بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

طراحی، مشخصه یابی و بهینه سازی ضخامت لایه پروسکایت یک سلول خورشیدی تاندم پروسکایت/سیلیکونی ($MAPbI_3$/Si)

علیرضا غلامی میلانی[۱]، سهراب احمدی کندجانی[۱،۲،۳]، بابک علیائی فر[۴]، میر حجت کرمانی[۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران [۲]پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[۳]قطب فوتونیک، دانشگاه تبریز، تبریز ایران [۴]مرکز پژوهشی نانوتکنولوژی، پژوهشکده علوم مواد و نانوتکنولوژی، دانشگاه بیلکنت، آنکارا، ترکیه

alireza.gholami.physics@gmail.com , s_ahmadi@tabrizu.ac.ir , babak.olyaeefar@unam.bilkent.edu.tr , kermani@tabrizu.ac.ir

چکیده – امروزه ا ستفاده از سلول های خور شیدی تاندم مت شکل از مواد نیمر سانای مختلف بدلیل بازده زیاد و بازده جذبی طیفی بزرگ مورد توجه قرار گرفته ا ست. در این مقاله سلول خور شیدی تاندم دو ترمیناله ای مت شکل از مواد با شکاف باندی بزرگ و کوچک مانند پرو سکایت و سیلیکون را شبیه سازی کردیم که از طریق یک لایه بازترکیب به هم متصل شده اند. برای شبیه سازی سلول تاندم ساختاری ارائه کردیم و سپس با بهینه سازی ضخامت لایه پرو سکایت، بازده ۲۶,۹۹ در صد را برای این تاندم بد ست آوردیم.

کلید واژه- سلول خورشیدی تاندم، سلول خورشیدی پروسکایت، سلول خورشیدی سیلیکونی

Design, Characterization and Optimization of the Thickness of Perovskite layer in Perovskite/Si Tandem Solar Cell

Alireza Gholami-Milani[1], Sohrab Ahmadi-Kandjani[1,2,3], Babak Olyaeefar[4], Mir Hojat Kermani[1]

[1]Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran [2]Research Institute for Applied physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran [3]Center of Excellecnce for photonic, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[4]Nanotechnology Research Center, Institute of Materials Science and Nanotechnology, Bilkent University, 06800 Ankara, Turkey
alireza.gholami.physics@gmail.com , s_ahmadi@tabrizu.ac.ir , babak.olyaeefar@unam.bilkent.edu.tr , kermani@tabrizu.ac.ir

Abstract- Nowadays, the use of tandem solar cells comprised of semiconductor materials has attracted attention due to high efficiency and high spectral absorption region. In this paper we simulated a two-terminal tandem solar cell which are connected together by a recombination layer. For simulation of tandem solar cell, we first present a structure and then by optimization the thickness of the perovskite layer, we obtain 26.99% efficiency for this tandem.

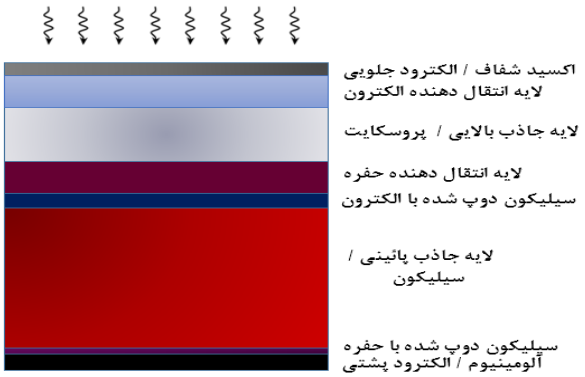
Keywords: Tandem solar cell, Perovskite solar cell, Silicon solar cell.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-21]

مقدمه

سلول های خورشیدی تاندم نسل جدیدی از افزاره های فوتو ولتائیکی هستندکه توانسته اند بر حد شاکلی که برای سلول های خورشیدی تک اتصاله وجود دارد عبور کنند. برای جذب بهینه، مواد جاذب با شکاف باندی بزرگ روی مواد با شکاف باندی کوچک قرار می گیرند. در این مدل، فوتون ها با انرژی بالاتر طیف خورشیدی توسط لایه جاذب با شکاف باندی بزرگ جذب می شوند و قسمت مادون قرمز و طول موج های بزرگ توسط لایه جاذب مورد استفاده در سلول پائینی جذب می شوند.این دو سلول توسط اتصالات تونلی یا الکترود به اشتراک گذاشته شده متصل می شوند که در نتیجه یک اتصال الکتریکی سری ایجاد می شود. سلول های خورشیدی تاندم بسته به نوع اتصال داخلی و روش ساخت به چند دسته تقسیم می شوند. تاندم های دو اتصاله در سال های اخیر بیشتر در کانون توجهات قرار گرفته که از مهمترین دلایل آن استفاده کمتر از اتصالات بین دو سلول خورشیدی و همچنین کمتر بودن اتلافات نوری در اتصالات می باشد. سلول های خورشیدی سیلیکونی به دلیل بازده زیاد و پایداری طولانی مدت به عنوان محبوب ترین افزاره فوتوولتائیکی شناخته می شود ولی با اینکه در دهه های گذشته هزینه این سلول بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافته محققین در تلاش برای یافتن مواد نیمرسانایی هستند که هزینه تولید کمتری داشته باشند. از جمله مواد جاذب نیمرسانایی که هزینه ساخت به مراتب پائین تری دارند می توان به پروسکایت اشاره کرد، این سلول ها از بازده ۳,۸۱ درصد در سال ۲۰۰۹[۱] به بازده ۲۵,۵۲ درصد در سال ۲۰۱۹ رسیده اند[۲] و همین مورد باعث شده است که این مواد مورد توجه گروه های متعددی از سراسر دنیا قرار بگیرند. سلول های خورشیدی تاندم پروسکایت – سیلیکون ۵۸ درصد از کل کار های پژوهشی را به خود اختصاص داده اند که این سلول ها بازده زیادی دارند و می توانند طول موجهایی از مادون قرمز تا قسمت فرابنفش را جذب کنند[۳]. در سال ۲۰۲۰ بازده تاندم دو ترمیناله با بازده ۳۰,۵۲ درصد گزارش شد که تحت نور متمرکز به بازده ۳۴,۶۲ درصد می رسید[۴]. در ساختار تاندم لایه جاذب سلول بالایی از باند گپ بالایی برخوردار خواهد بود تا بیشینه استفاده از تابش خورشیدی را داشته باشیم. پروسکایت ها با باند گپ وسیع (۲,۳ – ۱,۵ الکترون ولت) [۵] می توانند با سیلیکون با باند گپ باریک (۱,۱الکترون ولت)[۶] تشکیل افزاره تاندم را بدهند. در نتیجه با این کار اتلافات گرمایونی حاصل از حاملین داغ به شدت کاهش می یابد و می توانیم به بازده های بالاتر از سلول تک اتصاله بدست آوریم.

ساختار دستگاه و مدل شبیه سازی عددی



شکل ۱- ساختار تاندم پروسکایت - سیلیکون

شکل ۱ ساختار تاندم مورد بررسی در این مقاله را نشان می دهد. شبیه سازی این سلول با استفاده از برنامه شبیه سازی یک بعدی اسکپس[۱] انجام شده است که تونایی حل معادلات پواسون، پیوستگی برای هر دو نوع حامل همچنین تولید و بازترکیب را دارد. نور عبوری از هر لایه از رابطه زیر بدست می آید[۷].

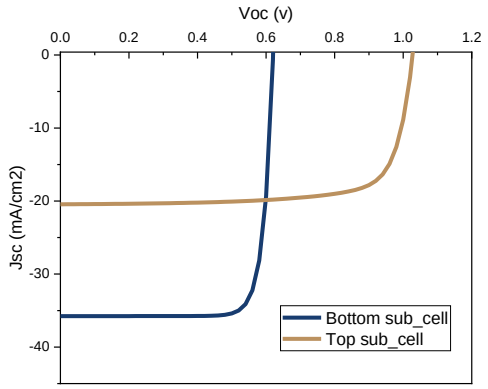
$$S(\lambda) = S_0(\lambda).\ \exp(-\alpha_i(\lambda).d_i) \qquad (۱)$$

در این معادله، $S(\lambda)$ نور عبوری از لایه های سلول خورشیدی و $S_0(\lambda)$ تابش اولیه است. همچنین α_i و d_i به

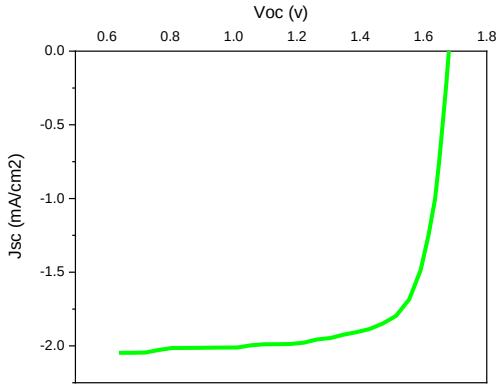
۱-SCAPS (a Solar Cell Capacitance Simulator)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-21]

ترتیب ضریب جذب و ضخامت لایه هایی است که نور از آنها عبور می کند. شبیه سازی این سلول که شامل سلول بالایی، اتصال تونلی و سلول پائینی است با توجه به داده هایی که در جدول ۱ آمده است انجام شده است. در سلول تاندم دو ترمیناله چون سلول ها بصورت سری به هم متصل شده اند جریان سلول پائینی باید با جریان سلول بالایی همخوانی داشته باشد. در ساختار سلول بالایی از TiO_2 و Spiro-OMeTAD به ترتیب به عنوان لایه های انتقال دهنده الکترون و حفره استفاده شده است. ساختار سلول پائینی بصورت n+ Si، p Si، p+ Si/BSF است که در آن لایه n+ Si نقش انتقال دهنده حفره، لایه p Si نقش لایه جاذب را در این ساختار به عهده دارد. بهینه سازی سلول تاندم با متغیر گذاشتن ضخامت و شکاف باندی لایه پروسکایت عملی است. منحنی چگالی جریان-ولتاژ سلول های مورد استفاده در تاندم بصورت جداگانه در شکل ۲ محاسبه شده اند. شکل ۳ منحنی جریان ولتاژ مربوط به سلول تاندم است و چون سلول ها بصورت سری به هم متصل شده اند، ولتاژ مدار باز تاندم جمع دو ولتاژ سلول های مورد استفاده است و چگالی جریان توسط سلول با چگالی جریان کم محدود می شود. برای بهینه سازی سلول تاندم مورد استفاده ضخامت لایه های جاذب دو سلول بالایی و پائینی را متغیر گذاشته و بیشینه بازده را برای این دستگاه بدست می آوریم. شکل ۴ اثر ضخامت لایه پروسکایت را روی سلول تاندم نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، ضخامت بهینه لایه پروسکات برای بهینه شدن سلول تاندم در حدود ۲۰۰ نانومتر است. جذب کم بدلیل ضخامت کم باعث محدود شدن چگالی جریان در ساختار تاندم می شود. در ضخامت های بالا تر از ۲۰۰ نانومتر جذب بیشتر و عبور نور عبوری کم خواهیم داشت بنابراین تعداد فوتون های موجود برای جذب در سلول پائینی سیلیکونی کمتر خواهد شد.



شکل ۲- منحنی چگالی جریان- ولتاژ سلول های بالایی و پائینی مورد استفاده در سلول خورشیدی تاندم



شکل ۳- منحنی چگالی جریان-ولتاژ سلول خورشیدی تاندم

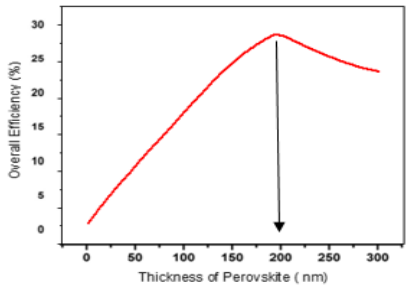
جدول ۱- پارامتر های مربوط به شبیه سازی سلول خورشیدی تاندم

مواد/پارامترها	اکسید شفاف	لایه انتقال دهنده الکترون / تیتانیوم دی اکسید	پروسکایت / بهینه شده	لایه انتقال دهنده / اسپیرو امتد
ضخامت (میکرو	0.500	0.050	0.200	0.350
باندگپ(الکترو ولت)	3.5	3.2	1.55	3
الکترون خواه (الکترون ولت)	4	3.9	3.9	2.45
چگالی حالات مؤ نوار رسانش (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{19}	2.2×10^{18}	1×10^{19}
چگالی حالات مؤ نوار ظرفیت (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{19}	1.8×10^{19}	1×10^{19}
تحرک پذیری الک (cm^2/Vs)	20	20	50	2×10^{-4}
تحرک پذیری ح (cm^2/Vs)	10	10	50	2×10^{-4}
چگالی دهند N_D (cm^{-3})	2×10^{19}	1×10^{16}	1×10^{13}	-
چگالی پذیرند N_A (cm^{-3})	1×10^{15}	-	-	2×10^{18}
ضریب گذردهی دی ال	200	9	30	3

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-21]

ادامه جدول ۱- پارامتر های مربوط به شبیه سازی سلول خورشیدی تاندم

مواد/پارامترها	n+ Si	p Si	p+ Si/BSF
ضخامت (میکرومتر)	0.020	300	20
باندگپ(الکترون ولت)	1.12	1.12	1.12
الکترون خواهی (الکترون ولت)	4.05	4.05	4.05
چگالی حالات مؤثر در نوار رسانش (cm^{-3})	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}
چگالی حالات مؤثر در نوار ظرفیت (cm^{-3})	2.6×10^{19}	2.6×10^{19}	1.4×10^{19}
تحرک پذیری الکترون (cm^2/Vs)	1.041×10^{3}	1.041×10^{3}	1.041×10^{3}
تحرک پذیری حفره (cm^2/Vs)	4.21×10^{2}	4.21×10^{2}	4.21×10^{2}
چگالی دهنده N_D (cm^{-3})	1×10^{20}	-	-
چگالی پذیرنده N_A (cm^{-3})	-	1×10^{16}	1×10
ضریب گذردهی دی الکتریک	11.9	11.9	11.9



شکل ۴: بهینه سازی ضخامت لایه پروسکایت در ساختار سلول خورشیدی تاندم.

جدول ۲- مقایسه ی عملکرد سلول های خورشیدی تک اتصاله و دو اتصاله

سلول خورشیدی / پارامترها	سیلیکون (بدون فیلتر)	پروسکایت (۳۵۰نانومتر)	تاندم پروسکایت/سیلیکون
V_{oc} (v)	۰,۶۲	۱,۰۲	۱,۶۴
J_{sc} (mA/cm^2)	۳۶,۰۰	۲۰,۲۴	۲۰,۷۹
FF (%)	۸۳,۰۴	۷۵,۲۸	۷۸,۱۴
Efficiency	۱۸,۵۷	۱۶,۹۲	۲۶,۹۹

همچنین در جدول ۲، پارامتر های فوتوولتائیک سلول های خورشیدی پروسکایت ۳۵۰ نانومتر و سیلیکون در حالت بدون فیلتر شبیه سازی شده اند. با توجه به اینکه سلول خورشیدی مورد بررسی دوترمیناله سری می باشد و بین دو سلول از لایه بازترکیب استفاده کردیم، جریان دو سلول باید با یکدیگر همخوانی داشته باشند و ولتاژ سلول تاندم جمع دو سلول جمع خواهد شد. با توجه به شبیه سازی انجام شده در جدول ۲، بازده سلول خورشیدی دو ترمیناله دو اتصاله از بازده سلول های خورشیدی تک اتصاله پروسکایت و سیلیکون بیشتر می باشد.

نتیجه‌گیری

همانطور که در بخش قبلی دیدیم، سلول خورشیدی تاندم بازده بیشتری نسبت به سلول های پروسکایتی و سیلیکونی دارد. ما عملکرد افزاره تاندم دو ترمیناله پروسکایت – سیلیکونی را مورد بررسی قرار دادیم. لایه جاذب پروسکایت و سیلیکون به ترتیب در سلولهای بالایی و پائینی نقش مهمی در بازده دستگاه ایفا می کنند که اثر ضخامت لایه پروسکایت به مراتب بیشتر از لایه سیلیکون است.

مرجع‌ها

[1] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. Journal of the American Chemical Society. 2009 May 6;131(17):6050-1.

[2] NREL P. Research Cell Record Efficiency Chart.

[3] Zhang Z, Li Z, Meng L, Lien SY, Gao P. Perovskite-Based tandem solar cells: get the most out of the sun. Advanced Functional Materials. 2020 Sep;30(38):2001904.

[4] Cherif FE, Sammouda H. Strategies for high performance perovskite/c-Si tandem solar cells: Effects of bandgap engineering, solar concentration and device temperature. Optical Materials. 2020 Aug 1;106:109935.

[5] Subedi B, Zuo J, Tumusange MS, Junda MM, Ghimire K, Podraza NJ. Roles of Center Cations. Hybrid Perovskite Solar Cells: Characteristics and Operation. 2021 Oct 18:253-73.

[6] Tang Q, Yao H, Xu B, Ge J. Enhanced energy conversion efficiency of Al-BSF c-Si solar cell by a novel hierarchical structure composed of inverted pyramids with different sizes. Solar Energy. 2020 Sep 15;208:1-9

[7] Kim K, Yoo JS, Ahn SK, Eo YJ, Cho JS, Gwak J, Yun JH. Performance prediction of chalcopyrite-based dual-junction tandem solar cells. Solar Energy. 2017 Oct 1;155:167-77.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-21]