بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی اثر شکل نانوذرات فلزی در تله‌اندازی نوریِ سلول‌های خورشیدی پلاسمونی

حمید مهدیلو و رسول عالی پور

دانشکده علوم، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

چکیده - در این مقاله یک مطالعه دقیق روی سلول‌های خورشیدی فیلم نازک با هدف بالا بردن جذب در آن‌ها انجام داده‌ایم. سلول‌های خورشیدی پلاسمونی با وجود استفاده از مواد کمتر دارای جذب بالایی هستند . مکانیسم عملکرد در سلول‌های خورشیدی پلاسمونی تشدید پلاسمون‌های سطحی جایگزیده توسط نانوذرات فلزی است. هدف این مقاله بررسی اثر شکل نانوذرات روی افزایش جذب در سلول است. ما نشان می‌دهیم که نانومیله‌ها بازده جذب بالاتری نسبت به بقیه نانوذرات از خود نشان می‌دهند. نتایج با روش FDTD در نرم افزار Lumerical شبیه سازی و بدست آمده است.

کلید واژه- سلول خورشیدی، روش FDTD، نرم افزار Lumerical، پلاسمون سطحی جایگزیده.

Consideration the effect of metallic nanoparticles shapes in light trapping by plasmonic solar cells

Hamid Mahdilu, Rasul Alipour

Faculty of science, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz

Abstract- In this paper we have done a rigorous study on the thin film solar cells to enhance the absorption of the cells. Plasmonic solar cells have higher absorption despite use of less material. The action mechanism in plasmonic solar cells is based on the resonance of the localized surface plasmons by metallic nanoparticles. The purpose of this article is consideration the effect of metallic nanoparticles shapes on the absorption of the cells. We realize that the nanorods exhibit higher absorption efficiency in respect to the other nanoparticles.

Keywords: Solar cell, FDTD method, Lumerical software, Localized surface plasmon.

۱- مقدمه

در سرتاسر جهان همیشه نیاز برای انرژی زیاد است. به تازگی برآورد شده است که نیاز جهان برای انرژی در ۳۰ سال آینده ۵۶ درصد افزایش خواهد یافت[۱]. زمانی که حرف از فراوانی انرژی می‌شود، هیچ چیز نمی‌تواند با خورشید به رقابت بپردازد. برخلاف انرژی‌های سوختی که یک روزی تمام می‌شوند، انرژی خورشیدی منبع انرژی فراوان است. در واقع خورشید می‌تواند بیش از انرژی یک ساله جهان را در یک ساعت به ما بدهد. بنابراین انرژی خورشیدی یک راه‌حل امیدوار کننده برای برآورده کردن نیازهای رو به رشد برای انرژی است[۲]. سلول‌های خورشیدی در سال‌های اخیر رشد فوق‌العاده‌ای را داشته است. اما به دلیل گران بودن از لحاظ اقتصادی قابل رقابت با سوخت‌های فسیلی نیستند و این امر از نظر مصرف کننده رضایت بخش نیست. استفاده از مواد پلاسمونی در ساخت سلول‌های خورشیدی باعث کاهش استفاده از ماده
در سلول خورشیدی می‌شود که این امر منجر به کاهش هزینه ساخت سلول خورشیدی می‌شود. یکی از روش‌هایی

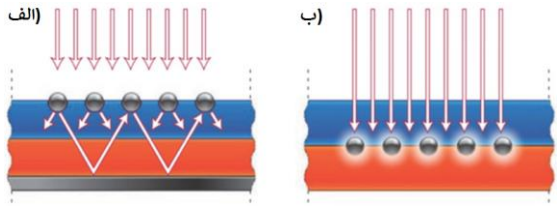
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

که به موجب آن تله‌اندازی نوری در سلول خورشیدی بهتر صورت می‌گیرد استفاده از پلاسمون‌های سطحی جایگزیده است[۳].

۲- تله‌اندازی نوری در سلول‌های خورشیدی پلاسمونی

در سلول‌های خورشیدی پلاسمونی، نانوذرات فلزی در بستری از ماده نیمه رسانا قرار می‌گیرند. تله‌اندازی نوری در این سلول‌ها به وسیله تشدید پلاسمونی جایگزیده توسط نانوذارت فلزی صورت می‌گیرد. یکی از شرایط تحریک پلاسمون سطحی جایگزیده برای محیط‌های شامل نانوذرات فلزی وجود حامل‌های بار آزاد است. نوسانات جمعی و منسجم الکترون‌ها در یک میدان فرودی EM باعث جابه‌جایی الکترون‌ها از هسته خود می‌شوند، که منجر به ایجاد توزیع‌های متفاوتی در بار سطحی می‌شود. هر نوع از توزیع بار سطحی توصیف کننده یک مد جمعی نوسان (پلاسمون سطحی جایگزیده) است. در این سلول‌ها تشدید پلاسمونی سطحی جایگزیده می‌تواند با دو مکانیسم انجام پذیرد: الف- افزایش سطح مقطع پراکندگی روبه جلو مؤثر بوسیله نانوذرات بزرگتر در سطح جلویی سلول (شکل ۱-الف)، ب- افزایش سطح مقطع جذب با تجمع میدان نوری نزدیک توسط نانوذارت کوچکتر در سطح جدایی لایه نیمه رسانا (شکل ۱-ب)[۳].



شکل ۱: تله اندازی نور در سلول خورشیدی پلاسمونی توسط (الف): پراکندگی روبه جلو نور توسط نانو ذرات سطحی سلول خورشیدی، (ب): تجمع میدان نوری نزدیک در اطراف نانو ذرات در سطح جدایی لایه نیمه رسانا[۴].

در شکل ۱-الف نور تابشی با طول موج نزدیک به تشدید پلاسمون به شدت پراکنده می‌شود، برای ذرات با اندازه کوچک‌تر از طول موج نور، سطح مقطع پراکندگی و جذب با روابط زیر محاسبه می‌شود[۵]:

$$C_{sca} = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 |\alpha|^2 \quad (۱)$$

$$C_{abs} = \frac{2\pi}{\lambda}\mathrm{Im}(\alpha) \quad (۲)$$

که در آن $\alpha = 3V\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\right)$ قطبش‌پذیری ذرات، V حجم ذرات، $\varepsilon = \varepsilon_p/\varepsilon_m$، که ε_p تابع دی‌الکتریک ذرات و ε_m متوسط تابع دی‌الکتریک محیط اطراف است. سطح مقطع پراکندگی بهنجار شده با ضریب $Q_{sca} = C_{sca}/A$ و سطح مقطع جذب بهنجار شده با ضریب $Q_{abs} = C_{abs}/A$ بیان می‌شوند، که A سطح مقطع هندسی ذرات است. می‌توان نشان داد که در فرکانس نزدیک به تشدید پلاسمون سطحی، به عنوان مثال $\varepsilon = -2$، قطبش پذیری ذرات بسیار بزرگ است بطوریکه سطح مقطع پراکندگی خیلی بزرگ‌تر از سطح مقطع هندسی آن می‌شود[۵].

در شکل ۱-ب تله‌اندازی نور براساس پلاسمون‌های سطحی جایگزیده توسط نانوذرات کوچکتر در سطح جلویی لایه نیمه رسانا انجام می‌پذیرد. برخلاف ذرات بزرگ‌تر که نور را بیشتر پراکنده می‌کنند، نانوذرات کوچک‌تر با سطح مقطع پراکندگی کم می‌تواند میدان موضعی را افزایش دهد. از آنجا که جذب نوری با شدت میدان الکترومغناطیسی متناسب است، میدان موضعی در اطراف نانوذرات می‌تواند منجر به جذب بیشتر در محیط اطراف شود[۳].

۳- روش تفاضل محدود حوزه زمان

روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) یک روش پیمایش زمانی است که موج‌های الکترومغناطیس پیوسته واقعی را در یک محیط فضایی گسسته محدود شبیه سازی می‌کند. در واقع موج الکترومغناطیسی در فضای داده‌های کامپیوتری انتشار می‌یابد! هم‌زمان با اضافه شدن پله زمانی، عدد موج نیز در شبکه منتشر می‌شود. برای شبیه سازی مدل‌هایی که باید تا بینهایت ادامه یابند، شرایط مرزی جاذب بر صفحات خارجی شبکه قرار داده می‌شوند تا اجازه خروج موج را بدون بازتاب بدهد. پدیده‌های بسیاری از جمله جریان‌های سطحی، پراکندگی، تشدید کاواک توسط مدل پله زمانی معادلات ماکسول به‌خوبی مدل می‌شوند. روش FDTD به‌طور مستقیم معادلات چرخشی ماکسول را حل می‌کند و نیازی به تعریف پتانسیل‌ها ندارد. در این روش نمونه برداری از فضای مورد بررسی برای محاسبه E و H در یک دوره زمانی صورت می‌گیرد. نمونه برداری با دقت زیر طول موج است که بسته به محدوده فرکانسی مورد نظر تعیین می‌گردد. به‌طور معمول ۱۰ تا ۲۰ نمونه برای هر طول موج لازم است. پله

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

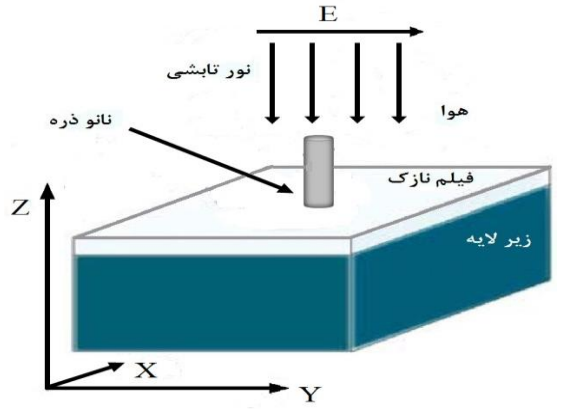
زمانی طوری انتخاب می‌شود که پایداری عددی الگوریتم برآورده شود[۶].

شرکت Lumerical یکی از شرکت‌های تولید کننده نرم افزارها در حوزه اپتیک و فوتونیک است، که یک نرم افزاری به نام مجموعه نرم افزار Lumerical به بازار عرضه نموده است. نرم افزاری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است FDTD Solutions می‌باشد که زیر نرم افزار مجموعه نرم افزار Lumerical است. FDTD Solutions حل کننده مسئله ماکسول ۳ بعدی است که قادر به تجزیه و تحلیل برهمکنش امواج فرابنفش، نور مرئی و مادون قرمز با مواد در ابعاد طول موج است.

۴- مدل‌سازی سلول‌های خورشیدی پلاسمونی بر پایه شکل نانوذرات و نتایج بدست آمده

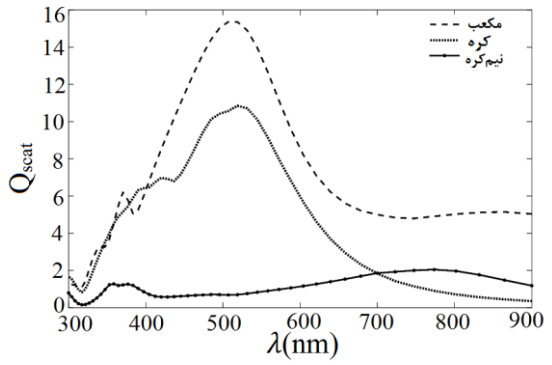
چنانچه در بخش ۲ اشاره شد، وقتی یک نانوذره فلزی در میدان الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد، توزیع بار سطحی در ذره ایجاد می‌شود. نانوذرات با شکل‌های هندسی مختلف، توزیع بارهای متفاوتی خواهند داشت، بنابراین با نور فرودی برهمکنش خواهند داشت. هدف از این مطالعه این است که با انتخاب شکل هندسی مناسب برای نانوذرات، سطح مقطع پراکندگی روبه جلو برای نانوذرات در سطح جلویی سلول و سطح مقطع جذب برای نانوذرات در لایه نیمه رسانا را افزایش دهیم تا بدین صورت بازده جذب در سلول خورشیدی فیلم نازک افزایش پیدا کند. سطح مقطع پراکندگی بهنجار شده بزرگ‌تر از یک بیانگر این است که نانوذرات فلزی قادر خواهند بود که نور فرودی بیشتری نسبت به اندازه خود تحت تأثیر قرار دهند. از طرفی دیگر سطح مقطع جذب بهنجار شده کوچک‌تر از یک به این معنا است که ذره فقط جذب کننده بیشتر نور در یک ناحیه کوچک از سطح مقطع فیزیکی‌اش است. حاصل جمع سطح مقطع‌های بهنجار شده جذب و پراکندگی به عنوان بازده خاموشی Q_{ext} بیان می‌شود.

با استفاده از روش شبیه سازی تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) از مجموعه نرم افزار Lumerical، مطابق شکل ۲ تابش موج نوری بسط‌فام با قطبش میدان در راستای محور y به یک نانوذره از جنس نقره با شکل‌های هندسی مختلف در سطح جلویی سلول و پراکندگی نوری نانوذره در زیر لایه نامحدود سیلیکونی شبیه سازی و محاسبه می‌شود، ضریب شکست فیلم نازک $n_{film}=1.5$، ضریب شکست زیرلایه $n_{subs(a-Si)}=4.23$، ضخامت فیلم نازک ۱۰ نانومتر و ضخامت زیر لایه ۱۵۰۰ نانومتر است. شبیه سازی برای نانوذرات مکعبی، کروی، نیم‌کروی، میله‌ای (استوانه‌ای)، مثلثی و شش ضلعی انجام گرفته است.



شکل ۲: هندسه یک سلول شامل نانوذره میله‌ای که تحت تابش نور عمودی قرار گرفته است. نانوذره به‌عنوان پراکنده کننده نور در سطح جلویی فیلم نازک به داخل زیر لایه بسیار ضخیم می‌باشد.

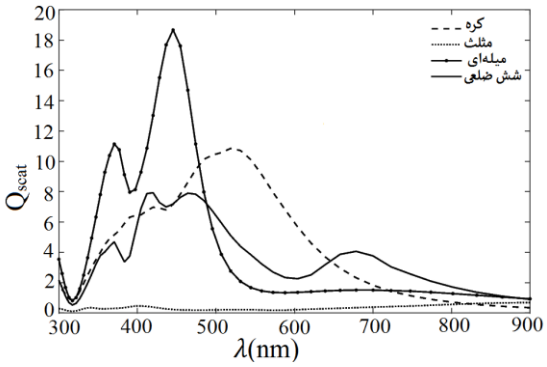
شکل ۳ نمودار سطح مقطع پراکندگی بهنجار شده برای نانوذرات کروی، مکعبی و نیم‌کره‌ای از جنس نقره را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد نانوذرات فلزی مکعبی و کروی پراکندگی بیشتری نسبت به نانوذرات نیم‌کروی مخصوصاً در حول طول‌موج ۵۲۰ نانومتر دارد. این نمودارها با نتایج بدست آمده در مرجع [۷] مطابقت دارد. این نشان دهنده این است که شبیه سازی درست انجام گرفته و نتایج بدست آمده قابل اطمینان می‌باشند. شکل ۴ نمودار سطح مقطع پراکندگی



شکل ۳: نمودار Q_{sca} برحسب طول‌موج برای نانوذرات مکعبی به ابعاد ۱۵۰ نانومتر، کره و نیم‌کره به قطر ۱۵۰ نانومتر از جنس نقره[۷].

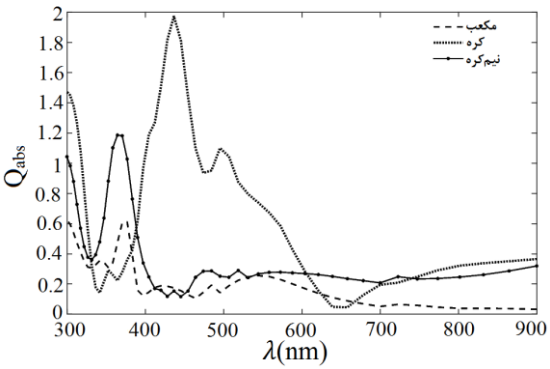
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

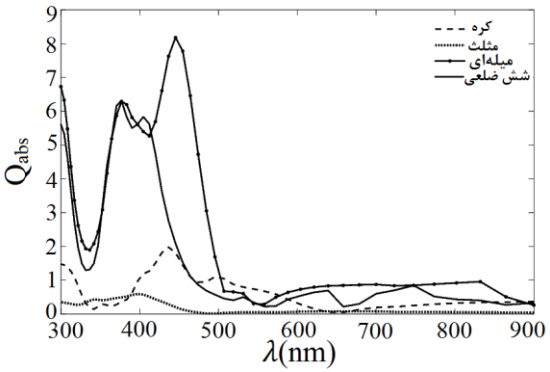


شکل ۴: نمودار Q_{sca} بر حسب طول‌موج برای نانوذرات کروی به قطر ۱۵۰ نانومتر، مثلثی به ابعاد ۱۵۰ نانومتر، میله و شش ضلعی به قطر ۱۰۰ نانومتر و به ترتیب به ارتفاع ۵۰۰ و ۲۰۰ نانومتر از جنس نقره.

بهنجار شده برای نانوذرات کروی، مثلثی، میله‌ای و شش ضلعی از جنس نقره را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، نانوذره فلزی میله‌ای سطح مقطع پراکندگی بیشتری نسبت به بقیه مخصوصاً حول طول‌موج ۴۵۰ نانومتر دارد. به ترتیب شکل‌های ۵ و ۶ نشان دهنده سطح مقطع جذب بهنجار شده برای نانوذرات مکعبی، کروی، نیم‌کروی، مثلثی، میله‌ای و شش ضلعی می‌باشد.



شکل ۵: نمودار Q_{abs} بر حسب طول‌موج برای نانوذره مکعبی به ابعاد ۱۵۰ نانومتر، کره و نیم‌کره به قطر ۱۵۰ نانومتر از جنس نقره.



شکل ۶: نمودار Q_{abs} بر حسب طول‌موج برای نانوذرات کروی به قطر ۱۵۰ نانومتر، مثلثی به ابعاد ۱۵۰ نانومتر، میله و شش ضلعی به قطر ۱۰۰ نانومتر و به ترتیب به ارتفاع ۵۰۰ و ۲۰۰ نانومتر از جنس نقره.

همان‌طور که از شکل ۵ می‌توان فهمید، نانوذره کروی سطح مقطع جذب بیشتری نسبت به بقیه ذرات حول طول‌موج ۴۶۵ نانومتر دارد. همچنین نانوذره نیم‌کره سطح مقطع جذب بیشتری از یک حول طول‌موج ۳۶۵ نانومتر را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ نانوذرات میله‌ای و شش ضلعی سطح مقطع جذب بیشتری نسبت به بقیه نانو ذرات حول طول‌موج‌های ۴۴۵ و ۳۷۶ نانومتر دارد.

۵- نتیجه گیری

در این گزارش نشان داده شد که روش FDTD یک روش مدل‌سازی دقیق برای مطالعه روی ساختار سلول‌های خورشیدی فیلم نازک پلاسمونی است. در این مطالعه تأثیر شکل هندسی نانوذره در افزایش سطح مقطع پراکندگی و جذب نانوذرات بررسی شد و نتایج نشان دادند که نانوذرات میله‌ای سطح مقطع بهنجار شده بالاتری نسبت به سایر هندسه‌ها دارد. با استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توان با یک محاسبه ساده نشان داد که نانو ذره میله‌ای با اندازه استفاده شده در شبیه سازی به دلیل دارا بودن حجم بیشتر نسبت به نانو کره قطبش پذیری بیشتری و در نتیجه سطح مقطع بهنجار شده بالاتری را نشان می‌دهد. منحنی‌های سطح مقطع پراکندگی و جذب بدست آمده از شبیه سازی در شکل‌های ۴ و ۵ این نتیجه را تأیید می‌کنند. بنابراین با بکار گرفتن این نانوذرات در ساخت سلول‌های خورشیدی پلاسمونی می‌توان بازده جذب توسط سلول را به طور چشم‌گیری افزایش داد.

مراجع

[1] U. S. Energy Information Administration. (2013, July). International Energy Outlook 2013 [Online]. Available: http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf [Date Last Accessed 12/10/2013].

[2] T. Markvart, *Solar Electricity*, 2nd ed. Chichester, England: John Wiley Sons, 2000.

[3] Wang, Shu-Yi, *Coupling of Luminescent Solar Concentrators to Plasmonic Solar Cells*. PH. D thesis, Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute, 2014.

[4] H. A. Atwater and A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices," Nat. Mater., vol. 9, no. 3, pp. 205-213, Mar. 2010.

[5] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley Sons, 1983.

[6] Sullivan, Dennis M, *Electromagnetic Simulation Using The FDTD Method*, Piscataway, NJ, IEEE Press, 2000.

[7] Ryan J. Veenkamp, *Light trapping in thin-film silicon solar cells via plasmonic metal nanoparticles*. MSC thesis, Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs, 2014.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]