NCWNN1394
دومین همایش ملی و کارگاه‌های تخصصی
علوم و فناوری نانو

طراحی سلول‌های خورشیدی نانوپلاسمونیکی با استفاده از روش FDTD

فیروزی، آرزو[۱]؛ محمدی، احمد[۲*]

[1] گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

[۲] گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

mohammadi@pgu.ac.ir

چکیده

به منظور افزایش بازده سلول‌های خورشیدی لایه نازک، ساختاری شامل آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های دی‌الکتریک بر روی سطح و آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های پلاسمونیک با دوره تناوب متفاوت در انتهای سلول را پیشنهاد می‌دهیم. در طراحی ساختار مورد نظر، دوره تناوب را به‌گونه‌ای در نظر می‌گیریم که نانومیله دی‌الکتریک میان نانومیله‌های پلاسمونیک قرار گیرد. ترکیب نانومیله‌های دی‌الکتریک و پلاسمونیک، موجب برانگیختگی مدهای پلاسمونیکی و فوتونیکی می‌شود که در صورت به‌کارگیری نانومیله‌ها به تنهایی امکان برانگیختگی آنها وجود نداشت. برانگیختگی مدهای مورد نظر در گستره‌ی وسیعی از طول‌موج جذب درون سلول را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. با استفاده از روش تفاضل متناهی دامنه زمان چگونگی افزایش بهره سلول‌های خورشیدی لایه نازک را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

کلمات کلیدی: *سلول‌های خورشیدی لایه نازک، افزایش بهره، نانومیله، مدهای فوتونیکی و پلاسمونیکی، روش FDTD.*

Design of Nanoplasmonic Solar Cells by Using the FDTD Method

Firoozi, A[1]; Mohammadi. A[2*]

[1]*Department of Physics, Persian Gulf University, Bushehr 75169, Iran*
[2]*Department of Physics, Persian Gulf University, Bushehr 75169, Iran*
mohammadi@pgu.ac.ir

Abstract

Abstract: To enhance light absorption in thin film solar cells, we propose double sided nanogratings which consist of dielectric nanowires on top and plasmonic nanowires at the bottom of the solar cells. We consider half period offset between the two nanogratings. Such combination is capable of exciting both plasmonic and photonic modes. Two dimensional finite difference time domain method (FDTD) is employed to investigate the effect of front and back nanogratings on absorption enhancement in thin film solar cells.

Keywords*: Thin Film Solar Cells, Absorption Enhancement, Nanogratings, Photonic and plasmonic modes, FDTD Method.*

مقدمه

با پیشرفت علم در زمینه‌های گوناگون، بشر نیاز روزافزونی به انرژی و منابع تولید آن پیدا کرده است. در عین حال مشکل عمده منابع تولید انرژی به روش‌های سنتی (سوخت‌های فسیلی، سوخت‌های هسته‌ای و ...) آلودگی زیست محیطی و پایان یافتن این منابع تولید انرژی می‌باشد. بنابراین یافتن منابع جدید انرژی که هم تا حدی پایان‌ناپذیر باشد و هم اینکه باعث آلودگی محیط زیست نشود، امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از انرژی‌هایی که مورد توجه بشر قرار گرفته است، انرژی خورشید است. سلول‌های خورشیدی ابزارهای اپتوالکترونیکی هستند که انرژی نورانی خورشید را به‌طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. سلول‌های خورشیدی از یک ماده جاذب که اغلب از جنس سیلیکون می‌باشد، ساخته می‌شوند. ضخامت ماده جاذب در نسل اول سلول‌های خورشیدی در حدود ۱۵۰ - ۳۰۰ میکرومتر می‌باشد، که درصد بالایی از هزینه ساخت سلول‌های خورشیدی صرف خالص‌سازی سیلیکون، تکنیک‌های ساخت و ... می‌شود. از این‌رو توجه محققان به نسل دوم سلول‌های خورشیدی با ضخامتی در حدود چند نانومتر تا چند ده میکرومتر جلب شده است. مشکلی که به دنبال کم کردن ضخامت ماده جاذب ایجاد می‌شود کم شدن طول جذب موثر نور توسط نیم‌رسانا می‌باشد، که باعث کاهش بهره‌ی سلول‌های خورشیدی لایه نازک در مقایسه با سلول‌های خورشیدی نسل اول می‌شود. بنابراین یافتن راهی به منظور افزایش جذب اپتیکی درون سلول، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

راه‌کارهای متنوعی به منظور افزایش بهره‌ی سلول‌های خورشیدی پیشنهاد شده است. از جمله: به کارگیری آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های پلاسمونیکی بر روی سطح سلول [۱]، استفاده از نانومیله‌های دی‌الکتریک بر روی سطح [۲]، به کارگیری نانومیله‌های جفت شده بر روی سطح سلول [۳]، قرار دادن نانومیله‌های پلاسمونیکی بر روی سطح و در انتهای سلول [۴]، به کارگیری آرایه‌ای نامنظم از نانومیله‌های دی‌الکتریک بر روی سطح سلول [۵].

راه‌کار ارائه شده در این مقاله به منظور افزایش بهره‌ی سلول‌های خورشیدی لایه نازک با بهره‌گیری از چندین پدیده اپتیکی، شامل به‌کارگیری آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های دی‌الکتریک بر روی سطح و آرایه‌ای از نانومیله‌های پلاسمونیک با دوره تناوب متفاوت در انتهای سلول می‌باشد. دوره تناوب را به‌گونه‌ای در نظر می‌گیریم که نانومیله دی‌الکتریک میان نانومیله‌های پلاسمونیک قرار گیرد. نشان می‌دهیم، ترکیب نانومیله‌های دی‌الکتریک و پلاسمونیک، موجب برانگیختگی مدهای پلاسمونیکی و فوتونیکی می‌شود که در صورت به‌کارگیری نانومیله‌ها به تنهایی امکان برانگیختگی آن‌ها وجود نداشت. برانگیختگی مدهای مورد نظر در گستره‌ی وسیعی از طول‌موج‌ها جذب درون سلول را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. به‌منظور طراحی و شبیه‌سازی یک ساختار بهینه روش تفاضل متناهی دامنه زمان را به دلیل توانایی در حل مسائل پیچیده الکترومغناطیسی در دامنه زمان، به ویژه برهم‌کنش نور با انواع مواد، برگزیده‌ایم.

روش تفاضل متناهی دامنه زمان

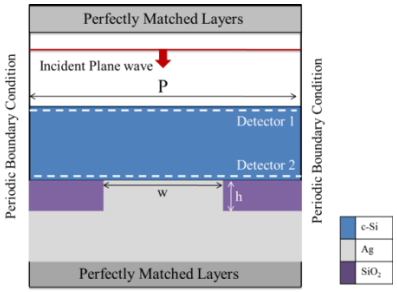
در این روش با شبکه‌بندی فضای مدل‌سازی و اختصاص خواص اپتیکی به سلول‌های این شبکه، ساختار مورد مطالعه و میدان‌های برهم‌کنش‌کننده تعریف می‌گردند [۶]. محل قرارگیری مولفه‌های میدان الکترومغناطیسی بر روی هر سلول به صورت یک در میان به گونه‌ای تعیین می‌گردد که هر مولفه میدان الکتریکی توسط مولفه‌های میدان مغناطیسی و هر مولفه میدان مغناطیسی توسط مولفه‌های میدان الکتریکی احاطه گردد. با گسسته‌سازی معادلات ماکسول از طریق اعمال تفاضل متناهی بر روی مشتق زمانی و مکانی مولفه‌های میدان شش معادله به هنگام‌سازی برای شش مولفه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی حاصل می‌شود. به عنوان نمونه معادله به‌هنگام‌سازی برای D_x به صورت رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$D_x^{n+1/2}(i+1/2,j)=D_x^{n-1/2}(i+1/2,j)+\frac{\Delta t}{\Delta x\cdot\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\begin{pmatrix}H_z^n(i+1/2,j+1/2)\\-H_z^n(i-1/2,j+1/2)\end{pmatrix} \quad (۱)$$

در مد الکتریکی عرضی (TE)، میدان الکتریکی در صفحه‌ی xy و میدان مغناطیسی در امتداد محور z قرار می‌گیرد و در مد مغناطیسی عرضی (TM)، میدان مغناطیسی در صفحه‌ی xy و میدان الکتریکی در امتداد محور z قرار می‌گیرد. در این مقاله ساختار مورد نظر تحت تابش موج با قطبش TE قرار می‌گیرد. دلیل تابش موج با قطبش TE به سلول، توانایی برانگیختگن پلاسمون سطحی توسط این قطبش در مقابل موج با قطبش TM می‌باشد.

نتـایج

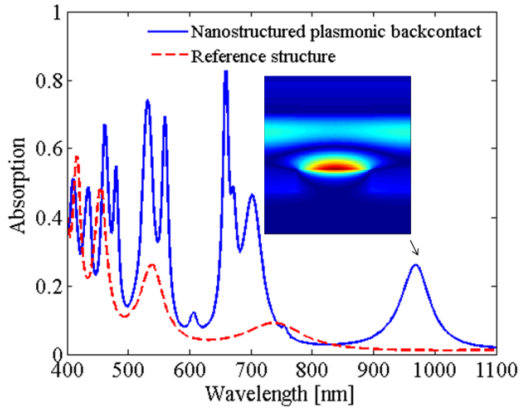
در ابتدا به منظور بررسی تاثیر نانومیله‌های پلاسمونیک بر افزایش جذب اپتیکی درون سلول، ساختاری شامل آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های پلاسمونیک در انتهای سلول در نظر می‌گیریم. ساختار مورد نظر به همراه شرایط مرزی در روش FDTD در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: فضای شبیه‌سازی در روش FDTD. به کارگیری آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های پلاسمونیکی در انتهای سلول.

در مرزهای بالا و پایین به منظور جلوگیری از بازتاب‌های غیر فیزیکی به درون فضای مسئله از شرایط مرزی جاذب [۶] استفاده می‌کنیم و به دلیل تناوبی بودن ساختار مسئله در مرزهای چپ و راست، شرایط مرزی دوره‌ای [۶] اعمال می‌گردد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است برای محاسبه جذب از دو آشکارساز در ابتدا و انتهای فضای شبیه‌سازی استفاده می‌کنیم. با تفاضل شار محاسبه شده توسط این دو آشکارساز می‌توان جذب درون سلول را محاسبه کرد. دوره تناوب (P)، ضخامت (w) و ارتفاع نانومیله‌ها (h) به ترتیب ۲۰۰، ۱۰۰ و ۸۰ نانومتر و ضخامت ماده جاذب ۲۰۰ نانومتر انتخاب شده است.

نانومیله‌ها درون لایه‌ی دی‌الکتریک به ضریب شکست ۱/۵ قرار گرفته‌اند. نتیجه محاسبه‌ی جذب اپتیکی درون سلول برحسب طول موج در شکل (۲) نشان شده است. با مقایسه میزان جذب محاسبه شده در دوحالت (بدون در نظر گرفتن نانومیله‌ها و در حضور نانومیله‌های پلاسمونیک) در نظر گرفته شده، افزایش جذب اپتیکی درون سلول در حضور نانومیله‌ها در طول‌موج‌های بلند که سیلیکون در این نواحی جذب پایینی دارد، قابل ملاحظه است. نانومیله‌های به‌کار گرفته شده در انتهای سلول موجب برانگیختگی مدهای پلاسمونیکی در طول‌موج ۹۵۰ نانومتر می‌شود. توزیع شدت میدان در طول موج ۹۵۰ نانومتر محاسبه شده و در شکل ۲ نشان داده شده است، که تایید کننده برانگیختگی مد پلاسمونیکی در این طول‌موج می‌باشد.

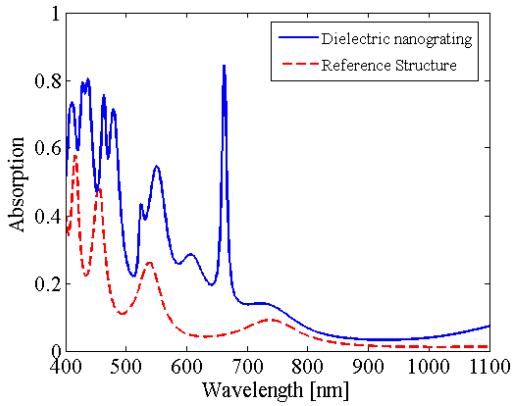


شکل ۲: جذب اپتیکی درون سلول برحسب طول موج در حضور آرایه‌ای از نانومیله‌های پلاسمونیک در انتهای سلول و توزیع شدت میدان مغناطیسی درون سلول و اطراف نانومیله‌ها در طول موج ۹۵۰ نانومتر.

در مرحله بعد به منظور بررسی تاثیر نانومیله‌های دی‌الکتریک بر افزایش بهره سلول، آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های دی‌الکتریک را بر روی سطح سلول قرار می‌دهیم. نمودار جذب اپتیکی درون سلول در شکل ۳ نشان داده شده است.

نانومیله‌های دی‌الکتریک قرار گرفته شده بر روی سطح سلول بخش عمده‌ای از نور فرودی را به درون سلول هدایت می‌کنند و همچنین موجب پراش نور فرودی در زوایای مختلف می‌شوند. اگر زاویه نور پراشیده شده توسط

نانومیله‌ها بزرگتر از زاویه حد باشد، در این صورت بازتابش کلی رخ می‌دهد و نور از محیط خارج نمی‌شود و درون سلول به دام می‌افتد، بنابراین نور پراشیده شده می‌تواند موجب برانگیختگی مدهای موجبری در طول‌موج‌های کوتاه درون ماده جاذب شود.

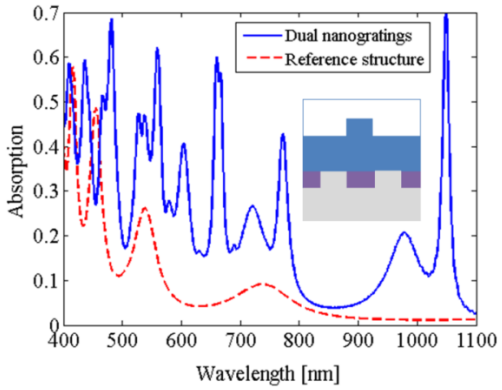


شکل ۳: جذب اپتیکی درون سلول برحسب طول موج در حضور آرایه‌ای از نانومیله‌های دی‌الکتریک برروی سطح سلول خورشیدی.

به منظور بهره‌گیری از تمام پدیده‌های اپتیکی بررسی شده در افزایش بهره سلول‌های خورشیدی، ساختاری شامل آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های دی‌الکتریک بر روی سطح و آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های پلاسمونیک با دوره تناوب متفاوت در انتهای سلول ارائه می‌دهیم (شکل ۴)، که جذب درون سلول را با بهره‌گیری از تمامی این پدیده‌ها به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. نمودار جذب اپتیکی درون سلول در این حالت در شکل ٤ نشان داده شده است. با به‌کارگیری ساختار طراحی شده علاوه بر تقویت مدهای اپتیکی و پلاسمونیکی که در حالت قبل نیز حضور داشتند، در برخی از طول موج‌ها پیک‌های جدیدی به وجود آمده است که به دلیل طراحی درنظر گرفته شده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، نشان دادیم با به‌کارگیری آرایه‌ای متناوب از نانومیله‌های دی‌الکتریک از جنس سیلیکون بر روی سطح می‌توان جذب درون سلول در طول‌موج‌های کوتاه را به میزان قابل توجهی افزایش داد. همچنین به کارگیری آرایه‌ای از نانومیله‌های پلاسمونیک در انتهای سلول به دلیل ایجاد میدان الکترومغناطیسی قوی درون سلول جذب درون سلول در طول‌موج‌های بلند را فزایش می‌دهد. در پایان نشان دادیم که با ترکیب نانومیله‌های دی‌الکتریک بر روی سطح و نانومیله‌های پلاسمونیک در انتهای سلول و با طراحی دقیق دوره تناوب می‌توان جذب درون سلول را با به‌کارگیری تمامی پدیده‌های اپتیکی مورد بحث به میزان قابل توجهی افزایش داد.



شکل ۴: جذب اپتیکی درون سلول برحسب طول موج با در نظر گرفتن ساختار طراحی شده به منظور افزایش بهره سلول.

مرجع‌ها

[1] J. N. Munday and H. A. Atwater, “Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells by combining metallic gratings and antireflection coatings,” *Nano. Lett.*11, (2011) 2195-2201.

[2] M. B. Duhring, N. A. Mortensen, O. Sigmund, “Plasmonic versus dielectric enhancement in thin–film solar cells,” *Appl. Phys. Lett.*100, (2012) 211914.

[3] A. Firoozi, A. Mohammadi, “Absorption Enhancement in Solar cells by Plasmon Coupling,” *submitted to IJNN.*

[4] Shen, H, and Maes, B, “Combined plasmonic gratings in organic solar cells,” *Opt. Express.* **19,** (2011) A1202–A1210

[5] Martins, E.R; Li, J; Liu, Y; Depauw, V; Chen, Z; Zhou, J; Krauss, T.F, “Deterministic quasi-random nanostructures for photon control,” *Nature Communications* (2013).

[6] Taflove A, Hagness S 2005 *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method,* (John Wiley).