

طراحی الکتروود نازک رسانای شفاف ساندویچ شکل ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS بر روی بستر PET

میلاذ رزم پوش^۱، بهرام عابدی روان^۲

^{۱*} دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ دانشکده علوم پایه، دانشگاه ستاری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، یک سیستم چند لایه‌ای نانوساختار رسانای شفاف ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS بر روی بستر پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) با استفاده از نرم‌افزار Essential Macleod طراحی و شبیه‌سازی شد. هدف اصلی از طراحی این ساختار، بهبود و بهینه‌سازی ویژگی‌های تراگسیلی اپتیکی و مقاومت الکتریکی بود. برای دستیابی به این هدف، ضخامت بهینه هر یک از لایه‌ها به گونه‌ای محاسبه شد که همزمان تراگسیلی اپتیکی بالا و مقاومت الکتریکی پایین را ارائه دهد. با استفاده از نرم‌افزار Essential Macleod و تحلیل شبیه‌سازی، ضخامت بهینه برای هر لایه به طور دقیق تعیین شد. این روش طراحی و بهینه‌سازی ساختار ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS، امکان استفاده بهینه از این ساختار را در کاربردهای مختلف اپتوالکترونیکی فراهم می‌کند. برخی خواص الکتریکی و اپتیکی سیستم چندلایه‌ای ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS مورد بررسی قرار گرفت. خواص مورد اندازه‌گیری شامل مقاومت الکتریکی سطحی، تراگسیلی اپتیکی و بازتاب بوده است. ساختار چندلایه‌ای ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS بهترین نتایج را در صورتی که ضخامت لایه‌های نقره ۱۰ نانومتر و ضخامت لایه‌های ZnS ۳۰ نانومتر بود، به دست آمد. و در این شرایط، ضریب شایستگی $F_{TC}=0.0745 \Omega^{-1}$ بدست آمد که بیشترین مقدار آن است و نشان‌دهنده بهترین کارایی ساختار است. همچنین، مقاومت الکتریکی سطحی پایین در حدود $6,328 \Omega/sq$ و تراگسیلی در ناحیه مرئی برابر با ۹۲,۷۵٪ بدست آمد. مقاومت الکتریکی پایین و تراگسیلی بالا این ساختار را به عنوان الکتروود رسانای شفاف در کاربردهای اپتوالکترونیک مقدر می‌سازد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱/۱۸

شاپای چاپی: 2588-493x

شاپای الکترونیکی: 2588-4921

* نویسنده مسئول

u.razmpoosh@gmail.com



واژگان کلیدی: الکتروود، رسانا، شفاف، نازک، PET

مقدمه

قابل رؤیت طیف نور هستند. به دلیل کاربردهای نوآورانه‌ای که در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی متنوعی مانند نمایشگرهای پنلی بزرگ، صفحه‌های لمسی و سلول‌های خورشیدی دارند، توجه قابل توجهی به خود جلب کرده‌اند.

اکسیدهای رسانا و شفاف^۱ (TCOs)، موادی هستند که همزمان دارای ویژگی‌های مقاومت الکتریکی کم و شفافیت بالا در ناحیه

^۱ Transparent Conductive Oxides

این مواد به لطف توانایی‌های خاص خود در انتقال الکتریسیته و تردیدهای کمتر در امتداد نور قابل رؤیت، به عنوان یک انتخاب مطلوب در صنعت الکترونیک قدرتمند شناخته شده‌اند [۴-۱]. تا به امروز، اکسید ایندیوم-قلع (ITO) به عنوان محبوب‌ترین گزینه اکسید رسانا و شفاف (TCO) شناخته شده است. ویژگی‌های منحصر به فردی مانند مقاومت الکتریکی بسیار پایین (تقریباً $4-10 \Omega/\text{sq}$) و شفافیت بالا (حدود ۸۰ درصد)، آن را در صنایع الکترونیک پیشرفته به عنوان انتخاب اصلی تبدیل کرده است. اما، مصرف گسترده ITO به عنوان TCO به معنای مصرف بیشترین مقدار ایندیوم در بازار است. این موضوع می‌تواند به عواقب قابل توجهی از جمله کاهش ارزش بازار ایندیوم منجر شود [۵ و ۶]. همچنین، ITO با محدودیت‌هایی مواجه است؛ زیرا برای دستیابی به رسانایی و شفافیت بهتر، به طور معمول نیاز به تیمار حرارتی در دمای تقریبی ۳۰۰ درجه سانتیگراد دارد [۷]. در نتیجه، بررسی جایگزینی مناسب و کارآمد برای ITO در صنعت الکترونیک الزامی است تا مشکلات مربوط به مصرف ایندیوم و محدودیت‌های عملکرد ITO را بهبود بخشیم.

بنابراین، در حال حاضر نیاز فوری به جایگزینی ارزان قیمت برای ITO وجود دارد. تحقیقات اخیر نشان داده است که چندین گزینه مناسب وجود دارد. یکی از این گزینه‌ها استفاده از اکسیدهای فلزی دوپ شده مانند AZO و GZO است. این اکسیدها، که ارزانتر از ITO هستند، توسط چندین پژوهشگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۸-۱۱]. جایگزین دیگری که مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از سیستم‌های چندلایه دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (D/M/D) است. در این سیستم‌ها، یک لایه نازک فلزی بین دو لایه دی‌الکتریک قرار می‌گیرد. این ساختارها توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند و به عنوان جایگزینی مناسب برای ITO مطرح شده‌اند [۱۲-۱۶].

به طور معمول، در ساختارهای D/M/D، برای لایه فلزی از نقره با ضخامت حدود ۱۰-۲۰ نانومتر استفاده می‌شود. این انتخاب به دلیل دو ویژگی مهم نقره، یعنی هدایت الکتریکی بالا و ضریب

خاموشی کم در دامنه قابل رؤیت، صورت می‌گیرد [۱۷-۱۹]. به این ترتیب، لایه نازک نقره به عنوان یک لایه فلزی میان دو لایه دی‌الکتریک در ساختار D/M/D قرار می‌گیرد. بر اساس گزارش‌ها، ساختار چندلایه D/M/D نسبت به فیلم TCO تک‌لایه، عملکرد بهتری دارد و ضخامت آن نیز کمتر است. با استفاده از این ساختار، بازتاب از لایه فلزی کاهش یافته و شفافیت بیشتری به دست می‌آید. علاوه بر این، این ساختار نشان داده است که مقاومت بهتری نسبت به خرابی‌ها از خود نشان می‌دهد و به طور کلی در برابر عوامل مختلف، مانند خوردگی و خراش، مقاومت بیشتری دارد. در سال ۱۹۰۷، بادیکر^۲ به بررسی هدایت الکتریکی لایه‌های نازک و شفاف اکسید کادمیوم (CdO) پرداخت. او در این تحقیقات، از یک صفحه نازک کادمیوم استفاده کرد که به وسیله اکسیداسیون حرارتی تهیه شده بود. نتایج این تحقیقات نشان داد که اکسید کادمیوم قابلیت تولید لایه‌های نازک TCO را دارد، که به دلیل خواص هدایت الکتریکی و شفافیت بالا، می‌تواند در بسیاری از برنامه‌های الکترونیکی مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. در سال‌های بعد، تحقیقات نشان داد که بسیاری از اکسیدهای دوتایی که عمدتاً از فلزات سنگین تشکیل می‌شوند، دارای خواص شفافیت نوری و هدایت الکتریکی بسیار برجسته‌ای هستند. به عنوان نمونه، اکسیدهای ZrO_2 , TiO_2 , GaO_3 , SnO_2 , ZnO , In_2O_3 و ... از این ترکیبات برخوردارند. این ترکیبات با خواص الکتریکی و نوری برجسته خود، به عنوان لایه‌های نازک شفاف و هادی در برنامه‌های مختلف الکترونیکی و نورپردازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰].

دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) یکی از مواد نیمه‌هادی قدرتمند و با هزینه کم است که از آن به عنوان یک جزء بسیار خوب و پراستفاده در صنایع استفاده می‌شود. یکی از ویژگی‌های برجسته این ماده، بازگشایی باند وسیع آن است که حدود

² Carl Baedeker

۱- جزئیات محاسبات لایه‌های ساختار

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار Macleod که یک ابزار پیشرفته برای طراحی و تحلیل پوشش‌های نازک نوری است، لایه‌های رسانای شفاف طراحی شد. هدف اصلی ما در این تحقیق، ایجاد الکترودی با خواص شفافیت بالا و مقاومت سطحی کم است. برای این منظور، ساختار لایه‌های نازک D/M/D/M/D بر روی زیرلایه پلی اتیلن ترفتالات (PET) طبق شکل ۱ شبیه‌سازی شد. انتخاب PET به دلیل خواص آن از جمله مقاومت بالا در برابر شکستگی، وزن سبک و هزینه مناسب بودن آن صورت گرفت. در مرحله بعد، مقدار شفافیت در این تحقیق، بر روی زیرلایه PET، از مواد دی‌الکتریک ZnS ، ZrO_2 و TiO_2 و فلزات Au ، Ag و Al به عنوان لایه‌های رسانای شفاف استفاده شد. لایه‌های دی‌الکتریک ZnS ، ZrO_2 و TiO_2 به عنوان لایه‌های غیررسانا در طراحی الکترودی شفاف استفاده شده‌اند. این لایه‌ها به دلیل خواص الکتریکی و اپتیکی مناسب، برای ایجاد عایقی موثر در ساختار الکترودی شفاف استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، لایه‌های فلزی Au ، Ag و Al نیز به عنوان لایه‌های رسانا در این ساختار استفاده شده‌اند. این لایه‌های فلزی، به دلیل خواص رسانایی بالا، بهبود شفافیت انتقال نور در الکترودی شفاف را به همراه دارند. هدف از این طراحی، دستیابی به حداکثر شفافیت نوری در محدوده طیفی مرئی و حداقل مقاومت سطحی برای افزایش کارایی الکترودی است. به منظور بهینه‌سازی این ساختار، ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک و فلزی در بازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از لایه دی‌الکتریک ZnS با ضخامت ۳۰ نانومتر و لایه فلزی Ag با ضخامت ۱۰ نانومتر منجر به بهینه‌ترین عملکرد از نظر شفافیت اپتیکی و رسانایی الکتریکی می‌شود. این ترکیب ضخامت موجب افزایش انتقال نوری، کاهش بازتاب و بهبود خواص الکتریکی شده و امکان استفاده از این الکترودی

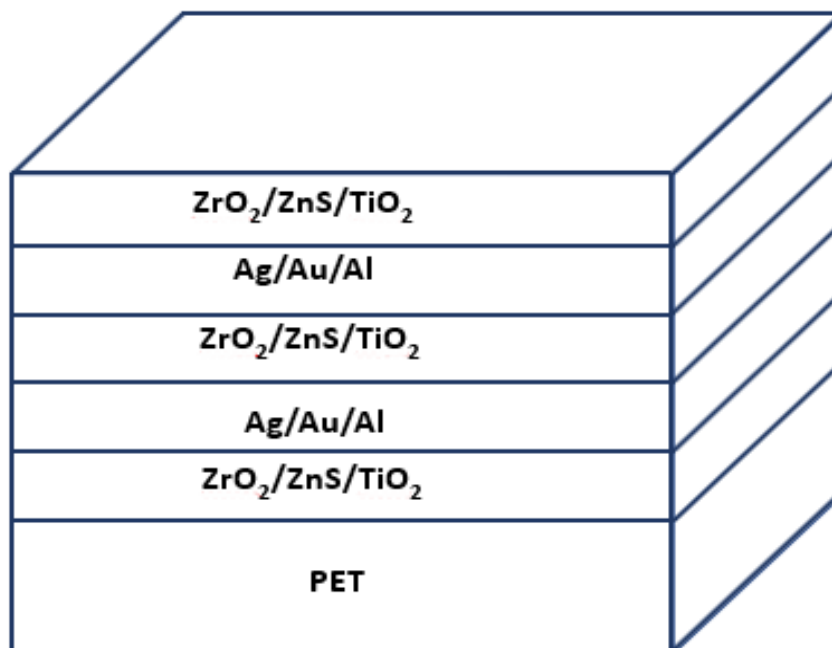
eV ۳,۴ از خود نشان می‌دهد، این ویژگی باعث شفافیت آن در ناحیه مرئی می‌شود. همچنین، دی‌اکسید تیتانیوم بسیار پایدار و مقاوم است و ویژگی‌های فیزیکی برتری از قبیل ثابت الکتریک بالا، مقاومت مکانیکی و شیمیایی عالی را دارا می‌باشد. این ماده همچنین به طور موثری به سطوح دیگر چسبندگی داشته و به عنوان یک ماده پایه در صنایع مختلف، از جمله صنایع الکترونیکی و فوتوکاتالیستیک، استفاده می‌شود [۲۱ و ۲۲]. بنابراین، در این مطالعه، از دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) به عنوان لایه‌ی دی‌الکتریک استفاده شده است. به طور کلی، وقتی لایه‌های فلزی روی لایه‌های دی‌الکتریک قرار می‌گیرند، آن‌ها تمایل دارند که به شکل رشد ولمر-وبر^۳ (رشد سه‌بعدی) رشد کنند. در این نوع رشد، رشد از هسته‌های جداگانه آغاز می‌شود که به تدریج به یکدیگر متصل می‌شوند [۲۳ و ۲۴].

ZnO (اکسید روی) یک نیمه‌هادی با رسانایی بالا است و می‌تواند جریان الکتریکی را به خوبی انتقال دهد. علاوه بر این، ZnO دارای شفافیت بالا در ناحیه مرئی است، که آن را به یک انتخاب مناسب برای برنامه‌هایی که نیاز به هم‌زنگی با نور دارند، تبدیل کرده است. ZrO_2 (اکسید زیرکونیوم) نیز یک نیمه‌هادی با رسانایی بالا است. این ماده دارای خواص رسانا و عایقی قابل تنظیم است، به این معنی که با تغییر شرایط مانند دما، می‌توان خواص رسانایی و عایقی آن را تغییر داد. همچنین، ZrO_2 دارای شفافیت بالا در برخی از نواحی طیفی است، که آن را به یک کاندیدای مناسب برای کاربردهای شفافیت نوری می‌سازد. SnO_2 (اکسید قلع) نیز یک نیمه‌هادی با رسانایی و شفافیت بالا است. این ماده دارای خواص الکتریکی برجسته بوده و می‌تواند جریان الکتریکی را به خوبی منتقل کند. همچنین، SnO_2 دارای شفافیت بالا در نواحی مرئی است، که آن را به یک گزینه مناسب برای کاربردهایی مانند لایه‌های نازک شفاف می‌کند. در مجموع، ZnO ، ZrO_2 و SnO_2 نیز همگی از نیمه‌هادی‌هایی با رسانایی و شفافیت بالا هستند که در برنامه‌های مختلفی از جمله الکترونیک و نورپردازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۵ و ۲۶].

³ Volmer - Weber

ادوات نوری پیشرفته فراهم می‌سازد.

را در کاربردهایی نظیر نمایشگرهای شفاف، سلول‌های خورشیدی و



شکل ۱: شماتیک اولیه ساختار الکترونرود رسانای شفاف

۲- بحث و نتایج

حائز اهمیت است. بنابراین، در طراحی لایه‌های نازک رسانای شفاف، ضخامت هر یه به عنوان یک فاکتور بسیار مهم در ارزیابی عملکرد الکترونرودهای رسانای شفاف و کاربردهای آنها در قطعات اپتوالکترونیک و سایر برنامه‌های نوری، باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

مقاومت سطحی لایه‌های نازک رسانای شفاف را می‌توانیم از معادله ی زیر حساب کنیم:

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

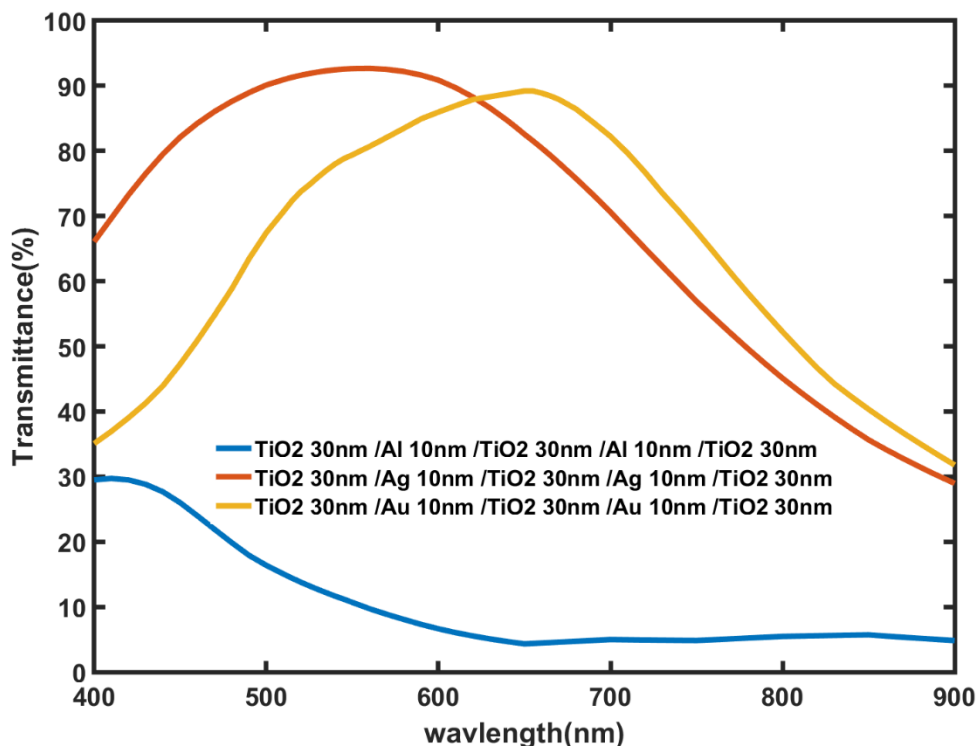
که در آن R بازتاب در ناحیه ی فروسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی و $Z_0 = 377 \Omega$ امپدانس فضای آزاد است. این رابطه نشان میدهد که بازتاب در ناحیه ی فروسرخ به غلظت الکترون در این پوشش ها بستگی دارد. بازتاب در طول موج 1700 nm می‌تواند به عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه ی فروسرخ استفاده شود [۲۷ و ۲۸]. ضریب شایستگی (F_{TC}) (شاخص مهمی است که رابطه بین خواص الکتریکی و

در طراحی لایه‌های نازک رسانای شفاف، ضخامت هر لایه تأثیر قابل توجهی بر بازتاب و تراگسیل نور، و همچنین بر مقاومت الکتریکی سطحی دارد. این عوامل بسیار مهم برای ارزیابی عملکرد الکترونرودهای رسانای شفاف و استفاده آنها در قطعات اپتوالکترونیک و سایر ابزارهای نوری می‌باشند. ضخامت لایه‌های نازک رسانای شفاف می‌تواند تأثیر مستقیم در بازتاب و تراگسیل نور داشته باشد. زمانی که ضخامت لایه‌ها به طور ایده‌آل تنظیم می‌شوند، بازتاب نور به حداقل و تراگسیل به حداکثر ممکن می‌رسد. این ویژگی مهم استفاده از لایه‌های نازک رسانای شفاف در ساختارهای نوری را فراهم می‌کند. همچنین، ضخامت لایه‌های نازک رسانای شفاف تأثیر مستقیمی بر مقاومت سطحی دارد. مقاومت سطحی نشان دهنده مقاومت الکتریکی در سطح لایه است و می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد ساختار نوری داشته باشد. ضخامت مناسب لایه‌ها می‌تواند منجر به کاهش مقاومت سطحی شود که این امر برای انتقال بهتر جریان الکتریکی و کارایی بالاتر ساختار مورد نظر بسیار

که در آن T تراگسیل پوشش های رسانای شفاف در طول موج 550 nm و R_{sh} مقاومت سطحی لایه را نشان می دهد.

اپتیکی پوشش های رسانای شفاف را نشان می دهد. این کمیت را هاک به صورت معادله ی (۲) تعریف کرده است [۲۹].

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



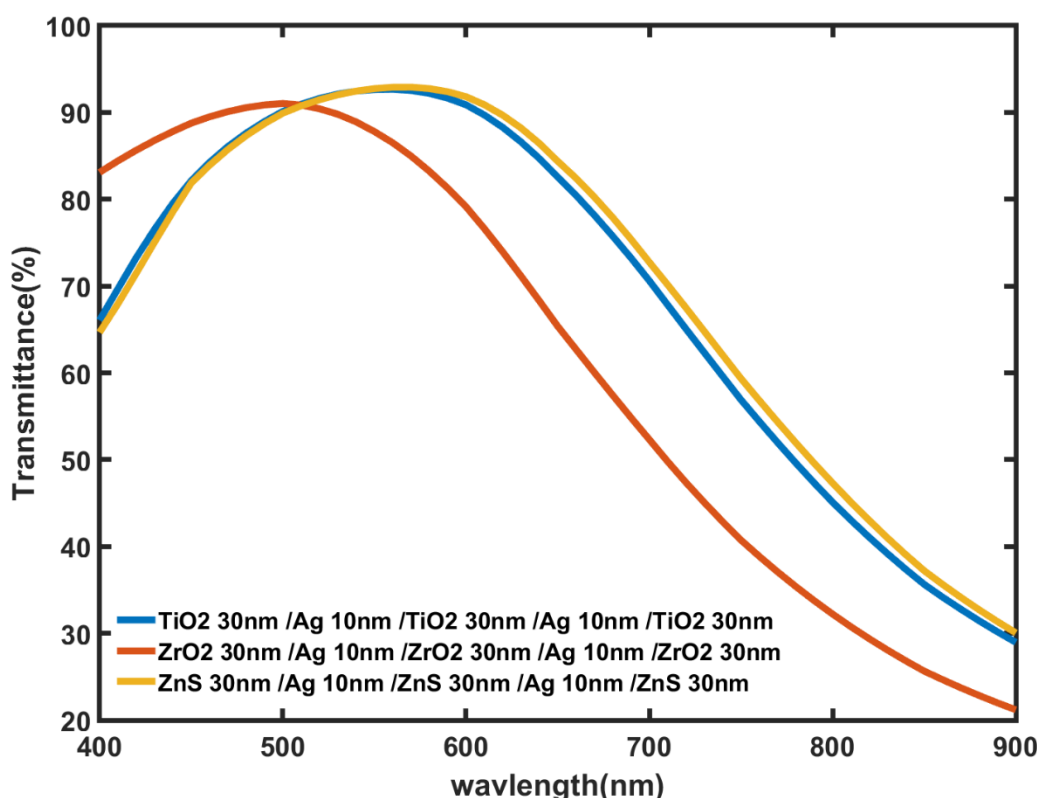
شکل ۲: تراگسیل اپتیکی ساختار $TiO_2 30nm / (Ag, Au, Al) 10nm / TiO_2 30nm / (Ag, Au, Al) 10nm / TiO_2 30nm$ در ناحیه طول موج ۴۰۰-۹۰۰ نانومتر

۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، استفاده از نقره به عنوان لایه های فلزی منجر به بیشترین شفافیت در ناحیه مرئی می شود. نقره خواص اپتیکی مناسبی در ناحیه مرئی دارد که بازتابندگی بسیار کمی دارد و اکثر نور مرئی را از خود عبور می دهد. به عبارت دیگر، نقره به حداقل بازتاب می رسد و نور را از ساختار عبور می دهد. این ویژگی شفافیت را در ناحیه مرئی افزایش می دهد. از سوی دیگر، آلومینیوم و طلا خواص اپتیکی متفاوتی نسبت به نقره دارد. در ناحیه مرئی، آلومینیوم بازتابندگی بسیار بالایی دارد و تراگذرایی نور را به حداقل می رساند. این به معنای بازتاب بیشتر نور مرئی و کاهش عبور آن از ساختار است. بنابراین، استفاده از

با توجه به شکل ۲، بهترین فلز برای استفاده در لایه های فلزی ساختار ساندویچی پنج لایه ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختار، از دی الکتریک TiO_2 برای لایه های اول، سوم و پنجم استفاده شده است، در حالی که برای لایه های فلزی دوم و چهارم از نقره، طلا و آلومینیوم استفاده شده است. ضخامت لایه های دی الکتریک ۳۰ نانومتر در نظر گرفته شده است، زیرا وقتی ضخامت لایه دی الکتریک کمتر از ۳۰ نانومتر هست، نفوذ جزئی لایه های فلزی وجود دارد که می تواند باعث کاهش کنترل پذیری مقاومت سطحی شود و همچنین ضخامت بیش از ۳۰ نانومتر نیز فاصله بین لایه های فلزی را افزایش داده و منجر به افزایش مقاومت سطحی می شود، بخاطر همین ضخامت بهینه ۳۰ نانومتر برای لایه دی الکتریک شبیه سازی و اختیار شد و ضخامت لایه های فلزی

جریان الکتریکی کمتری است. 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 ۲ و مطالب گفته شده در اینجا برای ساختار پنج لایه‌ای مورد بررسی از فلز نقره برای لایه‌های فلزی استفاده شده است.

آلومینیوم به جای نقره، به ویژه به دلیل بازتاب بالا در ناحیه مرئی، منجر به کاهش شفافیت ساختار می‌شود. نقره یک ماده‌ی رسانا است و رسانایی الکتریکی بالایی دارد. این به معنای انتقال جریان الکتریکی به خوبی است. بنابراین، استفاده از نقره در لایه‌های دوم و چهارم ساختار الکتروود رسانای شفاف، می‌تواند شفافیت ساختار را افزایش دهد که تراگسیلی نور طبق شکل ۲ برای این ساختار بیش از ۹۰ درصد است. از سوی دیگر، آلومینیوم و طلا رسانایی الکتریکی کمتری نسبت به نقره دارند، که این به معنای انتقال



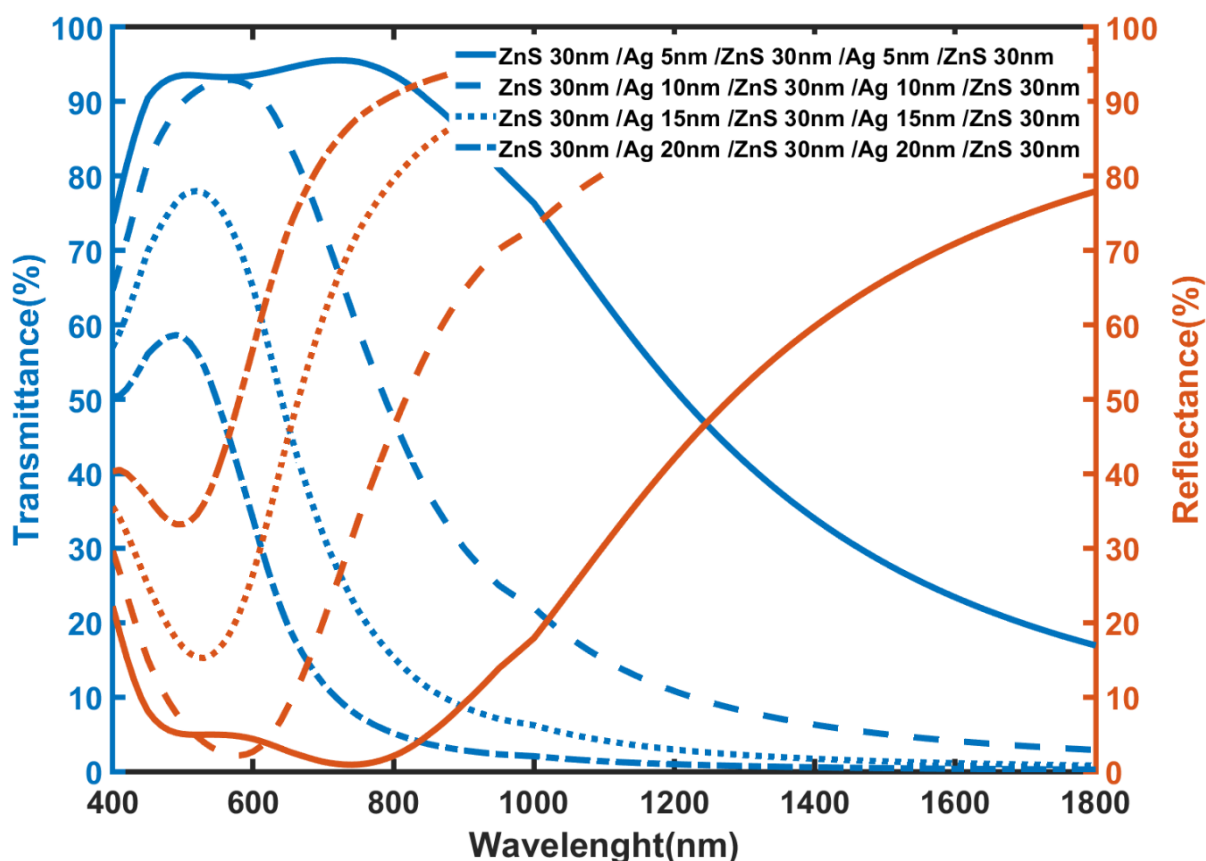
شکل ۳: تراگسیل اپتیکی ساختار $(\text{TiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{ZnS}) 30\text{nm} / \text{Ag } 10\text{nm} / (\text{TiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{ZnS}) 30\text{nm} / \text{Ag } 10\text{nm} / (\text{TiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{ZnS}) 30\text{nm}$ در ناحیه طول موج ۴۰۰-۹۰۰ نانومتر

ضخامت لایه‌های فلزی دوم و چهارم ۱۰ نانومتر انتخاب شده‌اند. ZnS دارای شفافیت اپتیکی بالایی در ناحیه مرئی است، به این معنی که نور مرئی را به خوبی عبور می‌دهد و کمتر بازتاب می‌کند. با استفاده از ZnS به عنوان لایه‌ی دی‌الکتریک، نور مرئی که از بالای ساختار عبور می‌کند، به خوبی از طریق لایه‌ی دی‌الکتریک ZnS عبور می‌کند و به لایه‌ی بعدی می‌رسد. این امر باعث افزایش شفافیت ساختار

در شکل ۳ به بررسی شفافیت اپتیکی ساختار پنج لایه‌ای، برای حالتی که از مواد TiO_2 ، ZrO_2 و ZnS برای لایه‌های دی‌الکتریک استفاده شده است، پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود وقتی از ماده‌ی ZnS برای لایه‌های دی‌الکتریک استفاده شده است، ساختار در ناحیه مرئی دارای بیشترین شفافیت می‌باشد. در اینجا برای بررسی بهترین ماده برای لایه‌های دی‌الکتریک، ضخامت لایه‌های اول، سوم و پنجم ۳۰ نانومتر و

مرئی اتفاق می‌افتد و نور به خوبی از طریق ساختار عبور می‌کند. این امر نیز به افزایش شفافیت اپتیکی ساختار کمک می‌کند. بنابراین در این ساختار پنج لایه‌ای مورد بررسی از مواد ZnS برای لایه‌های اول، سوم و پنجم استفاده شده است.

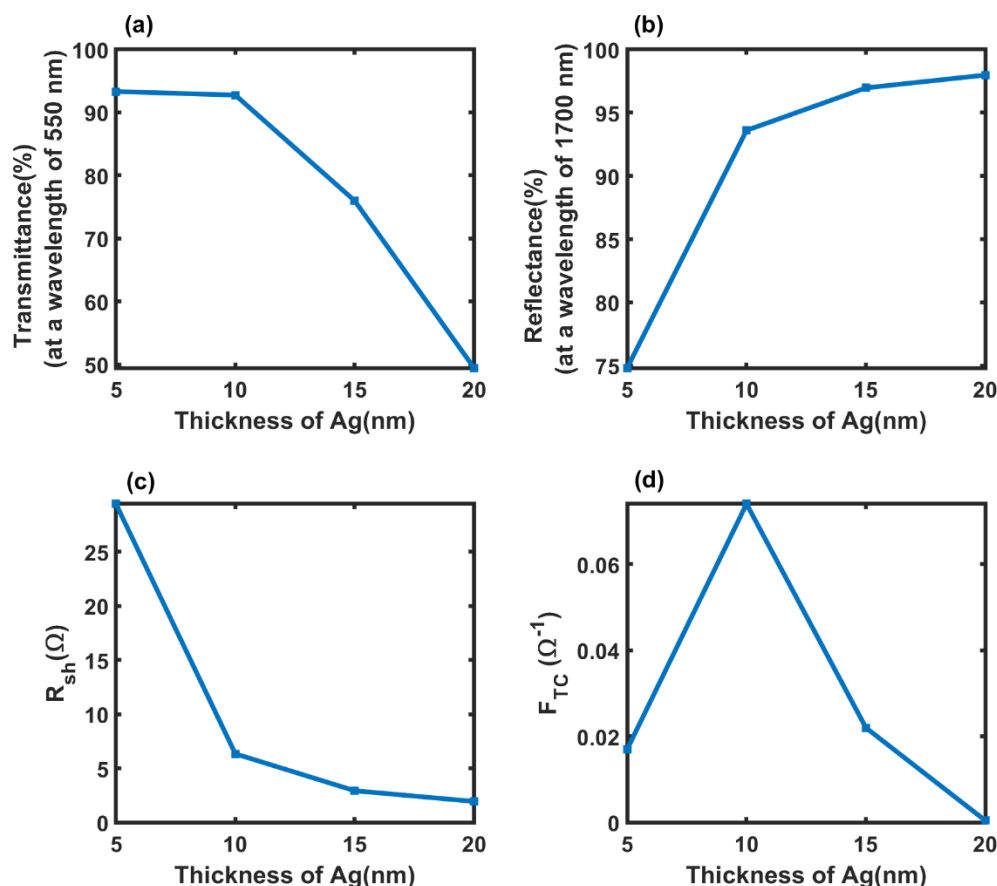
در محدوده‌ی نور مرئی می‌شود. درواقع ماده‌ی ZnS دارای ضریب شکست بالایی نسبت به مواد TiO_2 و ZrO_2 در محدوده نور مرئی است. ضریب شکست بالا به معنی این است که نور کمتری در مرزهای جداکننده‌ی لایه‌ها بازتاب می‌شود. با استفاده از ZnS به عنوان لایه‌ی دی‌الکتریک، کاهش بازتاب نور در محدوده‌ی نور



شکل ۴: تراگسیل و بازتاب اپتیکی ساختار پنج لایه‌ای ZnS 30nm/Ag x nm/ZnS 30nm/Ag x nm/ZnS 30nm

افزایش ضخامت لایه‌های نقره، فاصله میان لایه‌ها افزایش می‌یابد و اثر تداخل نور در ساختار کاهش می‌یابد، که باعث کاهش شفافیت در ناحیه‌ی مرئی می‌شود و همچنین ضخامت بیشتر لایه‌های نقره منجر به افزایش تداخل نور در ساختار می‌شود. 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 ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز می‌شود.

در شکل ۴ به بررسی تراگسیلی نور در ناحیه مرئی برای ساختار ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS بر روی بستر PET، به ازای ضخامت لایه‌های فلزی نقره بین ۵ تا ۲۰ نانومتر و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک ZnS ۳۰ نانومتر، پرداخته شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنیم با افزایش ضخامت لایه‌های نقره از ۵ نانومتر به ۲۰ نانومتر، شفافیت اپتیکی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده و بازتاب در ناحیه مرئی و مادون قرمز 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



شکل ۵: (a) تراگسیلی اپتیکی در طول موج ۵۵۰ نانومتر، (b) بازتاب اپتیکی در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر، (c) مقاومت الکتریکی سطحی و (d) ضریب شایستگی برای ساختار ZnS 30nm/Ag x nm/ZnS 30nm/Ag x nm/ZnS 30nm بر حسب ضخامت لایه Ag

جدول ۱: مقدار عددی تراگسیل و بازتاب اپتیکی، مقاومت الکتریکی سطحی و ضریب شایستگی ساختار ZnS 30nm/Ag x nm/ZnS 30nm/Ag x nm/ZnS 30nm

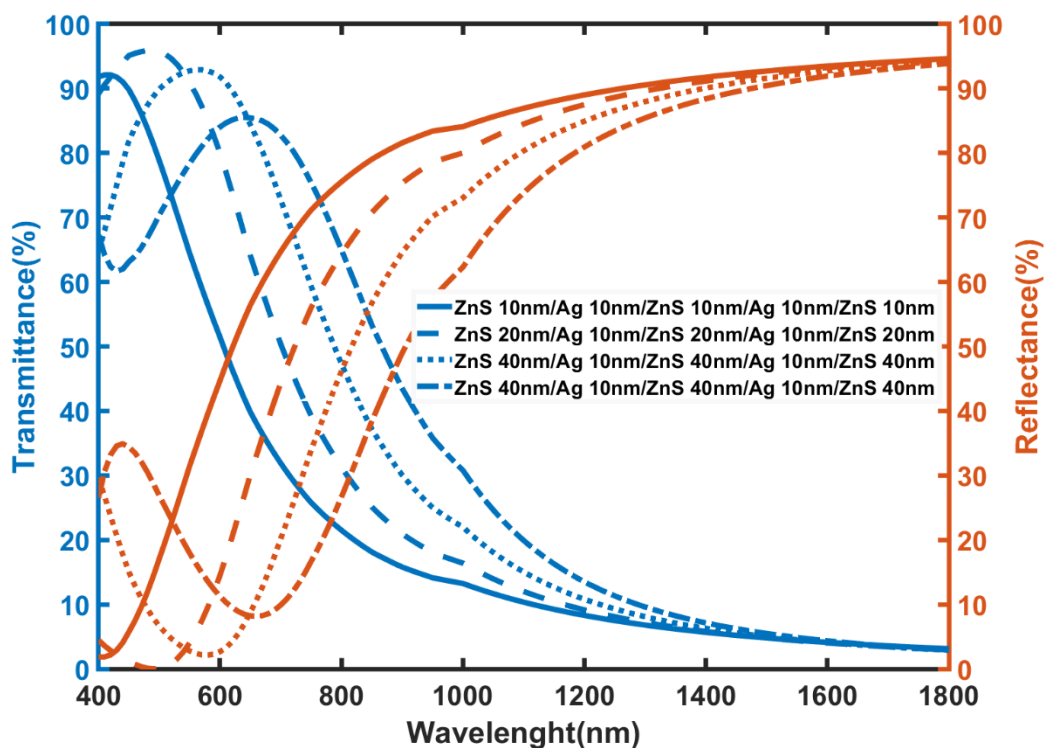
ساختار	Tmax% (at 550nm)	R% (at 1700nm)	R_{sh} (Ω /sq)	F_{TC} (Ω^{-1})
ZnS 30nm/Ag 5nm/ZnS 30nm/Ag 5nm/ZnS 30nm	۹۳,۳۲	۷۴,۸۲	۲۹,۴۲	۰,۰۱۷
ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm	۹۲,۷۵	۹۳,۶	۶,۳۴	۰,۰۷۴
ZnS 30nm/Ag 15nm/ZnS 30nm/Ag 15nm/ZnS 30nm	۷۵,۹۸	۹۶,۹۶	۲,۹۳	۰,۰۲۲
ZnS 30nm/Ag 20nm/ZnS 30nm/Ag 20nm/ZnS 30nm	۴۹,۴۶	۹۷,۹۷	۱,۹۴۳	۰,۰۰۰۴۵

برابر با ۹۳,۳۲، ۹۲,۷۵، ۷۵,۹۸ و ۴۹,۴۶ درصد می باشد که بیشترین تراگسیلی در ناحیه مرئی و طول موج ۵۵۰ نانومتر برای ساختار ZnS 30nm/Ag 5nm/ZnS 30nm/Ag 5nm/ZnS 30nm می باشد و طبق شکل 5b وقتی ضخامت

طبق شکل 5a و جدول ۱ برای ساختار ZnS 30nm/Ag/ZnS 30nm/Ag/ZnS 30nm وقتی که ضخامت لایه فلزی نقره ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نانومتر هست، تراگسیلی در طول موج ۵۵۰ نانومتر (طول موجی که چشم بیشترین حساسیت را به آن دارد) به ترتیب

مقاومت الکتریکی سطحی به ترتیب ۲،۹۳، ۶،۳۴، ۲۹،۴۲ و $1,943(\Omega/\text{sq})$ می باشد ولی در ساختار فوق برای حالتیکه ضخامت لایه فلزی نقره ۱۰ نانومتر است، ساختار دارای بیشترین ضریب شایستگی هست. هرچند برای ساختار فوق وقتیکه ضخامت لایه نقره ۵ نانومتر است بیشترین شفافیت اپتیکی را دارد و وقتیکه ضخامت لایه نقره ۲۰ نانومتر است دارای کمترین مقاومت الکتریکی سطحی می باشد ولی در این ساختار پنج لایه ای ساندویچ شده توسط لایه های Ag و ZnS، ضخامت بهینه ۱۰ نانومتر را برای ضخامت لایه فلزی نقره اختیار کرده ایم.

لایه نقره از ۵ نانومتر به ۲۰ نانومتر افزایش می یابد، بازتاب در ناحیه مادون قرمز و طول موج ۱۷۰۰ نانومتر افزایش می یابد که مطابق جدول ۱ برای حالتی که ضخامت لایه فلزی نقره ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نانومتر است، بازتاب نور در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر به ترتیب ۷۴،۸۲، ۹۳،۶، ۹۶،۹۶ و ۹۷،۹۷ درصد می باشد و باتوجه به این نکته انتظار می رود که مقاومت الکتریکی سطحی با افزایش ضخامت لایه فلزی کاهش یابد و رسانایی ساختار بهبود یابد که این نکته در شکل ۵c نیز قابل مشاهده می باشد و مطابق جدول ۱ وقتی ضخامت لایه نقره در ساختار ZnS 30nm/Ag/ZnS 30nm به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۱۵ نانومتر است،



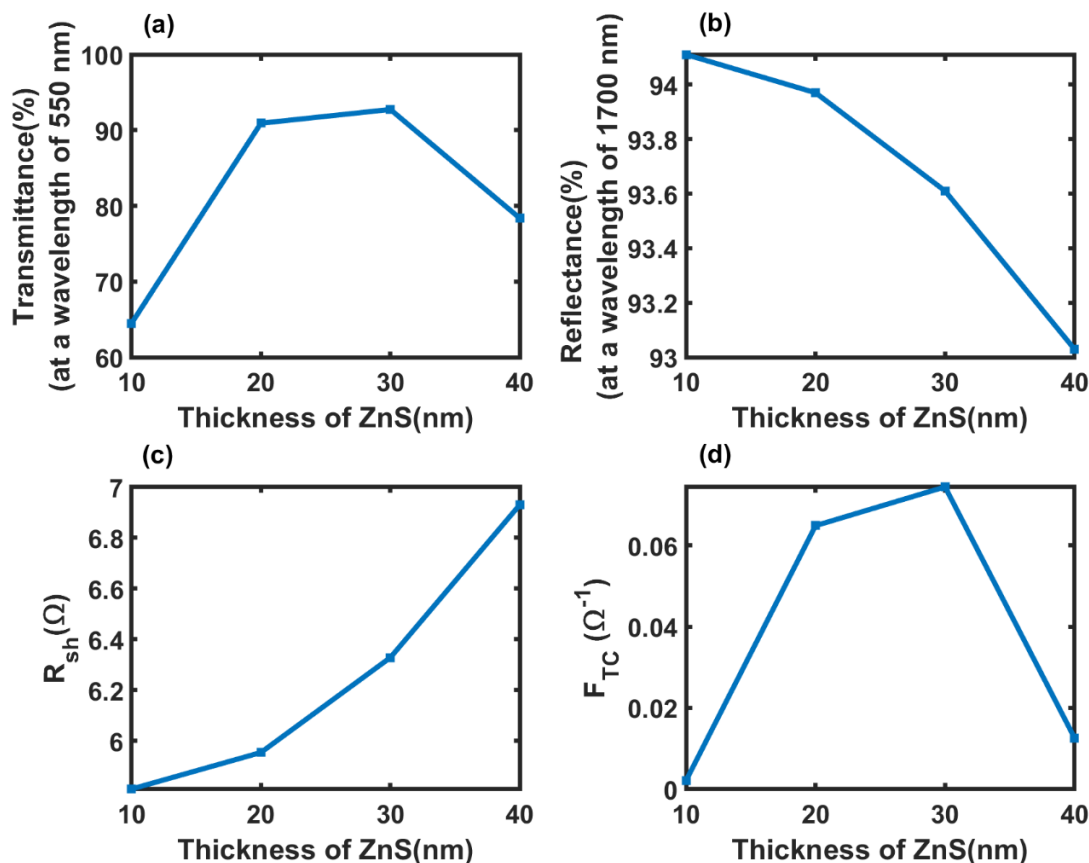
شکل ۶: تراگسیل و بازتاب اپتیکی ساختار پنج لایه ای ZnS 3x nm/Ag 10nm/ZnS x nm/Ag 10nm/ZnS x nm

است) بیشترین شفافیت اپتیکی را داراست و همچنین با افزایش ضخامت لایه های دی الکتریک ZnS از ۱۰ نانومتر به ۴۰ نانومتر، بازتاب نور در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر افزایش یافته است. درواقع زمانی که نور از فضا به ساختار وارد می شود، در معرض تداخل قرار می گیرد. وقتی که ضخامت لایه های دی الکتریک ZnS افزایش می یابد، فاصله میان این لایه ها افزایش می یابد. این افزایش فاصله منجر به افزایش

در شکل ۶ به بررسی تراگسیلی ساختار ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS بر روی بستر PET در ناحیه مرئی و بررسی بازتاب نور در ساختار فوق در ناحیه مادون قرمز برای حالتیکه ضخامت لایه های فلزی نقره ۱۰ نانومتر و ضخامت لایه های ZnS ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ناموتر انتخاب شده است، پرداخته ایم. مشاهده می شود وقتیکه که ضخامت لایه های دی الکتریک ZnS ۲۰ نانومتر است، ساختار در طول موج ۵۵۰ نانومتر (طول موجی که چشم بیشتر به آن حساس

طور مکرر بین لایه‌ها تداخل می‌کند. این تداخل نور در نتیجه باعث افزایش بازتاب نور در ساختار می‌شود، به ویژه در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر.

تداخل نور در ساختار می‌شود. تداخل نور در ساختار پیچ لایه‌ای ساندویچی باعث ایجاد حالت‌های تداخلی فازی می‌شود که باعث بازتاب نور می‌شوند. با افزایش ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک ZnS، تعداد حالت‌های تداخلی فازی در ساختار افزایش می‌یابد و نور به



شکل ۷: (a) تراگسیلی اپتیکی در طول موج ۵۵۰ نانومتر، (b) بازتاب اپتیکی در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر، (c) مقاومت الکتریکی سطحی و (d) ضریب شایستگی برای ساختار ZnS x nm/Ag 10nm/ZnS x nm/Ag 10nm/ZnS x nm بر حسب ضخامت لایه ZnS

جدول ۲: مقدار عددی تراگسیل و بازتاب اپتیکی، مقاومت الکتریکی سطحی و ضریب شایستگی ساختار ZnS x nm/Ag 10nm/ZnS x nm/Ag 10nm/ZnS

x nm

ساختار	Tmax% (at 550nm)	R% (at 1700nm)	R_{sh} (Ω/sq)	F_{TC} (Ω ⁻¹)
ZnS 10nm/Ag 10nm/ZnS 10nm/Ag 10nm/ZnS 10nm	۶۴,۴۷	۹۴,۱۱	۵,۸۱	۰,۰۰۲۱
ZnS 20nm/Ag 10nm/ZnS 20nm/Ag 10nm/ZnS 20nm	۹۰,۹۳	۹۳,۹۷	۵,۹۵۴	۰,۰۶۴۹
ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm	۹۲,۷۵	۹۳,۶۱	۶,۳۲۸	۰,۰۷۴۵
ZnS 40nm/Ag 10nm/ZnS 40nm/Ag 10nm/ZnS 40nm	۷۸,۳۸	۹۳,۰۳	۶,۹۳	۰,۰۱۲۶

لایه‌های ZnS و Ag، ۳۰ و ۱۰ نانومتر بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه طراحی شده تراگسیل در ناحیه مرئی ۹۳٫۶۱٪ و مقاومت الکتریکی سطحی آن $0.0745 (\Omega^{-1})$ و ضریب شایستگی آن نیز $6,328 (\Omega/\text{sq})$ بدست آمده است. بنابراین این سیستم پنج لایه‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی برای الکترودهای مرسوم ITO و دیگر الکترودها باشد.

منابع

- [1] Wager, J.F, Transparent electronics. *science*, 300(5623), pp.1245-1246, (2003).
- [2] Habis, C., Zaraket, J., & Aillerie, M.. Transparent Conductive Oxides. Part I. General Review of Structural, Electrical and Optical Properties of TCOs Related to the Growth Techniques, Materials and Dopants. In *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 417, pp. 243-256). Trans Tech Publications Ltd. (2022, July).
- [3] Chavan, G. T., Kim, Y., Khokhar, M. Q., Hussain, S. Q., Cho, E. C., Yi, J., ... & Jeon, C. W. A brief review of transparent conducting oxides (TCO): the influence of different deposition techniques on the efficiency of solar cells. *Nanomaterials*, 13(7), 1226. (2023).
- [4] Razmpoosh, M., Abedi Ravan, B. (2024). 'Designing and improving the performance of a transparent conductive electrode using a TiO₂/Ag/ZnS/Ag/TiO₂ mirror-shaped multilayer nano structure.', *Nanoscale*, 11(2), pp. 75-61.
- [5] Angmo, D., Krebs, F.C., 2013. Flexible ITO- free polymer solar cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(1), pp.1-14.
- [6] Lu, X., Zhang, Y., & Zheng, Z.. Metal-based flexible transparent electrodes: challenges and recent advances. *Advanced Electronic Materials*, 7(5), 2001121, (2021).
- [7] Zilberberg, K., Gasse, F., Pagui, R.,

طبق شکل 7a و جدول ۲ برای ساختار ZnS/Ag 10nm/ZnS/Ag 10nm/ZnS ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ نانومتر هست، تراگسیلی در طول موج ۵۵۰ نانومتر (طول موجی که چشم بیشترین حساسیت را به آن دارد) به ترتیب برابر با ۶۴٫۴۷، ۹۰٫۹۳، ۹۲٫۷۵ و ۷۸٫۳۸ درصد می‌باشد که بیشترین تراگسیلی در ناحیه مرئی و طول موج ۵۵۰ نانومتر برای ساختار ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm می‌باشد و طبق شکل 5b وقتی ضخامت لایه ZnS از ۱۰ نانومتر تا ۴۰ نانومتر افزایش می‌یابد، بازتاب در ناحیه مادون قرمز و طول موج ۱۷۰۰ نانومتر کاهش می‌یابد که مطابق جدول ۱ برای حالتی که ضخامت لایه دی‌الکتریک ZnS ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ نانومتر است، بازتاب نور در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر به ترتیب ۹۴٫۱۱، ۹۳٫۹۷، ۹۳٫۶۱ و ۹۳٫۰۳ درصد می‌باشد و باتوجه به این نکته انتظار می‌رود که مقاومت الکتریکی سطحی با افزایش ضخامت لایه دی‌الکتریک افزایش یابد و رسانایی ساختار کاهش یابد که این نکته در شکل 5c نیز قابل مشاهده می‌باشد و مطابق جدول ۲ وقتی ضخامت لایه دی‌الکتریک در ساختار ZnS/Ag 10nm/ZnS/Ag 10nm/ZnS 30nm به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ نانومتر است، مقاومت الکتریکی سطحی به ترتیب ۵٫۹۵۴، ۶٫۳۲۸ و $6,93 (\Omega/\text{sq})$ می‌باشد ولی در ساختار فوق برای حالتیکه ضخامت لایه دی‌الکتریک ZnS ۳۰ نانومتر است، ساختار دارای بیشترین ضریب شایستگی هست که برابر با $F_{TC}=0.0745 \Omega^{-1}$ است. هرچند برای ساختار فوق وقتیکه ضخامت لایه دی‌الکتریک ۱۰ نانومتر است دارای کمترین مقاومت الکتریکی سطحی می‌باشد ولی در این ساختار پنج لایه‌ای ساندویچ شده توسط لایه‌های Ag و ZnS، ضخامت بهینه ۳۰ نانومتر را برای ضخامت لایه دی‌الکتریک ZnS اختیار کرده‌ایم.

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش ما سیستم پنج لایه‌ای ساندویچ شکل ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm/Ag 10nm/ZnS 30nm را به عنوان پوشش رسانای شفاف طراحی کردیم. جنس بهینه برای لایه‌های دی‌الکتریک و فلز، ZnS و Ag و ضخامت بهینه برای

- [15] Wang, C., & Xing, Z. Preparation and characterization of ZnS/metal/ZnS transparent conductive multilayer films with different metal layers. *Journal of Modern Optics*, 71(4-6), 177-183, (2024).
- [16] Loka, C., Lee, K.S., Preparation of TiO₂/Ag/TiO₂ (TAT) multilayer films with optical and electrical properties enhanced by using Cr-added Ag film. *Applied Surface Science*, 415, pp.35-42, (2017).
- [17] Lee, C.H., Pandey, R., Wang, B.Y., Choi, W.K., Choi, D.K., Oh, Y.J., Nano-sized indium-free MTO/Ag/MTO transparent conducting electrode prepared by RF sputtering at room temperature for organic photovoltaic cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, pp.80-85, (2015).
- [18] Yu, S., Li, L., Lyu, X., Zhang, W., Preparation and investigation of nano-thick FTO/Ag/FTO multilayer transparent electrodes with high figure of merit. *Scientific reports*, 6(1), p.20399, (2016).
- [19] Oh, I.S., Ji, C.H., Oh, S.Y., Effects of ytterbium on electrical and optical properties of BCP/Ag/WO₃ transparent electrode based organic photovoltaic cells. *Electronic Materials Letters*, 12, pp.156-162, (2016).
- [20] Bright, C.I., Review of transparent conductive oxides (TCO). *Mattox D, editor*, 50, (2007).
- [21] Zhou, C., Xi, Z., Stacchiola, D. J., & Liu, M. Application of ultrathin TiO₂ layers in solar energy conversion devices. *Energy Science & Engineering*, 10(5), 1614-1629. (2022).
- [22] Vyas, S., Tiwary, R., Shubham, K., Chakrabarti, P., Study the target effect on the structural, surface and optical properties of TiO₂ thin film fabricated by RF sputtering method. *Superlattices and Microstructures*, 80, pp.215-221, (2015).
- [23] Campbell, C.T., Ultrathin metal films and particles on oxide surfaces: structural, Polywka, A., Behrendt, A., Trost, S., Heiderhoff, R., Gorn, P., Riedl, T., Highly robust indium- free transparent conductive electrodes based on composites of silver nanowires and conductive metal oxides. *Advanced Functional Materials*, 24(12), pp.1671-1678, (2014).
- [8] Khuili, M., Fazouan, N., Abou El Makarim, H., El Halani, G., Atmani, E.H., Comparative first principles study of ZnO doped with group III elements. *Journal of Alloys and Compounds*, 688, pp.368-375, (2016).
- [9] Zhang, D., Yu, W., Zhang, L., & Hao, X. (2023). Progress in the synthesis and application of transparent conducting film of AZO (ZnO: Al). *Materials*, 16(16), 5537.
- [10] Mahmood, K., Park, S.B., Atmospheric pressure based electrostatic spray deposition of transparent conductive ZnO and Al-doped ZnO (AZO) thin films: Effects of Al doping and annealing treatment. *Electronic Materials Letters*, 9, pp.161-170, (2013).
- [11] Das, H. S., Das, D. K., Maity, S. K., Khatua, D., Gupta, G. K., Jalgham, R. T., ... & Roymahapatra, G. Analysis of the influence of the thickness of transparent conducting oxide (GZO) with Ga-doping and its use as anode materials in organic light-emitting diodes. *ES Energy & Environment*, 25, 1239, (2024).
- [12] Ginley, D.S., Perkins, J.D., Transparent conductors. In *Handbook of transparent conductors* (pp. 1-25). Boston, MA: Springer US, (2010).
- [13] Haidari, G. Nano-viewpoint in modeling and investigation of the D/M/D transparent-conductive layer. *Plasmonics*, 17(1), 249-255, (2022).
- [14] Cattin, L., Louarn, G., Morsli, M., & Bernède, J. C. Semi-transparent organic photovoltaic cells with dielectric/metal/dielectric top electrode: influence of the metal on their performances. *Nanomaterials*, 11(2), 393, (2021).

dimensional Systems and Nanostructures, 41(3), pp.387-390, (2009).

[28] Liu, X., Cai, X., Qiao, J., Mao, J., Jiang, N., The design of ZnS/Ag/ZnS transparent conductive multilayer films. *Thin Solid Films*, 441(1-2), pp.200-206, (2003).

[29] Haacke, G., New figure of merit for transparent conductors. *Journal of Applied physics*, 47(9), pp.4086-4089, (1976).

electronic and chemisorptive properties. *Surface science reports*, 27(1-3), pp.1-111, (1997).

[24] Formica, N., Ghosh, D.S., Carrilero, A., Chen, T.L., Simpson, R.E., Pruneri, V., Ultrastable and atomically smooth ultrathin silver films grown on a copper seed layer. *ACS applied materials & interfaces*, 5(8), pp.3048-3053, (2013).

[25] Jang, B., Kim, J., Lee, J., Park, G., Yang, G., Jang, J., & Kwon, H. J. Combustion-assisted low-temperature ZrO₂/SnO₂ films for high-performance flexible thin film transistors. *npj Flexible Electronics*, 8(1), 74, (2024).

[26] Beckford, J., Behera, M. K., Yarbrough, K., Obasogie, B., Pradhan, S. K., & Bahoura, M. Gallium doped zinc oxide thin films as transparent conducting oxide for thin-film heaters. *AIP Advances*, 11(7), (2021).

[27] Zhao, P., Su, W., Wang, R., Xu, X., Zhang, F., Properties of thin silver films with different thickness. *Physica E: Low-*

Design of ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS Sandwich Shape Transparent Conductive Thin Electrode on PET Substrate

¹ Milad Razmpoosh, ² Bahram Abedi Ravan

^{1*} Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Faculty of Basic Sciences, Sattari University, Tehran, Iran

Article details

Received: 2025/01/07

Accepted: 2025/03/16

Published: 2025/04/07

ISSN: 2588-493x

eISSN: 2588-4821

Correspondence email:

u.razmpoosh@gmail.com



Abstract

In this research, a nanostructured multilayer transparent conductive system, ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS, was designed and simulated on a polyethylene terephthalate (PET) substrate using Essential Macleod software. The primary objective of this design was to enhance and optimize both the optical transmittance and electrical resistance properties. To achieve this, the optimal thickness of each layer was calculated to simultaneously provide high optical transmittance and low electrical resistance. Utilizing Essential Macleod software and simulation analysis, the optimal thickness for each layer was precisely determined. This design and optimization method for the ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS structure facilitates the efficient use of this structure in various optoelectronic applications. Certain electrical and optical properties of the ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS multilayer system were investigated. The measured properties included sheet resistance, optical transmittance, and reflectance. The ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS multilayer structure yielded the best results when the thickness of the silver layers was 10 nm and the thickness of the ZnS layers was 30 nm. Under these conditions, the figure of merit, FTC, was $0.0745 \Omega^{-1}$, which is the maximum value and indicates the best performance of the structure. Furthermore, a low sheet resistance of approximately $6.328 \Omega/\text{sq}$ and a transmittance of 92.75% in the visible region were achieved. The low electrical resistance and high transmittance make this structure suitable as a transparent conductive electrode in optoelectronic applications.

Keywords: Electrode, conductive, transparent, thin, PET