

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



بررسی تاثیر عیب های حجمی و سطح مشترکی بر عملکرد سلول خورشیدی سیلیکونی لایه نازک

معصومه، صمدی<sup>۱</sup>؛ غلامحسین ،حیدری<sup>۲و۳</sup>؛ حامد، بحیرایی <sup>۱</sup> ،

<sup>۱</sup> گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ملایر<sup>۲</sup> گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه

شهرکرد، شهرکرد<sup>۳</sup> پژوهشکده نانوتکنولوژی، دانشگاه شهرکرد

samadi\_masumeh@yahoo.com, hamedbahiraei@gmail.com, moh\\\"@gmail.com

چکیده – سیلیکون در پژوهشها اغلب به صورت ایده آل درنظر گرفته می شوددرحالی که شکل واقعی تر آن دارای نقص هایی می باشد ازجمله در حجم لایه سیلیکون و یا در سطح مشترک با لایه های دیگر که آنها عملکرد سلول را تحت تاثیر قرار می دهند. ما دراین پژوهش ابتدا با روش FDTD قسمت اپتیکی سلول سیلیکون لایه نازک (سلول سیلیکونی نسل جدید با ضخامت ۳ میکرون) را که دارای یک پوشش ضد بازتاب به ضخامت۴۶، ۸۲ و ۱۱۲ نانومتر می باشد شبیه سازی کردیم. در ادامه برای شبیه سازی قسمت الکتریکی سه حالت سلول ایده آل، سیلیکون با نقص حجمی و سیلیکون با هر دو نقص همزمان حجمی و در فصل مشترک با سایر لایه ها را در نظر گرفته شده است. برای این منظور سه شیوه بازترکیب تابشی، بازترکیب اوژه و بازترکیب به کمک عیب ها در نظر گرفته شد. نتایج شبیه سازی الکتر واپتیکی انجام شده نشان داد که عملکرد مربوط به سیلیکون واقعی تر نسبت به سیلیکون ایده آل کاهش چشم گیری دارد به نحویکه حتی در بهترین ضخامت از لایه ضد بازتاب منجر به کاهش حدود % ۵۰ در بازده سلول نسبت

كليد واژه- سلول خورشيدي سيليكوني لايه نازك، شبيه سازي الكترواپتيكي، عيب حجمي، عيب سطحي

# Investigation of The Effect of Bulk and Interface defects on The Performance of Thin layer silicon solar cell

## Samadi, Masoumeh '; Haidari, Gholamhosain<sup>',"</sup>; Hamed Bahirai'

## Shahrekord University, Shahrekord," Nanotechnology Research Institute, Shahrekord

University

samadi\_masumeh@yahoo.com, hamedbahiraei@gmail.com, moh \ \ \ @gmail.com

Abstract - Silicon is often considered ideal in research, while its more realistic form has defects, such as in the volume of the silicon layer or at the interface with other layers that affect cell performance. In this study, we first simulated the optical part of a thin layer silicon cell (new generation silicon cell with a thickness of  $\forall$  microns) which has an anti-reflective coating with a thickness of  $\pm 3$ ,  $\wedge 4$ , and 114 mm by FDTD method. To simulate the electrical part, three states including ideal silicon, silicon with volume defect, and silicon with both simultaneous volumetric defects and at the interface with other layers, have been considered. For this purpose, three methods of radiative recombination, Auger recombination, and recombination by defects were considered. The results of electro-optical simulation showed that the performance of the more real silicon cell than the ideal one is significantly reduced so that even at the best thickness of the anti-reflective layer( $\wedge 4$  nm) leads to a reduction of about  $\bullet \cdot \%$  in cell efficiency compared to the ideal cell.

Keywords: Thin Film Silicon Solar Cell, Bulk defect, Interface defect, Electro-optical Simulation

اوژه مكانيسم اتلافى ذاتى غالب سلولهاى خورشيدى سيليكونى است. کر و همکاران به تأثیر این ترکیب مجدد اوژه تقویت شده توسط کولن بر محدود سازی بازه پرداخته اند [۴]. با استفاده از پارامترسازی کلی میزان ترکیب مجدد ذاتی [۵] حداکثر بازده ۲۹/۰۵ برای سلول های خورشیدی سیلیکونی ایده آل محاسبه شده است. در این تحقیق به بررسی تاثیر عیوب حجمی سیلیکون لایه نازک و عیوب در سطح مشترک سیلیکون با لایه های دیگر پرداخته شده است. درهمین راستا ابتدا نرخ تولید الکترون-حفره در شبیه سازی اپتیکی به روش FDTD همراه با لایه ضدبازتاب نیترید سیلیکون تعیین گردید. برای این لایه سه ضخامت مجزا در نظر گرفته شد. این ضخامت ها به ترتیب ۴۶، ۸۲، ۱۱۲ نانومتر انتخاب شد. این ضخامت ها به گونه ای انتخاب شده که میزان بازتاب کل از سطح سلول به ترتیب در سه طول موج ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ نانومتر کمینه باشد. به عنوان مثال اگر ضخامت لایه بازتاب ۴۶ نانومتر باشد کمترین بازتاب را در طول موج ۴۰۰ نانومتر دارد [۶]. سپس در شبیه سازی الکتریکی بواسطه معادلات حاكم بر انتقال حامل ها براى لايه فعال سیلیکون غیر ایده آل ( با نقصهای حجمی-سطحی در سطح مشترک سیلیکون با لایه های مجاور)، منحنی J-V شبیه سازی و با حالت ایده آل مقایسه شد. برای این شبیه سازی از نرم افزار لومریکال استفاده شد. ساختار سلول شبیه سازی شده در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: طرح کلی سلول سیلیکونی لایه نازک شبیه سازی شده

#### روش وبررسی

روش FDTD معادالت ماکسول وابسته به زمان راباتقریب مرکزی و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، در فضای گسسته حل نموده و میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را در فضای شبیه سازی به دست می آورد[۸] طبق قوانین ترمودینامیک، بازده سلول خورشیدی سیلیکونی تحت نور خورشید ۳۲/۳۳درصد است[۱]

#### مقدمه

در طبیعت مادهای کاملا بلورهای و بی نقص وجود ندارد. همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی برخی مواد به شدت تحت تأثير حضور عيوب مي باشد اين عيوب در اشكال مختلفي ظاهرمی شوند که از جمله آن عیوب سطحی در فصل مشترک لایه ها و عیب حجمی است. عیب های حجمی در ساختارهای آمورف ( بی شکل) می تواند وجود داشته باشد که به دلیل سرد شدن سريع نمى توانند ساختار بلورى منظم تشكيل دهند. سلولهای خورشیدی سیلیکونی از دیرباز به عنوان متداول ترین نوع سلولها مورد مطالعه و تجاری سازی شده قرار گرفته اند. روشهای متعددی برای بهبود بازدهی و کاهش هزینه تمام شده این نوع سلولها بررسی و عملیاتی شده است. استفاده از سیلیکون لایه نازک ( ضخامت حدود ۱۸۰ میکرومتر) تک بلور به جای سیلیکون آمورف، علاوه بر بازدهی بالاتر، هزینه تمام شده کمتری را حاصل می شود. اما پژوهشگران امروزه به سلول های بسیار نازکتر سیلیکونی (ضخامت حدود چند میکرون) با هزینه های بسیار کمتر فکر می کنند . بازده این سلول های نازک سیلیکونی ( نسل جدید) در مقایسه با سلول سیلیکونی متعارف، کمتر می-باشد. ساخت لایه ی جاذب نازکتر، به علت کوچکتر شدن دانه ها و بزرگتر شدن مرزدانه ها، با تلفات بازترکیب و کاهش بازده سلول همراه شده است که با قرار گیری لایه های ضدبازتاب تا حدودی می توان بر مشکل کمبود بازده غلبه کرد. حداکثر بازده تبدیل توان سلولهای خورشیدی سیلیکونی با خواص ذاتی سیلیکون مانند انرژی شکاف باند یا ویژگیهای بازترکیب حامل بار محدود می شود. این محدودیت ذاتی برای تحقیقات فتوولتائیک از اهمیت اساسی برخوردار است. به ویژه اینکه پیشرفت های مستمر در فناوری منجر به نزدیک شدن شرایط عملکرد سلول های خورشیدی به این محدوده اساسی می شود [۱]. شاکلی و کوئیسر بر اساس توازن دقیق چگالی انرژی تابشی و تولید شده با در نظر گرفتن تنها بازترکیب تابشی، بیشینه بازده را برای سلولهای خورشیدی ایده آل تک پیوندی تعیین کردند [۲]. در سیلیکون بلوری فرایندهای بازترکیب غیر تابشی قابل توجهی وجود دارد ، به ویژه بازترکیب اوژه یا جذب حامل آزاد اتلافی. تیدجه وهمکاران [۳] نشان دادند که در واقع بازترکیب

این حد بر اساس فرضیات جذب خورشیدی کامل و بدون تلفات ناشی از ترکیب مجدد حامل بار غیر تابشی است. بهترین سلول خورشیدی سیلیکونی در جهان واقعی تاکنون ، که توسط شرکت کانکا ساخته شده است ، قادر به دستیابی به بازده تبدیل ۲۶/۷ درصد است. تجزیه و تحلیل این سلول با ضخامت ۱۶۵ میکرومتر نشان می دهد که در صورت عدم وجود مکانیسم از دست دادن خارجی ، کارایی محدود کننده چنین سلول ۲۹/۱درصد است بازترکیب تابشی، اوژه و شاکلی-کوییسر بروز میکنند. بازترکیبی بازترکیب تابشی، اوژه و شاکلی-کوییسر بروز میکنند. بازترکیبی و مطحی به سه شکل در حین گسیل یک فوتون اشاره دارد. این فرآیند معکوس جذب فوتون است. چگالی حامل بار اضافی تولید  $\Lambda$  با  $n=n+\Lambda$  های بار فوتون است. چگالی حامل بار اضافی تولید ملک با معکوس جذب موتون است. چگالی حامل بار اضافی تولید ملک بار اضافی را تعیین و  $n=n+\Delta$  مای بار اضافی را ترکیب مجدد حامل های بار

 $\tau = \Delta n R$ 

بازترکیب اوژه و بازترکیب شاکلی-کوییسر فرآیندهای غیر تابشی هستند که بازده سلول فتوولتائیک خورشیدی را به زیر حد تابش ایده آل کاهش می دهند در بازترکیب اوژه انرژی اضافی حاصل از بازترکیب الکترون-حفره به الکترون ها یا حفره هایی منتقل میشود که متعاقباً به جای تولید فوتون (فرایند تابشی) به حالت های انرژی بالاتر درهمان باند برانگیخته میشوند. بازترکیبی اوژه ممکن است شامل باندهای ظرفیت متفاوت و برهمکنش با فونون ها باشد نرخ بازترکیبی اوژه توسط رابطه ۲ بدست میآید.

(1)

 $R_{Aug} = (C_n n + C_p p)(n p - n \cdot p \cdot)$ <sup>(Y)</sup>

که  $C_p \ optimizerow C_p$  ضرایب اوژه هستند. محدودیت شاکلی-کوییسر یا محدودیت تعادلی جزیی به ماکزیمم راندمان نظری یک سلول خورشیدی که از اتصال (P-n) استفاده میکند بر می گردد . این محدودیت بیشینه راندمان تبدیل انرژی خورشیدی را در حدود ۳۳،۷ درصد قرار می دهد با این فرض که یک اتصال p-n با شکاف انرژی V۱/۱eV مانند سیلیکون داریم. یعنی از تمام انرژی نور خورشید که به سلول خورشیدی سیلیکونی می-رسد (حدود ۱۰۰۰ وات بر متر مربع) فقط ۳۳،۷ درصد آن

قابلیت تبدیل به انرژی التریکی را دارد (۳۳۷ وات بر مربع). نرخ تولید جریان دراین حالت:

$$I_{sh} = q(t_s f_\omega Q_s - 2t_c Q_c) \tag{7}$$

است که در آن  ${}^{I}wQ_{s}$  تعداد فوتونهایی است که بالای انرژی شکاف نواری بر روی سلول در واحد سطح قرار می گیرند، و  $t_{s}$ کسری از آنهاست که یک جفت الکترون-حفره ایجاد میکنند. این نرخ تولید به دلیل جریان "اتصال کوتاه" (در واحد سطح)  $t_{sh}$  نامیده میشود. [۷] ما فرض می کنیم که هر فوتون جذب شده در شدت طیف۸۸۸  $\Lambda$ /۱، یک جفت الکترون-حفره منفرد شده در شدت طیف۸۸ ما/۱، یک جفت الکترون- مقره منفرد ایجاد می کند. دراین شرایط برای یک سلول ایده آل سیلیکونی لایه نازک، با ضخامت ۳ میکرومتر بدون در نظر گرفتن عیوب سطحی در فصل مشترک سیلیکون با سایر لایه ها و عیوب حجمی، ۴ پارامتر اساسی سلول خورشیدی شبیه سازی شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول۱:پارامترهای شبیه سازی سلول سیلیکونی ایده آل

Cell	λ(nm)	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm^۲)	FF	դ(%)
سيليكون	۴۰۰	•,097	22,7.0	•,٨٢٩	11,1+£
ايده آل	۶۰۰	۰,09١	۲۳,09۷	۰,۸۲۸	11,077
	٨٠٠	•,077	۲۰,۸۹٥	۰,۸۲۷	9,997

همچنین شکل۱ منحنی J-V سلول ایده آل برای سه ضخامت D لایه ضد بازتاب را نشان می دهد.



شکل ۱: منحنی J-V برای سلول سیلیکونی ایده آل در سه ضخامت مختلف لایه ضد بازتاب

اما مقادیر جدول ۱ برای حالتی که سلول سیلیکونی فقط نقص حجمی سیلیکون لایه نازک و سپس علاوه بر نقص حجمی ، نقص در فصل مشترک لایه سیلیکون با لایه های دیگر در جدول ۲ آورده شده است. جدول ۲: پارامترهای شبیه سازی سلول سیلیکونی واقعی تر ( با نقص حجمی - و همزمان نقص حجمی و سطحی).

Cell	л́(nm)	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm^۲)	FF	դ(%)
	۴۰۰	۰,0۱۰	۱۷,۷۳۹	۰,۸٦٢	۷,۸۰۰
نقص سطحی	۶۰۰	۰,0۱۳	17,770	۰,۹۰۲	۸,۱٥٩
	٨٠٠	• ,0 • £	10,.95	۰,۹۰٤	٦,٨٨٥
	۴۰۰	۰,٤٩٣	10,177	۰,۸۸۷	٦,٦٢٩
نقص	۶۰۰	۰,٤٨٧	۱۷,۷۲۸	• ,٧٧٧	٦,٧٢٣
سطحی-	٨٠٠	۰,٤٩	۱0,٤٠٨	۰,۸۱۱	٦,٢١٥
حجمى					

همچنین نمودار-J این حالتها در شکل۲ و ۳ آورده شده است.



شکل۲: منحنی J-V برای سلول سیلیکونی فقط با نقص حجمی در سه ضخامت مختلف لایه ضد بازتاب



شکل۳: منحنی J-V برای سلول سیلیکونی همزمان با نقص حجمی و سطحی در سه ضخامت مختلف لایه ضد بازتاب

با مقایسه جدول ها و نمودارهای بدست آمده مشاهد شد که در حالت واقعی تر سلول سیلیکونی، پارامترها شبیه سازی نسبت به حالت ایده آل تقریبا کاهش چشم گیری داشته است. اما تاثیر ضخامتهای لایه ضد بازتاب و مهندسی ضخامت آن نیز دیده می شود. در بهترین حالت لایه ضد بازتاب ( ضخامت ۸۲ نانومتر) شود. در بهترین حالت لایه ضد بازتاب ( ضخامت ۲۸ نانومتر) مقادیر FF J<sub>sc</sub> ،Voc و ۹۲ درصدکاهش بواسطه اثر عیب های مختلف را نشان داد.

این تحقیق بررسی تاثیر مهندسی ضخامت لایه ضد بازتاب بر روى عملكرد سلول سيليكوني لايه نازك واقعى تر نسبت به حالت ایده آل را نشان می دهد. این سه ضخامت به گونه ای به دست آمد که بازتاب کل از سطح سلول به ترتیب در طول موج های ۸۰۰٬۶۰۰٬۴۰۰ نانومتر کمینه باشد. در ادامه با استفاده از روش FDTD و شدت طيفي خورشيد ١/٥٨Μ ميزان الكترون حفره ایجاد شده در لایه فعال محاسبه گردید. سیس دینامیک این الکترون-حفره ها با استفاده از در نظر گرفتن عیوب مختلف در حجم و فصل مشترک لایه سیلیکون نازک ( بویژه عیب اوژه) در رسیدن به الکترود های سلول در شبیه سازی الکتیکی بررسی گردید و منحنی J-V و ۴ یارامتر اساسی سلول به دست آمد. مقایسه این پارامترها برای سلول لایه نازک سیلیکونی با در نظر گرفتن عیب حجمی و سطحی ( سلول واقعی تر) ، میزان تاثیر لایه ضد بازتاب در بهبود عملکرد سلول را نشان می دهد. نتایج این بررسی نشان داد که برای سلول با ضخامت ۸۲ نانومتری از لایه ضد بازتاب، بازده به اندازه تقریبی % ۵۰ نسبت به سلول ايدہ آل، کاهش پيدا می کند.

### مرجع ها

- [1] Bhattacharya, S., John, S. Beyond ".'. Conversion Efficiency in Silicon Solar Cells: A Numerical Demonstration. Sci Rep 9, 17 £AY (7.19).
- [Y] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed balance limit of efficiency of pn junction solar cells", J. Appl. Phys., vol. "Y, pp. 01-9, 1971.
- [\*] T. Tiedje, E. Yablonovitch, G. D. Cody, and B. G. Brooks, "Limiting efficiency of silicon solar cells", IEEE Trans. Electron Devices, vol. "1, pp. V11-7, 1946.
- [1] M. J. Kerr, A. Cuevas, and P. Campbell, "Limiting efficiency of crystalline silicon solar cells due to Coulomb-enhanced Auger recombination", Prog. Photovolt: Res. Appl., vol. 11, pp. 97-112, 7117.
- [•] Ibrahim, M. L., and Anvar A. Zakhidov. "An improved model for describing the net carrier recombination rate in semiconductor devices." arXiv preprint arXiv:2108.10172 (Y • Y).

[V] Law, Yann-Meing, and Jean-Christophe Nave. "FDTD Schemes for Maxwell's Equations with Embedded Perfect Electric Conductors Based on the 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

Correction Function Method." *Journal of Scientific* Computing  $AA, \Upsilon$  ( $\Upsilon \cdot \Upsilon$ ).