج ۵۵۰nm (طول موجی که چشم بیشترین حساسیت را به آن دارد)، درصد تراگسیلی به ترتیب برابر با ۸۹/۰۷، ۹۴/۶۵، ۹۴/۱۷ و ۸۲/۵۹ درصد است که بیشترین تراگسیلی در ناحیه مرئی و طول موج ۵۵۰nm برای ساختار $\text{TiO}_2 20\text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{ZnS} 30\text{nm} / \text{Ag} 10\text{nm} / \text{TiO}_2 20\text{nm}$ است و طبق شکل ۶-ب، وقتی ضخامت لایه TiO₂ از ۱۰nm تا ۴۰nm افزایش می یابد، بازتاب در ناحیه فرورسرخ و طول موج ۱۷۰۰nm کاهش می یابد که مطابق جدول ۱ برای حالتی که ضخامت لایه



شکل ۷: تراگسیل و بازتاب نوری ساختار پنج لایه‌ای TiO_2 20nm/Ag x nm/ZnS 30nm/Ag x nm/ TiO_2 20nm

افزایش یافته است. در واقع لایه‌های نقره به عنوان لایه‌های فلزی دارای رانش آزاد الکترون‌ها هستند و موجب انتقال الکتریکی خوبی در ساختار می‌شوند. با افزایش ضخامت لایه‌های نقره، فاصله میان لایه‌ها افزایش می‌یابد و اثر تداخل نور در ساختار کاهش می‌یابد، که باعث کاهش شفافیت در ناحیه مرئی می‌شود و همچنین ضخامت بیشتر لایه‌های نقره منجر به افزایش تداخل نور در ساختار می‌شود [۲۰]. نوری که از بالای ساختار عبور می‌کند و به لایه‌های فلزی نقره برخورد می‌کند، ممکن است بازتاب شود و به سمت بالا بازگردد. این بازتاب نور منجر به افزایش شدت نور در ناحیه مرئی و فرورسرخ می‌شود.

در شکل ۷، به بررسی تراگسیلی نور در ناحیه مرئی برای ساختار $TiO_2/Ag/ZnS/Ag/TiO_2$ بر روی بستر شیشه، به ازای ضخامت لایه‌های فلزی نقره بین ۵ تا ۲۰nm و ضخامت لایه دی‌الکتریک ZnS ۳۰nm و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک TiO_2 ۲۰nm پرداخته شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌کنیم با افزایش ضخامت لایه‌های نقره از ۵nm به ۱۰nm شفافیت نوری نمونه افزایش پیدا کرده و سپس با افزایش ضخامت لایه‌های نقره از ۱۰nm تا ۲۰nm شفافیت نوری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. و با افزایش ضخامت لایه‌های نقره از ۵nm تا ۲۰nm، بازتاب در ناحیه مرئی و مادون قرمز



شکل ۸: (ا) تراگسیلی نوری در طول موج ۵۵۰ نانومتر، (ب) بازتاب نوری در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر، (ج) مقاومت الکتریکی سطحی و (د) ضریب شایستگی برای ساختار TiO_2 20nm/Ag x nm/ZnS 30nm/Ag x nm/TiO₂ 20nm بر حسب ضخامت لایه Ag

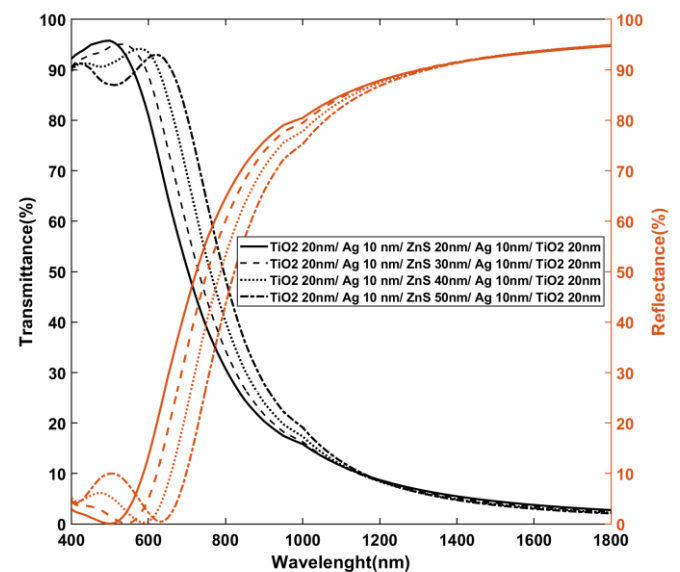
جدول ۲: مقدار عددی تراگسیل و بازتاب نوری، مقاومت الکتریکی سطحی و ضریب شایستگی ساختار TiO_2 20nm/Ag x nm/ZnS 30nm/Ag x nm/TiO₂ 20nm

ساختار	Tmax% (at 550nm)	R% (at 1700nm)	R_{sh} (Ω /sq)	F_{TC} (Ω^{-1})
TiO_2 20nm/Ag 5nm/ZnS 30nm/Ag 5nm/ TiO_2 20nm	۸۷/۶۲	۷۷/۸۹	۱۲/۸۸	۰/۰۲۰۷
TiO_2 20nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/ TiO_2 20nm	۹۴/۶۵	۹۴/۲۹	۵/۶۲۴	۰/۱۰۲۶
TiO_2 20nm/Ag 15nm/ZnS 30nm/Ag 15nm/ TiO_2 20nm	۷۵/۱۲	۹۷/۲۱	۲/۶۸۶	۰/۰۲۱۳
TiO_2 20nm/Ag 20nm/ZnS 30nm/Ag 20nm/ TiO_2 20nm	۴۲	۹۸/۱	۱/۸۱۸	۰/۰۰۰۰۹۴

ساختار TiO_2 20nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/ TiO_2 20nm است و طبق شکل ۸-ب وقتی ضخامت لایه نقره از ۵nm تا ۲۰nm افزایش می‌یابد، بازتاب در ناحیه مادون قرمز و طول موج ۱۷۰۰nm افزایش می‌یابد که مطابق جدول ۲ برای حالتی که ضخامت لایه فلزی نقره ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰nm است، بازتاب نور در طول موج ۱۷۰۰nm به ترتیب ۷۷/۸۹، ۹۴/۲۹،

طبق شکل ۸-ا و جدول ۲، برای ساختار TiO_2 20nm/Ag/ZnS 30nm/Ag/ TiO_2 20nm وقتی که ضخامت لایه فلزی نقره ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰nm هست، تراگسیلی در طول موج ۵۵۰nm (طول موجی که چشم بیشترین حساسیت را به آن دارد) به ترتیب برابر با ۸۷/۶۲، ۹۴/۶۵، ۷۵/۱۲ و ۴۲ درصد است که بیشترین تراگسیلی در ناحیه مرئی و طول موج ۵۵۰nm برای

۹۷/۲۱ و ۹۸/۱ درصد است و باتوجه به این نکته انتظار می‌رود که مقاومت الکتریکی سطحی با افزایش ضخامت لایه فلزی کاهش یابد و رسانایی ساختار بهبود یابد که این نکته در شکل ۸-ج نیز قابل مشاهده است و مطابق جدول ۲ وقتی ضخامت لایه نقره در ساختار TiO_2 20nm/Ag/ZnS 30nm/Ag/ TiO_2 20nm به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۱۵ نانومتر است، مقاومت الکتریکی سطحی به ترتیب ۱۲/۸۸، ۵/۶۲۴، ۲/۶۸۶ و $1/118 (\Omega/\text{sq})$ است ولی در ساختار بالا برای حالتیکه ضخامت لایه فلزی نقره ۱۰nm است، ساختار دارای بیشترین ضریب شایستگی هست. هرچند برای ساختار بالا وقتیکه ضخامت لایه نقره ۲۰nm است دارای کمترین مقاومت الکتریکی سطحی است ولی در این ساختار پنج لایه‌ای ساندویچ شده توسط لایه های TiO_2 ، ZnS و Ag، ضخامت بهینه ۱۰nm را برای ضخامت لایه فلزی نقره اختیار کرده‌ایم.

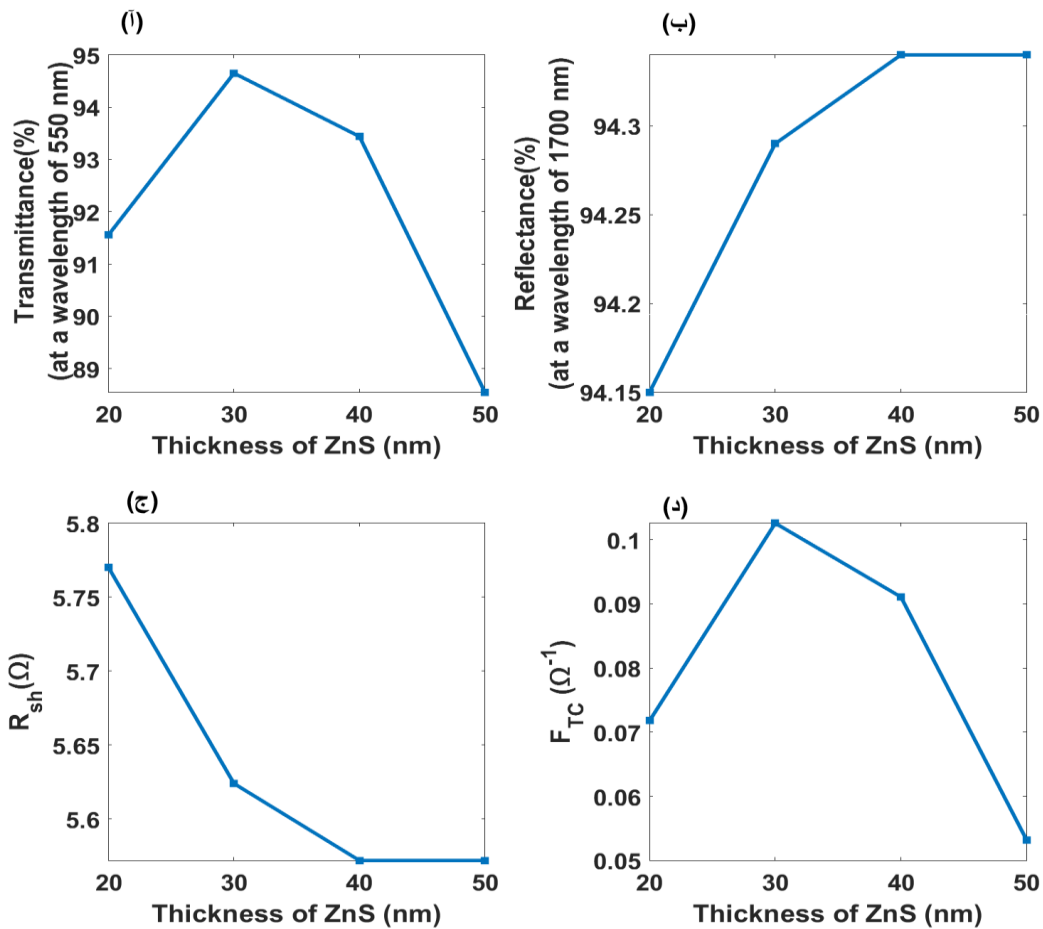


شکل ۹: تراگسیل و بازتاب نوری ساختار پنج لایه‌ای TiO_2 20nm/Ag 10nm/ZnS x nm/Ag 10nm/ TiO_2 20nm

در شکل ۹، به بررسی تراگسیلی نور در ناحیه مرئی برای ساختار TiO_2 /Ag/ZnS/Ag/ TiO_2 بر روی بستر شیشه، به ازای ضخامت لایه‌های فلزی نقره ۱۰nm و ضخامت لایه دی‌الکتریک ZnS از ۲۰ تا ۵۰nm و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک TiO_2 ۲۰nm پرداخته شده است. همانطور که در

شکل ۹ مشاهده می‌کنیم، با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS از ۱۰nm به ۲۰nm، شفافیت نوری نمونه در طول موج ۵۵۰ نانومتر افزایش پیدا کرده و سپس، با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS از ۲۰nm تا ۴۰nm شفافیت نوری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. و با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS از ۱۰nm تا ۴۰nm، بازتاب در طول موج ۱۷۰۰nm کاهش یافته است. افزایش شفافیت نوری نمونه با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS از ۱۰ به ۲۰nm به دلیل تغییراتی در تعامل نور با ساختار تشکیل دهنده‌ها رخ می‌دهد. با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS، تعداد اندازه‌های پلاریتونی (plasmonic modes) در ساختار افزایش می‌یابد [۲۱ و ۲۲]. این اندازه‌های پلاریتونی ناشی از تعامل کوآتومی بین نور و الکترون‌های آزاد در لایه فلزی نقره هستند. در ساختار TiO_2 /Ag/ZnS/Ag/ TiO_2 ، لایه فلزی نقره (Ag) بین دو لایه دی‌الکتریک قرار دارد و لایه‌های ZnS بین لایه‌های Ag درونی و خارجی قرار می‌گیرند. ضخامت لایه‌های ZnS در این ساختار تأثیر زیادی بر تعامل نور با ساختار دارد. زمانی که ضخامت لایه‌های ZnS از ۱۰ به ۲۰nm افزایش می‌یابد، مسیر طی شده با نور در لایه‌های ZnS افزایش می‌یابد. این افزایش مسیر طی شده با نور منجر به کاهش احتمال برهم‌کنش نور با الکترون‌های آزاد در لایه‌های Ag می‌شود. در نتیجه، کمترین نور در طول موج ۵۵۰nm توسط ساختار جذب می‌شود و شفافیت نوری نمونه افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS از ۲۰ تا ۴۰nm مسیر طی شده با نور در لایه‌های ZnS بیشتر می‌شود. این باعث افزایش احتمال جذب و پراکندگی نور در لایه‌های ZnS می‌شود. در نتیجه، شفافیت در طول موج ۵۵۰ نانومتر کاهش می‌یابد. در مورد بازتاب، با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS از ۱۰ تا ۴۰nm تفاوت ضریب شکست بین لایه‌های Ag و ZnS افزایش می‌یابد. این باعث کاهش بازتاب نور در مرزهای جداکننده لایه‌ها می‌شود و بازتاب در طول موج ۱۷۰۰nm کاهش می‌یابد. به طور خلاصه، با افزایش ضخامت لایه‌های ZnS، مسیر طی شده توسط نور افزایش می‌یابد که منجر به کاهش احتمال جذب و پراکنش نور با لایه‌های فلزی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش ضخامت لایه‌های ZnS باعث کاهش تفاوت ضریب شکست بین لایه‌های Ag و ZnS می‌شود،

که به نوبه خود منجر به کاهش بازتاب نور در مرزهای جداکننده لایه‌ها می‌شود.



شکل ۱۰: (ا) تراگسیلی نوری در طول موج ۵۵۰ نانومتر، (ب) بازتاب نوری در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر، (ج) مقاومت الکتریکی سطحی و (د) ضریب شایستگی برای ساختار TiO_2 20nm/Ag 10nm/ZnS x nm/Ag 10nm/TiO₂ 20nm بر حسب ضخامت لایه ZnS

جدول ۳: مقدار عددی تراگسیل و بازتاب نوری، مقاومت الکتریکی سطحی و ضریب شایستگی ساختار TiO_2 20nm/Ag 10nm/ZnS x nm/Ag 10nm/TiO₂ 20nm

ساختار	Tmax% (at 550nm)	R% (at 1700nm)	R_{sh} (Ω /sq)	F_{TC} (Ω^{-1})
TiO ₂ 20nm/Ag 5nm/ZnS 30nm/Ag 5nm/TiO ₂ 20nm	۹۱/۵۶	۹۴/۱۵	۵/۷۷	۰/۰۷۱۸
TiO ₂ 20nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/TiO ₂ 20nm	۹۴/۶۵	۹۴/۲۹	۵/۶۲۴	۰/۱۰۲۶
TiO ₂ 20nm/Ag 15nm/ZnS 30nm/Ag 15nm/TiO ₂ 20nm	۹۳/۴۴	۹۴/۳۴	۵/۵۷۲	۰/۰۹۱۱
TiO ₂ 20nm/Ag 20nm/ZnS 30nm/Ag 20nm/TiO ₂ 20nm	۸۸/۵۵	۹۴/۳۴	۵/۵۷۲	۰/۰۵۳۲

type TCOs," Progress in Materials Science, 96, 86-110, 2018, doi:10.1016/j.pmatsci.2018.03.004.

[2] D. Jayathilake, T. Nirmal Peiris,"Overview on Transparent Conducting Oxides and State of the Art of Low-cost Doped ZnO Systems," SF J Material Chem Eng, 1(1), 1004, 2018,

[3] B.K. Min, S.D. Choi,"SnO₂ thin film gas sensor fabricated by ion beam deposition,"Sensors and Actuators B: Chemical, 98(2-3), 239-246, 2004, doi:10.1016/j.snb.2003.10.023.

[4] S.K. Poznyak, A.N. Golubev, A.I. Kulak,"Correlation between surface properties and photocatalytic and photoelectrochemical activity of In₂O₃ nanocrystalline films and powders," Surface science, 454, 396-401, 2000, doi:10.1016/s0039-6028(00)00064-9.

[5] H.R. Fallah, M.J. Vahid,"Substrate temperature effect on transparent heat reflecting nanocrystalline ITO films prepared by electron beam evaporation," Renewable Energy, 35(7), 1527-1530, 2010, doi:10.1016/j.renene.2009.10.034.

[6] E. Nam, Y.H. Kang, D. Jung, Y.S. Kim,"Anode material properties of Ga-doped ZnO thin films by pulsed DC

TiO₂ 20nm/Ag طبق شکل ۱۰-۱ و جدول ۳، برای ساختار 10nm/ZnS/Ag 10nm/ TiO₂ 20nm لایه دی الکتریک ZnS ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰nm هست، تراگسیلی در طول موج ۵۵۰nm به ترتیب برابر با ۹۱/۵۶، ۹۴/۶۵، ۹۳/۴۴ و ۸۸/۵۵ درصد است و بازتاب در ناحیه فرورسرخ و طول موج ۱۷۰۰ نانومتر مطابق جدول ۳ برای حالتی که ضخامت لایه دی الکتریک ZnS ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰nm است به ترتیب ۹۴/۲۹، ۹۴/۳۴ و ۹۴/۳۴ درصد است و همچنین مقاومت الکتریکی سطحی به ترتیب ۵/۸۱، ۵/۹۵۴، ۶/۳۲۸ (Ω/sq) و ۶/۹۳ HSJ در حالتیکه ضخامت لایه دی الکتریک TiO₂ ۳۰ است، ساختار دارای بیشترین ضریب شایستگی هست که برابر با $F_{TC}=0.1026 \Omega^{-1}$ است که در نهایت برای این ساختار پنج لایه‌ای ساندویچ شده‌ی آینه‌ای با لایه‌های Ag، TiO₂ و ZnS، ضخامت بهینه ۳۰ nm را برای ضخامت لایه دی الکتریک ZnS اختیار کرده‌ایم.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ما سیستم پنج لایه‌ای ساندویچی آینه‌ای شکل TiO₂ 20nm/Ag 10nm/ZnS30nm/Ag 10nm/ TiO₂ 20nm را به عنوان پوشش رسانای شفاف طراحی کردیم. جنس بهینه برای لایه‌های اول و پنجم دی الکتریک، TiO₂ و برای لایه‌های دوم و چهارم فلزی، Ag و همچنین، جنس بهینه برای لایه‌ی سوم ZnS بدست آمد که ضخامت بهینه برای لایه‌های TiO₂، ZnS، Ag و ۲۰، ۳۰ و ۱۰ nm بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه طراحی شده تراگسیل در ناحیه مرئی ۹۴٫۶۵٪ و مقاومت الکتریکی سطحی آن (Ω/sq) ۵/۶۲۴ و ضریب شایستگی آن نیز (Ω⁻¹) ۰/۱۰۲۶ بدست آمده است. بنابراین این سیستم پنج لایه‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای الکترودهای مرسوم ITO و دیگر الکترودها باشد.

مراجع

[1] A. Mallick, D. Basak,"Revisiting the electrical and optical transmission properties of co-doped ZnO thin films as n-

annealing on structural, electrical and optical properties of nanostructured ZnS/Ag/ZnS films,” *Thin Solid Films*, 519(16), 5662-5666, 2011, doi:10.1016/j.tsf.2011.03.023.

[12] B.N. Cotier, M.D. Upward, F.H. Jones, P. Moriarty, P.H. Beton,”Atomic scale protection using fullerene encapsulation,” *Applied Physics Letters*, 78(1), 126-128, 2001, doi:10.1063/1.1336553.

[13] P. Hones, C. Zakri, P.E. Schmid, F. Lévy, O.R. Shojaei,”Oxidation resistance of protective coatings studied by spectroscopic ellipsometry,” *Applied Physics Letters*, 76(22), 3194-3196, 2000, doi:10.1063/1.126626.

[14] M.N. Shan, S.S Wang, Z.Q. Bian, J.P. Liu, Y.L. Zhao,”Hybrid inverted organic photovoltaic cells based on nanoporous TiO₂ films and organic small molecules,” *Solar energy materials and solar cells*, 93(9), 1613-1617, 2009, doi:10.1016/j.solmat.2009.04.017.

[15] G. Leftheriotis, S. Papaefthimiou, P. Yianoulis,”Development of multilayer transparent conductive coatings,” *Solid State Ionics*, 136, 655-661, 2000, doi:10.1016/s0167-2738(00)00328-3.

magnetron sputtering method for organic light emitting diodes,” *Thin Solid Films*, 518(22), 6245-6248, 2010, doi:10.1016/j.tsf.2010.02.068.

[7] B.H. Lee, I.G. Kim, S.W. Cho, S.H. Lee,”Effect of process parameters on the characteristics of indium tin oxide thin film for flat panel display application,” *Thin Solid Films*, 302(1-2), 25-30, 1997, doi:10.1016/s0040-6090(96)09581-8.

[8] J. Yu, N. Wang, Y. Zang, Y. Jiang,”Organic photovoltaic cells based on TPBi as a cathode buffer layer,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 664-668, 2011, doi:10.1016/j.solmat.2010.09.037.

[9] H.C. Lee, O.O. Park,”Electron scattering mechanisms in indium-tin-oxide thin films: grain boundary and ionized impurity scattering,” *Vacuum*, 75(3), 275-282, 2004, doi:10.1016/j.vacuum.2004.03.008.

[10] G.F. Wang, X.M. Tao, R.X. Wang, “Flexible organic light-emitting diodes with a polymeric nanocomposite anode,” *Nanotechnology*, 19(14), 145201, 2008, doi:10.1088/0957-4484/19/14/145201.

[11] M. Neghabi, A. Behjat, S.M.B. Ghorashi, S.M.A. Salehi,”The effect of

applications,” *Vacuum*, 86(9), 1318-1322, 2012, doi:10.1016/j.vacuum.2011.12.002.

[21] S.A. Maier,” *Plasmonics: fundamentals and applications*,” (Vol. 1, p. 245). New York: springer, 2007, doi:10.1007/0-387-37825-1.

[22] H. Ogura, Z.L. Wang,”Surface-plasmon mode on a random rough metal surface: enhanced backscattering and localization,” *Physical Review B*, 53(15), 10358, 1996, doi:10.1103/physrevb.53.10358.

[16] P. Zhao, W. Su, R. Wang, X. Xu, F. Zhang,”Properties of thin silver films with different thickness,” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 41(3), 387-390, 2009, doi:10.1016/j.physe.2008.08.062.

[17] X. Liu, X. Cai, J. Qiao, J. Mao, N. Jiang,”The design of ZnS/Ag/ZnS transparent conductive multilayer films,” *Thin Solid Films*, 441(1-2), 200-206, 2003, doi:10.1016/S0040-6090(03)00141-X.

[18] G. Haacke,”New figure of merit for transparent conductors,” *Journal of Applied physics*, 47(9), 4086-4089, 1976, doi:10.1063/1.323240.

[19] S.M.A. Durrani, E.E. Khawaja, A.M. Al-Shukri, M.F. Al-Kuhaili,”Dielectric/Ag/dielectric coated energy-efficient glass windows for warm climates,” *Energy and Buildings*, 36(9), 891-898, 2004, doi:10.1016/j.enbuild.2004.02.003.

[20] M.G. Varnamkhasti, H.R. Fallah, M. Mostajaboddavati, A. Hassanzadeh,”Influence of Ag thickness on electrical, optical and structural properties of nanocrystalline MoO₃/Ag/ITO multilayer for optoelectronic



Designing and improving the performance of a transparent conductive electrode using a $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ mirror-shaped multilayer nano structure

M. Razmpoosh^{1,*} and B. Abedi Ravan²

1. Faculty of Physics, Tabriz University, Tabriz, East Azerbaijan

2. Faculty of Basic Sciences, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Tehran

Abstract: In this research, a multilayer transparent conductive electrode was designed and optimized using a D/M/D/M/D multilayer nanostructure on a glass substrate. The main purpose of this design was to improve the optical transmission properties and electrical resistance. The optimal material and thickness of each layer were determined using Essential Macleod software. The electrical and optical properties of the multilayer nanostructure were then investigated, including surface electrical resistance, optical transmittance, and reflectance. The results showed that the best structure was $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$, with silver layers of 10 nm thickness, ZnS layers of 30 nm thickness, and TiO_2 layers of 20 nm thickness. Under these conditions, the coefficient of merit $\text{FTC}=0.11026 \Omega$ was obtained, indicating the highest efficiency of the structure. The surface electrical resistance was approximately $5.624\Omega/\text{sq}$, and the optical transmittance in the visible region was 94.65%. These values demonstrate that this structure is suitable for use as a transparent conductive electrode in optoelectronic applications. Therefore, the $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{ZnS}/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ structure can serve as a suitable substrate in nanoelectronic and optoelectronic technologies. The article focuses on the 5-layer electrode with mirror symmetry based on D/M/D/M/D layers, exploring the influence of various factors such as layer materials, thickness, and arrangement, and optimizing the structure to achieve the highest transparency and conductivity.

Keywords: Multilayer electrodes, Symmetric multilayer structures, Optically transparent, Mirror-shaped nanostructures