

طراحی لایه ضد بازتاب نانو قالب‌های سیلیکون با قابلیت افزایش جذب نوری سلول- های خورشیدی لایه نازک

آماندانا جلالی^{۱,۲}، حمید نادگران^۱ و دانیل ارنی

^۱گروه فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۲گروه مهندسی تئوری و عمومی الکترونیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه دوپسبورگ-اسن، دوپسبورگ، آلمان

چکیده - لایه ضد بازتاب نانو قالب‌های سیلیکونی طراحی و با لایه‌های ضد بازتاب متداول مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی مقایسه شده است. قالب‌های سیلیکون با اندازه و تناوب بهینه شده بر روی لایه فعال سلول خورشیدی قرار گرفته و بر روی این قالب‌ها پوششی از سیلیکون نیتريد قرار داده شده است. در نتیجه این طراحی لایه‌ای با ضریب شکست موثر میانی بین سیلیکون نیتريد و لایه فعال تشکیل می‌شود که منجر به ایجاد لایه‌هایی با ضریب شکست تقلیل یافته شده و تاثیر شایانی در کاهش بازتاب دارد. این قالب‌ها تا زاویه تابش ۴۵ درجه کارایی بالایی داشته و بازتاب را به میزان مناسبی کاهش می‌دهند. در راستای اثبات این مدعا، لایه ضد بازتاب نانو قالب‌های سیلیکون همراه با چندین لایه ضد بازتاب متداول طراحی و میزان بازتاب در چندین زاویه تابش متنوع به همراه جذب اپتیکی محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که لایه بازتاب پیشنهادی از تمامی لایه‌های ضد بازتاب متداول بهتر عمل کرده علاوه بر اینکه جفت شونده‌ی موثری بین نور و لایه فعال ایجاد می‌کند.

کلید واژه- جذب اپتیکی، جفت شونده‌ی نور، ضریب شکست تقلیل یافته، لایه ضد بازتاب، سلول خورشیدی.

Design of Silicon Nano-bars Anti-Reflection Coating to Enhance Thin Film Solar Cells Efficiency

Mandana Jalali^{1,2}, Hamid Nadgaran¹, Daniel Erni²

¹Physics Department, Shiraz University, Shiraz, Iran

²General and Theoretical Electrical Engineering (ATE), Faculty of Engineering, University of Duisburg-Essen, and CENIDE- Center of Nanointegration Duisburg-Essen, Duisburg, Germany

Abstract- In this paper a novel anti-reflection coating based on silicon nano-bars is designed and compared to conventional anti-reflection coatings. Silicon nano-bars with optimized size and period are designed and embedded on the active layer on top of which a 100nm Si_3N_4 layer is coated. As a result the proposed layer stack, an intermediate layer with refractive index amid the two layers is formed and a graded refractive index anti-reflection coating is achieved which has a substantial effect on reduction of reflection spectra. Such structure effects reflection even at 45° illumination angle. To validate our claim, the proposed structure as well as four conventional anti-reflection coating is simulated and through computation of reflection factor and silicon absorption spectra, it is shown that our structure outperform the already existed anti-reflection coatings and additionally strongly couples the incident light to the active layer.

Keywords: Optical absorption, Light coupling, Graded refractive index, Anti-reflection coating, Solar cell.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

بازتاب متشکل از تنها یک لایه باید ضخامت یک چهارم طول موج و ضریب شکست مجذور مربع ضریب شکست لایه زیرین را داشته باشد. چنین لایه‌ای در بازه طول موجی محدودی کار می‌کند و فقط برای تابش‌های نزدیک به عمود مناسب است. از طرف دیگر لایه‌های ضد بازتاب متشکل از چند لایه نیاز به لایه‌های مختلف با ضریب شکست نزدیک به هم دارند که ساخت پیچیده داشته و همواره مواد مناسب با ضریب شکست دلخواه در دسترس نیست. اگرچه این لایه‌ها کارایی بهتری نسبت به ضد بازتاب‌های تک لایه دارند. در این مقاله لایه ضد بازتاب دو لایه سیلیکا و فلورید منیزیم، دو لایه سیلیکا و سیلیکون نیتريد، سه لایه اکسید آلومینیوم، سیلیکون نیتريد و روی سولفید و در آخر چهار لایه اکسید آلومینیوم، سیلیکون نیتريد، پنتا اکسید تانتالم و روی سولفید در مقایسه با ساختار پیشنهادی قالب‌های سیلیکونی با پوشش سیلیکون نیتريد شبیه سازی شده است. مشخصات هر ساختار در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات ساختارهای ضد بازتاب شبیه سازی شده.

	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم	لایه چهارم
ساختار A	SiO ₂ [75nm]	MgF ₂ [60nm]	-	-
ساختار B	SiO ₂ [10nm]	Si ₃ N ₄ [55nm]	-	-
ساختار C	Al ₂ O ₃ [205nm]	Si ₃ N ₄ [22nm]	ZnS [29nm]	-
ساختار D	Al ₂ O ₃ [21nm]	Si ₃ N ₄ [14nm]	Ta ₂ O ₅ [18nm]	ZnS [26nm]
نانو قالب- های سیلیکون	c-Si Bars w=160 nm h= 45nm p=400 nm	Si ₃ N ₄ [100nm]	-	-

۳- نتایج

سلول خورشیدی لایه نازک با لایه ۴۰۰ نانومتری سیلیکون کریستالی که در زیر آن ۴۰ نانومتر نقره بعنوان الکتروود قرار دارد و در بالا لایه ضد بازتاب گذاشته شده

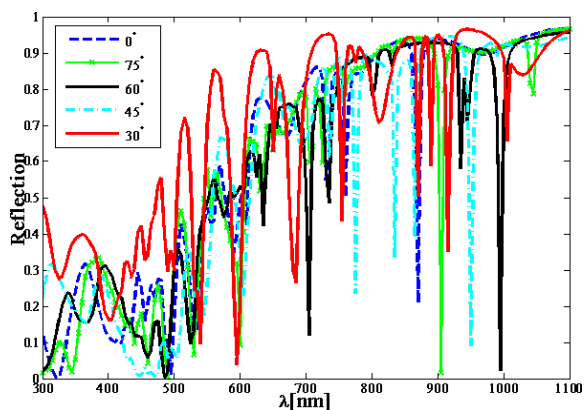
سلول‌های خورشیدی لایه نازک، با توجه به کاهش قابل توجه ضخامت لایه فعال، پتانسیل بالایی در حل معضل انرژی دارند و از این رو توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده‌اند [۲،۱]. اگرچه این کاهش ضخامت لایه فعال، جذب اپتیکی لایه را شدیداً کاهش داده که در نتیجه کارایی چنین سلول‌هایی پایین است. به منظور رفع این نقیصه تکنیک‌های متنوعی برای افزایش جذب اپتیکی پیشنهاد شده است [۴،۳]. از جمله مهمترین این تکنیک-ها لایه ضد بازتاب است که با افزایش درصد نور فرودی درون لایه فعال، احتمال جذب فوتون را بهبود می‌بخشد [۵].

طراحی لایه‌های ضد بازتاب با توجه به کاربردهای متنوع چنین لایه‌هایی چندین دهه توجه بسیاری به خود جلب کردند و طراحی‌های متنوعی پیشنهاد شده است [۷،۶]. اگرچه به علت پیچیدگی طراحی سلول خورشیدی با توجه به پهنای باند گسترده سلول که از ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر است و همچنین زوایای متنوع تابش نور خورشید در طول روز، طراحی لایه بازتاب مناسب مورد کاربرد در سلول‌های خورشیدی هنوز نیاز به بررسی دارد [۸]. از این رو یافتن طراحی مناسب سلول خورشیدی موضوع این مقاله قرار گرفته است. لایه ضد بازتاب نانو قالب‌های سیلیکون به همراه پوشش سیلیکون نیتريد پیشنهاد شده است، که با توجه به کاهش بازتاب مناسب در تمامی زوایا و جفت شدگی قوی نور با لایه فعال در برخی بازه‌های طول موجی، کارایی مناسبی در سلول‌های خورشیدی دارد و نشان داده خواهد شد که از تمامی لایه‌های ضد بازتاب متداول بهتر عمل می‌کند.

۲- انواع لایه‌های ضد بازتاب

لایه ضد بازتاب، لایه‌ای اپتیکی بر روی سطوح ادوات اپتیکی است که بازتاب از سطح را کاهش می‌دهد. بسیاری از لایه‌های ضد بازتاب متشکل از چندین لایه نازک شفاف با ضریب شکست‌های متفاوت می‌باشند که به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند تا نورهای بازتابی از سطوح مختلف تداخل ویرانگر و موج عبوری تداخل سازنده داشته باشند. از این رو طول موج و زاویه تابش پارامترهای تعیین کننده در طراحی چنین لایه‌ای می‌باشند [۶]. لایه ضد

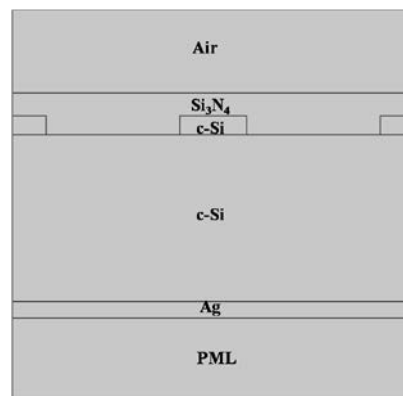
به منظور بررسی کارایی ساختارهای پیشنهادی در شکل ۲، میزان بازتاب از هر پنج ساختار ضد بازتاب معرفی شده در جدول ۱ بر حسب طول رسم شده است. به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه بازتاب از سلول مرجع (سلول بدون لایه ضد بازتاب) در کنار طیف تابشی نور خورشید به نمودار اضافه شده است. دیده می‌شود که نانو قالب‌های سیلیکون بازتاب را در بازه‌ای گسترده‌ای کاهش داده‌اند و نسبت به سلول مرجع ۱۸.۴٪ بازتاب کاهش یافته است. نکته قابل توجه آن است که کاهش بازتاب در نواحی که تابش نور خورشید قوی است، اتفاق افتاده که نشان دهنده طراحی متناسب با سلول‌های خورشیدی است. بهترین ساختار بین دیگر لایه‌های پیشنهادی، لایه سیلیکون نیتريد (ساختار B) است که ۱۷.۱٪ بازتاب را نسبت به سلول مرجع کاهش داده است. اگرچه به نظر می‌رسد تفاوت دو ساختار چندان نیست، قدرت ساختار نانو قالب‌های سیلیکون در میزان جذب لایه فعال به خوبی مشهود است. همچنین این ساختار تا زوایای ۳۰ درجه نیز بازتاب را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد در حالیکه دیگر ساختارها با دور شدن از تابش عمود به سرعت کارایی خود را از دست می‌دهند. ساختار چهار لایه (ساختار D) بر خلاف انتظار کارایی مناسبی نداشته که علت را می‌توان طراحی این لایه در یک طول موج خاص عنوان کرد.



شکل ۳: میزان بازتاب از ساختار نانو قالب‌های سیلیکون در زوایای مختلف بر حسب طول موج.

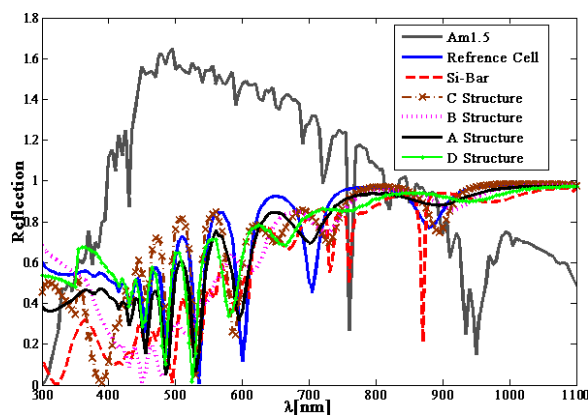
میزان انعکاس برای ساختار قالب‌های سیلیکون در شکل ۳ در زوایای مختلف رسم شده است. به خوبی مشاهده می‌شود که تا زاویه تابش ۴۵ درجه ساختار عملکرد مناسبی داشته و زاویه تابش تأثیر چندان بر بازتاب از ساختار نداشته است. در تابش ۳۰ درجه هم ساختار هنوز

است، شبیه سازی و نور با قطبش TE و زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه به مجموع لایه‌ها تابانده شده است. محاسبات با روش شبیه سازی المان متناهی بر اساس نرم افزار شبیه سازی COMSOL انجام شده است. در شکل ۱، شمای ساختار شبیه سازی شده با لایه ضد بازتاب پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۱: هندسه ساختار شبیه سازی شده به همراه لایه ضد بازتاب نانو قالب‌های سیلیکونی.

قالب‌های سیلیکون ارتفاع ۴۵ نانومتر، عرض ۱۶۰ نانومتر و تناوب ۴۰۰ نانومتر دارند که این پارامترها بر اساس بهینه سازی با روش الگوریتم ژنتیک زایشی بهینه و انتخاب شده‌اند. پوشش سیلیکون نیتريد ۱۰۰ نانومتری است و در نتیجه قالب‌ها کاملاً درون سیلیکون نیتريد قرار دارند و یک لایه ۵۵ نانومتری از تنها سیلیکون نیتريد در بالای قالب‌ها تشکیل می‌شود. این طراحی موجب می‌شود که نور از لایه‌هایی با ضریب شکست تقلیل یابنده عبور کند که در نتیجه بازتاب کاهش می‌یابد.



شکل ۲: میزان بازتاب برای پنج ساختار معرفی شده در جدول ۱ به همراه بازتاب از سلول مرجع و طیف تابشی خورشید بر حسب طول موج.

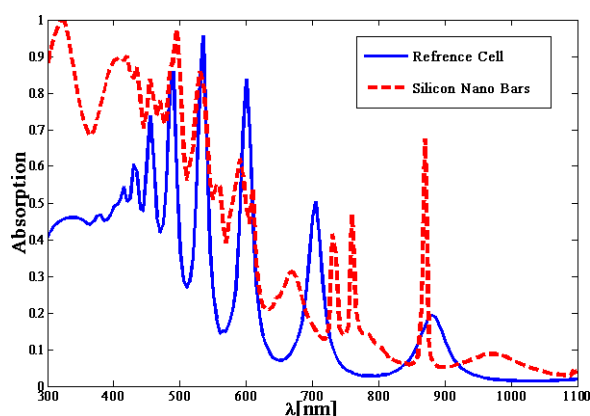
ساختاری از ساختارهای ضد بازتاب متداول میزان عبور بالاتری دارد و موجب افزایش جذب اپتیکی سلول به میزان ۵۷.۷٪ می‌شود. به منظور بررسی علل اپتیکی چنین بهبودی، طیف بازتاب و جذبی ساختار به دقت مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که این قالب‌ها تشکیل ساختار ضد بازتاب با ضریب شکست تقلیل یافته می‌دهند و در نتیجه بازتاب را کاهش می‌دهند، در کنار اینکه بازتاب وابستگی چندانی به زاویه تابش نداشته و تا زاویه ۳۰ درجه نیز کارایی قابل قبولی دارد. چنین کاهش بازتابی در کنار جفت شدگی موثر نور با لایه فعال جذب اپتیکی لایه فعال را بهبود بخشیده تا جائیکه ۵۷.۷٪ افزایش در جذب کل لایه در بازه طول موجی ۳۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر بدست آمده است.

مراجع

- [1] H. A. Atwater, A. Polman, "Plasmonic for improved photovoltaic devices," Nat Mater, 9 (2010) 26229.
- [2] F. Hallermann, C. Rochstuhl, S. Fahr, G. Seifert, S. Wackerow, H. Graener, G. v. Plessen, F. Lederer, "On the use of localized polaritons in solar cells," Phys. stat. sol. (a), 205 (2008) 208.
- [3] K. Nakayama, K. Tanabe, H. Atwater, "Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cell," Appl. Phys. Lett, 93 (2010) 12.
- [4] M. Jalali, H. Nadgaran, "Photon management of silicon photovoltaics through scattering and near field effect of nanoparticles," Proc of the 5th international conference on nanostructures(ICNS5), Kish Island, Iran, 2014.
- [5] S. J. Oh, S. Chhajed, D. J. Poxson, J. Cho, E. F. Schubert, S. J. Tark, D. Kim, and J. K. Kim. "Enhanced broadband and omni-directional performance of polycrystalline Si solar cells by using discrete multilayer antireflection coatings." Opt. Exp. 21.101 (2013): A157-A166.
- [6] D. Bouhafs, A. Moussi, A. Chikouche, and J. M. Ruiz. "Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells." Solar Energy Materials and Solar Cells 52, no. 1 (1998): 79-93.
- [7] K. Bikash, T. B. Pandian, E. Sreekiran, and S. Narayanan. "Benefit of dual layer silicon nitride anti-reflection coating." Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE. IEEE, 2005.
- [8] M. Jonatha, J. Kobler, J. Sauer, J. Best, M. Gardener, A. AR Watt, and G. Wakefield. "High-performance single layer antireflective optical coatings comprising silica nanoparticles." ACS applied materials & interfaces 4.2 (2012): 854-859.

قادر به کاهش بوده است.

علاوه بر موارد ذکر شده در مورد کارایی نانو قالب‌های سیلیکون به عنوان لایه ضد بازتاب، این قالب‌ها با کمک جفت شدگی نور با لایه فعال جذب سیلیکون را افزایش داده و در نتیجه کارایی سلول را بهبود می‌بخشند. طیف جذب سیلیکون در بازه گسترده ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر برای دو ساختار با قالب‌های سیلیکون و بدون هیچ ساختار ضد بازتابی در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵: طیف جذب سیلیکون در حضور نانو قالب‌های سیلیکون و بدون هیچ ساختار ضد بازتابی بر حسب طول موج.

همان طور که شکل گویا می‌باشد، حضور نانو قالب‌های سیلیکون جذب را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد تا جائیکه میزان جذب در سراسر بازه طول موجی ۵۷.۷٪ افزایش یافته است. قله‌های جدیدی به نمودار اضافه شده است و دامنه بعضی از قله‌ها افزایش یافته است که این پدیده در بازه طول موجی ۳۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر قدرت بیشتری داشته است. علت چنین افزایشی تشکیل مدهای موجبری و ایجاد الگوهای میدان نزدیک قوی در نتیجه این مدها و ترکیب مرتبه‌های مختلف پراش می‌باشد. این افزایش در زوایای تابش غیر عمود نیز وجود داشته و در زاویه تابش ۴۵ درجه ۶۶.۲٪ افزایش مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار ضد بازتاب نانوقالب‌های سیلیکون پوشش داده شده با سیلیکون نتیرید به عنوان ساختار ضد بازتاب مناسب برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی لایه نازک پیشنهاد شده و با کمک محاسبه میزان بازتاب در کنار محاسبه جذب اپتیکی لایه فعال کارایی این ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده که چنین