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

تأثیر بافت‌زنی زیر طول موجی سطحی بر روی بازدهی سلول‌های خورشیدی نانوساختار

حمزه نورالهی[۱]، عباس بهجت[۲]، محمدآقا بلوری‌زاده[۱]

[۱]گروه فیزیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۲]گروه پژوهشی فوتونیک، مرکز تحقیقات مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده – بافت‌زنی زیر طول موجی راهکاری مؤثر برای بدام‌اندازی نور و افزایش میزان جذب اپتیکی بشمار می‌رود و رویکردی کارآمد جهت بالا بردن کیفیت سلول‌های خورشیدی است. در این مقاله با استفاده از مدل موجبر اپتیکی میزان جذب شدت نور خورشید در لایه نیمه‌هادی با بافت سطحی زیر طول موجی بر مرز مشترک با الکترود مقابل را محاسبه می‌کنیم. با اعمال انرژی جذب شده به سیستم گاز الکترون-حفره سلول خورشیدی ولتاژ مدار- باز سلول را به دست می‌آوریم و نشان خواهیم داد که این ساختار بازدهی سلول خورشیدی را بطور محسوسی افزایش می‌دهد.

کلید واژه- بافت‌زنی زیر طول موجی، بدام اندازی نور، بازدهی سلول خورشیدی، ولتاژ مدار-باز،

کد PACS - 310.0310،250.0250،040.0040

Sub-wavelength texturing effect on efficiency of nanostructure solar cells

[1]Nourolahi Hamzeh, [2] Behjat Abbas, [1]Bolorizadeh Mohamad Agha

[1]Phycics and Photonics Group, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

[2]Photonics Research Group, Yazd University, Yazd, Iran

[2]Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd, Iran

Abstract- Sub-wavelength texturing is an effective method for light trapping and optical absorption enhancement in solar cells. We have implemented the optical waveguide model in sub-wavelength textured semiconductor layer in order to increase the optical absorbance in solar light. By applying of the absorbed energy to electron-hole gas system of solar cell, the results of open-circuit voltage and solar cell efficiency have been rendered indicating significant enhancement in cell performance.

Keywords: Sub-wavelength texturing, light harvesting, open-circuit voltage , solar cell efficiency.

PACS No - 040.0040.،250.0250،310.0310

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر توجه زیادی به روش‌های بدام‌اندازی نور به منظور افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی شده است. طراحی بهینه ساختار سلول خورشیدی به منظور بدام‌اندازی بهتر نور نیز به روش‌های مختلفی همچون الگوریتم ژنتیک[۱] و حل عددی معادلات ماکسول در لایه‌های نازک و در رژیم زیر طول‌موجی به روش تفاضل متناهی حوزه زمانی [۲] و اجزای محدود [۳و۴] انجام شده و افزایش جذب نور دراین ساختارها مشاهده شده است. در رژیم زیر طول‌موجی ضخامت لایه جاذب سلول خورشیدی کمتر از طول موج اپتیکی بوده و برای مطالعه آن اپتیک هندسی کارایی لازم را ندارد. در این محدوده، نور در لایه جاذب به صورت مدهای گسسته انتشار می‌یابد به همین دلیل روش مبتنی بر بسط مدی به لایه موجبر دی‌الکتریک سلول خورشیدی اعمال شده است[۵] و همین روش برای بررسی میزان جذب در نیمه هادی لایه نازک که بر روی لایه فلزی که مدهای پلاسمون پلاریتون سطحی را حمایت می‌کند نیز اعمال شده است[۶]. در این مقاله با استفاده از روش تحلیلی بسط مد موجبر میزان جذب شدت نور خورشید را در لایه نیمه‌هادی با بافت سطحی زیر طول موجی محاسبه می‌کنیم و با اعمال انرژی جذب شده به سیستم گاز الکترون-حفره در لایه نیمه‌هادی سلول خورشیدی ولتاژ مدار-باز و بازدهی سلول خورشیدی را به دست می‌آوریم.

۲-میزان جذب نور در یک نیمه‌هادی لایه نازک دارای بافت سطحی زیرطول موجی

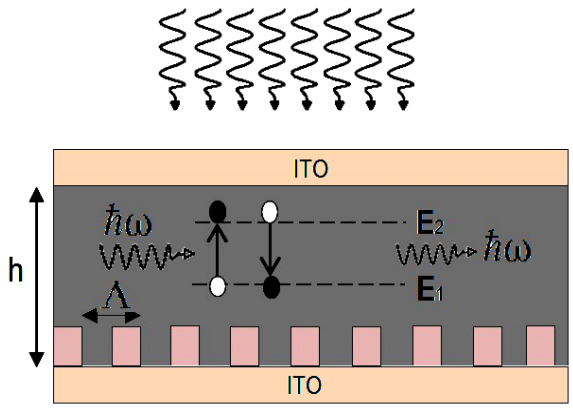
از آنجا که در رژیم زیرطول‌موجی اپتیک هندسی را نمی‌توان به کار برد، نظریه تابندگی نیز استفاده نمی‌شود و ما بنابر نظریه تابندگی اصلاح شده[۷]، و با فرض اینکه لایه نیمه‌هادی هر دوی مدهای تابشی و موجبری را حمایت می‌کند چگالی انرژی میدان در ساختار لایه نازک را بر حسب چگالی این مدها می‌نویسیم. در تعادل گرمایی که هر دوی این مدها با نسبت یکسان فوتون بر مد نور فرودی اشغال می‌شوند چگالی مد تابشی بر واحد حجم و بر واحد فرکانس،

$$\rho_{rad}=\frac{\Omega_{rad}}{4\pi}\left(\frac{\omega^2 n_f^3}{\pi^2 c^3}\right) \qquad (۱)$$

می‌شود که $\Omega_{rad}=\left(1-\sqrt{1-n_s^2/n_f^2}\right)$، زاویه فضایی جفت شدگی با مدهای تابشی، c سرعت نور در فضای آزاد، ω فرکانس، n_f و n_s به ترتیب ضریب شکست‌های لایه نیمه‌هادی و محیط اطراف است. چگالی مدهای موجبری بنابر نظریه موجبر تخت دو بعدی تعیین می‌شود که چگالی این مدها بر واحد سطح و واحد فرکانس،

$$\rho_m=\frac{n_{eff}^2\,\omega}{2\pi c^2} \qquad (۲)$$

می‌شود، n_{eff} ضریب شکست موثر گریتینگ زیر طول موجی است که برای لایه نیمه هادی که مرز مشترک با الکترود مقابل ITO آن دارای بافت سطحی زیر طول موجی شده است(مطابق شکل ۱.)، محاسبه می‌شود.



شکل۱.شمایی از سلول خورشیدی با لایه نیمه هادی به ضخامت h که در مرز مشترک با الکترود مقابل ITO دارای بافت سطحی زیر طول موجی با تناوب Λ شده است. نیمه‌هادی به صورت یک سیستم دو ترازه با انرژی‌های E_1 و E_2، نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن ضریب جذب طیفی $\alpha(\omega)$ برای لایه نیمه هادی نرخ جذب مدهای تابشی:

$$r_{abs}^{rad}=\alpha(\omega)U_{rad}v_g^{rad} \qquad (۳)$$

می‌شود که U_{rad} انرژی کل مدهای تابشی بر واحد فرکانس و V_g^{rad} سرعت گروه این مدهای می‌باشد. به همین صورت برای مدهای موجبر خواهیم داشت:

$$r_{abs}^{m}=\alpha(\omega)(\Gamma_m U_m)v_g^{m} \qquad (۴)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

که U_m انرژی کل بر واحد فرکانس مد موجبر و Γ_m ضریب محصور سازی مد mام موجبر است.

در تعادل گرمایی انرژی با همان نرخی که به مدهای تابشی و موجبری کوپل می‌شود با همان نرخ از آن‌ها خارج می‌شود بنابراین میزان جذب نور فرودی در لایه نیمه‌هادی[۵و۶] :

$$A=\frac{\rho_{rad}}{\rho_{tot}}f_{rad}+\sum_m\frac{\rho_m}{h\,\rho_{tot}}f_m \qquad (۵)$$

می‌شود که $\rho_{tot}=\rho_{rad}+\sum_m\rho_m/h$، چگالی حالت‌های کل و f_{rad} ضریب جذب مدهای تابشی و f_m ضریب جذب مدهای موجبر و h ضخامت لایه نیمه‌هادی است. بافت سطحی با تناوب Λ رابطه پاشندگی را تغییر می‌دهد و با استفاده از نظریه محیط-مؤثر می‌توان ضریب شکست مؤثر محیط دارای بافت سطحی را به دست آورد[۸].

۳-تعادل شارشی در حالت مدار-باز سلول خورشیدی

هر سیستمی که تابش گرمایی را به شکل دیگری از انرژی مثل انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، اولین مرحله برانگیخته شدن سیستم جذب کننده است. در سلول خورشیدی نیمه‌هادی سیستم جذب کننده گاز الکترون-حفره است که با جذب نور انرژی تابش گرمایی را به پتانسیل شیمیایی تبدیل می‌کند. فرآیند تبدیل پتانسیل شیمیایی سیستم گاز الکترون-حفره به جریان خروجی با بررسی حالت تعادل شارشی ممکن می‌شود. در تعادل شارشی ابتدا جفت الکترون-حفره توسط جذب فوتون‌های خورشیدی تشکیل می‌شود سپس از طریق بازترکیب تابشی انرژی خود را از دست می‌هند و به تعادل گرمایی با محیط می‌رسند. در تعادل شارش فوتونی، جریان الکترون-حفره صفر است در نتیجه این حالت مدار-باز سلول است. در حالت مدار باز نرخ فوتون‌های جذب شده از خورشید با $T=T_s$ و از محیط با $T=T_0$ برابر است با نرخ فوتون‌های گسیل شده به محیط به این صورت:

$$A\left(\int_{E_g}^{\infty}\frac{E^2\,dE}{e^{E/kT_s}-1}+\int_{E_g}^{\infty}\frac{E^2\,dE}{e^{(E-\mu_{oc})/kT_0}-1}\right)=\int_{E_g}^{\infty}\frac{E^2\,dE}{e^{(E-\mu_{oc})/kT_0}-1} \qquad (۶)$$

که E انرژی فوتون خورشیدی، A میزان جذب، μ_{oc} پتانسیل شیمیایی گاز الکترون-حفره در حالت مدار- باز، K ثابت بولتزمن، E_g انرژی باند ممنوعه نیمه‌هادی، T_s =۶۵۰۰°K دمای خورشید و T_o =۳۰۰°K، دمای محیط سلول خورشیدی است. ما میزان جذب در لایه نیمه‌هادی را که در قسمت قبل بدست آوردیم برای فوتون‌های با انرژی بالاتر از انرژی باند ممنوعه نیمه‌هادی وارد کردیم و با همین نسبت برای فوتون‌های گسیلی ناشی از باز ترکیب تابشی در نظر گرفتیم. برای حالت ، $E-\mu_{oc}\gg kT_0$ ، $E\gg kT_s$ مقدار یک در مخرج کسرهای معادله (۶) حذف می‌شود و با حل آن بر حسب μ_{oc} به رابطه:

$$qV_{oc}=\mu_{oc}=E_g\left(1-\frac{T_0}{T_s}\right)+kT_0Ln\left(\frac{T_s}{T_0}\right)+Ln\left(\frac{A}{1-A}\right)+Ln\left(\frac{E_g^2+2E_gkT_0+2k^2T_0^2}{E_g^2+2E_gkT_s+2k^2T_s^2}\right). \qquad (۷)$$

می‌رسیم که V_{oc} ولتاژ مدار- باز سلول خورشیدی و q بار الکترون است . برای دمای خورشیدی ودمای محیط معلوم، V_{oc} تابعی است از میزان جذب ساختار سلول و انرژی باند ممنوعه ماده نیمه‌هادی.

۴-بازدهی سلول خورشیدی

بازدهی سلول خورشیدی که کیفیت یک سلول را نشان می‌دهد به صورت توان خروجی به انرژی نور خورشید فرودی بر نیمه هادی تعریف شده و به صورت:

$$\eta_{eff}=FF.I_{sc}.\mu_{oc} \qquad (۸)$$

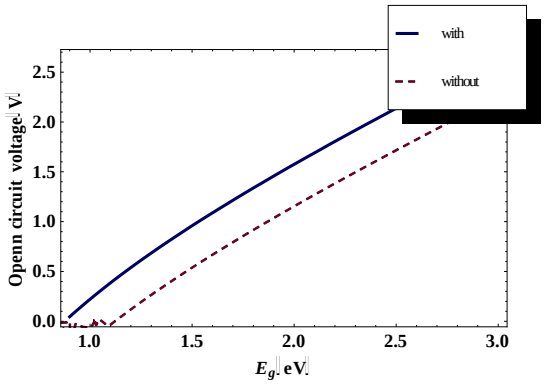
برحسب ولتاژ مدار-باز نویسی می‌شود. فاکتور گنجایش، FF، نیز تابعی از ولتاژ مدار –باز V_{oc} می‌شود[۹]:

$$FF=\frac{v_{oc}-Ln[v_{oc}+1-Ln(v_{oc})]}{v_{oc}-Ln[v_{oc}+1-Ln(v_{oc})]+1}+\frac{v_{oc}-Ln\{v_{oc}-Ln[v_{oc}+1-Ln(v_{oc})+1)]\}}{v_{oc}[1-\exp(-v_{oc})]} \qquad (۹)$$

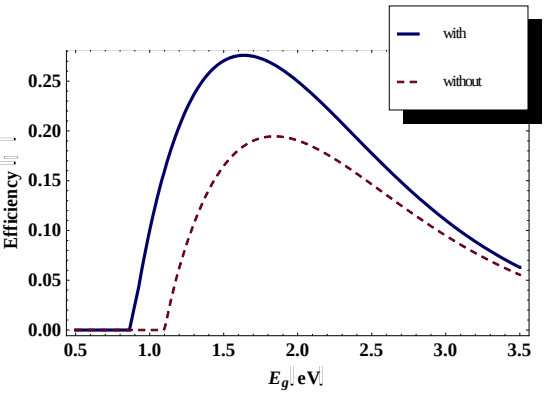
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

۵- نتایج محاسبات

برای ساختار سلول خورشیدی با پارامترهای، $n_s = ۱٫۴۵,\ n_f = ۳٫۶۹,\ h = ۱۰۰nm,\ (\Lambda/\lambda) = ۱/۲٫۷۱$، نمودار ولتاژ مدار-باز بر حسب انرژی باند ممنوعه نیمه‌هادی برای سلول بدون و به همراه بافت زیرطول موجی را در شکل۲. آورده‌ایم (n_f برای سیلیکن در نظر گرفته شده است). شکل۳. نیز نمودار تغییر بازدهی سلول خورشیدی با ایجاد بافت زیر طول‌موجی در سطح زیرین لایه جاذب که در تماس با الکترود مقابل است را نشان می‌دهد.



شکل۲. ولتاژ مدار باز برای سلول دارای بافت سطحی زیر طول موجی و بدون آن.



شکل۳. بازدهی برای سلول دارای بافت سطحی زیر طول موجی و بدون آن.

۶-نتیجه‌گیری

با ایجاد بافت سطحی در مرز لایه جاذب و الکترود مقابل سلول خورشیدی علاوه بر افزایش ۱۰٪ در بازدهی، بیشینه بازدهی نسبت به سلول بدون ساختار بافت زیر طول‌موجی، به سمت باند ممنوعه کوچکتر جابجا شده است. همانطور که در شکل۳ دیده می‌شود برای طیف بازدهی سلول خورشیدی میزان جابجایی حدود ۰٫۲ eV است. این جابجایی نشان می‌دهد که با مهندسی هندسه سلول می‌توان از مواد نیمه‌هادی با انرژی باند ممنوعه کوچکتر در ساخت سلول استفاده کرد. به نظر می‌رسد بتوان با استفاده از این ساختار بازدهی سلول‌های خورشیدی ساخته شده از مواد پلیمری همچون PCBM و P3HT و مواد قطبی غیرآلی همچون CdTe را افزایش داد.

[1] C. Wang, S. Yu, W. Chen, and C. Sun, Sci. Rep., vol. 3, Jan.(2013).
[2] B. Zeng et al, J. Appl. Phys. 113, 063109 (2013).
[3] Dunbar, R. B. et al, Phy. Rev. B, 85, 035301 (2012)
[4] Dunbar, R. B. et al, Opt. Exp. vol. 20, S2, p. A177 (2012).
[5] H. R. Stuart and D. G. Hall, J. Opt. Soc. Amer. A, vol. 14, no. 11, pp. 3001–3008,Nov. (1997).
[6] E. A. Schiff, J. Appl. Phys. 110, 104501 (2011).
[7] I. M. Bassett, Phys. Rev. Lett. 54, 2014 (1985).
[8] P. Lalanne and J.-P. Hugonin, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 15, No. 7, (1998).
[9] Abrams, Niv, and Zhang, J. Appl. Phys. 109, 114905 (2011).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]