



بررسی اثر شکل نانوذرات فلزی در تله اندازی نوری سلول های خورشیدی پلاسمونی

حمید مهدیلو و رسول عالی پور

دانشکده علوم، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

چکیده - در این مقاله یک مطالعه دقیق روی سلول های خورشیدی فیلم نازک با هدف بالا بردن جذب در آن ها انجام داده ایم. سلول های خورشیدی پلاسمونی با وجود استفاده از مواد کمتر دارای جذب بالایی هستند. مکانیسم عملکرد در سلول های خورشیدی پلاسمونی تشدید پلاسمون های سطحی جایگزیده توسط نانوذرات فلزی است. هدف این مقاله بررسی اثر شکل نانوذرات روی افزایش جذب در سلول است. ما نشان می دهیم که نانومیل ها بازده جذب بالاتری نسبت به بقیه نانوذرات از خود نشان می دهند. 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

نیازهای رو به رشد برای انرژی است [۲]. سلول های خورشیدی در سال های اخیر رشد فوق العاده ای را داشته است. اما به دلیل گران بودن از لحاظ اقتصادی قابل رقابت با سوخت های فسیلی نیستند و این امر از نظر مصرف کننده رضایت بخش نیست. استفاده از مواد پلاسمونی در ساخت سلول های خورشیدی باعث کاهش استفاده از ماده در سلول خورشیدی می شود که این امر منجر به کاهش هزینه ساخت سلول خورشیدی می شود. یکی از روش هایی

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 می شود، هیچ چیز نمی تواند با خورشید به رقابت بپردازد. برخلاف انرژی های سوختی که یک روزی تمام می شوند، انرژی خورشیدی منبع انرژی فراوان است. در واقع خورشید می تواند بیش از انرژی یک ساله جهان را در یک ساعت به ما بدهد. بنابراین انرژی خورشیدی یک راه حل امیدوار کننده برای برآورده کردن

که در آن $\alpha = 3V \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)$ قطبش پذیری ذرات، V حجم ذرات، $\epsilon = \epsilon_p / \epsilon_m$ ، که ϵ_p تابع دی الکتریک ذرات و ϵ_m متوسط تابع دی الکتریک 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 می شوند، که A سطح مقطع هندسی ذرات است. می توان نشان داد که در فرکانس نزدیک به تشدید پلاسمون سطحی، به عنوان مثال $\epsilon = -2$ ، قطبش پذیری ذرات بسیار بزرگ است بطوریکه سطح مقطع پراکندگی خیلی بزرگتر از سطح مقطع هندسی آن می شود [۵].

در شکل ۱-ب تله اندازی نور براساس پلاسمون های سطحی جایگزیده توسط نانوذرات کوچکتر در سطح جلویی لایه نیمه رسانا انجام می پذیرد. برخلاف ذرات بزرگتر که نور را بیشتر پراکنده می کنند، نانوذرات کوچکتر با سطح مقطع پراکندگی کم می تواند میدان موضعی را افزایش دهد. از آنجا که جذب نوری با شدت میدان الکترومغناطیسی متناسب است، میدان موضعی در اطراف نانوذرات می تواند منجر به جذب بیشتر در محیط اطراف شود [۳].

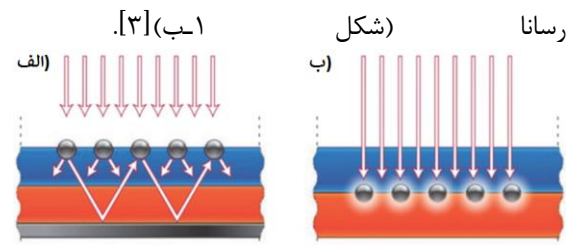
۳- روش تفاضل محدود حوزه زمان

روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) یک روش پیمایش زمانی است که موج های الکترومغناطیس پیوسته واقعی را در یک محیط فضایی گسسته محدود شبیه سازی می کند. در واقع موج الکترومغناطیسی در فضای داده های کامپیوتری انتشار می یابد! هم زمان با اضافه شدن پله زمانی، عدد موج نیز در شبکه منتشر می شود. برای شبیه سازی مدل هایی که باید تا بینهایت ادامه یابند، شرایط مرزی جاذب بر صفحات خارجی شبکه قرار داده می شوند تا اجازه خروج موج را بدون بازتاب بدهد. پدیده های بسیاری از جمله جریان های سطحی، پراکندگی، تشدید کاواک توسط مدل پله زمانی معادلات ماکسول به خوبی مدل می شوند. روش FDTD به طور مستقیم معادلات چرخشی ماکسول را حل می کند و نیازی به تعریف پتانسیل ها ندارد. در این روش نمونه برداری از فضای مورد بررسی برای محاسبه E و H در یک دوره زمانی صورت می گیرد. نمونه برداری با دقت زیر طول موج است که بسته به محدوده فرکانسی مورد نظر تعیین می گردد. به طور معمول ۱۰ تا ۲۰ نمونه برای هر طول موج لازم است. پله

که به موجب آن تله اندازی نوری در سلول خورشیدی بهتر صورت می گیرد استفاده از پلاسمون های سطحی جایگزیده است [۳].

۲- تله اندازی نوری در سلول های خورشیدی پلاسمونی

در سلول های خورشیدی پلاسمونی، نانوذرات فلزی در بستری از ماده نیمه رسانا قرار می گیرند. تله اندازی نوری در این سلول ها به وسیله تشدید پلاسمونی جایگزیده توسط نانوذرات فلزی صورت می گیرد. یکی از شرایط تحریک پلاسمون سطحی جایگزیده برای محیط های شامل نانوذرات فلزی وجود حامل های بار آزاد است. نوسانات جمعی و منسجم الکترون ها در یک میدان فرودی EM باعث جابه جایی الکترون ها از هسته خود می شوند، که منجر به ایجاد توزیع های متفاوتی در بار سطحی می شود. هر نوع از توزیع بار سطحی توصیف کننده یک مد جمعی نوسان (پلاسمون سطحی جایگزیده) است. در این سلول ها تشدید پلاسمونی سطحی جایگزیده می تواند 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 نانوذرات کوچکتر در سطح جدایی لایه نیمه



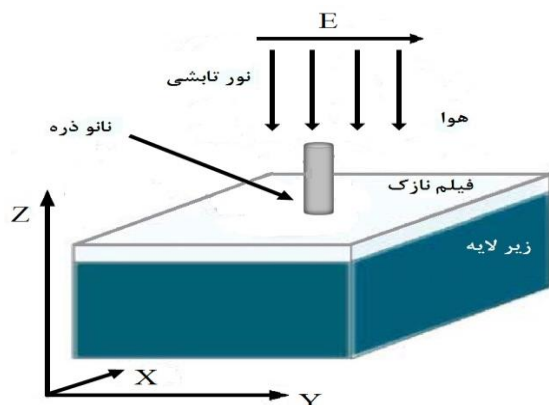
شکل ۱: تله اندازی نور در سلول خورشیدی پلاسمونی توسط (الف): پراکندگی روبه جلو نور توسط نانو ذرات سطحی سلول خورشیدی، (ب): تجمع میدان نوری نزدیک در اطراف نانو ذرات در سطح جدایی لایه نیمه رسانا [۴].

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

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

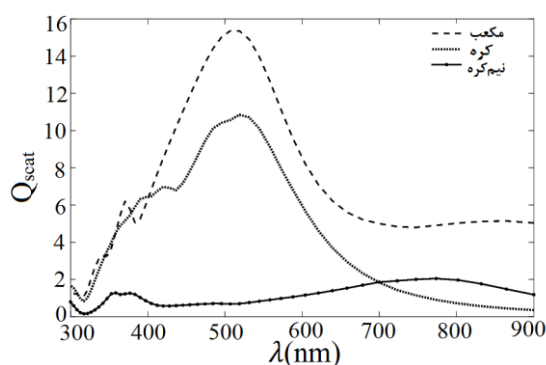
$$C_{abs} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(\alpha) \quad (2)$$

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، نیم کروی، میله ای (استوانه ای)، مثلثی و شش ضلعی انجام گرفته است.



شکل ۲: هندسه یک سلول شامل نانوذره میله ای که تحت تابش نور عمودی قرار گرفته است. نانوذره به عنوان پراکنده کننده نور در سطح جلویی فیلم نازک به داخل زیر لایه بسیار ضخیم می باشد.

شکل ۳ نمودار سطح مقطع پراکندگی بهنجار شده برای نانوذرات کروی، مکعبی و نیم کره ای از جنس نقره را نشان می دهد. همان طور که شکل ۳ نشان می دهد نانوذرات فلزی مکعبی و کروی پراکندگی بیشتری نسبت به نانوذرات نیم کروی مخصوصاً در حول طول موج 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 می باشند. شکل ۴ نمودار سطح مقطع پراکندگی



شکل ۳: نمودار Q_{sca} بر حسب طول موج برای نانوذرات مکعبی به ابعاد ۱۵۰ نانومتر، کره و نیم کره به قطر ۱۵۰ نانومتر از جنس نقره [۷].

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

شرکت Lumerical یکی از شرکت های 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 می باشد 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- مدل سازی سلول های خورشیدی پلاسمونی بر پایه شکل نانوذرات و نتایج بدست آمده

چنانچه در بخش ۲ اشاره شد، وقتی یک نانوذره فلزی در میدان الکترومغناطیسی قرار می گیرد، توزیع بار سطحی در ذره ایجاد می شود. نانوذرات با شکل های 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 فیزیکی اش است. حاصل جمع سطح مقطع های بهنجار شده جذب و پراکندگی به عنوان بازده خاموشی Q_{ext} بیان می شود.

با استفاده از روش شبیه سازی تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) از مجموعه نرم افزار Lumerical، مطابق شکل ۲ تابش موج نوری بسط فام با قطبش میدان در راستای محور Y به یک نانوذره از جنس نقره با شکل های هندسی مختلف در سطح جلویی سلول و پراکندگی نوری نانوذره در زیر لایه نامحدود سیلیکونی شبیه سازی و محاسبه می شود، ضریب

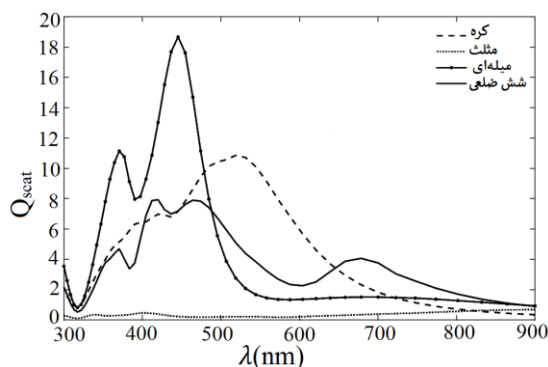
همان طور که از شکل ۵ می‌توان فهمید، نانوذره کروی سطح مقطع جذب بیشتری نسبت به بقیه ذرات حول طول موج ۴۶۵ نانومتر دارد. همچنین نانوذره نیم کره سطح مقطع جذب بیشتری از یک حول طول موج ۳۶۵ نانومتر را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ نانوذرات میله‌ای و شش ضلعی سطح مقطع جذب بیشتری نسبت به بقیه ذرات حول طول موج‌های ۴۴۵ 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.

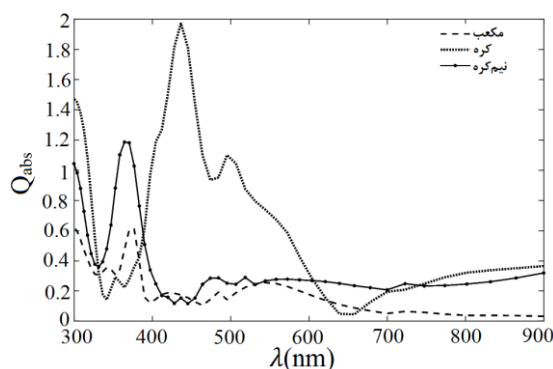
مراجع

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

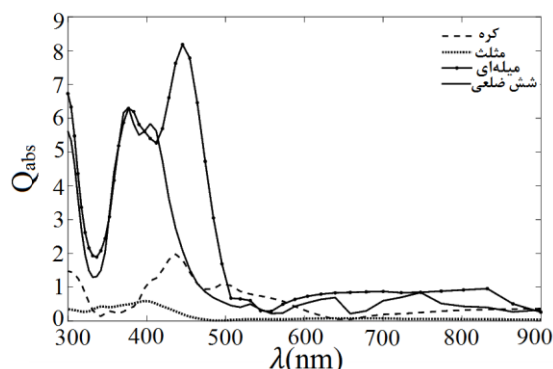


شکل ۴: نمودار Q_{sca} بر حسب طول موج برای نانوذرات کروی به قطر ۱۵۰ نانومتر، مثلی به ابعاد ۱۵۰ نانومتر، میله و شش ضلعی به قطر ۱۰۰ نانومتر و به ترتیب به ارتفاع ۵۰۰ و ۲۰۰ نانومتر از جنس نقره.

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



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



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