بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بهبود جذب نوری سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکانی در اثر حساس سازی با آرایه ای از نانوذرات فلزی نقره

سید سامان کهنه پوشی*، ابوالفضل چمن مطلق#

*تهران، جهاد دانشگاهی تربیت مدرس، گروه تکنولوژی نانوذرات saman.device@yahoo.com

#استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. achaman@ihu.ac.ir

چکیده - در سلول‌های خورشیدی لایه نازک به منظور افزایش جذب، طراحی‌های مختلفی از جمله زبر کردن سطح سلول، استفاده از لایه‌های بازتابی در زیر سلول و حساس‌سازی با نانوذرات فلزی معرفی شده است. در این مقاله به منظور افزایش جذب، از نانوذرات فلزی روی سلول استفاده شده است. در اثر تشدید پلاسمونی محلی، و همچنین پراکنش نور ناشی از وجود نانوذرات و به تله‌اندازی نور در داخل ساختار، طیف جذبی در بازه‌ای از طول موج در محدوده‌ای که با توجه به طیف تابشی استاندارد *AM 1.5* شدت نور خورشید بیشتر است، ۲۰٪ بهبود می‌یابد. تاثیر فاصله نانوذرات از هم و اندازه آنها روی طیف جذبی بررسی شده است. از آنجایی که فاصله نانوذرات روی بازتاب و پراکنش نور به داخل ساختار تاثیرگذار است دیده می‌شود که به ازای فاصله خاصی می‌توان بیشترین افزایش جذب را حاصل کرد این فاصله برای نانوذرات با قطر ۴۰ و ۸۰ نانومتر به ترتیب ۴۰ و ۶۰ نانومتر می‌باشد.

کلید واژه- سلول خورشیدی لایه نازک، نانوذرات نقره، پلاسمون محلی، پراکنش نوری.

Improvement of thin film silicon solar cell light absorption caused decorated with the array of metallic Ag nanoparticles

S. Kohnehpoushi*, A. Chaman Motlagh#

* Tehran, Nanotechnology Research Group, Academic Center for Education, Culture & Research (ACECR) on TMU, Tehran, Iran saman.device@yahoo.com

Tehran, Emam Hossein university, Faculty of Electrical and Computer Engineering, achaman@ihu.ac.ir

Abstract- It is used different ways in order to increase the absorption of thin film solar cells. Roughen the surface, Use reflective layer under the cell and sensitization with metal nanoparticles such in. In this work, we use finite difference time domain (FDTD) method to analyze the plasmonic effect of Ag nanoparticles (NPs) on optical behaviour of thin film solar cell. Light absorption in the absorber layer is a key parameter to have an efficient cell. So in present work we utilize Ag NPs to enhance light absorption. By decorating Ag NPs on the cell, incident light will scatter and as well as if it is in the resonance frequency of electrons collective oscillations in the Ag NPs, then local surface plasmon resonances (LSPRs) will be excited that can increases field intensity around Ag NPs. The wavelengths of the sunlight with AM 1.5 intensity profile that intensity is higher, Absorption is increased by 20%. Reflection and scattering of light into the cell will be related to NPs distance. Seen that for a certain distance, absorption enhancement is higher. This distance for NP with diameters of 40 and 80 nm will be 40 and 60 nm respectively.

Keywords: Thin film solar cell, Ag Nanoparticles, Local plasmon, Light scattering.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

در سلول‌های خورشیدی کاهش هزینه به ازای تولید واحد انرژی یکی از مهمترین پارامترهایی است که باید مد نظر قرار گیرد. در جهت تحقق این هدف سلول های خورشیدی لایه نازک به عنوان نسل دوم سلول های خورشیدی معرفی شد[۱، ۲]. نیمه‌هادی‌های کریستالی یا بی نظم Si، $CuInSe_2$، GaAs، CdTe و ... از جمله موادی هستند که در این نوع سلول ها استفاده می شوند[۳]. بیشترین میزان بازده اندازه گیری شده برای سلول‌های *CIGS*، *CdTe*، *a-Si*، *nc-Si* به ترتیب برابر با ۲۰/۱، ۱۶/۷، ۹/۵، و ۱۰/۱ درصد است[۴]. مشکل اصلی این نوع ساختارها، جذب پایین در لبه باند هدایت است، بنابراین به تله انداختن نور در این ساختارها برای افزایش ضریب جذب بسیار مهم است. در ساختارهای با ضخامت معمولی از روش زبر کردن سطح به صورت تکه‌های هرمی شکل که باعث افزایش سطح نورگیر و به تله انداختن نور می شود، میزان جذب نور را افزایش می دهند. ولی در ساختارهای لایه نازک از این روش نمی‌توان استفاده کرد[۵]. یکی از پیشنهادهایی که برای بهبود جذب در این ساختارها مطرح می‌شود استفاده از نانو ساختارهای فلزی است که می‌تواند نور را به تله بیاندازد و بازده سلول را بهبود دهد[۶]. بررسی های تجربی روی سلول های خورشیدی آلی[۷، ۸] و غیرآلی[۹، ۱۰] این افزایش جذب را در اثر حساس سازی توسط نانوذرات فلزی نشان می‌دهد. بهبود جذب و افزایش بازده با اضافه کردن لایه بازتابی توسط Haug طراحی و ساخته شده است[۱۱]. نانوذرات فلزی با تبدیل نور ورودی به میدان پلاسمونی می تواند در طیف موج های خاصی نور ورودی را تقویت نموده و باعث افزایش جذب در سلول شود. بعلاوه حساس سازی توسط نانوذرات فلزی باعث پراکنش بیشتر نور به داخل ساختار شده و می‌تواند منجر به جذب بیشتر نور ورودی شود[۶]. در این مقاله طیف جذبی سلول خورشیدی سیلیکانی بررسی شده است. ضخامت لایه فعال ۲۴۰ نانومتر لحاظ شده و از لایه ITO با ضخامت ۲۰ نانومتر به عنوان کاتد و از Al با ضخامت ۸۰ نانومتر به عنوان آند استفاده شده است. آرایه‌ای از نانوذرات فلزی نقره به منظور حساس سازی سلول روی لایه ITO چیده شده و تاثیر آن روی جذب سل بررسی شده است. تاثیر فاصله ذرات از هم و اندازه‌های مختلف ذرات روی طیف جذبی، شبیه سازی شده است. در نهایت دوره تناوب بهینه معرفی خواهد شد.

۲- تئوری و فیزیک

مکانیزم کار سلول های خورشیدی تولید الکترون- حفره در اثر تابش نور خورشید است. در سلول های خورشیدی نیمه هادی، نور به سلول تابیده شده و در ناحیه فعال، جذب می شود. در اثر جذب نور، زوج الکترون- حفره تولید شده و به ترتیب به سمت آند و کاتد حرکت می‌کنند. از آن‌جایی که ضخامت لایه جاذب کم است، درصدی از نور جذب شده و مابقی از سل عبور می کند. با حساس سازی توسط نانوذرات روی سل، می‌توان نور را به تله انداخت و درصد بیشتری از نور را جذب کرد. ساختارهای پلاسمونی به سه طریق می‌توانند در به تله انداختن و جذب حداکثری نور در سلول‌های خورشیدی تک لایه نقش ایفا کند. در مکانیزم اول نانو ذره‌های فلزی می‌توانند باعث پراکنش نور هنگام برخورد با سطح شده و در نتیجه مسیر بیشتری را در ناحیه جاذب طی کند که این باعث افزایش مقدار جذب خواهد شد. همچنین نانوذره های فلزی می‌تواند به عنوان آنتن‌های زیر طول موج به صورت میدان نزدیک به نیمه‌هادی کوپل شود. در مکانیزم سوم برای حالتی که لایه فلزی چین دار در زیر لایه جاذب، وجود دارد، نور خورشید به پلاریتون پلاسمون سطحی تبدیل شده که می‌تواند در سطح فصل مشترک فلز و نیمه‌هادی تحریک شده و در لبه نیمه‌هادی هدایت شود. این امواج پلاسمونی می‌تواند در عرض سلول منتشر شده و جذب شود که منجر به تولید الکترون- حفره خواهد شد[۶]. پراکنش نور از یک نانوذره فلزی که در یک محیط همگن قرار دارد از تمامی جهات مثل هم است ولی وقتی این نانوذره در فصل مشترک بین محیط قرار می‌گیرد دیگر این قاعده صادق نبوده و پراکنش به سمت محیطی که ضریب شکست بالاتری دارد، بیشتر است. بنابراین نانو ذره را در سطح فصل مشترک بین هوا و دی-الکتریک قرار می‌دهیم که باعث می‌شود نور به سمت ناحیه جاذب پراکنده شود و در نتیجه مسیر بیشتری را در داخل سیلیکون ببینند. البته مشاهدات تجربی ادعای بالا را نشان می‌دهد ولی تا به حال به صورت سیستماتیک روی آن کار نشده است[۱۲]. شکل و اندازه‌ی نانو ذره پارامتر مهمی در پراکنش نور به سمت لایه‌ی جاذب است. ذره-های کوچکتر با ممان دو قطبی نزدیکتر به نیمه‌هادی مقدار بیشتری نور را به سمت نیمه‌هادی زیرین پراکنده می‌کند[۶]. برای تابع دی-الکتریک ذرات فلزی از مدل درود- لورنتز با دو پارامتر تنظیم استفاده شده است[۱۳]، که با نتایج تجربی جانسون و کریستی هم‌خوانی خوبی دارد[۱۴]. تاثیر اندازه ذرات در این مدل لحاظ شده است. می-توان مدل را به صورت رابطه (۱) نوشت

$$\varepsilon_{Ag}(\omega,\alpha,\beta) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\alpha\gamma(a))} + \frac{f\omega_L^2}{\omega_L^2 + \omega^2 + i\beta\Gamma_L\omega} \quad (۱)$$

که Γ_L، ω_L و ω_p به‌ترتیب ضریب میرایی، بسامد میرایی و بسامد پلاسما است که برای نقره به ترتیب $۱/۷۳\times۱۰^{۱۵}$ ، ۸×۱۰^{۱۵} ، $۱/۳۹\times۱۰^{۱۶}$ است. α و β نیز که ضرایب تنظیم هستند به ترتیب ۱/۳ و ۰/۲ فرض شده است [۱۳]. ثابت میرایی پلاسمونی که به اندازه وابسته است به صورت رابطه (۲) است.

$$\gamma(a) = \gamma_b + AV_F/a \quad (۲)$$

که γ_b ثابت میرایی برای توده نقره است برابر با $۳/۱۹\times۱۰^{۱۳}$ ، V_F سرعت فرمی، a شعاع نانوذره، A ضریبی است که بسته به اینکه اطراف نانوذره را چه ماده‌ای پوشانده باشد متفاوت است. برای ذرات داخل هوا این ضریب ۰/۷۵ است که برای ذرات داخل دی‌الکتریک این ضریب بزرگتر خواهد بود.

با استفاده از تئوری رایلی قابلیت پلاریزه شدن (α) برای کره با ثابت دی‌الکتریک نسبی ε_r و حجم V به صورت زیر می‌باشد

$$\alpha = \varepsilon_0 3V\frac{\varepsilon_r + 1}{\varepsilon_r + 2} \quad (۳)$$

در نتیجه سطح مقطع جذبی و پراکنش به صورت زیر است:

$$C_{scattering} = \frac{k^4}{6\pi}|(\alpha/\varepsilon_0)|^2 = \frac{k^4}{6\pi}(3V)^2\frac{(\varepsilon_r' - 1)^2 + \varepsilon_r''^2}{(\varepsilon_r' + 2)^2 + \varepsilon_r''^2} \quad (۴)$$

$$C_{absorption} = k\Im(\alpha/\varepsilon_0) = 3kV\frac{3\varepsilon_r''}{(\varepsilon_r' + 2)^2 + \varepsilon_r''^2} \quad (۵)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$k = {}^{2\pi}/_{\lambda} \quad (۶)$$

با توجه به معادلات بالا، سطح مقطع جذبی و پراکنش دارای تشدید پلاسمونی در فرکانس تقریبی $E_{resonance}/h$ است. برای ذرات آزاد در خلاء، انرژی تشدید برای نقره ۳.۴۷ الکترون- ولت و برای طلا ۲.۶ الکترون-ولت محاسبه شده است. هنگامی‌که این ذرات در محیطی با قابلیت پلاریزه شدن قرار گیرند، فرکانس تشدید به انرژی‌های پایین‌تر یا به سمت قرمز طیف مرئی انتقال می‌یابد.

برای محاسبه جذب از نرم افزار Lumerical FDTD Solution استفاده شده است. در این نرم افزار جذب بر واحد حجم با دیورژانس بردار Poynting محاسبه می‌شود

$$P_{abs} = -.5\ real(\vec{\nabla}.\vec{P}) \quad (۷)$$

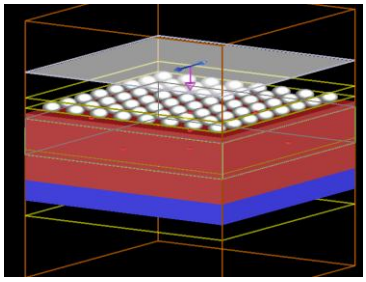
که در نهایت به صورت رابطه (۸) استخراج می‌شود.

$$P_{abs} = -.5\ \omega\ |E|^2\ imag(\varepsilon) \quad (۸)$$

که E میدان الکتریکی، ε تابع دی‌الکتریک لایه جاذب و ω بسامد نور ورودی است، در واقع توان جذبی تابعی از فرکانس خواهد بود.

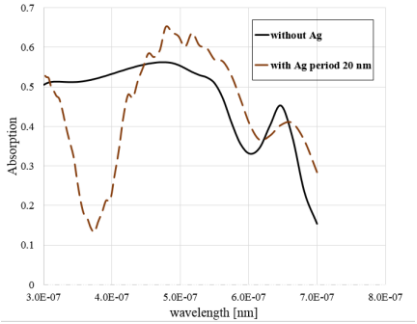
۳- نتایج و بحث

شکل ۱ شماتیک ساختاری سلول شبیه سازی شده را نشان می دهد.



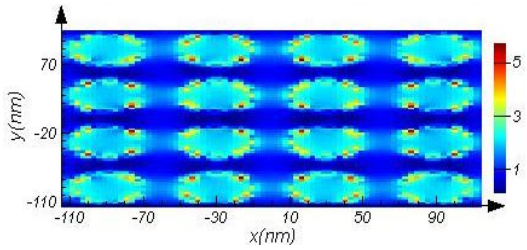
شکل۱- شماتیک ساختاری سلول برای حالتی که با نانوذرات نقره به قطر ۴۰ نانومتر حساس شده است.

لایه سیلیکانی بی نظم با ضخامت ۲۴۰ نانومتر به عنوان لایه جاذب استفاده شده است. از لایه های ITO و Al با ضخامت های ۲۰ نانومتر و ۸۰ نانومتر به ترتیب به عنوان کاتد و آند استفاده شده است. همان‌گونه که از شکل نشان داده شده است، آرایه‌ای از نانوذرات روی سل چیده شده که به منظور بهبود پلاسمونی استفاده می شود. نور از بالا به ساختار تابیده شده است. ابعاد سل ۵۰۰ * ۵۰۰ نانومتر فرض شده و شرایط مرزی در جهت z و جهت های y،x به ترتیب PML و Periodic در نظر گرفته شده است. تابع دی الکتریک سیلیکان بی نظم از داده‌های SOPRA N&K Database استخراج شده است. شکل ۲ طیف جذبی سلول را نشان می دهد.



شکل۲- طیف جذبی لایه سیلیکانی برای حالتی که با نانوذره حساس نشده است و همچنین در حالت حساس شده با آرایه ای از نانوذرات نقره به قطر ۴۰ نانومتر و فاصله ۲۰ نانومتر.

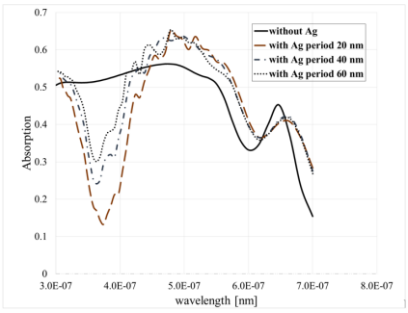
همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می شود، حساس سازی توسط نانوذرات فلزی منجر به افزایش جذب در بازه‌ای از طول موج شده است. این افزایش جذب به پراکنش نور به محیط جاذب در اثر وجود نانوذرات مربوط است. نور به جای اینکه مسیری مستقیم در طول سلول را طی کند و درانتها از سلول خارج شود، در اثر برخورد با نانوذرات، پراکنده شده و مسیر بیشتری را در سلول می ماند و در آن به تله می افتد. در نتیجه امکان جذب فوتون های بیشتر مهیا می شود. از آن‌جایی که نور در مسیر تابش قبل از اینکه به لایه جاذب برسد با نانوذرات مواجه می شود، مقداری از فوتون ها در فلز جذب می شوند و به لایه جاذب نمی رسند، از اینرو در مجاورت طول موج تشدید پلاسمونی (۳۶۰ نانومتر) که نانوذرات بیشترین جذب را دارند، میزان جذب لایه جاذب کاهش پیدا کرده است. با توجه به طیف تابشی خورشید AM 1.5 در طول موج هایی که شدت تابش نور خورشید بیشتر است، افزایش جذب ساختار تاثیر بیشتری نسبت به سایر طول موج های طیف دارد، بنابراین در مجموع نانوذرات پلاسمونی باعث افزایش جذب ساختار و نتیجتا افزایش بازده سلول خواهند شد. شکل ۳ پروفایل شدت میدان الکتریکی آرایه نانوذرات را در طول موج تشدید پلاسمونی نشان می‌دهد.



شکل۳- پروفایل شدت میدان الکتریکی آرایه نانوذرات با قطر ۴۰ نانومتر و فاصله ۴۰ نانومتر در طول موج تشدید پلاسمونی (۳۶۰ نانومتر).

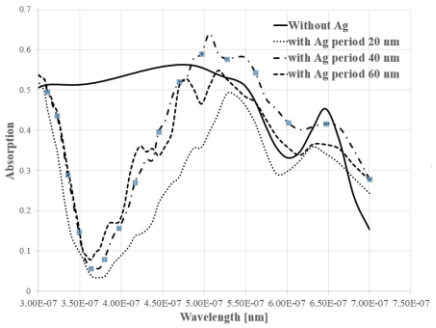
همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می شود، شدت میدان الکتریکی در اثر تحریک پلاسمون های محلی، در اطراف نانوذرات بیشتر است. این امواج پلاسمونی می تواند با ناحیه جاذب کوپل شده و باعث تولید الکترون- حفره بیشتری شود. فاصله نانوذرات از هم روی میزان پراکنش نور به داخل و همچنین میزان جذب سلول تاثیرگذار خواهد بود. در شکل ۴ دیده می شود که ساختار در حالت هایی که فاصله نانوذرات از هم متفاوت است، طیف جذبی رفتاری متفاوت نشان می دهد. دیده می شود هرچه فاصله ذرات از هم بیشتر باشد، میزان افت جذب در مجاورت طول موج تشدید پلاسمونی کمتر خواهد بود، زیرا میزان جذب در نانوذرات کمتر بوده و در نتیجه میزان نور بیشتری می تواند به ناحیه جاذب برسد. ولی میزان پراکنش نور نیز در این حالت کمتر بوده و در نتیجه میزان افزایش جذب در بازه طیف جذبی کمتر است. بنابراین طراحی فاصله بهینه در این نوع ساختارها امری ضروری است. شکل ۴ طیف جذبی، لایه جاذب را برای سه فاصله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتری نانوذرات نقره به اندازه ۴۰ نانومتر را نشان می دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



شکل۴- طیف جذبی لایه سیلیکانی برای حالتی که با نانوذره حساس نشده است و همچنین در حالتی های حساس شده با آرایه ای از نانوذرات نقره به قطر ۴۰ نانومتر و در دوره تناوب های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتر.

از آنجایی میزان قطبش پذیری نانوذرات به اندازه آن نیز وابسته است، با تغییر اندازه ذرات، انتظار می رود که رفتار نوری آن متفاوت بوده و به طبع طیف جذبی سلول متفاوت باشد. شکل ۵ طیف جذبی، لایه جاذب را برای سه فاصله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتری نانوذرات نقره به اندازه ۸۰ نانومتر را نشان می دهد.



شکل۵- طیف جذبی لایه سیلیکانی برای حالتی که با نانوذره حساس نشده است و همچنین در حالتی های حساس شده با آرایه ای از نانوذرات نقره به قطر ۸۰ نانومتر و در دوره تناوب های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتر.

همان گونه که دیده می شود در این طراحی حساس سازی با نانوذرات فلزی نه تنها باعث افزایش جذب نخواهد شد بلکه منجر به کاهش جذب نیز خواهد شد. در حالت حساس سازی سلول با نانوذرات با قطر ۸۰ نانومتر و فاصله ۴۰ نانومتر، پراکنش های نوری به سمت داخل ساختار نبوده و بیشتر حالت انعکاسی دارد بنابراین جذب در ساختار کمتر خواهد شد. در حالتی که فاصله بیشتر می شود، نور بیشتر به داخل ساختار نفوذ کرده و بنابراین پروفایل جذب نسبت به طراحی های قبلی، وضعیت بهتری خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه سازی نوری سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکانی انجام شد. به منظور بهبود طیف جذبی سلول از نانوذرات فلزی نقره به صورت حساس شده روی سلول استفاده شد. در اثر تشدید پلاسمونی محلی، و همچنین پراکنش نور ناشی از وجود نانوذرات و به تله اندازی نور در داخل ساختار طیف جذبی در بازه ای از طول موج در محدوده‌ای که با توجه به طیف تابشی استاندارد AM 1.5 شدت نور خورشید بیشتر است، ۲۰٪ بهبود می یابد. تاثیر فاصله نانوذرات از هم و اندازه آنها روی طیف جذبی بررسی شده است. از آنجایی که فاصله نانوذرات روی بازتاب و پراکنش نور به داخل ساختار تاثیرگذار است دیده می شود به ازای فاصله خاصی می‌توان بیشترین افزایش جذب را حاصل کرد این فاصله برای نانوذرات با قطر ۴۰ و ۸۰ نانومتر به ترتیب ۴۰ و ۶۰ نانومتر است.

۵- مراجع

[۱] J. Grandidier, D. M. Callahan, J. N. Munday, and H. A. Atwater, "Gallium arsenide solar cell absorption enhancement using whispering gallery modes of dielectric nanospheres," *Photovoltaics, IEEE Journal of,* vol. 2, pp. 123-128, 2012.

[۲] S. Pillai and M. Green, "Plasmonics for photovoltaic applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 94, pp. 1481-1486, 2010.

[۳] M. Berginski, J. Hüpkes, M. Schulte, G. Schöpe, H. Stiebig, B. Rech, *et al.*, "The effect of front ZnO: Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells," *Journal of Applied Physics,* vol. 101, p. 074903, 2007.

[۴] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*: John Wiley & Sons, 2011.

[۵] S. Pillai, K. Catchpole, T. Trupke, and M. Green, "Surface plasmon enhanced silicon solar cells," *Journal of applied physics,* vol. 101, p. 093105, 2007.

[۶] H. A. Atwater and A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices," *Nature materials,* vol. 9, pp.۲۰۱۰ ,۲۱۳-۲۰۵ .

[۷] S.-S. Kim, S.-I. Na, J. Jo, D.-Y. Kim, and Y.-C. Nah, "Plasmon enhanced performance of organic solar cells using electrodeposited Ag nanoparticles," *Applied Physics Letters,* vol. 93, p. 073307, 2008.

[۸] M. Westphalen, U. Kreibig, J. Rostalski, H. Lüth, and D. Meissner, "Metal cluster enhanced organic solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 61, pp. 97-105, 2000.

[۹] A. J. Morfa, K. L. Rowlen, T. H. Reilly III, M. J. Romero, and J. van de Lagemaat, "Plasmon-enhanced solar energy conversion in organic bulk heterojunction photovoltaics," *Applied Physics Letters,* vol. 92, p. 013504, 2008.

[۱۰] S. Tong, C. Zhang, C. Jiang, G. Liu, Q. Ling, E. Kang, *et al.*, "Improvement in the hole collection of polymer solar cells by utilizing gold nanoparticle buffer layer," *Chemical Physics Letters,* vol. 453, pp. 73-76, 2008.

[۱۱] F.-J. Haug, T. Söderström, O. Cubero, V. Terrazzoni-Daudrix, and C. Ballif, "Influence of the ZnO buffer on the guided mode structure in Si/ZnO/Ag multilayers "*,Journal of Applied Physics,* vol. 106, p. 044502, 2009.

[۱۲] J. Mertz, "Radiative absorption, fluorescence, and scattering of a classical dipole near a lossless interface: a unified description," *JOSA B,* vol. 17, pp. 1906-1913, 2000.

[۱۳] V. P. Drachev ,U. K. Chettiar, A. V. Kildishev, H.-K. Yuan, W. Cai, and V. M. Shalaev, "The Ag dielectric function in plasmonic metamaterials," *Optics express,* vol. 16, pp. 1186-1195, 2008.

[۱۴] P. B. Johnson and R.-W. Christy, "Optical constants of the noble metals "*,Physical Review B,* vol. 6, p. 4370, 1972.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]