

بررسی سلول های خورشیدی سیلیکونی ناهمگون با بازدهی بالا با استفاده از نرم افزار AMPS-1D

نفیسه معماریان، مهران مین باشی، محمود جلالی مهرآباد

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده - در این مقاله پارامترهای موثر در افزایش بازدهی سلول های خورشیدی سیلیکونی ناهمگون بررسی شده است. با استفاده از نرم افزار شبیه ساز *AMPS-1D*، مدل های مختلفی از سلول های خورشیدی ناهمگون شبیه سازی شده و پارامترهای کارکردی سلول بر حسب تغییرات تابع کار اتصال جلویی و پشتی سلول، مطالعه شده است. همچنین اثر تغییر ضریب بازتاب اتصال پشتی بررسی شده و بازده کوانتومی برای تغییرات تابع کار اتصال جلویی ترسیم شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که با افزایش تابع کار اتصال جلویی، بازدهی افزایش می یابد. در مقابل با افزایش تابع کار اتصال پشتی، بازده کاهش می یابد. بهترین نتایج برای بالاترین میزان ضریب بازتاب در اتصال پشتی بدست می آید. بالاترین بازده سلول ۲۴/۰۷ درصد می باشد.

کلید واژه- سلول خورشیدی ناهمگون، محاسبات عددی، *AMPS-1D*، بهینه سازی تابع کار

An investigation of high performance hetero-junction silicon solar cells by using AMPS-1D

Nafiseh Memarian, Mehran Minbashi, Mahmoud Jalai Mehrabad

Physics department, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract - In this paper the effect of different parameters on the efficiency of heterojunction silicon solar cells have been studied. By using simulation software *AMPS-1D*, various models of heterojunction solar cells have been simulated and cell functional parameters have been studied by changes in the work function of the front and back contacts of the cell. In addition, the effect of reflection coefficient of back contact is investigated and the quantum efficiency of the cell has been plotted with respect to the front contact work function. The results showed that by increasing the front contact work function, efficiency will increase. On the contrary increasing the work function of back contact will cause a decrease in the efficiency. The best result has been achieved for the highest back contact reflection coefficient. The highest calculated efficiency was 24/07%.

Keywords: Heterojunction solar cell; numerical solution; *AMPS-1D*; work function optimization

زیر نوشت [۴]:

$$\frac{d}{dx} \left(-\varepsilon(x) \frac{d\psi}{dx} \right) = q [p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x) + p_t(x) - n_t(x)] \quad (1)$$

در رابطه (۱) ψ پتانسیل الکترواستاتیک، p ، n به ترتیب چگالی الکترونهای آزاد و حفره، p_t ، n_t به ترتیب چگالی الکترون و حفره‌ای به دام افتاده است. N_D^+ ، N_A^- چگالی دهنده‌ها و پذیرنده‌های یونیزه شده است. ε گذردهی دی‌الکتریک نیم‌رسانا و q بار الکترون می‌باشد. خصوصیات حامل‌ها در این ساختار از معادله پیوستگی برای الکترون و حفره بدست آمده اند. معادلات پیوستگی در شرایط پایدار عبارتند از:

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = R_n(x) - G(x) \quad (2)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = G(x) - R_p(x) \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳) J_p و J_n ، چگالی جریان الکترون و حفره هستند. R_p و R_n آهنگ بازترکیب برای الکترون‌ها و حفره‌ها است. $G(x)$ آهنگ تولید است که بصورت تابعی از x بیان می‌شود.

AMPS-1D سه جفت معادلات دیفرانسیلی (۱)، (۲)، و (۳) را با در نظر گرفتن شرایط مرزی به روش نیوتن-رافسون حل می‌کند، پس از آن به محاسبه پتانسیل، سطوح شبه فرمی برای حفره و الکترون، چگالی حامل‌ها، میدان الکتریکی، جریان و پارامترهای کارکردی سلول می‌پردازد.

TCO $\phi = 5/7$ eV
aSi:H(p+)
Thickness= 10nm
a-Si:H/c-Si interface=3nm
cSi(n) 1/5 Ω .cm
Thickness= 100 μ m
aSi:H(n+)
Thickness= 10nm
Ag $\phi = 4/26$ eV

شکل ۱: شماتیک سلول خورشیدی ناهمگون شبیه سازی شده

۳- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی

تابع کار اتصال جلویی و پشتی سلول در بازده سلول خورشیدی نقش مهمی را ایفا می‌کند، علاوه بر آن باید

۱- مقدمه

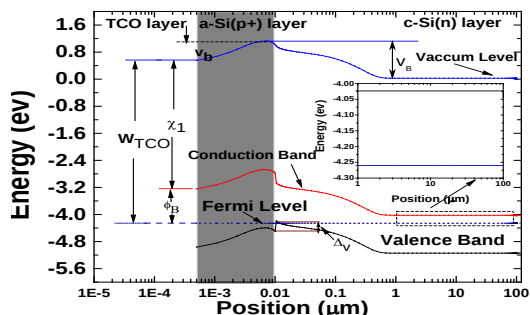
سلول‌های خورشیدی یکی از انواع انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد که در حال حاضر در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بین سیلیکون آمورف هیدروژنه (a-Si:H) و آلیاژهای آن به مواد نیم‌رسانای بسیار مهمی برای ساخت سلول‌های خورشیدی با بازدهی و طول عمر بالا تبدیل شده اند. استفاده از پیوندگاه ناهمگون بین سیلیکون بلوری و آمورف باعث کارآمدتر شدن این نوع سلول‌های سیلیکونی شده است [۱]. با توجه به هزینه بر بودن و سایر شرایط کارهای تجربی، شبیه سازی یک ساختار و بدست آوردن محدوده پارامترهای بهینه برای ساختار مورد نظر، می‌تواند باعث صرفه جویی در انرژی و زمان برای پژوهشگران باشد.

AMPS-1D یک کد شبیه ساز کامپیوتری عمومی، برای طراحی و تحلیل ساختارهای دو پایانه است، که می‌تواند ساختارهایی نظیر اتصالات p-n و اتصالات همگون و ناهمگون p-i-n، p-i-p، n-i-n و سد شاتکی را شبیه سازی کند، که این ساختارها ممکن است پلی کریستالی، آمورف یا لایه‌های تک کریستالی و یا ترکیبی از آن‌ها باشند [۲ و ۳].

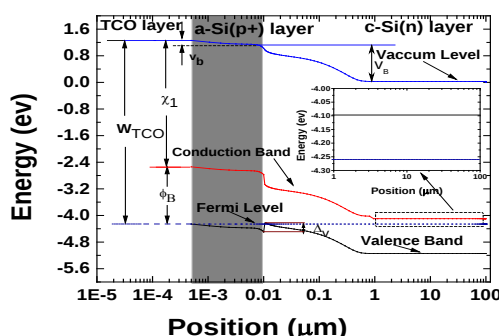
۲- مدل سازی

شکل ۱ شماتیکی از سلول خورشیدی ناهمگون شبیه سازی شده را نشان می‌دهد، که در آن از سیلیکون بلوری به عنوان زیرلایه استفاده شده است و همچنین از لایه‌های اکسید رسانای شفاف (TCO) در هر دو طرف سلول به منظور دستیابی به مقاومت پایین استفاده شده است. در این ساختار، اتصال پشتی بطور کامل و قسمتی از اتصال جلویی توسط نقره (Ag) آبکاری شده است. از آن‌جا که AMPS-1D نمی‌تواند اثر باز ترکیب حامل‌ها را در فصل مشترک بررسی نماید، در این مقاله یک لایه بسیار نازک با چگالی حالات بالا که نشان دهنده فصل مشترک میان سیلیکون آمورف و سیلیکون بلوری می‌باشد، جهت در نظر گرفتن اثرات فصل مشترک تعریف شده است.

سه معادله اصلی که با حل همزمان آنها می‌توان کارکرد سلول خورشیدی را بررسی کرد عبارتند از: معادله پواسون، معادله پیوستگی برای الکترون‌ها و معادله پیوستگی برای حفره‌ها به طور کلی معادله‌ی پواسون را می‌توان به شکل



شکل ۳: ساختار نوار انرژی درون سلول برای پایین ترین تابع کار اتصال جلویی $W_{TCO} = 4/7 \text{ eV}$



شکل ۴: ساختار نوار انرژی درون سلول برای بالاترین تابع کار اتصال جلویی $W_{TCO} = 5/68 \text{ eV}$

۳-۲- اثر تابع کار اتصال پشتی

در شکل ۵ اثر تابع کار اتصال پشتی سلول خورشیدی ناهمگون بر روی پارامترهای کارکردی سلول نشان داده شده است. ویژگیهای استفاده شده برای پنج ماده مختلف در جدول آمده است.

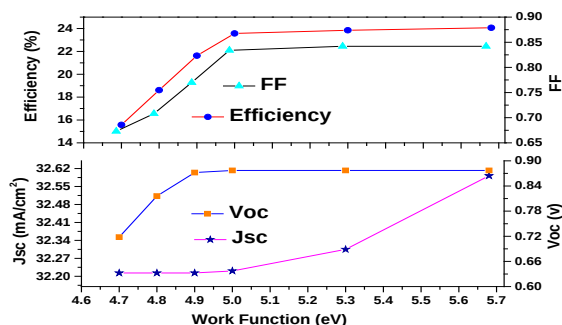
جدول ۱: تابع کار و ضریب بازتاب مواد مختلف به کار رفته در اتصال پشتی سلول

Materials	w (ev)	R
ZnO:B	3/8[6]	0/86[6]
Al	4/06[7]	0/93[7]
Ag	4/26[7]	0/96[7]
Mo	4/36[7]	0/8[7]
Cu	4/53[7]	0/9[7]

ضریب بازتاب را نیز در نظر گرفت. در هنگام شبیه سازی و بررسی اثرات تابع کار اتصال جلویی و پشتی سایر پارامترها ثابت و به ازای بهینه ترین مقادیر جایگذاری شده اند.

۳-۱- اثر تابع کار اتصال جلویی

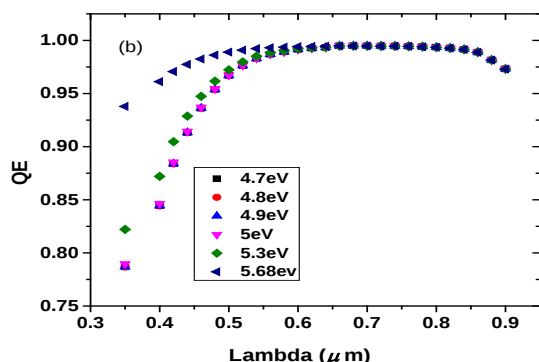
تابع کار TCO از ۴ تا ۶/۱ الکترون ولت تغییر داده شده است [۵]. ضریب بازتاب اتصال جلویی برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود با افزایش تابع کار اتصال جلویی سلول، بازده افزایش می یابد. برای پی بردن به اثر تابع کار بر روی فصل مشترک بین لایه TCO و a-Si:H(p+) (امیتر)، باید ساختار نواری انرژی را بررسی کنیم. باتوجه به شکل ۲ از تابع کار ۵ eV به بعد ولتاژ مدار باز اشباع شده و به مقدار ثابت ۰/۸۷۷ می رسد و ضریب پرشدگی (FF) نیز به مقدار ثابت ۰/۸۴۲ می رسد.



شکل ۲: اثر افزایش تابع کار اتصال جلویی سلول بر پارامترهای کارکردی سلول خورشیدی.

در شکل ۳ ناحیه ی خاکستری مربوط به امیتر که در پتانسیل V_B قرار دارد، نشان داده شده است. زمانی که تابع کار TCO پایین است، تراز فرمی TCO پایین تر از امیتر می باشد. بنابراین نوار ظرفیت و نوار رسانش هر دو در فصل مشترک به سمت بالا خم می شوند، بدین ترتیب سد شاتکی بین TCO/ aSi:H(p+) مانع عبور حفره ها شده و در نتیجه حامل های بار کم شده و بازده سلول کاهش می یابد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است هنگامی که تابع کار TCO بالا باشد تراز فرمی لایه TCO، هم تراز یا بالاتر از لایه امیتر قرار می گیرد، بدین ترتیب حامل ها به لایه ی TCO جریان می یابند و به الکترون رسیده و در نتیجه بازده سلول خورشیدی افزایش می یابد.

خورشیدی بازده کوانتومی افزایش می‌یابد.



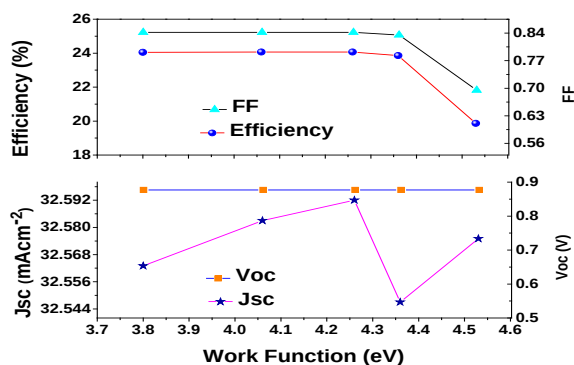
شکل ۷: تاثیر تابع کار اتصال پشتی سلول ناهمگون بر بازده کوانتومی بر حسب طول موج فرودی

۴- نتیجه‌گیری

برای سلول خورشیدی سیلیکونی ناهمگون به ازای ضریب بازتاب ثابت برای اتصال جلویی سلول، با افزایش تابع کار بازده سلول افزایش می‌یابد. برای اتصال پشتی سلول به ازای ضریب بازتاب ثابت با افزایش تابع کار، بازده کاهش می‌یابد. اگر تغییر ضریب بازتاب در نظر گرفته شود، در اتصال جلویی سلول هرچه ضریب بازتاب کم باشد بازده بیشتر و در اتصال پشتی با افزایش ضریب بازتاب، بازدهی افزایش می‌یابد. بالاترین بازده بدست آمده برای این ساختار ۲۴/۰۷ درصد می‌باشد که مقدار قابل قبول و مناسبی است.

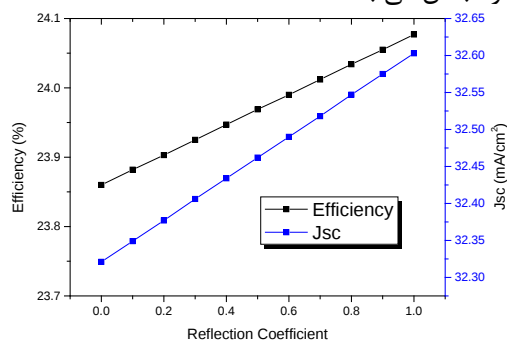
مراجع

- [1] A. BENSMAN, H. TAYOUB, B. ZEBENTOUT and Z. BENAMARA, Investigation of Performance Silicon Heterojunction Solar Cells Using a-Si: H or a-SiC: H at Emitter Layer Through AMPS-1D Simulations, Sensors & Transducers, Vol. 27, pp. 82-86, 2014.
- [2] N. Hernandez-Como, A. Morales-Acevedo, Simulation of hetero-junction silicon solar cells with AMPS-1D, Solar Energy Materials & Solar Cells 94 62-67, 2010.
- [3] S.J. Fonash, A manual for One-Dimensional Device Simulation Program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures (AMPS-1D), (The Center for Nanotechnology Education and Utilization, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802).
- [4] S.M. Sze Physics of semiconductor devices (New York: John Wiley & Sons Press: 1981).
- [5] Chunyan Song², Hong Chen, Yi Fan, Jinsong Luo, Xiaoyang Guo, and Xingyuan Liu High-Work-Function Transparent Conductive Oxides with Multilayer Films, Applied Physics Express 5 (2012) 041102
- [6] P. Prunici, F. U. Hamelmann, W. Beyer, H. Kurz, and H. Stiebig "Modelling of infrared optical constants for polycrystalline low pressure chemical vapour deposition ZnO:B films" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 113, 123104, 2013.
- [7] CRC Handbook of Chemistry and Physics version 2008, p. 12-114



شکل ۸: اثر افزایش تابع کار اتصال پشتی سلول بر چهار فاکتور مهم سلول‌های خورشیدی.

با توجه به شکل ۵، با افزایش تابع کار اتصال پشتی سلول، بازده آن کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با وجود اینکه تابع کار Ag بیشتر از Al و ZnO:B است، ولی باید تاثیر ضریب بازتاب نیز در نظر گرفته شود. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، چون ضریب بازتاب Ag بیشتر است به همین دلیل Ag بیشترین بازده را می‌دهد. همچنین بازده Al بیشتر از ZnO:B است به خاطر ضریب بازتاب آن می‌باشد.



شکل ۹: اثر ضریب بازتاب اتصال پشتی بر روی بازدهی و چگالی جریان در سلول خورشیدی ناهمگون

۳-۳- بررسی اثر تابع کار اتصال جلویی روی بازده کوانتومی

در شکل ۷ بازده کوانتومی بر حسب طول موج نور فرودی به ازای مقادیر مختلف تابع کار اتصال جلویی رسم شده است. I_{ph} جریان فوتونی تولیدی از رابطه‌ی ۴ بدست می‌آید:

$$I_{ph} = q \int \phi(\lambda) \{1 - R(\lambda)\} QE(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

که در اینجا $QE(\lambda)$ بازده کوانتومی سلول خورشیدی است [۴]. از رابطه ۴ جریان تولید فوتونی با بازده کوانتومی متناسب است، بدین معنی که با افزایش بازده سلول