

Optoelectronic

Open
Access

ORIGINAL ARTICLE

Design and Simulation of the ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) Multilayer System with the Capability of Application as an Interlayer Electrode in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells

Reza Mardani Ghahfarrokhi¹, Mohsen Ghasemi^{2*}, Vishtasb Soleimani³

1 Ph.D. Student, Department of Physics, Faculty of Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2 Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3 Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Correspondence

Mohsen Ghasemi

Email: ghasemi.mohsen@sku.ac.ir

How to cite

Mardani Ghahfarrokhi, R. Ghasemi, M. Soleimani, V. (2026). Design and Simulation of the ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) Multilayer System with the Capability of Application as an Interlayer Electrode in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells, Optoelectronic, 8(2), 65-74.

ABSTRACT

In this research, the ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) transparent conductive multilayer system designed and simulated. The optimal thickness of the layers determined to simultaneously obtain high transmittance and low electrical resistance simultaneously. To investigate the optical properties of the multilayer system, the transmission spectrum, reflection, and effective energy band gap of the multilayer system determined. The optimal thicknesses for the ZnSe, Ag, and CdTe layers calculated to be 40 nm, 12 nm, and 35 nm, respectively. The results showed that the designed system can be used as an interlayer electrode in solar cells. For this purpose, a two-terminal tandem perovskite (CH₃NH₃PbI₃) and silicon solar cell with the structure FTO/TiO₂/Perovskite (CH₃NH₃PbI₃)/Spiro-OMeTAD/ZAC/C-Si(n)/C-Si(p)/C-Si(p+)/Mo simulated using SCAPS software. The values of open circuit voltage (V_{oc}), current density (J_{sc}), fill factor (FF), and power conversion efficiency (PCE) obtained as 1.62 V, 20.40 mA/cm², 89.30%, and 29.51%, respectively. Generally, the results showed that the designed ZAC system has good potential for application in optoelectronic devices.

KEYWORDS

ZnSe/Ag/CdTe Multilayer System, Optical Properties, Silicon-Perovskite Tandem Solar Cell, Power Conversion Efficiency, Optoelectronic Devices.

فصلنامه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

طراحی و شبیه‌سازی سامانه چندلایه‌ای ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) با قابلیت کاربرد به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای در سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون

رضا مردانی قهفرخی^۱، محسن قاسمی^{۲*}، ویشناسب سلیمانیان^۳

چکیده

در این پژوهش، سامانه چندلایه‌ای رسانای شفاف ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) طراحی و شبیه‌سازی شد. ضخامت بهینه برای لایه‌ها به گونه‌ای تعیین شد که تراکسیل بالا و مقاومت الکتریکی پایین به‌طور همزمان حاصل شود. برای بررسی خواص اپتیکی سامانه چندلایه‌ای، طیف عبور، بازتاب و گاف انرژی موثر سامانه چندلایه‌ای تعیین شد. ضخامت بهینه برای لایه‌های ZnSe، Ag و CdTe به ترتیب ۴۰ nm، ۱۲ nm و ۳۵ nm محاسبه شد. نتایج نشان داد که سامانه طراحی شده می‌تواند به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای در سلول‌های خورشیدی استفاده شود. برای این منظور، سلول خورشیدی تاندم دو ترمیناله پروسکایت (CH₃NH₃PbI₃) و سیلیکون با ساختار FTO/ TiO₂/ Perovskite / Spiro-OMeTAD/ ZAC/ C-Si (n)/ C-Si (p)/ C-Si (p+)/ Mo استفاده از نرم‌افزار SCAPS شبیه‌سازی شد. برای مقادیر ولتاژ مدار باز (Voc)، چگالی جریان (Jsc)، ضریب پرشدگی و بازده تبدیل توان (PCE) به ترتیب ۱/۶۲V، ۲۰/۴۰ mA/cm²، ۸۹/۳۰ و ۲۹/۵۱ درصد به‌دست آمد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که سامانه طراحی شده ZAC پتانسیل مناسبی برای به‌کارگیری در ادوات اپتوالکترونیکی دارد.

واژه‌های کلیدی

سامانه چندلایه‌ای ZnSe/Ag/CdTe، خواص اپتیکی، سلول خورشیدی تاندم سیلیکون - پروسکایت، بازده تبدیل توان، ادوات اپتوالکترونیک.

۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۲ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۳ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

نویسنده مسئول:

محسن قاسمی

رایانامه: ghasemi.mohsen@sku.ac.ir

استناد به این مقاله:

رضا مردانی قهفرخی، محسن قاسمی، ویشناسب سلیمانیان (۱۴۰۴). طراحی و شبیه‌سازی سامانه چندلایه‌ای ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) با قابلیت کاربرد به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای در سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، ۸(۲)، ۶۵-۷۴.

مقدمه

امروزه محققان علاقه زیادی به استفاده از ساختارهای دی‌الکتریک (اکسید فلزی) / فلز / دی‌الکتریک (اکسید فلزی) دارند؛ زیرا این گونه ساختارها کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از جمله سلول خورشیدی، نمایشگر، باتری، دستگاه‌های الکترونیکی و فوتوکاتالیست‌ها دارند [۱]. این ساختارها دارای ویژگی‌هایی مانند رسانایی بالا، شفافیت زیاد، پایداری مناسب و انعطاف پذیری مناسب هستند [۲]. از فلزهایی مانند Au، Ag، Cu به عنوان لایه فلزی میانی در این ساختارها استفاده می‌شود؛ ولی معمولاً از بین این فلزها، نقره به دلیل بی‌رنگ دیده شدن در ضخامت‌های خیلی نازک و رسانایی بالا، بیشتر استفاده می‌شود [۳]. این نوع ساختارها دارای مقاومت ترکیبی ناشی از انتقال‌های افقی (درون لایه فلزی) و عمودی (بین فلز و لایه اکسیدی) هستند و مقاومت سطحی پایینی دارند [۴]. لایه فلزی نازک در این ساختار، عامل اصلی تعیین مقاومت سطحی است و همچنین انتقال سریع الکترون‌ها در راستای افقی و در کل سطح را تضمین می‌کند و در عین حال، مقاومت مکانیکی خوبی در برابر خمیدگی دارد [۵]. انتقال‌های عمودی توسط لایه اکسیدی و مرز میان فلز و لایه اکسید فلزی کنترل می‌شوند. نکته کلیدی در اینجا، انتقال الکترون از طریق مرز فلز- اکسید فلزی است که به تابع کار و نوع فلز بستگی دارد. از آنجا که لایه اکسیدی بسیار نازک است، الکترون‌ها می‌توانند به راحتی از آن عبور کنند. بنابراین اثر مرز بین لایه‌ها معمولاً ناچیز است. بسته به اختلاف سطح انرژی، ممکن است مسیر عبور الکترون‌ها روان یا شامل یک سد پتانسیل باشد. در صورت وجود سد پتانسیل، می‌توان با استفاده از یک ترکیب فلز واسطه این سد را کاهش داد؛ چرا که ترکیبات فلز واسطه، تابع کار الکتروود را افزایش داده و موانع تزریق الکترون یا حفره را کم می‌کنند [۶]. اغلب این ساختارها به عنوان الکتروود رسانای شفاف استفاده می‌شود. در سال ۲۰۰۴ پژوهشگران ساختارهای دی‌الکتریک / فلز / دی‌الکتریک (D/M/D) را معرفی کردند و نشان دادند که این ساختارها می‌توانند ویژگی الکتروودی را بهبود بخشند [۷]. در سال‌های اخیر برخی از پژوهشگران روی این ساختارها مطالعه کردند؛ به طور مثال سوچو و همکاران [۸] از ترکیب ZnO/Ag/ZnO در نمایشگرهای OLED، چنگ و همکاران [۹] از ترکیب ITO/Ag/ITO در دستگاه‌های الکتروکرومیک و پرز و همکاران [۱۰] از ترکیب ZnS/Ag/TiO₂ در سلول خورشیدی استفاده کردند. امروزه به دلیل توسعه روزافزون در استفاده از سلول خورشیدی، محققان در تلاش برای بهینه‌سازی آن‌ها هستند. از جمله این اقدامات

می‌توان به استفاده از ساختارهای دی‌الکتریک (اکسید) / فلز / دی‌الکتریک (اکسید) به عنوان الکتروودهای رسانای شفاف در سلول‌های خورشیدی اشاره کرد [۱۱]. در حال حاضر سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون بلورین (C-Si) فناوری غالب در بازار تجاری فتوولتائیک (PV) هستند و در سال ۲۰۲۰ بیش از ۸۰ درصد از تقاضای کل جهان را به خود اختصاص داده است [۱۲]. از این رو در میان فناوری‌های مختلف، سلول‌های تاندم مبتنی بر پروسکایت - سیلیکون بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند. با ترکیب لایه‌های پروسکایت با ساختار سیلیکونی، این سلول‌ها از محدودیت‌های ذاتی سلول‌های تک‌پیوندی فراتر رفته و بازدهی تبدیل نور خورشید به برق را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند. پروسکایت با قابلیت جذب طیف‌های نوری گسترده و هزینه تولید پایین، مکملی بسیار خوب برای سیلیکون است که در دهه‌های گذشته پایه اصلی صنعت سلول خورشیدی بوده است [۱۳]. در سلول‌های خورشیدی تاندم دوترمیناله لایه الکتروود میان لایه‌ای که به عنوان لایه بازترکیب نیز شناخته می‌شود، نقش کلیدی در برقراری اتصال الکتریکی سری بین سلول‌های بالا و پایین با نوار انرژی متفاوت ایفا می‌کند و جریان تولیدی در هر سلول را بدون تلفات عمده انتقال می‌دهد. این لایه علاوه بر فراهم آوردن تماس اهمی با هر دو نیم‌رسانا، تراز باند مطلوب را برای کاهش موانع انتقال حامل‌ها تنظیم می‌کند تا بازترکیب غیرتابشی در حداقل ممکن باقی بماند [۱۴]. در ساختارهای پروسکایت - سیلیکون مواد مختلفی از جمله اکسیدهای فلزی، لایه‌های آلی و لایه‌های فلزی / نیمه هادی برای این منظور به کار می‌روند که هر یک در توازن میان شفافیت نوری، رسانایی الکتریکی و پایداری حرارتی مزایا و چالش‌های خاص خود را دارد [۱۵]. ساختار ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) به عنوان یک الکتروود میان‌لایه‌ای در سلول‌های خورشیدی تاندم، ترکیبی از خواص اپتیکی و الکتریکی مطلوب هر سه ماده را ارائه می‌دهد. ZnSe با گاف نواری پهن (۲/۷eV) و ضریب شکست بالا امکان عبور نور با کمترین تلفات را می‌دهد [۱۶]. لایه نازک Ag به دلیل تابع کار مناسب (۴/۲۶eV) و رسانایی الکتریکی بسیار بالا، مانع از تجمع بار و افت ولتاژ می‌شود [۱۷] همچنین CdTe با گاف نواری حدود ۱/۵eV پتانسیل جذب بالای فوتون‌های طیف مرئی را دارد و به عنوان لایه انتقال بار و میان‌لایه‌ای در سلول‌های خورشیدی عمل می‌کند [۱۸]. بخش عمده‌ای از افزایش کارایی سلول‌های تاندم پروسکایت - سیلیکون به دلیل طراحی لایه میان‌لایه‌ای موثر و بهینه است. لایه میان‌لایه‌ای علاوه بر به حداقل رساندن افت نوری در

استفاده شده است. ساختار کلی سلول تاندم به صورت FTO/ TiO₂/ Pervoskite (CH₃NH₃PbI₃)/ Spiro-OMeTAD/ ZAC/ C-Si (n)/ C-Si (p)/ C-Si (p+)/ Contact back (Mo) در ساختار بالا به عنوان لایه پنجره به کار رفته است. لایه TiO₂ نوع n به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون، لایه Spiro-OMeTAD به عنوان لایه انتقال‌دهنده حفره و ساختار ZAC به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای بین سلول‌ها است. سلول اول به صورت FTO/ TiO₂/ pervoskite (CH₃NH₃PbI₃)/ Spiro-OMeTAD/ Contact back (Ni) و سلول دوم به صورت Contact front (Al) /ZAC/ C-Si (n)/ C-Si (p)/ C-Si (p+)/ Contact back (Mo) در نرم‌افزار SCAPS-1D تعریف شده است. با ترکیب این دو سلول، ساختار تاندم شکل می‌گیرد. ابتدا سلول سیلیکونی و سپس سلول پروسکایت به منظور بهره‌وری بهینه شبیه‌سازی شد، سپس سلول پروسکایت به سلول سیلیکونی به صورت سری پیکربندی شدند که در نهایت سلول تاندم پروسکایت - سیلیکون شکل می‌گیرد.

نتایج و بحث

بهینه‌سازی ضخامت ساختار ZAC

لایه‌های میان‌لایه‌ای بسته به موقعیتی که از آن‌ها استفاده می‌شود، ویژگی‌های خاص خود را باید داشته باشد؛ از آنجایی که در این کار از لایه ZAC به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای بین دو سلول تاندم استفاده می‌شود، این لایه باید دارای شفافیت نوری و رسانایی الکتریکی بالا باشد. به همین منظور برای دستیابی به ضخامت بهینه ساختار ZAC از نرم‌افزار Essential Macleod استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار امکان به‌دست آوردن طیف‌های تراگسیل، بازتاب، چگالی و جذب اپتیکی پوشش‌های تک لایه و چند لایه با تغییر ضخامت لایه‌ها امکان‌پذیر است. در هر مرحله ضخامت لایه‌ها را تغییر داده و منحنی‌های بازتاب و تراگسیل لایه‌ها توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شوند. ضخامت سامانه‌های چندلایه‌ای باید به گونه‌ای باشد که ساختار نهایی به طور هم‌زمان دارای بیشترین تراگسیل اپتیکی در ناحیه مرئی و بیشترین بازتاب در ناحیه فرو سرخ باشد که بازتاب ناشی از چگالی حامل‌های بار بالا و به عبارت دیگر مقاومت الکتریکی سطحی پایین است. از آنجایی که به دست آوردن هم‌زمان این دو ویژگی در این ساختارها به راحتی امکان‌پذیر نیست، می‌توان از تعریف ضریب شایستگی برای مقایسه عملکرد پوشش‌های طراحی شده استفاده کرد. برای محاسبه مقاومت سطحی لایه‌ها از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۲]:

طیف خورشیدی باید مقاومت و بازترکیب غیرتابشی را نیز کاهش دهد. به همین دلیل شفافیت اپتیکی و رسانایی الکتریکی و ترازهای انرژی مواد انتخابی از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۵]. در ساختار ZAC لایه نازک نقره باعث کاهش مقاومت سری و امکان ایجاد پلاسمون‌های محلی برای تقویت جذب نور می‌شود. در حالی که ZnSe و CdTe به ترتیب نقش پنجره اپتیکی و لایه حفره ساز را ایفا می‌کنند [۱۹]. در پژوهش‌های مائو و همکاران [۲۰] و ماتسویی و همکاران [۲۱] به ترتیب از لایه‌هایی مانند NiO_x/2PACz و TiO_x به عنوان لایه میان‌لایه‌ای استفاده کرده‌اند که هر یک مزایا و چالش‌های خاص خود را دارند.

این پژوهش برای اولین بار امکان طراحی و استفاده از سامانه سه لایه‌ای با ساختار ZnSe/Ag/CdTe (ZAC) به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای در سلول تاندم پروسکایت - سیلیکون را بررسی کرده است. این ساختار ضمن حفظ شفافیت و رسانایی بالا منجر به کاهش بازترکیب غیر قابل بازگشت و افزایش بازده نهایی می‌شود. استفاده هم‌زمان از سه ماده به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای این طراحی را منحصر به فرد کرده است. همچنین استفاده از یک لایه فلزی بین لایه‌های ZnSe و CdTe باعث بهبود خواص اپتیکی و الکتریکی ساختار می‌شود. به منظور بررسی عملکرد این الکتروود آن را در یک سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون قرار می‌دهیم و پارامترهای سلول خورشیدی مورد نظر را استخراج و عملکرد سلول را بررسی می‌کنیم.

محاسبات

روش‌شناسی و مدل‌سازی

نرم‌افزار استفاده‌شده برای شبیه‌سازی سلول خورشیدی تاندم، SCAPS-1D (نسخه ۳.۳.۱۰) است. از بخش‌های مختلف نرم‌افزار برای تنظیم یا تغییر پارامترهایی استفاده می‌شود که نتایج بر اساس آن‌ها استنتاج می‌گردد. برای یک سلول خورشیدی تاندم، ماده با گاف انرژی بالاتر باید در سلول فوقانی و ماده با گاف انرژی پایین‌تر در سلول تحتانی قرار گیرد تا عملکرد بهینه حاصل شود. گاف انرژی پروسکایت در بازه eV ۱/۴ تا ۱/۹ (بزرگ‌تر از سیلیکون) برای لایه فعال بالایی یک ساختار دو گاف کارآمد مناسب است. در این پژوهش برای طراحی سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون، از پروسکایت CH₃NH₃PbI₃ به عنوان لایه جاذب سلول بالایی استفاده شده است که دارای گاف انرژی مستقیم در حدود eV ۱/۵۵ است. برای سلول پایینی از سیلیکون بلوری (C-Si)

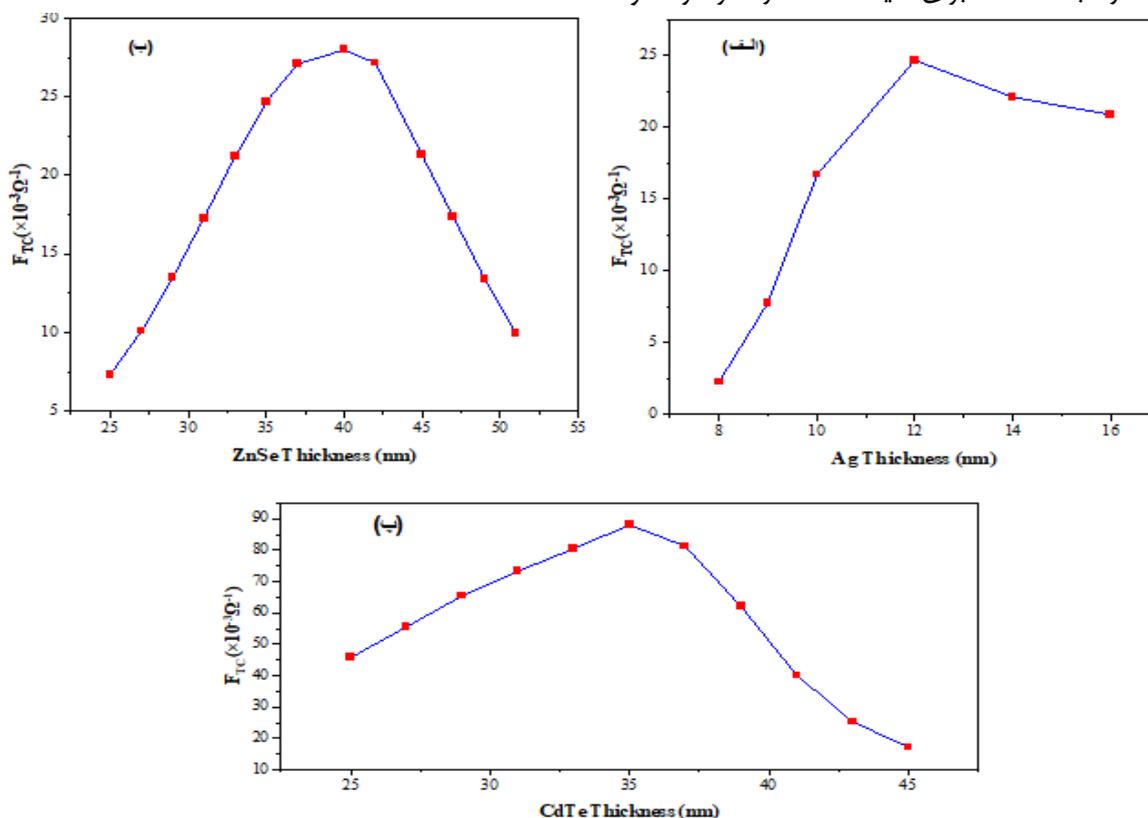
ضخامت لایه ZnSe را تغییر می‌دهیم تا ضخامت بهینه لایه ZnSe به دست آید و در آخر مقدار ضخامت بهینه لایه‌های Ag و ZnSe را قرار داده و مقدار بهینه لایه CdTe به دست می‌آید. شکل ۱ (الف-ب-پ) نمودار F_{TC} محاسبه شده را بر حسب ضخامت برای هر سه لایه Ag، ZnSe و CdTe نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها، بهترین مقدار F_{TC} برای هر سه لایه زمانی به دست می‌آید که ضخامت لایه‌های Ag، ZnSe و CdTe به ترتیب ۱۲nm، ۴۰nm و ۳۵nm باشد. شکل ۲ طیف عبور و بازتاب ساختار ZAC بهینه شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مقدار متوسط تراگسیل در محدوده مرئی و مقدار متوسط بازتاب در محدوده فروسرخ به ترتیب حدود ۸۳ درصد و ۱۶ درصد است. از ناحیه ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر طیف عبور از ۸۷ به ۸۲ درصد کاهش می‌یابد و در طول موج ۱۲۰۰ نانومتر به ۵۳ درصد می‌رسد. با توجه به اینکه یکی از فاکتورهای مهم در لایه میان‌لایه‌ای، طیف عبور قابل قبول در ناحیه فروسرخ نزدیک است [۲۶]، ساختار ZAC نیز در ناحیه فروسرخ طیف عبور قابل قبولی دارد. دونگ چن و همکاران [۲۷] در پژوهش خود از ساختارهای ITO/Cu/ITO و ITO/Ag/ITO به عنوان تماس پشتی استفاده کردند تا نور را به سلول زیرین (مثل سیلیکون) منتقل کند و به این نتیجه رسیدند که این لایه‌ها باعث افزایش بازده سلول خورشیدی می‌شود.

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

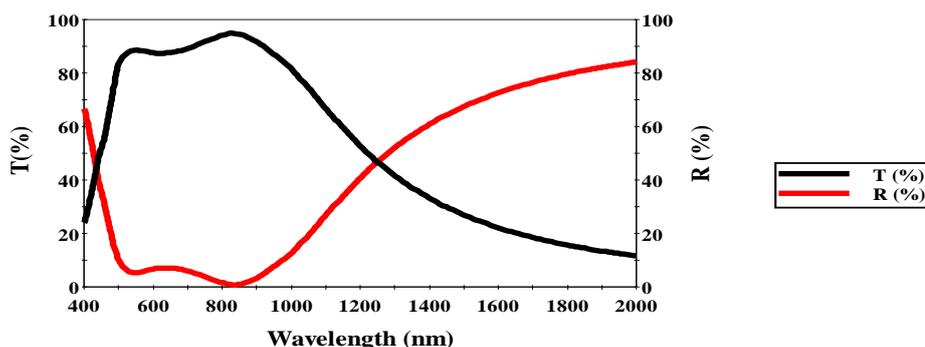
که در آن R بازتاب در ناحیه فروسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی و $Z_0 = 377 \Omega$ امپدانس فضای آزاد است. این رابطه نشان می‌دهد که بازتاب در ناحیه فروسرخ به تراکم الکترون در این لایه‌ها بستگی دارد. بازتاب در طول موج ۱۷۰۰ nm می‌تواند به عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه فروسرخ به کار رود [۲۳]. ضریب شایستگی (FTC) شاخص مهمی است که رابطه بین خواص الکتریکی و اپتیکی پوشش‌های رسانای شفاف را نشان می‌دهد. این کمیت توسط هاک^۱ به صورت معادله زیر تعریف شده است [۲۴]:

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

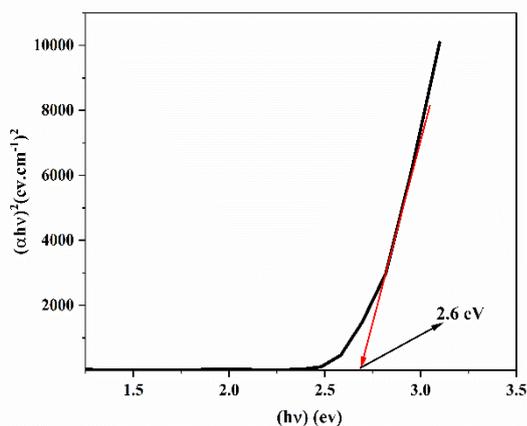
که در آن T تراگسیل پوشش‌های رسانای شفاف در طول موج ۵۵۰ nm و R_{sh} مقاومت سطحی لایه را نشان می‌دهد. دورانی^۲ [۲۵] در ساختارهای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک نشان داد که معمولاً با برابر قرار دادن ضخامت لایه‌های اول و سوم تراگسیل لایه‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسند. برای طراحی این سامانه، ابتدا ضخامت لایه‌های ZnSe و CdTe را در یک مقدار دلخواه (۳۵nm) ثابت گرفته و باید با تغییر ضخامت لایه Ag ضریب شایستگی این پوشش‌ها به ماکزیمم مقدار خود برسد. سپس ضخامت بهینه به دست آمده برای لایه Ag و مقدار ثابت ۳۵nm برای لایه CdTe در نظر گرفته و



شکل ۱. نمودار ضریب شایستگی (FTC) بر حسب ضخامت لایه‌های Ag (الف)، ZnSe (ب) و CdTe (پ)



شکل ۲. تراگسیل و بازتاب اپتیکی ساختار چند لایه‌ای ZnSe (40 nm) / Ag (12 nm) / CdTe (35 nm) برحسب طول موج

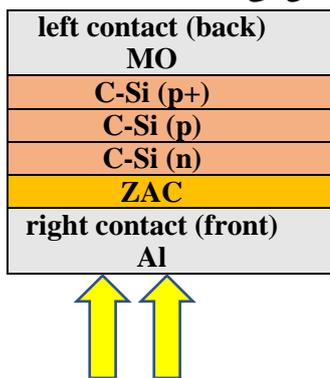


شکل ۳. نمودار $(\alpha hv)^2$ برحسب hv برای ساختار ZAC

طیف استاندارد AM 1.5 G و دمای ۳۰۰ کلوین در این شبیه‌سازی به کار رفته است. ولتاژ استفاده‌شده برای عملیات شبیه‌سازی ۰ تا ۳ ولت تعیین شده است.

سلول خورشیدی تک پیوندی سیلیکون

شکل ۴ ساختار شماتیک سلول خورشیدی تک پیوندی سیلیکونی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. ساختار شماتیک سلول خورشیدی سیلیکونی

در این نوع سلول لایه‌های سیلیکون بلوری نوع (p)، (p+) و (n) به ترتیب به عنوان میدان سطح پشتی، لایه جذب‌کننده حفره و لایه انتشاردهنده الکترون به کار رفته است. همچنین آلومینیوم و مولیبدن به ترتیب به عنوان تماس فلزی جلویی و پشتی استفاده شده است. ضخامت بهینه لایه‌های سیلیکون بلوری نوع (n) و (p+) از پژوهش ناوشروان و همکاران [۲۸] استخراج شده است.

جدول ۳ مقایسه ضخامت بهینه لایه C-Si نوع p را در

تمام پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی از جمله گاف انرژی، گذردهی دی‌الکتریک، چگالی موثر نوار رسانش، چگالی موثر نوار ظرفیت، تحرک الکترونی و تحرک حفره برای موادی مانند پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ ، سیلیکون تک بلور (C-Si)، TiO_2 ، FTO، Spiro-OMeTAD و ZnSe، CdTe موجود در مقالات گزارش‌شده [۲۸-۳۱]، استخراج گردید و در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در سلول خورشیدی سیلیکونی و پروسکایت دو لایه نقص تعریف شده است که در جدول ۲ مشخص شده است. نرم‌افزار SCAPS-1D به طور مستقیم نمی‌تواند لایه فلزی را شبیه‌سازی کند؛ ولی می‌توان با تعریف و بهینه‌سازی قسمت عیوب بین‌لایه‌ای بین دو لایه ZnSe و CdTe تا حد زیادی لایه نقره را شبیه‌سازی کرد. داده‌های ضریب جذب مواد پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ ، سیلیکون تک بلور (C-Si)، TiO_2 ، FTO، Spiro-OMeTAD و ZnSe از CdTe از منابع مختلف استخراج شد [۳۰-۳۳]. به کمک رابطه ضریب جذب (α) ساختار ZAC تعیین می‌شود [۳۴]:

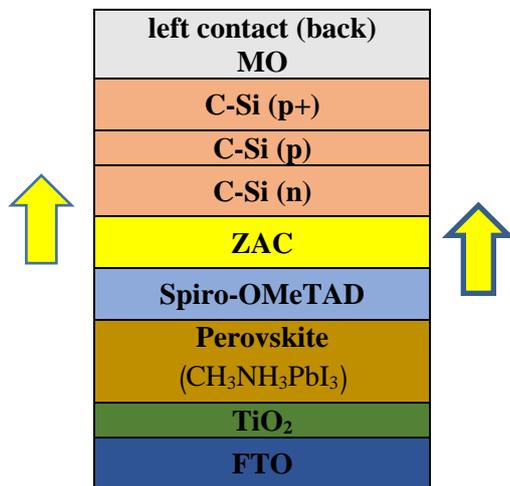
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{T} \right] \quad (3)$$

در رابطه بالا R ، T و d به ترتیب طیف بازتاب، عبور و ضخامت سامانه چندلایه‌ای است. به منظور وارد کردن اثرات پلاسمونیک و نوری ساختارهای شامل فلز در برنامه SCAPS باید فایل ضریب جذب ساختار را از برنامه Essential Macleod استخراج کرد و سپس در برنامه SCAPS وارد کرد. برای تعیین گاف انرژی ZAC باید منحنی تغییرات $(\alpha hv)^2$ برحسب hv رسم کرد؛ سپس با برازش خط راست بر محدوده خطی منحنی‌ها از محل قطع خط راست با محور hv مقدار گاف انرژی تعیین می‌شود. در شکل ۳ منحنی‌های $(\alpha hv)^2$ (in $eV \cdot cm^{-1}$)² بر حسب hv (eV) و همچنین برازش خط راست بر منحنی مذکور برای ساختار ZAC رسم شده است و مقدار گاف انرژی موثر سامانه سه لایه‌ای مقدار $2/6$ eV به دست می‌آید.

جدول ۱. پارامترهای مورد برای شبیه‌سازی سلول خورشیدی در نرم‌افزار SCAPS - 1D

CdTe	ZnSe	Spiro-OMeTAD	C-Si (p+)	C-Si (n)	C-Si (p)	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	TiO ₂	FTO	پارامترها
40	35	200	30	50	4000	500	50	100	ضخامت (nm)
1.45	2.7	3	1.12	1.12	1.12	1.55	3.2	3.5	گاف انرژی (eV)
4.28	4.09	2.45	3.9	3.9	4.050	4.17	4	4	الکترون خواهی (eV)
10.6	9	6.5	11.9	11.9	11.9	6.5	10	9	گذردهی دی الکترونیک
8×10 ¹⁷	1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹	2.8×10 ¹⁹	2.8×10 ¹⁹	2.6×10 ¹⁹	1×10 ¹⁸	2.2×10 ¹⁸	2.2×10 ¹⁹	چگالی موثر نوار رسانش (cm ⁻³)
1.8×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹	2.6×10 ¹⁹	2.6×10 ¹⁹	2.6×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹	1.8×10 ¹⁹	1.8×10 ¹⁹	چگالی موثر نوار ظرفیت (cm ⁻³)
320	500	2×10 ⁻⁴	1215	1215	1041	1.6	20	20	تحرک الکترونی (cm ² /Vs)
40	80	2×10 ⁻⁴	443	443	421	1.6	10	10	تحرک حفره (cm ² /Vs)
1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	1×10 ¹⁴	چگالی نقص (cm ⁻³)
1×10 ¹⁷	0	2×10 ²⁰	9×10 ¹⁹	0	1.5×10 ¹⁵	3.2×10 ¹⁵	0	0	غلظت پذیرنده (cm ⁻³)
0	1×10 ¹⁷	0	0	1×10 ¹⁸	0	0	10 ¹⁷	10 ¹⁹	غلظت دهنده (cm ⁻³)

جذب‌کننده و لایه انتقال‌دهنده حفره به کار رفته است. همچنین از نیکل به عنوان تماس فلزی پشتی استفاده شده است. ضخامت بهینه لایه‌های FTO و TiO₂ از پژوهش ناوشروان و همکاران [۲۸] و لایه Spiro-OMeTAD از پژوهش بازیزی^۴ و همکاران [۳۷] استخراج شده است.



شکل ۵. ساختار شماتیک سلول خورشیدی پروسکایت

جدول ۵ مقایسه ضخامت بهینه لایه پروسکایت را نشان

می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه ضخامت بهینه لایه پروسکایت (CH₃NH₃PbI₃) در سلول خورشیدی پروسکایت

بازدهی تبدیل توان PCE (%)	ضریب پری FF (%)	ضخامت Pervoskite (CH ₃ NH ₃ PbI ₃) (میکرومتر)
17.26	84.67	0.1
17.28	83.97	0.3
17.32	84.36	0.5
17.26	84.93	0.7
17.20	85.24	1
16.90	85.73	2

با توجه به داده‌های جدول ۴ ضخامت بهینه لایه پروسکایت برای حداکثر بازدهی سلول خورشیدی پروسکایت در ۰/۵ میکرومتر است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سلول خورشیدی پروسکایت در ضخامت بهینه لایه پروسکایت (CH₃NH₃PbI₃) برای مقادیر ولتاژ مدار باز (Voc) و چگالی جریان (Jsc) به ترتیب ۱/۰۲۷ و ۲۰/۴۰ mA/cm² به دست آمد.

جدول ۲. تعریف نقص‌های بین‌لایه‌ای برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و پروسکایت

نوع سلول خورشیدی	تعریف لایه‌ها	چگالی نقص بین‌لایه‌ای (cm ⁻²)
سیلیکون بلوری	ZAC / C-Si (n)	1×10 ¹⁴
پروسکایت	TiO ₂ / Perovskite Perovskite / Spiro-OMeTAD	1×10 ¹⁴ 1×10 ¹⁴

سلول خورشیدی سیلیکونی نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه ضخامت بهینه لایه C-Si (p) در سلول خورشیدی سیلیکونی

ضخامت C-Si(p+) (میکرومتر)	ضریب پری FF (%)	بازدهی تبدیل توان PCE (%)
1	81.63	20.87
2	80.90	20.93
3	80.76	21.21
4	80.72	21.28
5	80.53	21.15

با توجه به جدول ۳ ضخامت بهینه لایه سیلیکون بلوری نوع (p) برای حداکثر بازدهی سلول خورشیدی سیلیکونی در ۴ میکرومتر است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سلول خورشیدی سیلیکونی در ضخامت بهینه لایه سیلیکونی نوع (p) برای مقادیر ولتاژ مدار باز (Voc) و چگالی جریان (Jsc) به ترتیب ۰/۶۰۱۷ و ۴۳/۸۵ mA/cm² به دست آمد.

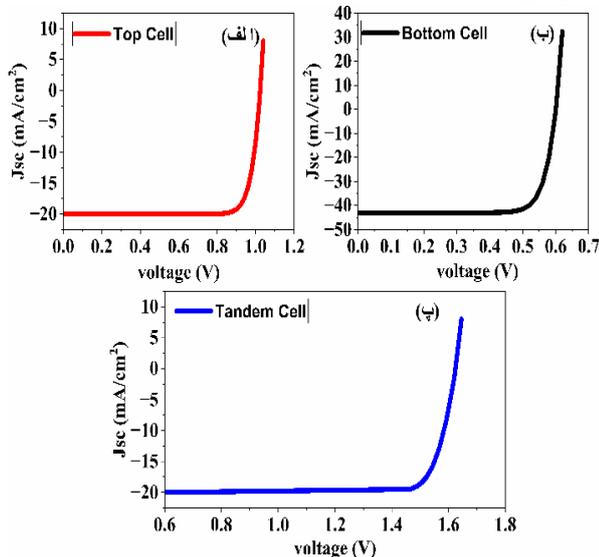
پژوهشگران دیگری سلول خورشیدی سیلیکونی را شبیه‌سازی کردند و بازدهی تبدیل توان سلول را به دست آوردند. از جمله ناوشروان^۱ و همکاران [۲۸]، کانماز^۲ [۳۵] و بازیدی^۳ و همکاران [۳۶] بازدهی تبدیل توان سلول خورشیدی بر پایه سیلیکون را به ترتیب ۲۰/۳۰، ۲۶/۶۰ و ۱۳ درصد به دست آوردند.

سلول خورشیدی تک پیوندی پروسکایت

شکل ۵ ساختار شماتیک سلول خورشیدی پروسکایت را نشان می‌دهد. در این ساختار سلول خورشیدی لایه‌های FTO، TiO₂، پروسکایت (CH₃NH₃PbI₃) و Spiro-OMeTAD به ترتیب به عنوان لایه پنجره، لایه انتقال‌دهنده الکترون، لایه

1 Nowsherwan
2 Kanmaz
3 Bouzidi

می‌باشیم؛ زیرا سلول تاندم باعث جذب طیف وسیع‌تر نور خورشید می‌شود که سلول بالایی فوتون‌هایی با انرژی بالا (طول موج کوتاه‌تر) و سلول پایینی فوتون‌هایی با انرژی پایین‌تر (طول موج بالاتر) را جذب می‌کنند [۴۱]. از جمله علل دیگر می‌توان کاهش تلفات حرارتی و در نتیجه افزایش ولتاژ مدار باز اشاره کرد [۴۲]. همچنین در سلول‌های تاندم، کاهش مقاومت‌های سری و بهبود شرایط توزیع جریان در لایه‌ها، ضریب پرشدگی (FF) را افزایش داده و در نهایت باعث ارتقای بازده کل دستگاه می‌شود [۴۳]. علاوه بر این موارد، لایه ZAC می‌تواند باعث کاهش فرآیند بازترکیب شده و لایه نقره در ساختار ZAC منجر به ایجاد پلاسمون‌های محلی برای تقویت جذب نور می‌شود [۲۲-۲۰]. شکل ۷ نمودار جریان بر حسب ولتاژ را برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، پروسکایت و تاندم پروسکایت - سیلیکون نشان می‌دهد.



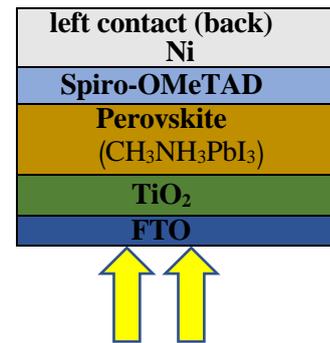
شکل ۷. نمودار جریان بر حسب ولتاژ سلول‌های خورشیدی (الف- پروسکایت، ب- سیلیکونی و پ- تاندم پروسکایت - سیلیکون)

با توجه به شکل ۷ ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و بازده تبدیل توان، عملکرد سلول تاندم پروسکایت - سیلیکون نسبت به سلول تک پیوندی سیلیکونی و پروسکایت افزایش یافته؛ ولی چگالی جریان سلول تاندم نسبت به سلول سیلیکونی به دلیل محدودیت جریان در زیر سلول پروسکایت کاهش یافته است. به طور کلی در سلول‌های تاندم، جریان کلی سلول توسط زیر سلول با جریان کمتر محدود می‌شود [۴۴]. هیون^۳ و همکاران [۴۵]، چین^۴ و همکاران [۴۶] نیز در پژوهش خود شاهد افزایش بازده تبدیل توان و ولتاژ مدار باز و همچنین کاهش چگالی جریان سلول تاندم نسبت به سلول سیلیکونی بودند. پی و همکاران^۵ [۴۷] و مارچانت^۶ و همکاران [۴۸] در

رابهی^۱ و همکاران [۳۸] و شافی^۲ و همکاران [۳۹] در پژوهش‌های خود به کمک نرم‌افزار SCAPS-1D بازدهی سلول خورشیدی پروسکایت را به ترتیب ۱۷ و ۱۶ درصد به دست آوردند که به نتایج ما نزدیک هستند.

سلول خورشیدی تاندم دو ترمیناله پروسکایت - سیلیکون

در قسمت‌های قبل پارامترهای بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایت و سیلیکون به دست آمد و شکل ۶ ساختار شماتیک سلول خورشیدی تاندم دو ترمیناله پروسکایت - سیلیکون را نشان می‌دهد.



شکل ۶. ساختار شماتیک سلول خورشیدی تاندم دو ترمیناله پروسکایت - سیلیکون

در این شبیه‌سازی اتصال الکتریکی بین Spiro-OMeTAD / ZAC به صورت غیر اهمی مدل‌سازی شده است.

حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون مطابق جدول ۵ به دست آمد.

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی با ضخامت بهینه لایه پروسکایت برای سلول خورشیدی پروسکایت

PCE (%)	FF (%)	$J_{sc} (\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc} (V)$
29.51	89.30	20.40	1.62

بازدهی سلول‌های خورشیدی از رابطه زیر محاسبه می‌شود

[۴۰]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100 \quad (4)$$

در رابطه بالا V_{oc} ولتاژ مدار باز، J_{sc} چگالی جریان مدار کوتاه (یکا باید برحسب SI جای‌گذاری شود)، FF ضریب پرشدگی و P_{in} توان ورودی تابش خورشید که معادل 1.5G ($\frac{W}{m^2}$) است.

با مقایسه جدول‌های ۳ و ۴ با جدول ۵ شاهد افزایش بازدهی سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون نسبت به سلول‌های خورشیدی تک پیوندی سیلیکونی و پروسکایتی

طراحی و بهینه‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار ZAC می‌تواند به عنوان یکی از گزینه‌های استفاده‌شده به عنوان الکتروود میان‌لایه‌ای در سلول‌های خورشیدی تاندم قرار گیرد. ضخامت بهینه لایه‌های ZnSe، Ag و CdTe به منظور شفافیت اپتیکی و رسانایی بالا به ترتیب ۴۰، ۱۲ و ۳۵ نانومتر به‌دست آمد و همچنین نتایج برای سلول خورشیدی تاندم پروسکایت-سیلیکون برای مقادیر ولتاژ مدار باز (Voc)، چگالی جریان (Jsc)، ضریب پرشدگی و بازده تبدیل توان (PCE) به ترتیب ۱/۶۲V، ۲۰/۴۰ mA/cm²، ۸۹/۳۰ و ۲۹/۵۱ درصد به‌دست آمدند.

پژوهش‌های تجربی روی ساختار تاندم پروسکایت - سیلیکون بازده تبدیل توان سلول آن را به ترتیب ۲۹/۰۳ و ۲۹ درصد به‌دست آوردند. نتایج این تحقیقات مطابقت خوبی با پژوهش حاضر دارد و بازدهی تبدیل توان این کار مقداری بالاتری است، که این نشان از بهینه‌سازی خوب پارامترهای سلول خورشیدی تاندم پروسکایت - سیلیکون در این پژوهش است و نشان می‌دهد که الکتروود میان‌لایه‌ای ZAC می‌تواند نقش مهمی در بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی تاندم ایفا کند.

نتیجه‌گیری

سامانه چندلایه‌ای ZnSe/Ag/CdTe (به اختصار ZAC)

References

- [1] J. Han et al. "Optimization of oxide materials in oxide-metal-oxide(OMO) electrodes for flexible electrochromic devices". *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 249, (2023), 112035.
- [2] E. G. Jeong, et al. "A review of highly reliable flexible encapsulation technologies towards rollable and foldable OLEDs". *J. Inf. Dis.* 21 (1), (2020), 19-32.
- [3] H. V. Kiranakumar et al. "A review on electrical and gas-sensing properties of reduced graphene oxide metal oxide nanocomposites". *Biomass Conversion and Biorefinery*. 14, (2024), 12625-12635.
- [4] M. Wang et al. "Optimized properties of innovative electrochromic device using ITO/Ag/ITO electrodes, *Electrochim*". *Acta*. 301, (2019), 200-208.
- [5] Y. Alesanco et al. "All-in-one gel-based electrochromic devices: strengths and recent developments". *Materials*. 11 (3), (2018), 414.
- [6] H. Ferhati et al. "High-responsivity MSM solar-blind UV photodetector based on annealed ITO/Ag/ITO structure using RF sputtering". *IEEE Sensor. J.* 19 (18), (2019), 7942-7949.
- [7] M. Althumayri et al. "Recent Advances in Transparent Electrodes and Their Multimodal Sensing Applications". *Advanced Science*. 11 (39), (2024), 2405099.
- [8] G. Su choi et al. "Enhancing Light Extraction Efficiency in OLED Using Scattering Structure-Embedded DMD-Based Transparent Composite Electrodes". *Nanomaterials*. 13 (15), (2023), 2253.
- [9].Y. Cheng et al. "Evaluation of Transparent ITO/Nano-Ag/ITO Electrode Grown on Flexible Electrochromic Devices by Roll-to-Roll Sputtering Technology". *Coatings*. 12 (4), (2022), 455.
- [10] L. Peres et al. "ZnS/Ag/TiO₂ multilayer electrodes with broadband transparency for thin film solar cells". *RSC Advances*. 6 (66), (2016), 61057-61063.
- [11] D. H. Kim, et al. "ZnSnO/Ag/indium tin oxide multilayer films as a flexible and transparent electrode for photonic devices, Superlattice". *Microst*. 83, (2015), 635-641.
- [12] M. A. Fazel et al. "Progress of PV cell

منابع

- technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability". *Solar Energy*. 258, (2023), 203-219.
- [13] S. E. Sofia et al. "Roadmap for cost-effective, commercially-viable perovskite silicon tandems for the current and future PV market". *Sustainable Energy & Fuels*. 2, (2020), 852-862.
 - [14] J. P. Mailoa et al. "A 2-Terminal Perovskite/Silicon Multijunction Solar Cell Enabled by a Silicon Tunnel Junction". *Applied Physics Letters*. 106, (2015), 121105.
 - [15] Y. Lin et al. "Transparent Recombination Layers Design and Rational Characterizations for Efficient Two-Terminal Perovskite-Based Tandem Solar Cells". *Advanced Materials*. 36, (2024), 2405684.
 - [16] A. Strabor et al., "Thermal lens in magneto-active ZnS, ZnSe and CdSe semiconductor media", *Optical Materials*. 138, (2023), 113740.
 - [17] A. El-Mahalawy et al., "Overcoming the poor performance of n-CdS/p-SnS solar cells by plasmonic effect of gold and silver nanoparticles", *Alloys and Compounds*. 923, (2022), 166344.
 - [18] M. Alzaid et al. "Thermal decomposition study of cadmium telluride (CdTe) Microstructural, optical, and electrical characteristics of Cu-doped CdTe nanocrystalline films for designing absorber layer in solar cell applications". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32 (4), (2021), 1-13.
 - [19] S. Kim et al. "Plasmon-enhanced performance of CdS/CdTe solar cells using Au nanoparticles". *Optics Express*. 27 (15), (2019), 22017- 22024.
 - [20] L. Mao et al. "Fully Textured, Production-Line Compatible Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells Approaching 29% Efficiency". *Advanced Materials*. 34 (40), (2022), 2206193.
 - [21] T. Matsui et al. "Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells Enabled by Multifunctional TiO_x Interconnects". *Small*. 21 (24), (2025), 2500969.
 - [22] P. Zhao et al. "Properties of thin silver films with different thickness". *Physica E*. 41, (2009), 387-390.
 - [23] X. Liu et al. "The design of ZnS/Ag/ZnS

- transparent conductive multilayer films". *Thin Solid Films*. 441, (2003), 200-226.
- [24] J. Haacke. "New figure of merit for transparent conductors". *J. Appl. Phys.* 47, (1976), 4086-4089.
- [25] M. G. Varnamkhasti et al. "Design and fabrication of nanometric TiO₂/Ag/TiO₂/Ag/TiO₂ transparent conductive electrode for inverted organic photovoltaic cells application" *Superlattices and Microstructures*. 69, (2014), 231-238.
- [26] J. Zheng et al. "Efficient monolithic perovskite-Si tandem solar cells enabled by an ultra-thin indium tin oxide interlayer". *Energy & Environmental Science*. 16 (3), (2023), 1223-1233 .
- [27] D. Chen et al. "ITO/Ag/ITO and ITO/Cu/ITO transparent rear contacts for semi-transparent perovskite solar cells". *Thin Solid Films*. 752, (2022), 139252.
- [28] G. A. Nowsherwan et al. "Numerical Modeling and Optimization of Perovskite Silicon Tandem Solar Cell Using SCAPS-1D". *Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences*. 7, (2021), 171- 184.
- [29] N. Ramli et al. "Model development of monolithic tandem silicon-perovskite solar cell by SCAPS simulation". *AIP Conference Proceedings*. 1838, (2017), 020006.
- [30] S. R. Hosseini et al. "Investigating the effect of non-ideal conditions on the performance of a planar CH₃NH₃PbI₃ based perovskite solar cell through SCAPS-1D simulation". *Heliyon*. 8 (11), (2022), 11471.
- [31] M. Belarbi et al. "Parameters optimization of heterojunction ZnSe/CdS/CIGS/Si solar cells using SCAPS-1D software". *Journal of Renewable Energies*. 1 (1), (2022), 31-36.
- [32] M. Ball et al. "Optical properties and limiting photocurrent of thin-film perovskite solar cells". *Energy & Environmental Science*. 8 (2), (2015), 602-609.
- [33] A. S. Hassanien et al. "Study of optical properties of thermally evaporated ZnSe thin films annealed at different pulsed laser powers". *Journal of Alloys and Compounds*. 685, (2016), 733-742.
- [34] D. C. Look et al. "Reflectance and transmittance measurements: Application to Fe-doped GaN". *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 34 (4), (2016), 4954211.
- [35] I. Kanmaz. "Simulation of CdS/p-Si/p+-Si and ZnO/CdS/p-Si/p+-Si heterojunction solar cells". *Results in Optics*. 10, (2023), 100353.
- [36] A. Bouzidi et al. "Numerical simulation of tandem solar cells based- CIGS and C-Si sub-cells using SCAPS-1D". *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED STUDIES IN COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING*. 11 (12), (2022), 17-27.
- [37] S. Bouazizi et al. "Design and efficiency enhancement of FTO/PC 60 BM/CsSn 0.5 Ge 0.5 I 3 /Spiro-OMeTAD/Au perovskite solar cell utilizing SCAPS-1D Simulator". *Materials Research Express*. 9 (9), (2022), 096402.
- [38] S. Rabhi et al. "Modeling and Numerical Simulation of a CH₃NH₃SnI₃ Perovskite Solar Cell Using the SCAPS1-D Simulator". *Engineering Proceedings*. 56 (1), (2023), 97.
- [39] M. A. Shafi et al. "Numerical Simulation of Lead-Free Sn-Based Perovskite Solar Cell by Using SCAPS-1D". *Engineering Proceedings*. 12 (1), (2021), 92.
- [40] A. Al-Ezzi et al. "Photovoltaic Solar Cells: A Review". *Applied System Innovation*. 5 (4), (2022), 67.
- [41] S. Rühle. "Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells". *Solar Energy*. 130, (2016), 139-147.
- [42] K. A. Bush et al. "23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability". *Nature Energy*. 2 (4), (2017), 17009.
- [43] X. Liu et al. "Charge carrier management for highly efficient perovskite/Si tandem solar cells with poly-Si based passivating contacts" *Energy Environ*. 18, (2025), 5599-5609.
- [44] M. Heydarian et al. "Maximizing Current Density in Monolithic Perovskite Silicon Tandem Solar Cells". *Solar RRL*. 7 (7), (2023), 2200930.
- [45] J. Y. Hyun et al. "Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with a Voc of 1784 mV Based on an Industrially Feasible 25 cm² TOPCon Silicon Cell". *ACS Applied Energy Materials*. 5 (5), (2022), 1632-1639.
- [46] B. Chen et al. "Conductive passivating contact for high fill factor monolithic perovskite/silicon tandem solar cells". *Interdisciplinary Materials*. 2 (6), (2023), 855-865.
- [47] F. Pei et al. "A binary 2D perovskite passivation for efficient and stable perovskite/silicon tandem solar cells". *Nature Communications*. 15, (2024), 7024.
- [48] C. Marchant et al. "Perovskite/silicon tandem solar cells-compositions for improved stability and power conversion efficiency". *Photochemical & Photobiological Sciences* 23, (2024), 1-22.