بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

افزایش بازدهی سلولهای خورشیدی سیلیکونی توسط بلورهای فوتونی یک بعدی

رضا ارکانی، حجت حبیبی و مجید قناعت‌شعار

آزمایشگاه نانو مغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - در این مقاله به بررسی تاثیر بلور فوتونی یک بعدی بر میزان افزایش بازدهی سلول خورشیدی سیلیکونی پرداخته شده است. از آنجایی که بیشترین تمرکز انرژی تابشی خورشید در بازه‌ی طول موجی مریی و فروسرخ قرار دارد، لذا طراحی بلور فوتونی بازتاب دهنده در این بازه صورت گرفته است. نشان داده‌ایم که از این طریق بازدهی سلول خورشیدی تا حد قابل قبولی افزایش یافته است.

کلید واژه- سلول خورشیدی، بلور فوتونی، افزایش جذب نور، افزایش بازدهی سلول خورشیدی.

Efficiency Enhancement of Silicon Solar Cells Using 1D Photonic Crystals

Reza Arkani, Hojjat Habibi and Majid Ghanaatshoar

Laser and plasma research institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the influence of one-dimensional photonic crystal back reflectors on performance improvement of silicon solar cells has been investigated. Solar radiation has much intensity in the visible and infrared regime, thus we have designed the back reflector PCs to operate in the desired wavelength band. Finally, the improvement of efficiency of the solar cell has been achieved.

Keywords: Solar cell, Photonic crystals, Absorption enhancement, Efficiency enhancement of solar cell.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱-مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک از اهمیت بسیاری برخوردار است. در دسترس‌ترین و خالص‌ترین انرژی، تابش خورشیدی است. دستگاه‌های فوتوولتاییک قادر به تبدیل این انرژی به انرژی الکتریکی هستند. عملکرد این دستگاه‌ها بر مبنای نیمه‌رساناهای آلی و معدنی استوار است [۱]. انواع تجاری سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بلورین دارای بازدهی نزدیک به ۲۰٪ هستند [۲].

برای داشتن بازدهی بالا در سلول‌های خورشیدی، علاوه بر توجه به انتخاب درست مواد تشکیل دهنده‌ی ساختار، بایستی طراحی ساختار نیز به گونه‌ای انجام شود که حداکثر جذب نور را در لایه‌ی فعال داشته باشیم [۱,۲]. بدین منظور می‌توان با وارد کردن نانوذرات در لایه‌ی فعال، خواص الکتریکی این لایه را در راستای افزایش جذب، بهبود بخشید [۳]. همچنین می‌توان از متمرکزکننده‌های نوری برای تمرکز نور از ناحیه‌ای بزرگ‌تر از سطح ساختار به داخل ساختار استفاده نمود [۴,۵]. اما تمرکز تابش خورشیدی بر سطح سیستم فوتوولتاییک توسط عدسی یا آینه‌های فلزی، باعث گرم شدن ساختار و در نتیجه کاهش بازدهی آن می‌شود. بدین منظور می‌توان از بلور فوتونی یک بعدی استفاده نمود [۶-۹].

امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای متناوب در بازه‌ی فرکانسی مشخصی قابلیت انتشار را نداشته و بازتاب داده می‌شوند. از این ویژگی می‌توان برای بازتاب امواج نور فرودی در بازه‌ی فرکانسی دلخواه استفاده نمود. در این مقاله با استفاده از یک لایه شیشه ضدبازتاب از جنس کوارتز و ۵ جفت لایه از جنس MgF_2 و AlAs برای تشکیل بلور فوتونی، جذب نور را در لایه‌ی فعال سلول خورشیدی سیلیکونی افزایش می‌دهیم. این افزایش جذب نور به افزایش جریان تولیدی در قطعه کمک می‌کند که این افزایش جریان تولیدی در نهایت به افزایش بازدهی قطعه منجر می‌شود.

۲-مبانی نظری

بلور فوتونی یک بعدی، چندلایه‌هایی هستند که از تکرار لایه‌هایی با ضریب شکست n_j و ضخامت d_j به دست می‌آیند. هنگامی که نور به سطح ساختار برخورد می‌کند، قسمتی از آن بازتابیده و قسمتی نیز عبور می‌کند. این اتفاق برای لایه‌های درونی ساختار نیز رخ می‌دهد. در محاسباتمان، جذب لایه‌ها را نیز در نظر می‌گیریم و بر همین اساس ضریب شکست لایه‌ی jام که دارای ضخامت d_j است را به صورت $\tilde{n}_j=n_j + ik_j$ بیان می‌کنیم. هرچند که برای اکثر مواد دی‌الکتریک، ضریب جذب k_j تنها در بازه‌ای معین دارای اهمیت است.

در بلور فوتونی، ضریب شکست به صورت متناوب تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان ضریب شکست لایه‌های متناوب را به صورت $n_j = n_L < n_H$ و $n_{j+1} = n_H$ در نظر گرفت که H و L به ترتیب نمایانگر ماده‌ی با ضریب شکست بزرگ‌تر و کوچک‌تر هستند. در محاسبات صورت گرفته از یک روش ماتریس انتقال ۲×۲ استفاده کرده‌ایم [۱۰]. با محاسبه‌ی میزان جذب نور، چگالی جریان J بر حسب ولتاژ V از اختلاف مجموع جریان فوتون‌های القایی و جریان تولیدی از بازترکیب صورت‌گرفته در ساختار به صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۱]:

$$J(V) = \int_0^\infty d\lambda [\frac{e\lambda}{hc}\frac{dI}{d\lambda}A(\lambda)] - \frac{2\pi e(n^2+1)E_g{}^2 kT}{h^3c^2}\exp(\frac{eV-E_g}{kT}) \quad (۱)$$

که $\frac{dI}{d\lambda}$ شدت نور تابشی از خورشید در واحد طول موج است که از مرجع [۱۲] به دست آمده است، $A(\lambda)$ میزان جذب نور، E_g انرژی گاف نواری، kT انرژی گرمایی و n میانگین ضریب شکست ماده‌ی نیمه‌رسانا است. در نهایت با در نظر گرفتن P_{inc} به عنوان انرژی تابشی فرودی و محاسبه‌ی $d(JV)/dV = 0$ به رابطه‌ی بازدهی می‌رسیم:

$$\eta = J[V(\max)].V(\max)/P_{inc} \quad (۲)$$

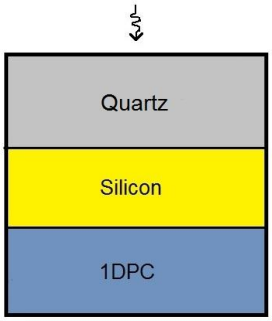
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۳-محاسبات و نتایج

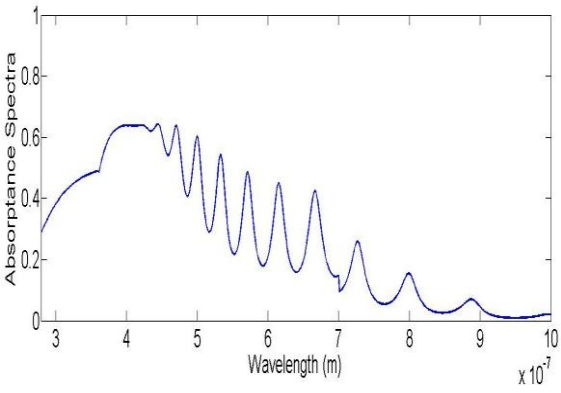
در محاسبات از سیلیکون بلورین به عنوان لایه‌ی فعال سلول خورشیدی که جذب نور در آنجا صورت می‌گیرد، استفاده کرده‌ایم. اطلاعات اپتیکی لایه‌های استفاده شده از مرجع [۱۳] استخراج شده‌اند. لایه‌ی فعال از جنس سیلیکون را دارای ضخامتی برابر با ۱ میکرون در نظر گرفته‌ایم. از ساختار بلور فوتونی قرار گرفته در زیر لایه‌ی فعال، به منظور بازتاب دادن امواج عبوری از لایه‌ی سیلیکون به درون سیستم استفاده کرده‌ایم. لایه‌های بکار رفته در PC، ۶ جفت‌لایه از جنس MgF_2 و AlAs با ضخامت‌های ۹۰ nm و ۳۷ nm هستند. همچنین از یک لایه‌ی ۱ میلی‌متری کوارتز به عنوان لایه‌ای با بازتاب ناچیز در بازه طول موجی مورد نظرمان استفاده کرده‌ایم. شکل ۱ نمایی از ساختار را نمایش می‌دهد.

برای بررسی اثر بلور فوتونی بازتاب دهنده بر میزان افزایش جذب نور در لایه‌ی سیلیکون، طیف جذب نور بر حسب طول موج را یک بار در عدم حضور بلور فوتونی و بار دیگر در حضور بلور فوتونی مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل‌های ۲ و ۳ به بررسی این موضوع می‌پردازد.

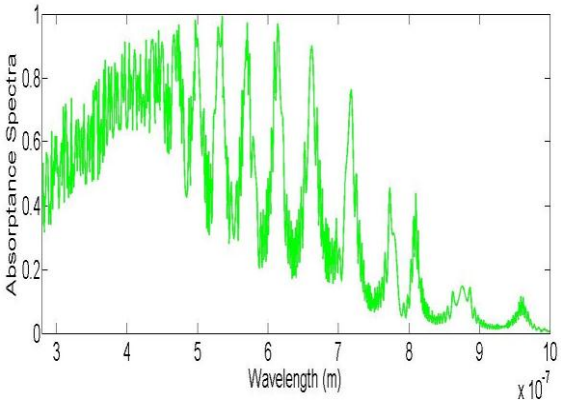
از آنجایی که سیلیکون بلورین دارای انرژی گاف نواری برابر ۱/۱۲ eV است، در نتیجه انرژی‌های کمتر از این مقدار قادر به تولید زوج الکترون-حفره نخواهند بود. با در نظر گرفتن این نکته جریان تولیدی در ساختار را محاسبه می‌کنیم.



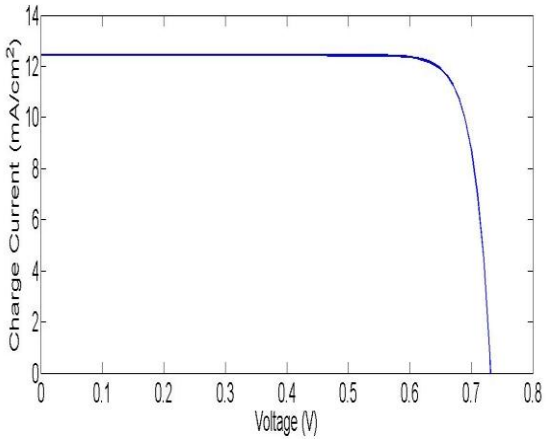
شکل ۱: نمایی از ساختار طراحی شده برای افزایش جذب نور در لایه‌ی سیلیکون.



شکل ۲: میزان جذب نور در سلول خورشیدی بدون حضور بلورهای فوتونی.

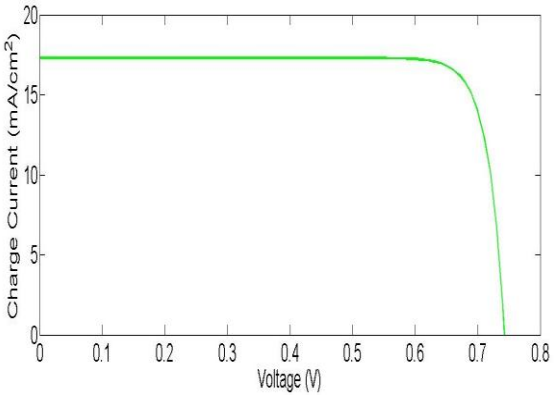


شکل ۳: میزان جذب نور در سلول خورشیدی با بکارگیری بلورهای فوتونی.



شکل ۴: منحنی جریان بر حسب ولتاژ سلول خورشیدی در عدم حضور بلور فوتونی.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۵: منحنی جریان بر حسب ولتاژ سلول خورشیدی در حضور بلور فوتونی.

با استفاده از رابطه‌ی ۱ منحنی جریان بر حسب ولتاژ قطعه را در عدم حضور بلور فوتونی و در حضور بلور فوتونی به دست می‌آوریم. شکل ۴ این منحنی را در عدم حضور بلور فوتونی و شکل ۵ این منحنی را در حضور بلور فوتونی نمایش می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، حضور بلور فوتونی موجب افزایش جریان در سلول شده است.

در نهایت برای محاسبه‌ی بازدهی قطعه‌ی طراحی شده با استفاده از منحنی جریان بر حسب ولتاژ و رابطه‌ی ۲ مقدار بازدهی را به دست می‌آوریم. بازدهی محاسبه شده برای سلول خورشیدی طراحی شده در عدم حضور بلور فوتونی ٪۷/۷۳ به دست می‌آید. با استفاده از طراحی مناسب لایه‌ی ضدبازتاب و بلور فوتونی بازتاب دهنده مقدار بازدهی به ٪۱۰/۰۸ می‌رسد. در مقایسه با کارهای انجام شده این مقدار قابل توجه است و نشان می‌دهد که قطعه طراحی شده کارکرد درستی دارد. برای مقایسه بهتر مرجع [۱۴] را در نظر بگیرید. در این مقاله برای بلور فوتونی یک بعدی با ۸ جفت لایه و همچنین لایه ضد بازتاب ایده‌آل به بازدهی ٪۱۲/۴۴ برای لایه فعال ۲ میکرونی دست یافته‌اند. نویسندگان مقاله معتقدند که حضور بلور فوتونی سه بعدی برای دستیابی به بازدهی بیشتر (حدود ٪۱۶-۱۵) الزامی است. برای لایه فعال ۲ میکرونی با ساختار معرفی شده، ما به بازدهی حدود ۱۴ درصد می‌رسیم که نشان از آن دارد که حتی با بلورهای فوتونی یک بعدی با ساختاری ساده اما مناسب، می‌توان مقدار قابل توجهی افزایش بازدهی داشت.

۴-نتیجه‌گیری

به دام انداختن نور در سلول‌های خورشیدی از اهمیت بسیاری برخوردار است. با طراحی مناسب و با استفاده از یک لایه‌ی ضدبازتاب با ضخامت مناسب بر روی لایه‌ی فعال سلول خورشیدی و استفاده از بلور فوتونی بازتاب‌دهنده در زیر لایه‌ی فعال به منظور به دام انداختن نور توانستیم جذب نور را در لایه‌ی سیلیکون تا حد چشمگیری افزایش دهیم. این افزایش جذب به افزایش جریان قطعه و در نهایت افزایش بازدهی منجر می‌شود. محاسباتمان نشان می‌دهند که طراحی مناسب لایه‌های ضدبازتاب و بلور فوتونی بازتاب‌دهنده تأثیر چشمگیری در افزایش بازدهی سلول خورشیدی داشته است.

مراجع

[1] Wurfel, P., *Physics of solar cells*, John Wiley& Sons, Inc., Publications, 2007

[2] Fraas, L., Partain, L., *Solar cells and their applications*. John Wiley & Sons, Inc., Publications, 2010

[3] Zeng L.S. et al. *Efficient hybrid carboxylated polythiophene/nanocrystalline TiO_2 heterojunction solar cells*, Solar Energy, 85, 1967–71, 2011

[4] Xie W.T., Dai Y.J., Wang R.Z., Sumathy K., *Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: a review*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 15, 2588–2606, 2011

[5] Chong K.K., Siaw FL, Wong C.W., Wong G.S., *Design and construction of non-imaging planar concentrator for concentrator photovoltaic system*, Renewable Energy, 34, 1364–70, 2009

[6] van Sark W.G., Barnham K., Slooff L., Chatten A., Buchtemann A., Meyer A., et al. *Luminescent solar concentrators—a review of recent results*, Optics Express, 16, 21773–92, 2008

[7] O'Brien P.G. et. al., *Photonic crystal intermediate reflectors for micromorph solar cells: a comparative study*, Optics Express, 18, 4478-90, 2010

[8] Rowan B.C., Wilson L., Richards B., *Advanced material concepts for luminescent solar concentrators*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 14, 1312–22, 2008

[9] Bielawny A. et. al., *Intermediate reflectors for enhanced top cell performance in photovoltaic thin-film tandem cells*, Optics Express, 17, 8439-46, 2009

[10] Morozov G.V., Placido F., Sprung D., *Absorptive photonic crystals in 1D*, Journal of Optics, 13, 2011

[11] Henry C.H., *Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells*, J. Appl. Phys. 51, 4494-4500, 1980

[12] ASTMG 173-03, *Standard Table for Reference Solar Spectrum Irradiances, ASTM International*, West Conshohoken, Pensylvania, 2005

[13] Palik E.D., *Handbook of optical constants of solids*, Academic Press, 1998

[14] Bermel P., Luo C., Zeng L., Kimerling L.C., Joannopolous J.D., *Improving thin film crystalline solar cell efficiencies with photonic crystals*, Optics Express, 15, 16986-17000, 2007

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]