

تأثیر پارامترهای هندسی آرایه نانومیله‌های ZnO با پوشش اکسید روی دوب شده با آلومینیوم بر رفتار بازتابی سلول خورشیدی $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$

سید محمد میرکاظمی^۱، فاطمه دباغ کاشانی^۲ و احمد مشعل^۲

^۱ گروه سرامیک، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده - در تحقیق حاضر، اثر ارتفاع، قطر و دانسیته سطحی آرایه نانومیله ZnO با پوشش اکسید روی دوب شده با آلومینیوم بر رفتار بازتابی پوشش بیرونی سلول خورشیدی کالکوپیریدی $(Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2)$ مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی درصد بازتاب از نرمافزار لومریکال 2015 استفاده شده است. معادلات ماکسول با استفاده از نرمافزار لومریکال بر پایه روش تفاضل محدود حوزه زمان حل شده و میدان الکتریکی و مغناطیسی در فضا بدست آمده است. با استفاده از جواب حاصل از معادلات ماکسول و روش بازتاب نیم‌کره‌ای، درصد بازتاب محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، تغییرات ارتفاع، قطر و دانسیته سطحی نانوآرایه تأثیر چشمگیری بر ضریب بازتاب ندارد. البته به کارگیری نانوآرایه درصد بازتاب را در زوایای مختلف تباش تقریباً یکنواخت می‌نماید.

کلید واژه- روش تفاضل محدود حوزه زمان، درصد بازتاب نیم‌کره‌ای، سلول خورشیدی کالکوپیریدی CIGS، نرمافزار لومریکال ۲۰۱۵

The Effects of Geometrical Parameters of ZnO Nano Rod Array with Al doped ZnO Coating on the Reflectanc Behavior of Antireflection Layer of CIGS Solar Cell

Seyyed Mohammad Mirkazemi¹, Fatemeh Dabbagh Kashani², Ahmad Mashal²

¹ Ceramic group, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

² School of Physics, Iran University of Science and Technology

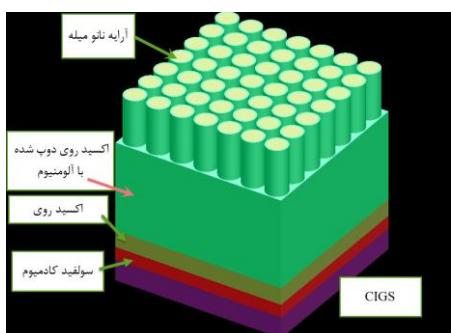
Abstract- In this research, the effects of geometrical parameters (length, diameter and surface density) of Nano Rod Array (NRA) of ZnO coated with Al doped ZnO on variation of refractivity of solar cell antireflection coating are investigated. The reflectance behavior is simulated by FDTD Commercial Software Lumerical 2015. Maxwell equations are solved with Lumerical software based on finite difference time domain method and electric and magnetic fields are evaluated in space. By using these solutions and hemispherical reflectance method, reflectance is calculated. Simulation results show that variation of Geometrical parameters of NRA (diameter, length and surface density) has no significant effect on reflectance. However, using NRA influence on uniformity of reflectance amount for different incident angles.

Keywords: CIGS Solar Cells, Commercial Software Lumerical 2015, Finite Difference Time Domain (FDTD) Method, Hemispherical Reflectance

بازتابی لایه ضدبارتاب در سلول خورشیدی کالکوپیریدی CIGS است. به جهت نیل به این هدف، تحقیق حاضر چنین سازماندهی شده است. در قدم نخست، ساختمان سلول خورشیدی در نظر گرفته شده و پارامترهای مرتبط با شبیه‌سازی معرفی می‌شود. سپس، با استفاده از نرم‌افزار لومریکال ۲۰۱۵ و روش بازتاب نیم‌کره‌ای^۱، درصد بازتاب در طول موج ۵۵۰ نانومتر (که تابش خورشید در این طول موج بیشینه است^[۸]) برای پیکربندی مختلف نانوآرایه شبیه‌سازی می‌شود. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده تأثیر ارتفاع، قطر و دانسیته آرایه نانو میله بر درصد بازتاب این لایه برای زوایای مختلف تابش مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده نمودارها ارائه می‌شود.

۲- شبیه‌سازی

تحلیل تئوری مشخصه‌های اپتیکی در سلول CIGS با آرایه AZO: ZnO NR: ZnO با حل معادلات امواج الکترومغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار لومریکال صورت گرفته است (نرم‌افزار از روش تفاضل محدود حوزه زمان برای حل معادلات ماکسول و محاسبه میدان الکتریکی و مغناطیسی و انتشار آن استفاده می‌کند). در این شبیه‌سازی، سلول CIGS شامل چندین لایه شامل اجزای زیر در نظر گرفته شده است، آرایه‌ای از نانومیله ZnO با پوشش AZO، لایه‌های CdS، ZnO، AZO (سولفید کادمیوم)، CIGS (فلز مولبیدن) و شیشه سودالایم به ترتیب با ضخامت‌های ۹۰۰، ۸۰، ۶۰، ۱۹۰۰ و ۲ میلی‌متر. شکل ۱ طرحی از لایه‌های فوقانی سلول خورشیدی کالکوپیریدی را نشان می‌دهد. اطلاعات اپتیکی ناحیه‌ی جاذب CIGS از اطلاعات مرجع^[۹] استخراج شده است.



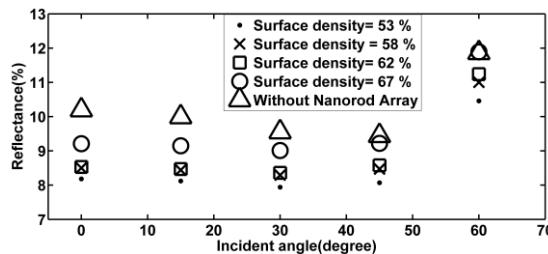
شکل ۱: طرح شماتیک ساختار سلول خورشیدی CIGS

1- hemispherical reflectance method

۱- مقدمه

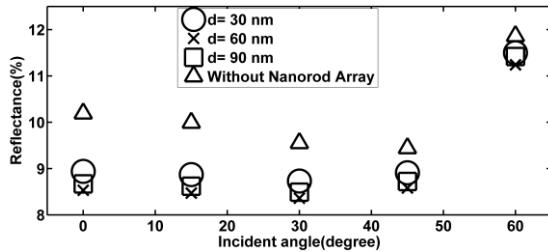
استفاده از لایه‌های ضدبارتاب به منظور کاهش بازتاب نور و افزایش عبوردهی در بازه‌ی مشخص طول موجی به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته است^[۱۱]. روش‌های مرسوم، استفاده از لایه‌های ضدبارتاب دی‌کلتریک تک-لایه یا چند لایه هستند^[۲]. پوشش‌های تک لایه با ضخامت یک چهارم طول موج برای زاویه فرودی و طول موج مشخص عمل می‌کنند. از محدودیت‌های استفاده از پوشش‌های ضدبارتاب لایه نازک چند لایه، انتخاب ماده، عدم تطبیق ضریب انبساط حرارتی و سایر موارد می‌باشد. با توجه به معایب فوق از سال ۱۹۶۷ تحقیقات بر روی استفاده از آرایه‌ای از ناهمواری‌ها بر روی سطح به عنوان تکنیک ضدبارتاب جایگزین روش مرسوم آغاز شده است. پوشش‌های به کار گرفته شده در این روش دوام و پایداری حرارتی بیشتری دارند^[۳]. سلول‌های خورشیدی به صورت ادوات بالک یا لایه نازک طبقه‌بندی می‌شوند. مواد لایه نازک شامل کالکوپیرید((Ga_x(Se_{1-y}S_y)₂CIGS)، سیلیکون آمورف(Si) و تلورید کادمیوم(CdTe) هستند^[۴]. در میان این مواد سلول خورشیدی، CIGS بدلیل بازده بالای الکتریسیته خورشیدی (با بازده تولید بیش از ۲۰/۳ درصد) و قیمت پایین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است^[۵]. تحقیقات بسیاری بر روی روش‌های افزایش بازده این نوع از سلول‌های خورشیدی صورت پذیرفته است. استفاده از لایه‌های ضدبارتاب نانوساختار یکی از روش‌های کارا در افزایش بازده تبدیل است^[۶]. اکسید روی(ZnO) در بازه‌ی طول موج مرئی شفاف بوده و پایداری شیمیایی و حرارتی خوبی دارد. دوپ نمودن این ماده با فلزات مناسب همچون آلومنیوم هدایت الکتریکی آن را بهبود می‌بخشد. اکسید روی دوب شده با آلومنیوم(Al: ZnO(AZO)) به دلیل عبوردهی نوری خوب و رسانندگی بالا مورد توجه بسیاری قرار گرفته است^[۷]. استفاده از نانوساختارهایی همچون آرایه نانومیله، نانوکره و غیره از ZnO به همراه لایه نازک AZO در فرآیند شبیه‌سازی و ساخت سلول‌های خورشیدی مورد توجه قرار گرفته است^[۱۱]. هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر پارامترهای هندسی آرایه نانومیله اکسید روی با پوشش اکسید روی دوب شده با آلومنیوم(AZO- ZnO NRA) - قطر، دانسیته سطحی نانوآرایه و ارتفاع نانو میله - بر رفتار

در شبیه‌سازی گراف‌های این شکل، ارتفاع نانومیله‌ها ۲۲۰ و قطر مجموع هسته و پوشش ۶۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، به کارگیری آرایه نانومیله اکسید روی سبب ایجاد یکنواختی بیشتر در درصد بازتاب زوایای بزرگ‌تر تابش فرودی می‌شود. تغییرات دانسیتۀ سطحی تأثیر چشمگیری بر روى درصد بازتاب ندارد. البته همانگونه که مشاهده می‌شود در غیاب آرایه نانومیله اکسید روی میزان بازتاب یا به عبارت دیگر تلفات نوری سلول خورشیدی بالاتر است.



شکل ۲: تغییرات درصد بازتاب بر حسب زاویه‌ی تابش فرودی برای چهار دانسیتۀ سطحی مختلف آرایه

سپس، تأثیر قطر نانومیله برای آرایه نانومیله با ارتفاع ۲۲۰ نانومتر و درصد دانسیتۀ سطحی ۶۲ درصد مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). در جدول ۳ داده‌های مرتبط به قطر هسته و ضخامت پوشش ارائه شده است.



شکل ۳: تغییرات درصد بازتاب بر حسب زاویه‌ی تابش فرودی برای سه قطر مختلف نانومیله‌ها

جدول ۳: مشخصات آرایه نانومیله با دانسیتۀ سطحی ۶۲ درصد و قطر مختلف نانومیله

قطر نانومیله(نانومتر)	۳۰	۶۰	۹۰
قطر هسته(نانومتر)	۲۵	۵۰	۷۵
ضخامت پوشش(نانومتر)	۵	۱۰	۱۵

همانگونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، مقدار درصد بازتاب برای قطرهای مختلف نانومیله تقریباً یکسان است. لازم به ذکر است که درصد بازتاب در حضور آرایه نانومیله کمتر از مقدار آن بدون وجود

فرمول ناحیه‌ی جاذب $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ با $x=0.31$ انتخاب شده است. اطلاعات شبیه‌سازی یک سلول خورشیدی CIGS در طول موج ۵۵۰ نانومتر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: اطلاعات مورد نیاز در طول موج ۵۵۰ نانومتر در نرم افزار لومریکال

ماده	بخش حقیقتی ضریب-شکست	بخش موهمی ضریب-شکست	مرجع
Substrate glass (Soda-lime)	$1/5251$	$2/2 \times 10^{-7}$	[۱۰]
Mo	$2/771$	$2/521$	[۱۱]
CIGS	$2/001$	$0/5365$	[۹]
CdS	$2/549$	$0/605$	[۱۱]
i-ZnO	$2/013$	$0/5$	[۱۲]
Al: ZnO	$1/347$	$0/310$	[۷]

۳- نتایج و بحث

همانگونه که ذکر شد، استفاده از لایه‌های ضدبازتاب مناسب به منظور کاهش تلفات نوری ناشی از بازتاب در سلول‌های خورشیدی ضروری است. یکی از روش‌های کاهش تلفات بازتاب و فراهم نمودن امکان به دام انداختن نور، استفاده از آرایه‌های نانوساختار است. در این تحقیق آرایه نانومیله اکسید روی با پوشش اکسید روی دوپ شده با الومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش، تأثیر سه پارامتر هندسی دانسیتۀ سطحی آرایه نانومیله، قطر و ارتفاع آن بر ضریب بازتاب نیمکرهای با تابش نور در زاویه مشخص و اندازه‌گیری شدت نور بر روی نیمکرهای در ناحیه پشت منبع تابش و انتگرال‌گیری بر روی سطح مذکور محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه نور خورشید ناقطبیده است، شبیه‌سازی‌ها برای دو قطبش TM و TE مورد بررسی قرار گرفته اند. در قدم نخست تأثیر دانسیتۀ سطحی آرایه نانومیله بر ضریب بازتاب نیمکرهای بررسی شد. نانومیله اکسید روی با قطر ۵۰ نانومتر با پوشش AZO به ضخامت ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی در چهار قطر مختلف درصد دانسیتۀ سطحی آرایه نانومیله خلاصه شده است. در شکل ۲ تغییرات درصد بازتاب در زوایای مختلف تابش نور فرودی برای چهار دانسیتۀ سطحی متفاوت مشاهده می‌شود.

جدول ۲: مشخصات آرایه نانومیله با قطر ۶۰ نانومتر (مجموع قطر هسته و پوشش) و درصد دانسیتۀ سطحی آرایه نانومیله مختلف

دانسیتۀ سطحی آرایه نانومیله (درصد)	۵۳	۵۸	۶۲	۶۷
فاصله مرکز تا مرکز نانومیله‌ها از یکدیگر (نانومتر)	۷۳	۷۰	۶۸	۶۵

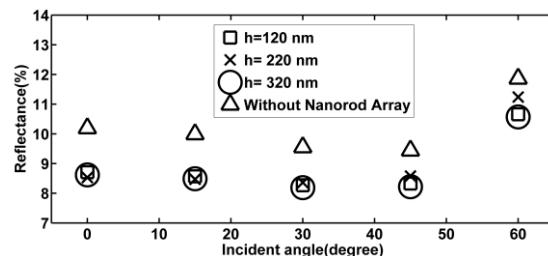
در زوایای مختلف تابش فرودی باعث عدم نیاز به استفاده از سامانه‌های ردیاب خورشیدی و کاهش چشمگیر هزینه و پیچیدگی سیستم‌های سلول خورشیدی می‌شود.

مراجع

- [1] MY. Hsieh, SY. Kuo, HV. Han, JF. Yang, YU. Liao, FI. Lai and HC. Kuo, "Enhanced broadband and omnidirectional performance of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with ZnO functional nanotree arrays", *Nanoscale*, Vol. 5, No. 9 pp. 3841- 3846, 2013.
- [2] DS. Tsai, CA. Lin, WC. Lien, HC. Chang, YL. Wang and JH. He, "Ultra- High-Responsivity broadband detection of Si metal- semiconductor metal schottky photodetector improved by ZnO nanorod arrays", *ACSNano*, Vol. 5, No. 10, pp. 7748-7753, 2011.
- [3] P. Lalanne and G. M. Morris, "Antireflection behavior of silicon subwavelength periodic structures for visible Light", *Nanotechnology*, Vol. 8, No. 2, pp. 53- 56, 1997.
- [4] S. Muthmann and A. Gordijn, "Amorphous silicon solar cells deposited with non-constant silane concentration", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 95, No. 2, pp. 573- 578, 2011.
- [5] M. Kim, S. Sohn and S. Lee, "Reaction kinetics study of CdTe thin films during CdCl₂ heat treatment", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 95, No. 8, pp. 2295- 2301, 2011.
- [6] J. W. Leem and J. S. Yu, "Indium tin oxide subwavelength nanostructures with surface antireflection and superhydrophilicity for high-efficiency Si-based thin film solar cells", *Opt. Express*, Vol. 20, No. 103, pp. A431-A440, 2012.
- [7] N. Baydogan, T. Ozdurmusoglu, H. Cimenoglu and A. B. Tugrul, "Refractive index and extinction coefficient of ZnO: Al thin films derived by Sol- Gel dip Coating technique, Defect and diffusion forum", Vol. 334, pp. 290-293, 2013.
- [8] Krč, J., Topič, M., *Optical Modeling and Simulation of thin-film photovoltaic devices*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [9] P. D. Paulson, R. W. Bikmire and W. N. Shafarman, "Optical Characterization of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ alloy thin films by spectroscopic ellipsometry", *Journal of Applied Physics*, Vol. 94, No. 2, pp. 879-888, 2003.
- [10] www.refractiveindex.info.
- [11] E. D. Palik, M. Ryzhik; *Handbook of Optical Constant of Solids*, p. 312, Second edition, Academic Press, 1998.
- [12] S. Haussener, Efficiency calculations and optimization analysis of a solar reactor for high temperature step of the zinc/zinc-oxide thermochemical redox cycle, Master thesis, Institute of Energy Technology, Swiss- Federal Institute of Technology, Zurich, 2007.

آرایه نانومیله است.

در مرحله پایانی، تأثیر ارتفاع نانومیله‌ها بر درصد بازتاب مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ تغییرات درصد بازتاب بر حسب زاویه‌ی تابش فرودی برای نانومیله‌هایی با ارتفاع مختلف نشان داده شده است. قطر نانومیله ۶۰ نانومتر و دانسیته سطحی آرایه نانومیله ۶۲ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: تغییرات درصد بازتاب بر حسب زاویه‌ی تابش فرودی برای سه ارتفاع مختلف نانومیله‌ها

همانگونمکه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، درصد بازتاب برای ارتفاع‌های مختلف مقدار تقریباً یکسانی دارد. همچنین همانطورکه ملاحظه می‌شود در غیاب آرایه نانومیله اکسید روی درصد بازتاب بالاتر است. یکنواختی درصد بازتاب در زوایای مختلف تابش فرودی سبب عدم نیاز به استفاده از سامانه ردیاب خورشیدی و کاهش هزینه و پیچیدگی سیستم سلول‌های خورشیدی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

به منظور کاهش تلفات نوری ناشی از بازتاب و افزایش بازده سلول خورشیدی، تلاش بر این است تا با استفاده از لایه‌های ضدبازتاب مناسب در لایه بیرونی سلول خورشیدی CIGS میزان تلفات نوری به حداقل مقدار ممکن برسد. یکی از راه‌ها استفاده از نانوساختارها است. در این تحقیق تأثیر به کارگیری نانوآرایه اکسید روی با پوشش اکسید روی دوبپ شده با آلومینیوم در بیرونی ترین لایه پوشش ضدبازتاب مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات قطر، ارتفاع و دانسیته سطحی آرایه نانومیله (روی پوشش بیرونی AZO) تحلیل شد. نتایج نشان داد به کارگیری نانومیله‌های اکسید روی باعث یکنواختی بیشتر بازتاب نور در زوایای بزرگ‌تر تابش فرودی می‌شود. همچنین مطابق نتایج تغییرات دانسیته سطحی، قطر و ارتفاع نانومیله تأثیر چشمگیری بر روی درصد بازتاب ندارد. با توجه به نتایج این شبیه‌سازی می‌توان ادعا کرد یکنواختی درصد بازتاب