Document Type: Full length research Paper
Pages 1-11

Design and Numerical Simulation of Tandem Solar Cells Based on Sb_2S_3 to Improve Photovoltaic Performance

Zahra Dahmardeh, Mohsen Saadat*

Department of Physics, Faculty of Science, University Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Received: 04.06.2023 Final revised: 05.02.2024 Accepted: 04.03.2024

Doi: 10.22055/jrmbs.2024.19015

Abstract

In this research, different tandem solar cells were designed and simulated, in which the upper sub-cell is Sb_2S_3. Different structures including Sb_2Se_3, CISe, CZTSe and GeTe were proposed for the lower sub-cell. It is very important to match the current in the upper and lower sub-cells in consecutive cells. To reach the current matching point, the thickness of the layers of the lower sub-cell was kept constant and the thickness of the absorbing layer of the upper cell was changed so that the current density in both sub-cells was the same. At the current matching point, the performance of the upper cell under the AM 1.5G standard spectrum radiation and the performance of the lower sub-cell under the filtered spectrum radiation were evaluated, and then the current-voltage characteristic curve of the tandem cell was obtained from the sum of the characteristic curves of the two sub-cells. The efficiency obtained for Sb_2S_3/Sb_2Se_3, Sb_2S_3/CIS, Sb_2S_3/CZTSe and Sb_2S_3/GeTe tandem cells was 22.10%, 30.95%, 24.83% and 36.80%, respectively. The greater the energy gap difference of the sub-cells, the more photons are collected and the greater current density is obtained for the cell. The best performance was obtained when GeTe was used as the bottom sub-cell.

Keywords: Tandem Solar Cells, Sb_2S_3, Numerical Simulation, Filtered Spectrum, Current Matching Technique

* Corresponding Author: Saadat@phys.usb.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

مقاله پژوهشی کامل

طراحی و شبیه‌سازی عددی سلول‌های خورشیدی پشت سر هم بر پایهٔ Sb_2S_3 جهت بهبود عملکرد فوتوولتائیک

زهرا دهمرده، محسن سعادت*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴ ویرایش نهائی: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

Doi: 10.22055/jrmbs.2024.19015

چکیده

در این تحقیق سلول‌های خورشیدی پشت سر هم[1] مختلفی طراحی و شبیه‌سازی شده که در آنها زیرسلول بالایی Sb_2S_3 است. ساختارهای مختلفی شامل Sb_2Se_3، CISe، CZTSe و GeTe برای زیرسلول پایینی پیشنهاد شد. تطابق جریان در زیرسلول بالا و پایین در سلول‌های پشت سر هم از اهمیت زیادی برخوردار است. برای رسیدن به نقطهٔ تطابق جریان، ضخامت لایه‌های زیرسلول پایینی ثابت نگه داشته شد و ضخامت لایهٔ جاذب سلول بالایی تغییرداده شد تا چگالی جریان در هر دو زیر سلول یکسان شود. در نقطهٔ تطابق جریان، عملکرد سلول بالایی تحت تابش طیف استاندارد AM1.5G و عملکرد زیرسلول پایینی تحت تابش طیف فیلتر شده مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس منحنی مشخصه جریان–ولتاژ سلول پشت سر هم از مجموع منحنی‌های مشخصه دو زیرسلول فرعی به‌دست آمد. بازدهی به‌دست آمده برای سلول‌های پشت سرهم Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ به‌ترتیب برابر ٪۲۲٫۱۰، ٪۳۰٫۹۵، ٪۲۴٫۸۳ و ٪۳۶٫۸۰ به‌دست آمد. هر چه اختلاف گاف انرژی سلول‌های فرعی بیشتر باشد، فوتون‌های بیشتری جمع‌آوری می‌شوند و چگالی جریان بزرگتری برای سلول حاصل می‌شود. بهترین عملکرد هنگامی به‌دست آمد که از GeTe به‌عنوان زیرسلول پایینی استفاده شد.

کلیدواژگان: سلول خورشیدی پشت سر هم، Sb_2S_3، شبیه‌سازی عددی، طیف فیلتر شده، روش تطابق جریان

مقدمه

امروزه نیاز به انرژی به‌طور گسترده‌ای رو به افزایش است. منبع اصلی تأمین انرژی در حال حاضر سوخت‌های فسیلی هستند که تأثیرات مخربی بر محیط زیست دارند و سبب گرمایش جهانی می‌شوند. سوخت‌های پاک به‌ویژه انرژی خورشیدی جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شوند. دستگاه‌های فوتوولتاییک می‌توانند بدون ایجاد آلودگی نور خورشید را مستقیماً به جریان الکتریسیته تبدیل کنند. در حال حاضر، بازار فوتوولتاییک عمدتاً در اختیار دستگاه‌های تک پیوندی به‌ویژه سلول‌های خورشیدی سیلیکونی در شکل‌های مختلف است. هر چند سلول‌های خورشیدی سیلیکونی در طی دهه‌ها توسعه یافته‌اند و امروزه به رکورد بازدهی ٪۲۶٫۷ رسیده‌اند [۱] که نزدیک به حد تئوری اوژه ٪۲۹٫۴ نزدیک است [۲]، اما اخیراً بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد این سلول‌ها حاصل نشده است. سیلیکون

* نویسنده مسئول: Saadat@phys.usb.ac.ir

[1] Tandem Solar Cells

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص ۴.۰ بین‌المللی می‌باشد

بلوری پیشگام این عرصه با چالش‌های مهمی مانند گاف انرژی غیرمستقیم مواجه است که مستلزم مصرف مقادیر زیادی مواد فوق‌العاده خالص و همچنین فرآیند ساخت چند مرحله‌ای است که این امر موجب افزایش مصرف انرژی، امکانات فنی و نیروی کار است [۳].

در سال‌های اخیر مواد حجمی و لایهٔ نازک زیادی به‌عنوان لایهٔ جاذب جایگزین سیلیکون در سلول‌های خورشیدی تک پیوندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴,۵]، اما به‌هر حال حد بالایی برای سلول‌های خورشیدی تک پیوندی وجود دارد. در سال ۱۹۶۱، شاکلی[1] و کوئیسر[2] نشان دادند که بیشترین بازده تئوری برای سلول خورشیدی با لایهٔ جاذب با گاف انرژی ۱٫۳۴eV برابر ٪۳۳٫۷ است [۶]. تا کنون ویفرهای سیلیکون تک کریستال، پروسکایت‌های بر پایهٔ سرب و سلول‌های لایه نازک مانند $Cu(In,Ga)Se_2$ و CdTe به‌ترتیب به رکورد بازدهی ٪۲۶٫۷، ٪۲۵٫۲، ٪۲۳٫۳ و ٪۲۲٫۱ رسیده‌اند [۷]. این نشان می‌دهد که بازدهی تجربی سلول‌های خورشیدی تک پیوندی نسل اول، دوم و سوم به مقدار تئوری خود نزدیک شده‌اند. سلول‌های تک پیوندی تنها فوتون‌های با انرژی مساوی یا بیشتر از گاف انرژی ماده جاذب را می‌توانند جذب کنند و باقیمانده طیف تابشی هدر می‌رود. حتی در مورد فوتون‌های با انرژی بیشتر از گاف، تفاوت انرژی به‌صورت اتلاف گرمایی ظاهر می‌شود و این سبب کاهش عملکرد سلول می‌شود [۸].

کاربرد جاذب‌های متعدد با گاف انرژی‌های مختلف در سلول‌های پشت سر هم (چند پیوندی)، عملی‌ترین راهکار برای بالا بردن قابل توجه حد بازده فراتر از حد عملی برای دستگاه‌های تک اتصالی است [۹]. سلول‌های خورشیدی پشت سر هم شامل یک زیرسلول بالا با گاف انرژی زیاد هستند که فوتون‌های فرودی با طول موج کوتاه را جذب می‌کند و یک سلول پایین با گاف انرژی کم که طول موج‌های بلندتر طیف خورشید را جذب می‌کند. ولتاژ مدار باز[3] (V_{OC}) یک سلول پشت سر هم برابر با مجموع V_{OC} هر یک از سلول‌های فرعی آن است. در سلول‌های پشت سر هم دو ترمینالی، زیرسلول‌ها از نظر الکتریکی و اپتیکی به‌صورت سری به‌هم متصل هستند. نور ابتدا بر زیرسلول بالایی می‌تابد و بخشی از آن جذب می‌شود و قسمت جذب نشده وارد زیرسلول پایینی می‌شود. قانون اول کیرشهف دربارهٔ دو سلول با اتصال الکتریکی سری بیان کننده این است که جریان عبوری از دو سلول باید با هم برابر باشد. بنابراین برای بازدهی بهتر لازم است که توانایی تولید جریان در آنها یکسان باشد و از اتلاف انرژی جلوگیری شود [۱۲-۱۰]. بیشترین حد بازدهی برای سلول‌های پشت سر هم با تعداد محدود زیرسلول برابر ٪۶۸٫۲ پیش‌بینی شده است [۱۳]. تاکنون سلول‌های خورشیدی چند پیوندی III-V، بازدهی‌های بالاتر از حد شاکلی-کوئیسر تک پیوندی نشان داده‌اند. با این حال، فناوری ساخت این نوع از سلول‌ها در حال حاضر پیچیده و گران قیمت است و عمدتاً برای کاربردهای فضایی استفاده می‌شوند [۱۴,۱۵]. همچنین علیرغم بازدهی قابل توجه سلول‌های خورشیدی تک پیوندی و پشت سر هم پروسکایتی بر پایهٔ سرب، به‌دلیل سمی بودن زیاد و ناپایداری ذاتی محققان به‌دنبال مواد جایگزینی هستند که هم با محیط زیست سازگار باشند و هم پایداری بالایی داشته باشند. فناوری‌های فوتوولتاییک لایهٔ نازک با استفاده از مواد نیم‌رسانای آلی و معدنی مختلف توجه زیادی را به‌خود جلب کرده‌اند

[1] Shockley
[2] Queisser
[3] Open-Circuit Voltage

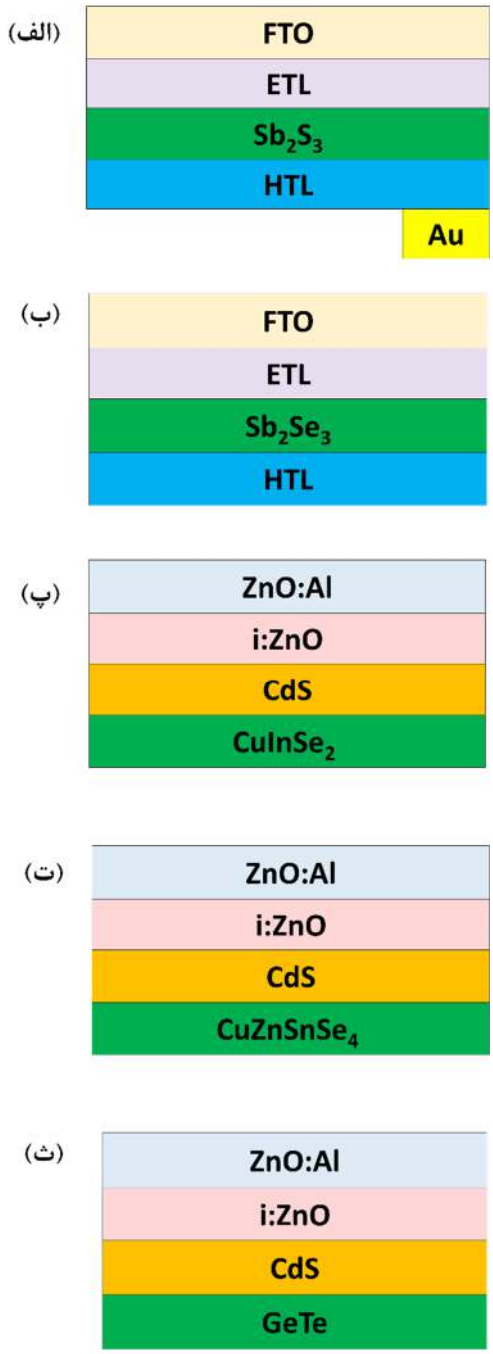
[۱۶-۱۹].

Sb_2S_3 با گاف انرژی مطلوب ۱٫۷ eV، شرایط سنتز مناسب (سنتز در دمای کمتر از ۳۵۰ °C)، پایداری ذاتی، غیرسمی بودن و عناصر تشکیل دهندهٔ ارزان‌تر یکی از مناسب‌ترین نامزدها برای سلول بالایی در سلول‌های پشت سر هم است. بنابراین، در ترکیب با سلول پایین بهینه، Sb_2S_3 می‌تواند یک همتای مناسب برای زیرسلول بالایی در دستگاه‌های پشت سر هم باشد [۲۰]. کالکوژنیدهای لایهٔ نازک مانند CISe، CdTe، $Cu_2ZnSnSe_4$ و همچنین GeTe به‌دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به‌فردی مثل گاف انرژی مناسب، هزینه‌های تولید پایین و پایداری بالا می‌توانند نامزدهای سلول پایینی در دستگاه‌های پشت سر هم مبتنی بر Sb_2S_3 باشند [۲۰].

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SCAPS [۲۱] سلول‌های خورشیدی پشت سر هم مختلفی طراحی و شبیه‌سازی شده که در آنها زیرسلول بالایی Sb_2S_3 است. ساختارهای مختلفی شامل CISe، CdTe، CZTTSe و GeTe برای زیرسلول پایینی پیشنهاد شد. از آنجایی که چگالی جریان نامتناسب بین دو زیرسلول منبع اصلی کاهش جریان در سلول‌های پشت سر هم است، ابتدا ضخامت جاذب سلول‌های فرعی بالایی به‌منظور تعیین "نقطهٔ تطابق جریان"[1] که در آن سلول‌های فرعی دارای چگالی جریان برابر هستند، تنظیم و سپس عملکرد ساختار آنالیز شد.

ساختار سلول و روش شبیه‌سازی

در این تحقیق از نرم‌افزار SCAPS [۲۱] برای شبیه‌سازی عددی سلول‌های خورشیدی استفاده شده است. اساس کار این نرم‌افزار بر حل عددی معادلهٔ پواسون و معادلات پیوستگی برای الکترون و حفره است، که به‌صورت زیر هستند:



شکل ۱. ساختار سلول خورشیدی الف) Sb_2S_3 ب) Sb_2Se_3 پ) CIS ت) CZTS و ث) GeTe.

[1] Current Matching Point

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+q/\varepsilon[p(x)-n(x)+N_D-N_A+\rho_p-\rho_n]=0 \quad (۱)$$

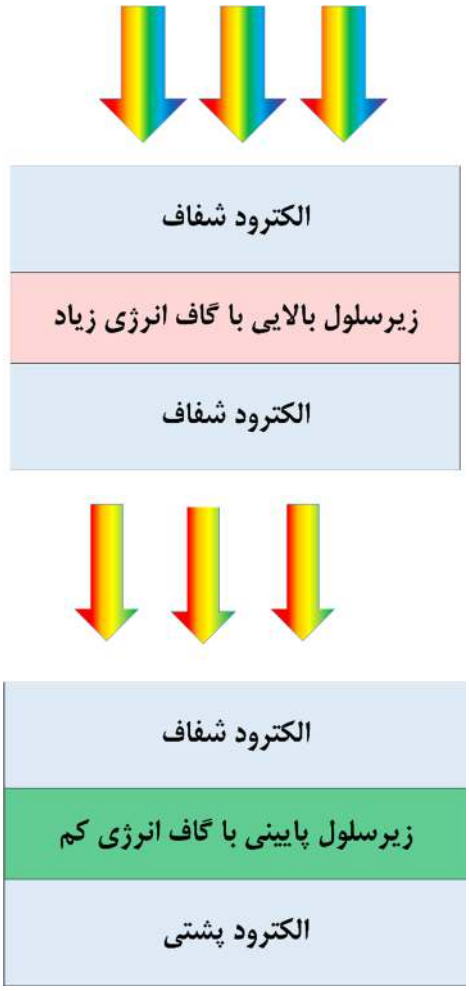
$$\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx}=G_{op}(x)-R(x) \quad (۲)$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx}=-G_{op}(x)+R(x) \quad (۳)$$

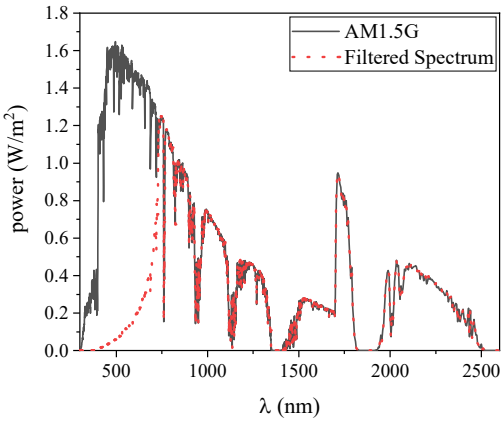
که q و ε بار الکترون و ثابت دی الکتریک، N_D و N_A چگالی حامل‌های دهنده و پذیرنده هستند، Ψ پتانسیل الکترواستاتیک محلی است، p، n، ρ_p، ρ_n، J_p، J_n به‌ترتیب غلظت حفره، غلظت الکترون، الکترون‌ها به دام افتاده، حفره‌های به دام افتاده، چگالی جریان حفره‌ها و الکترون‌ها هستند. G_{op} و R آهنگ تولید و بازترکیب حامل‌های بار هستند. برای همه شبیه‌سازی‌ها طیف خورشیدی استاندارد جهانی جرم هوای ۱٫۵ مورد استفاده قرار گرفته است و دما روی ۳۰۰ کلوین تنظیم شد.

ساختار زیرسلول بالایی به‌صورت SnO_2:F/ETL (CdS)/ absorber (Sb_2S_3)/ HTL (SpiroOMeTAD)/ Au است. که در آن Sb_2Se3 لایه جاذب است و از کادمیوم سولفید (CdS) به‌عنوان لایهٔ انتقال دهنده الکترون (ETL[1]) و از SpiroOMeTAD به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره (HTL[2]) استفاده شده است. همچنین طلا و SnO_2:F (FTO) اتصال‌های پشتی و جلویی سلول هستند. این ساختار در شکل۱الف نشان داده شده است. ساختارهای مورد استفاده برای زیرسلول پایینی در شکل‌های۱ب تا ث نشان داده شده‌اند. ساختار شکل۱ ب همانند ساختار زیرسلول بالایی است و تنها تفاوت در این است که Sb_2Se_3 به جای Sb_2S_3 نقش لایه جاذب را دارد. در ساختارهای شکل۱ پ تا ث ZnO و CdS به‌ترتیب به نقش اکسید رسانای شفاف و لایه بافر را دارند و لایه‌های (CIS) $CuInSe_2$،

[1] Electron Transport Layer



شکل۲. طرح سلول خورشیدی پشت سر هم با دو زیرسلول فرعی.



شکل۳. طیف استاندارد AM 1.5 G و طیف فیلتر شده توسط زیرسلول Sb_2S_3

[2] Hole Transport Layer

$CuZnSnSe_4$ **(CZTSe)** و GeTe به‌عنوان لایه جاذب عمل می‌کنند. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی برای سلول‌های Sb_2S_3 و Sb_2Se_3 در جدول۱ و برای لایه‌های جاذب سلول‌های پایینی در جدول۲ آورده شده‌اند.

شبیه‌سازی سلول‌های پشت سر هم با اتصال زیرسلول‌های فرعی با استفاده از روش تطابق جریان انجام شده است. برای این منظور ابتدا زیر سلول بالایی تحت تابش طیف استاندارد AM1.5G قرار می‌گیرد. سپس طیف فیلتر شده توسط زیرسلول بالایی بر زیرسلول پایینی می‌تابد [۱۲]. همان‌طور که قبلاً گفته شد تطابق جریان در زیرسلول بالا و پایین در سلول‌های پشت سرهم از اهمیت زیادی برخوردار است. برای رسیدن به نقطهٔ تطابق جریان ضخامت لایه‌های زیرسلول پایینی ثابت نگه داشته شد و ضخامت لایهٔ جاذب سلول بالایی تغییرداده شد تا چگالی جریان در هر دو زیر سلول یکسان شود. در نقطهٔ تطابق جریان عملکرد سلول بالایی تحت تابش طیف استاندارد AM 1.5G و عملکرد زیرسلول پایینی تحت تابش طیف فیلتر شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس منحنی مشخصهٔ جریان–ولتاژ سلول پشت سر هم از مجموع منحنی‌های مشخصه دو زیرسلول فرعی حاصل می‌شود. طیف فیلتر شده عبوری از زیرسلول بالایی از معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$T(\lambda)=T_0(\lambda)\exp\left[\sum_{k=1}^{n}-\left(\alpha_k(\lambda)t_k\right)\right] \qquad ۴$$

$T_0(\lambda)$، k، n و t به‌ترتیب نشان دهندهٔ طیف استاندارد جهانی AM1.5G، شماره لایه، تعداد کل لایه‌های سلول فرعی بالایی و ضخامت هر لایه هستند. همچنین $\alpha(\lambda)$ ضریب جذب هر ماده است و با رابطهٔ زیر داده می‌شود:

$$\alpha(E)=A_\alpha\sqrt{h\nu-E_g} \qquad ۵$$

که در آن A_α، E_g، h و ν به‌ترتیب پیش فاکتور، شکاف انرژی ماده (eV)، ثابت پلانک (eV.sec) و فرکانس طیف (Hz) هستند.

طرحی از سلول پشت سر هم که در آن زیرسلول بالایی تحت تابش طیف استاندارد AM1.5G و زیرسلول پایینی تحت تابش طیف فیلتر شده قرار گرفته‌اند، در شکل۲ نشان داده شده است. لایهٔ جاذب هر سلول فرعی فوتون‌هایی را که انرژی بالاتر از گاف انرژی‌شان هست جذب می‌کنند. شکل۳ طیف استاندارد AM1.5 G و طیف فیلتر شده توسط زیرسلول Sb_2S_3 را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود بیشتر طیف AM1.5 (تا حدود ۷۳۰ نانومتر) توسط زیرسلول بالایی جذب می‌شود و بقیه طیف به زیرسلول پایینی منتقل می‌شود.

نتایج و بحث

برای شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی پشت سر هم Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ روش شرح داده شده در قسمت قبل برای دستیابی به نقطهٔ تطابق جریان به‌کار گرفته شد. در هر مورد، چگالی جریان هر دو سلول فرعی با تغییر ضخامت لایهٔ جاذب زیرسلول بالایی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل۴ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نقطهٔ تطابق برای سلول‌های خورشیدی پشت سر هم Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ به‌ترتیب در ضخامت Sb_2S_3 برابر با ۲۲۹ nm، ۳۹۷ nm، ۵۴۱ nm و ۶۵۳ nm اتفاق می‌افتد.

در نقطهٔ تطابق جریان، منحنی‌های مشخصهٔ جریان–ولتاژ زیرسلول بالایی Sb_2S_3 تحت تابش طیف استاندارد AM1.5G و زیرسلول پایینی، تحت تابش طیف فیلتر شده و همچنین منحنی مشخصهٔ سلول پشت

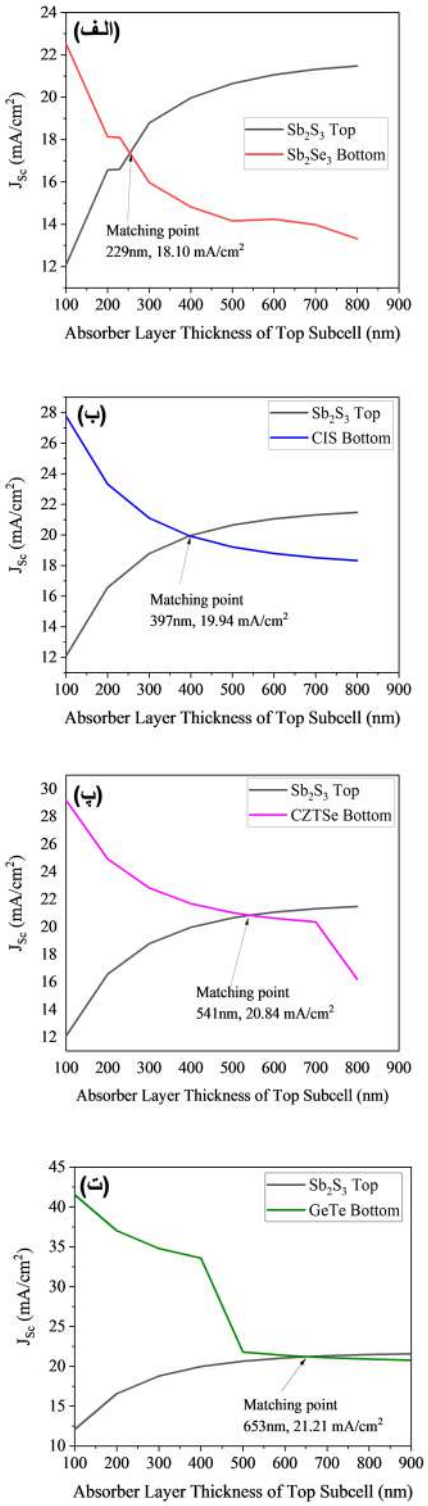
سر هم در شکل۵ نمایش داده شده‌اند. در جدول۱و۲، Eg گاف انرژی، χ الکترون‌خواهی، εr ضریب دی‌الکتریک، Nc و Nv چگالی حالات مؤثر نوارهای رسانش و ظرفیت، v_{th}^{e} و v_{th}^{p} سرعت گرمایی الکترون و حفره‌ها و μ_e وμ_p تحرک‌پذیری الکترون و حفره‌ها هستند.

جدول۱. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی سلول‌های Sb_2S_3 و Sb_2Se_3 [۲۲-۲۴].

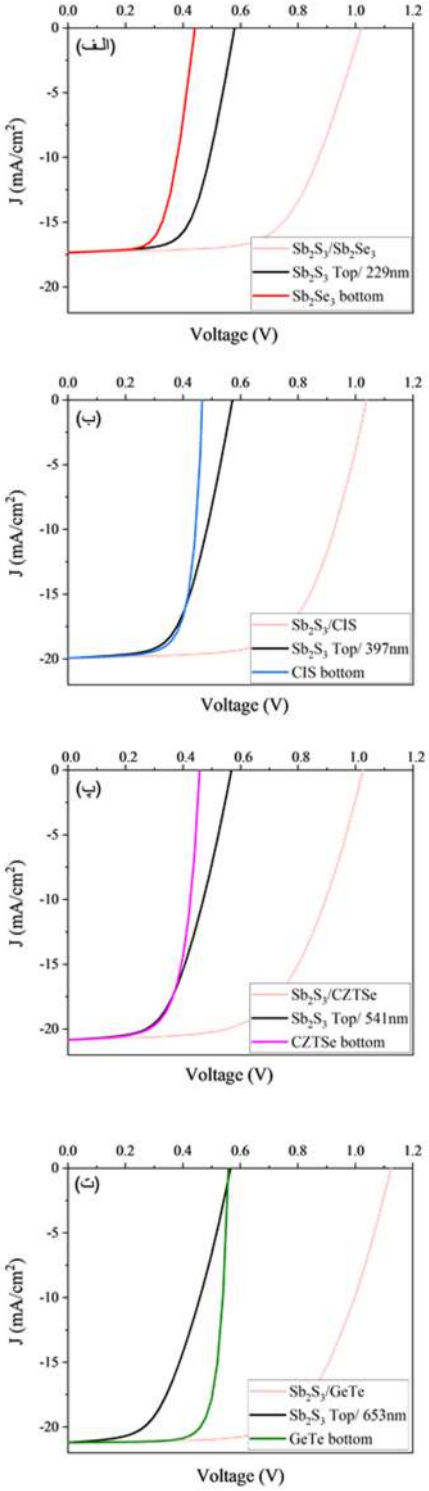
Parameter	Sb_2S_3/Sb_2Se_3	HTL	ETL	FTO
E_g(eV)	۱٫۷و ۱٫۲	۳٫۰	۲٫۴	۳٫۵
χ (eV)	۳٫۷۰ و ۴٫۰۴	۲٫۰	۴٫۵	۴٫۰
ε_r	۵ و ۱۸	۳٫۰	۱۰٫۰	۹٫۰
N_c (cm^{-3})	۲٫۲×۱۰^{۱۸}	۲٫۵×۱۰^{۱۸}	۲٫۲×۱۰^{۱۸}	۲٫۲×۱۰^{۱۸}
N_v (cm^{-3})	۱٫۸×۱۰^{۲۰}	۱٫۸×۱۰^{۱۹}	۱٫۸×۱۰^{۱۹}	۱٫۸×۱۰^{۱۹}
v_{th}^{e} [cm/s]	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}
v_{th}^{p}[cm/s]	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}
μ_e [cm^2/Vs]	۰٫۸ و ۱۵	۱٫۰×۱۰$^{-۴}$	۱۰۰	۲۰
μ_p[cm^2/Vs]	۰/۲و ۵٫۱	۲٫۰×۱۰$^{-۴}$	۲۵	۱۰

جدول۲. پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی سلول‌های CIS، CZTSe و GeTe

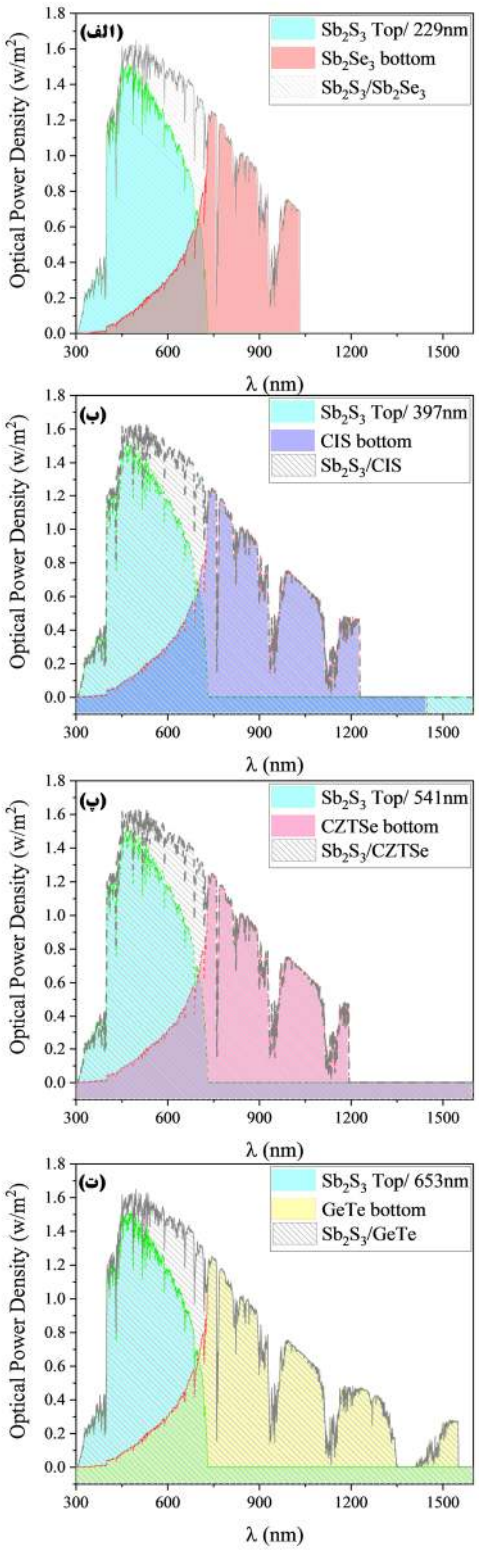
Parameter	[25]GeTe	CIS [26]	CZTSSe [27, 28]	[26]ZnO
E_g(eV)	۰٫۸	۱٫۰۱	۱٫۰۴	۳٫۵
χ (eV)	۴٫۸	۴٫۳۴	۴٫۴۷	۴٫۰
ε_r	۳۶	۱۳٫۶	۱۰٫۳۶	۹٫۰
N_c (cm^{-3})	۱٫۰×۱۰^{۱۶}	۲٫۲×۱۰^{۱۸}	۲٫۲×۱۰^{۱۸}	۲٫۲×۱۰^{۱۸}
N_v (cm^{-3})	۱٫۰×۱۰^{۱۷}	۱٫۸×۱۰^{۱۹}	۱٫۸×۱۰۱۹	۱٫۸×۱۰^{۱۹}
v_{th}^{e} [cm/s]	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}
v_{th}^{p}[cm/s]	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}	۱×۱۰^{۷}
μ_e [cm^2/Vs]	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰
μ_p[cm^2/Vs]	۲۰	۲۵	۲۵	۱۰



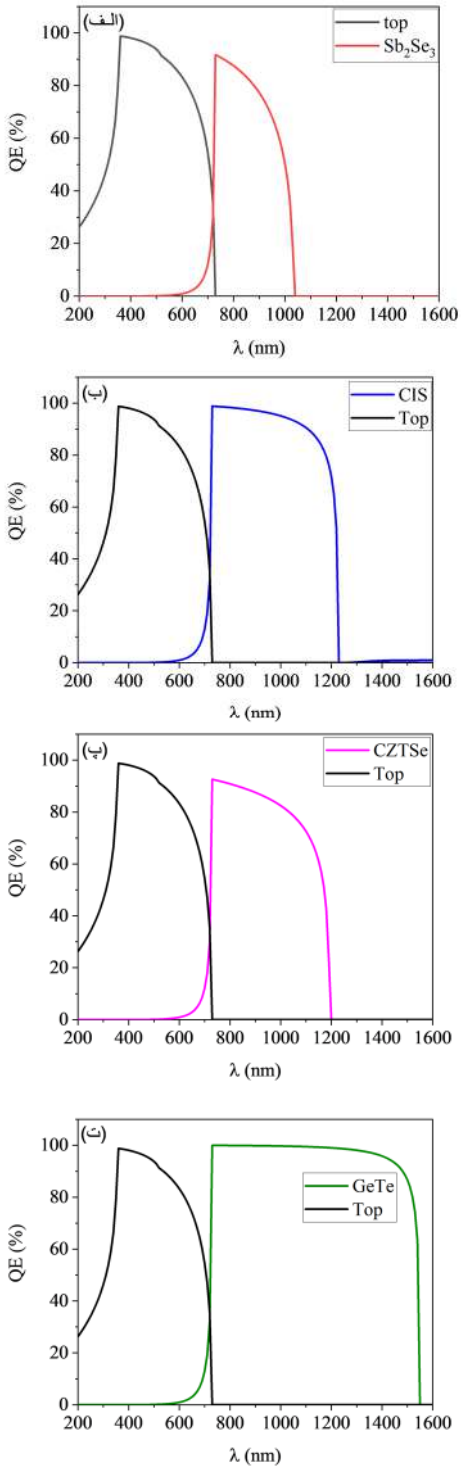
شکل۴. چگالی جریان مدار کوتاه زیرسلول‌ها برحسب ضخامت لایهٔ جاذب زیرسلول بالایی برای ساختارهای پشت سر هم الف) Sb_2S_3/Sb_2Se_3 ب) Sb_2S_3/CIS پ) $Sb_2S_3/CZTSe$ و ت) $Sb_2S_3/GeTe$.



شکل۵. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ زیرسلول‌ها و سلول نهایی برای ساختارهای پشت سر هم الف) Sb_2S_3/Sb_2Se_3 ب) Sb_2S_3/CIS پ) $Sb_2S_3/CZTSe$ و ت) $Sb_2S_3/GeTe$.



شکل۶. طیف جذب شده توسط هر یک از زیر سلول‌ها وسلول نهایی برای ساختارهای پشت سر هم الف) Sb_2S_3/Sb_2Se_3 ب) Sb_2S_3/CIS پ) Sb_2S_3/CZTSe و ت) Sb_2S_3/GeTe.



شکل۷. بازدهی کوآنتومی خارجی زیرسلول‌ها برای ساختارهای پشت سر هم الف) Sb_2S_3/Sb_2Se_3 ب) Sb_2S_3/CIS پ) Sb_2S_3/CZTSe و ت) Sb_2S_3/GeTe.

جدول۳ پارامترهای فوتوولتاییک وابسته را برای سلول‌های خورشیدی پشت سر هم مختلف نشان می‌دهد. در این جدول ولتاژ مدار باز[1] (V_{OC}) برحسب ولت، جریان مدار کوتاه[2] (J_{SC}) برحسب mA/cm^2، فاکتور پرشدگی[3] (FF) و بازدهی[4] (η) برحسب درصد هستند. مقادیر جریان مدار کوتاه برای ساختارهای Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ به‌ترتیب برابر با ۱۸٫۱۰، ۱۹٫۹۴، ۲۰٫۸۴ و ۲۱٫۲۱ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع به‌دست آمدند. کمترین جریان هنگامی به‌دست می‌آید که از Sb_2Se_3 به‌عنوان زیرسلول پایینی استفاده شود و بیشترین جریان نیز برای $Sb_2S_3/GeTe$ حاصل می‌شود. این موضوع به‌این دلیل است که در بین زیرسلول‌های پایینی Sb_2Se_3 بیشترین گاف انرژی (۱٫۲ eV) و GeTe کمترین گاف انرژی (۰٫۸ eV) را دارند و هر سلول فوتون‌های با انرژی بیشتر از گاف لایهٔ جاذب خودش را جذب می‌کند. هر چه اختلاف گاف انرژی سلول‌های فرعی بیشتر باشد، فوتون‌های بیشتری جمع‌آوری می‌شوند. با کاهش گاف زیرسلول پایینی، طول موج‌های بلندتری از طیف که قبلاً جذب نمی‌شدند، جذب می‌شوند و این منجر به تولید فوتوالکترون‌های بیشتری در داخل سلول می‌شود. این مطلب توسط شکل‌های۶ و ۷ تأیید می‌شود که نشان می‌دهند کمترین مقدار جذب طیف ورودی در ساختار Sb_2S_3/Sb_2Se_3 و بیشترین مقدار جذب در ساختار $Sb_2S_3/GeTe$ اتفاق می‌افتد. با کاهش گاف انرژی در زیرسلول پایینی تعداد فوتون بیشتری جذب می‌شود و بنابراین جریان آن زیاد می‌شود؛ برای آن که تطابق جریان در دو سلول برقرار شود، ضخامت لایهٔ جاذب بالایی باید افزایش یابد تا تعداد فوتون بیشتری هم در سلول بالایی جذب شده و جریان آن هم افزایش یابد. نکتهٔ قابل توجه دیگر این است که ضریب پر شدن (FF) سلول بالایی با افزایش ضخامت آن کاهش می‌یابد، به‌طوری که برای ساختار Sb_2S_3/Sb_2Se_3 مقدار ضخامت برابر ۲۲۹ نانومترو مقدار FF برابر ٪۶۴٫۱۰، برای Sb_2S_3/CIS مقدار ضخامت برابر ۳۹۷ نانومتر و مقدار FF برابر ٪۵۸٫۱۷، برای $Sb_2S_3/CZTSe$ مقدار ضخامت ۵۴۱ نانومتر و مقدار FF برابر ٪۵۳٫۷۲ و برای $Sb_2S_3/GeTe$ مقدار ضخامت ۶۵۳ نانومتر و مقدار FF برابر ٪۵۰٫۰۱ است. دلیل این موضوع این است که با افزایش ضخامت، مقاومت سری کلی دستگاه افزایش می‌یابد [۲۹].

نتایج جدول۳ نشان می‌دهد که سلول‌های پشت سرهم Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ به‌ترتیب بازدهی ٪۲۲٫۱۰، ٪۳۰٫۹۵، ٪۴٫۸۳ و ٪۳۶٫۸۰ دارند. بهترین عملکرد مربوط به ساختار $Sb_2S_3/GeTe$ است و این عمدتاً به‌دلیل اختلاف گاف انرژی بیشتری است که بین زیرسلول‌های فرعی این ساختار در مقایسه با ساختارهای دیگر وجود دارد. ولتاژ مدار باز، جریان مدار کوتاه و ضریب پرشدگی این ساختار نیز به‌ترتیب برابر ۱٫۱۲ V، ۲۱٫۲۱ mA/cm^2 و ٪۶۲٫۹۰ هستند.

[1] Open-Circuit Voltage
[2] Short-Circuit Current
[3] Fill Factor
[4] Efficiency

جدول۳. پارامترهای فوتوولتاییک سلول نهایی برای ساختارهای پشت سر هم Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$

ساختار	Sb_2S_3 / Sb_2Se_3	Sb_2S_3 /CIS	Sb_2S_3 / CZTSe	Sb_2S_3 /GeTe
V_{OC}بالایی	۰٫۵۸	۰٫۵۷	۰٫۵۷	۰٫۵۷
J_{SC}بالایی	۱۶٫۶۰	۱۹٫۹۴	۲۰٫۸۴	۲۱٫۲۱
FF بالایی	۶۴٫۱۰	۵۸٫۱۷	۵۳٫۷۲	۵۰٫۰۱
η بالایی	۱۲٫۲۰	۱۵٫۳۰	۱۲٫۳۸	۱۴٫۷۳
V_{OC}پایینی	۰٫۴۴	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۵۶
J_{SC}پایینی	۱۸٫۱۰	۱۹٫۹۴	۲۰٫۸۴	۲۱٫۲۱
FF پایینی	۶۴٫۱۰	۷۳٫۰۶	۶۷٫۱۳	۷۸٫۳۰
η پایینی	۱۰٫۲۰	۱۵٫۷۳	۱۲٫۴۷	۲۲٫۷۵
V_{OC}کل	۱٫۰۲	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۱۲
J_{SC} کل	۱۸٫۱۰	۱۹٫۹۴	۲۰٫۸۴	۲۱٫۲۱
FF کل	۶۰٫۳۰	۶۴٫۷۵	۵۹٫۶۵	۶۲٫۹۰
η کل	۲۲٫۱۰	۳۰٫۹۵	۲۴٫۸۳	۳۶٫۸۰

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سلول‌های پشت سرهم Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ به‌ترتیب با بازدهی ٪۲۲٫۱۰، ٪۳۰٫۹۵، ٪۴٫۸۳ و ٪۳۶٫۸۰ شبیه‌سازی شدند. در این ساختارها سلول فرعی بالایی از Sb_2S_3 با گاف انرژی بالا تشکیل شده و سلول فرعی پایین از Sb_2Se_3، CIS، CZTSe و GeTe که گاف انرژی کوچکتری دارند، ساخته شده است. طیف فیلتر شده و روش تطابق جریان برای شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی پشت سرهم استفاده شد. در ساختارهای Sb_2S_3/Sb_2Se_3، Sb_2S_3/CIS، $Sb_2S_3/CZTSe$ و $Sb_2S_3/GeTe$ تطابق جریان هنگامی صورت گرفت که ضخامت لایه جاذب سلول فرعی بالایی در این ساختارها به‌ترتیب برابر ۲۲۹، ۳۹۷، ۵۴۱ و ۶۵۳ نانومتر انتخاب شد. در نقطهٔ تطابق جریان عملکرد فوتوولتاییک سلول‌ها بررسی شد. بهترین عملکرد برای ساختار $Sb_2S_3/GeTe$ به‌دست آمد که منجر به بازدهی ٪۳۶٫۸۰، ولتاژ مدار باز ۱٫۱۲ V، جریان مدار کوتاه mA/cm^2 ۲۱٫۲۱ و ضریب پرشدگی ٪۶۲٫۹۰ شد.

مرجع‌ها

[1] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%, Nature Energy 2 (2017) 1-8. https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.32

[2] A. Richter, M. Hermle, S.W. Glunz, Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells, IEEE Journal of Photovoltaics 3 (2013) 1184-1191. https://doi.org/10.0.4.85/JPHOTOV.2013.2270351

[3] T.K. Todorov, D.M. Bishop, Y.S. Lee, Materials perspectives for next-generation low-cost tandem solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells 180 (2018) 350-357. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.07.033

[4] S .Sharma, K.K. Jain, A. Sharma, Solar cells: in research and applications—a review, Materials Sciences and Applications 6 (2015) 1145. https://doi.org/10.4236/msa.2015.612113

[5] J. Dhilipan, N. Vijayalakshmi, D.B. Shanmugam, R. Jai Ganesh, S. Kodeeswaran, S. Muralidharan, Performance and efficiency of different types of solar cell material–A review, Materials Today: Proceedings 66 (2022) 1295-1302 https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.132

[6] W. Shockley, H.J. Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics 32 (2004) 510-519. https://doi.org/10.1063/1.1736034

[7] National Renewable Energy Laboratory Best Research-Cell Efficiency, (2022). Available from: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[8] M. Mousa, F.Z. Amer, R.I. Mubarak, A. Saeed, Simulation of Optimized High-Current Tandem Solar-Cells With Efficiency Beyond 41%, IEEE Access 9 (2021) 49724-49737. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069281

[9] M.A. Green, Commercial progress and challenges for photovoltaics, Nature Energy 1 (2016) 15015. https://doi.org/10.1038/nenergy.2015.15

[10] S.M. Iftiquar, J. Jung, J. Yi, Improved efficiency of perovskite-silicon tandem solar cell near the matched optical absorption between the subcells, Journal of Physics D: Applied Physics 50 (2017) 405501. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8655

[11] Y. Cheng, L. Ding, Perovskite/Si tandem solar cells: Fundamentals, advances, challenges, and novel applications, SusMat 1 2021 324-344. https://doi.org/10.1002/sus2.25

[12] N. Shrivastav, J. Madan, R. Pandey, A.E. Shalan, Investigations aimed at producing 33% efficient perovskite–silicon tandem solar cells through device simulations, RSC Advances 11 (2021) 37366-3737. https://doi.org/10.1039/D1RA06250F

[13] A.D. Vos, Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells, Journal of Physics D: Applied Physics 13 (1980) 839. https://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/13/5/018

[14] J.F. Geisz, R.M. France, K.L. Schulte, M.A. Steiner, A.G. Norman, H.L. Guthrey, M.R. Young, T. Song, T. Moriarty, Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration, Nature Energy 5 (2020) 326-335. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5

[15] I. Tobías, A. Luque, Ideal efficiency of monolithic, series-connected multijunction solar cells, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 10 (2002) 323-329. https://doi.org/10.1002/pip.427

[16] S. Mathew, A. Yella, P .Gao, R. Humphry-Baker, B.F.E. Curchod, N. Ashari-Astani, I. Tavernelli, U. Rothlisberger, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers, Nature Chemistry 6 (2014) 242-247. https://doi.org/10.1038/nchem.1861

[17] L. Dou, J. You, Z. Hong, Z. Xu, G. Li, R.A. Street, Y. Yang, 25th Anniversary Article: A Decade of Organic/Polymeric Photovoltaic Research, Advanced Materials 25 (2013) 6642-6671. https//:doi.org/10.1002/adma.201302563

[18] A. Chirilă, P. Reinhard, F. Pianezzi, P. Bloesch, A.R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, D. Keller, C. Gretener, H. Hagendorfer, D. Jaeger, R. Erni, S. Nishiwaki, S. Buecheler, A.N. Tiwari, Potassium-induced surface modification of $Cu(In,Ga)Se_2$ thin films for high-efficiency solar cells, Nature Materials 12 (2013) 1107-1111. https://doi.org/10.1038/nmat3789

[19] M. Graetzel, R.A.J. Janssen, D.B. Mitzi, E.H. Sargent, Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics, Nature 488 (2012) 304-312. https://doi.org/10.1038/nature11476

[20] U.A. Shah, S. Chen, G.M.G. Khalaf, Z. Jin, H. Song, Wide Bandgap Sb_2S_3 Solar Cells, Advanced Functional Materials 31 (2021) 2100265. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.202100265

[21] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid Films 361 (2000) 527-532. https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00825-1

[22] M. Saadat, O. Amiri, Fine adjusting of charge carriers transport in absorber/HTL interface in $Sb_2(S,Se)_3$ solar cells, Solar Energy 243 (2022) 163-173. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.047

[23] Z. Dahmardeh, M. Saadat, Exploring the potential of standalone and tandem solar cells with Sb_2S_3 and Sb_2Se_3 absorbers: a simulation study, Scientific Reports 13 (2023) 22632. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49269-w

[24] Z. Dahmardeh, M. Saadat, O. Amiri, Enhancing photovoltaic performance of antimony sulfide-selenide tandem solar cells through selenium content variation: Modeling and simulation analysis, Solar Energy 262 (2023) 111788. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.06.006

[25] M.M. Salah, A. Zekry, M. Abouelatta, A. Shaker, M. Mousa, F.Z. Amer, R.I. Mubarak, A. Saeed, High-Efficiency Electron Transport Layer-Free Perovskite/GeTe Tandem Solar Cell: Numerical Simulation, Crystals 12 (2022) 878. https://doi.org/10.3390/cryst12070878

[26] M. Saadat, O. Amiri, A. Rahdar, Optimization of (Zn,Sn)O buffer layer in $Cu(In,Ga)Se_2$ based solar cells, Solar Energy 189 (2019) 464-470. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.093

[27] M. Haghighi, M. Minbashi, N. Taghavinia, D.-H. Kim, S.M. Mahdavi, A.A. Kordbacheh, A modeling study on utilizing SnS_2 as the buffer layer of CZT(S, Se) solar cells, Solar Energy 167 (2018) 165-171. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.010

[28] M. Minbashi, M.K. Omrani, N. Memarian, D.-H. Kim, Comparison of theoretical and experimental results for band-gap-graded CZTSSe solar cell, Current Applied Physics 17 (2017) 1238-1243. https://doi.org/10.1016/j.cap.2017.06.003

[29] N. Singh, A. Agarwal, M. Agarwal, Numerical simulation of highly efficient lead-free all-perovskite tandem solar cell, Solar Energy 208 (2020) 399-410. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.003