





شبیهسازی اثر جنس نقاط کوانتومی بر طیف جذب و مشخصههای سلولهای خورشیدی حساسشده با نقاط کوانتومی

حسین وحید دستجردی، حمیدرضا فلاح و مرتضی حاجی محمودزاده

گروه فیزیک - دانشگاه اصفهان

چکیده – در این پژوهش ما تاثیر استفاده از نقاط کوانتومی مختلف به عنوان حساسکننده در سلولهای خورشیدی حساسشده با نقاط کوانتومی را مورد بررسی قرار دادیم و نمودار طیف جذب، نمودار چگالی جریان– ولتاژ و مشخصههای مربوط به آن را به دست آوردیم. سپس تاثیر استفاده از دو نوع نقاط کوانتومی مختلف در یک سلول خورشیدی را مورد بررسی قرار دادیم و مشاهده کردیم استفاده از دو نوع حساسکننده که هر کدام در قسمتی از ناحیهی طیفی، جذب خوبی دارند؛ می تواند بازده تبدیل توان سلول را به مقدار قابل ملاحظهای نسبت به زمانی که هر کدام در قسمتی از ناحیهی طیفی، جذب خوبی دارند؛ می تواند بازده تبدیل توان سلول را به مقدار قابل ملاحظهای

كليد واژه- بازده تبديل توان، حساس كننده، سلول خورشيدي حساس شده با نقاط كوانتومي، طيف جذب، نقاط كوانتومي.

Simulation of the effect of quantum dots type on the absorption spectrum and characteristics of quantum dot sensitized solar cells

Hossein Vahid Dastjerdi, Hamidreza Fallah, Morteza Hajimahmoudzadeh

Department of Physics, University of Isfahan

Abstract- In this study, we investigated the effect of using different quantum dots as sensitizers in quantum dot sensitized solar cells and we obtained the absorption diagrams, current density- voltage diagrams and related characteristics. Then we study the effect of using two different types of quantum dots in a solar cell and we observed using two types of sensitizers that each one absorbs specific parts of solar spectrum, can increase the power conversion efficiency of the cell.

Keywords: power conversion efficiency, sensitizer, quantum dot sensitized solar cell, absorption spectrum, quantum dots.

۱– مقدمه

با افزایش نیاز بشر به انرژی و محدود بودن منابع سوختهای فسیلی، منابع انرژی تجدیدپذیر و قابل اعتماد از جمله انرژی خورشیدی مورد توجه ویژهی پژوهشگران قرار گرفتهاند [۱]. در میان سلولهای خورشیدی، سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی به دلیل خواص ویژهای که دارند مانند جذب زیاد نور، سنتز آسان، هزینهی توليد كم، توليد چند اكسيتون (جفت الكترون-حفره) در اثر جذب تک فوتون و همچنین با توجه به اینکه گاف انرژی آنها توسط اندازهی آنها قابل کنترل می باشد تا بتوان ناحیهی جذبشان را بر ناحیهی مورد نظر طیف خورشیدی منطبق کرد، نمونه یامیدبخشی از سلول های خورشیدی نسل سوم بودهاند [۲]. پیکربندی این سلولها شبیه سلولهای خورشیدی رنگدانهای شامل لایهای از نانوذرات TiO₂ متخلخل، حساس كننده، الكتروليت و الكترودها می باشد و تنها تفاوت آن ها در نوع حساس کننده (نقاط کوانتومی یا رنگ) میباشد [۳]. با جذب نور توسط نقاط كوانتومى، اكسيتونها توليد شده و با انتقال الكترونها به آند TiO₂، فوتوجریان شکل می گیرد [۴]. در شکل ۱ ساختار کلی این نوع سلولهای خورشیدی نشان داده شده است.



شکل۱: ساختار سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی

در این پژوهش ما با شبیه سازی سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی با استفاده از روش تفاضل محدود حوزهی زمان (FDTD)، جذب نور در ناحیهی فعال این نوع سلول ها محاسبه کرده و سپس با حل معادلات دریفت – دیفیوژن برای این سلول ها با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی اپتیکی، توانستیم مشخصه های الکتریکی آن ها را استخراج نماییم.

'Finite-difference time-domain

در روش FDTD با حل معادلات ماکسول، میدانهای EDTD با حل معادلات ماکسول، میدانهای الکتریکی (\vec{E}) و مغناطیسی (\vec{H}) را که ابتدا توابع پیوستهای از زمان هستند گسسته کرده و میدانها را در زمان $n\Delta t$ که به طور اختصار با n نمایش میدهیم توسط روابط پله- زمانی (۱) و (۲) به دست می آوریم [۵].

$$\vec{E}^{(n+1)} = \vec{E}^{(n)} + \frac{\Delta t}{\varepsilon} \vec{\nabla} \times \vec{H}^{(n+\frac{1}{2})} \tag{1}$$

$$\vec{H}^{(n+\frac{3}{2})} = \vec{H}^{(n+\frac{1}{2})} - \frac{\Delta t}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{E}^{(n+1)}$$
(7)

در این رابطه \mathcal{F} گذردهی الکتریکی و \mathcal{H} نفوذپذیری مغناطیسی می باشد. با داشتن روابط (۱) و (۲) و با در اختیار داشتن میدان الکتریکی اولیه ($\vec{E}^{(0)}$) می توان مقدار نهایی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را محاسبه نمود. برای محاسبه یتوان جذب شده توسط سلول بر واحد حجم در هر بسامد نیز می توان از رابطه ی (۳) استفاده کرد. برای محاسبه ی آن تنها لازم به دانستن شدت میدان الکتریکی و قسمت موهومی گذردهی الکتریکی ماده ی مورد نظر می باشیم، که در شبیه سازی به روش FDTD به سادگی قابل محاسبه می باشند [۵].

$$P_{\rm abs}(r,\omega) = -0.5 \times \omega |E|^2 \,\mathrm{Im}(\varepsilon) \tag{7}$$

با استفاده از توان جذب شده می توان نرخ تولید الکترون -حفرهها را با استفاده از معادلهی (۴) دست آورد [۵].

$$G(r) = \int \frac{P_{abs}}{\hbar\omega} d\omega \tag{(f)}$$

سرانجام با حل معدلات دریفت- دیفیوژن برای حاملها که به صورت جدا برای الکترونها و حفرهها توسط روابط (۵) و (۶) داده میشوند، با در نظر گرفتن معادلات پیوستگی، نرخ تولید و نرخ بازترکیب برای هر کدام از حاملها، میتوان نمودار جریان ولتاژ سلولهای خورشیدی را به دست آورد [7].

348

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \nabla n \tag{a}$$

$$J_{p} = q\mu_{p}pE - qD_{p}\nabla p \tag{9}$$

در این معادلات، ، q بار الکترون، $\mu_p = \mu_p$ و μ_p به ترتیب تحرکپذیری الکترون و حفره، n و p به ترتیب چگالی الکترونها و حفرهها، E میدان الکتریکی، $D_p = D_p$ به ترتیب ضریب دیفیوژن الکترونها و حفرهها می باشند.

از روی نمودار چگالی جریان- ولتاژ مربوط به سلولهای خورشیدی به ترتیب توسط رابطهی (۷) و (۸) میتوان ضریب پرشدگی و بازده تبدیل توان را محاسبه نمود [۶].

$$FF = \frac{P_{\max}}{J_{SC}V_{OC}} \tag{Y}$$

$$\eta = \frac{J_{\rm SC}V_{\rm OC}FF}{P_{\rm solar}} \tag{A}$$

که P_{\max} ، بشینه چگالی توان دریافتی از سلول، $V_{\rm OC}$ ولتاژ P_{\max} مدار – باز و $J_{\rm SC}$ چگالی جریان اتصال – کوتاه میباشد. شدت نور فرودی خورشید (100 mW/cm²) برای استاندارد AM 1.5 میباشد.

نتايج شبيهسازى

شکل ۲ طیف جذب در ناحیهی طول موجی ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر را برای سلولهای خورشیدی حساسشده با نقاط کوانتومی مختلف نشان میدهد. از میان این نانومواد، PbS و PbSe به دلیل این که باند جذب را به سمت ناحیهی فروسرخ توسعه میدهند، میتوانند نرخ تولید الکترون-فروسرخ تا حد زیادی افزایش دهند. همین امر سبب افزایش چگالی جریان برای سلولهای ساخته شده توسط این مواد شده است (جدول ۱).



اما همان طور که در شکل ۳ نمودار چگالی جریان - ولتاژ مربوط به این سلول ها قابل مشاهده است، نقاط کوانتومی

PbS و PbS علی رغم جذب نور بسیار خوب، ولی به دلیل کم بودن گاف انرژی که دارند، V_{oc} پایینی دارند.

سایر نقاط کوانتومی که اثر آنها نیز شبیه سازی شده است به دلیل بیشتر بودن گاف انرژی آنها و در نتیجه جمع آوری الکترونها با انرژی بیشتر، موجب بالا بودن Voc برای این سلولها شده است.



همان گونه که در جدول ۱ از نتایج حاصل از مشخصهیابی سلولهای خورشیدی شبیهسازی شده پیداست، بازده تبدیل توان در صورت استفاده از نقاط کوانتومی CdSe بیشترین مقدار (//۱۲/۵۱) خود را در بین این سلولها داراست.

جدول ۱: نتایج حاصل از مشخصهیابی نمودار چگالی جریان- ولتاژ

حساسكننده	J_{SC} (mA/cm ²)	<i>V_{oc}</i> (V)	FF	η (%)
PbS	۲۳/۶	۰/٣٩	٠/٨۴	۷/۷۳
PbSe	۲۸/۱	٠/١٨	۰/۶۱	٣/•٨
CdS	٩/٣	1/14	٠/٩	٩/۵۴
CdSe	١۴/٨	٠/٩۵	٠/٨٩	15/01
CdTe	18/1	٠/٨٢	•/\\	11/88

در صورت استفاده از دو نوع نقطه کوانتومی می توان میزان جذب و بازدهی سلول خورشیدی را توسط دو ماده کنترل کرد. برای مثال در صورت استفاده از دو نوع حساس کننده CdS/PbSe (شکل۴)، می توان جذب سلولی که در آن از نقاط کوانتومی CdS استفاده شده بود و در نمودار شکل ۲ نشان دادیم دارای جذب مناسبی برای طول موجهای بلندتر

از ۶۰۰ نانومتر نیست، بهبود ببخشیم. همچنین سلول خورشیدی حساسشده با دو نوع نقطه کوانتومی CdSe/PbS با داشتن جذب بسیار بالا سرتاسر ناحیهی ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، نرخ تولید جفت الکترون – حفره بالایی را دارا می باشد و با توجه به مشخصههای جدول ۲ بازدهی بالاتری نسبت به سایر سلولهای بررسی شده را دارا می باشد.



با توجه به جدول ۲ می توان دریافت سلول حساس شده با نقاط کوانتومی CdS/PbSe دارای V_{oc} بالاتری نسبت به سلول خور شیدی حساس شده تنها با PbSe می باشد. شکل ۵ نمودار چگالی جریان- ولتاژ مربوط به سلول های حساس شده توسط دو نوع نقاط کوانتومی را نشان می دهد.







۱۰/۴	۰/٨۶	•/84	۱۸/۸	CdS/PbSe
14/34	• /AY	٠/٧٩	۲۰/۹	CdSe/PbS

نتيجهگيرى

با توجه به بازدهی بالایی که برای سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی پیشبینی می شود، این سلولها میتوانند در آینده با بهبود هر چه بیشتر بازدهی، جایگزین مناسبی سلولهای خورشیدی سیلیکونی باشند. در سلولهای خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی با استفاده از دو نوع حساس کنندهی مختلف که یکی از آنها ار میان عناصر PDS و PbS انتخاب شود تا بتواند با گسترش محدودهی جذب به ناحیهی فروسرخ نرخ تولید حاملها را افزایش دهد و دیگری از عناصری با گاف انرژی بیشتر از Voc انتخاب شود تا بتواند علاوه بر افزایش جذب بخشد، میتوان به بازدهیهای بسیار بیشتر از سلولهای خورشیدی حساس شده با یک نوع نقاط کوانتومی دست یافت.

مراجع

- [1] Devabhaktuni, Vijay, et al. "Solar energy: Trends and enabling technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013): 555-564.
- [2] Lee, Yuh-Lang, and Yi-Siou Lo. "Highly efficient quantumdot-sensitized solar cell based on co-sensitization of CdS/CdSe." Advanced Functional Materials 19.4 (2009): 604-609.
- [3] Hanna, M. C., and A. J. Nozik. "Solar conversion efficiency of photovoltaic and photoelectrolysis cells with carrier multiplication absorbers." Journal of Applied Physics 100.7 (2006): 074510.
- [4] Lee, Ji-Won, et al. "Electron injection from a cds quantum dot to a tiO2 conduction band as an efficiency limiting process: Comparison of qd depositions between silar and linker assisted attachment." *Journal of Photopolymer Science and Technology* 29.3 (2016): 357-362.
- [5] Gross, P. A., et al. "Theoretical and photo-electrochemical studies of surface plasmon induced visible light absorption of Ag loaded TiO2 nanotubes for water splitting." *Applied Physics Letters* 109.15 (2016): 153903.
- [6] Luque, Antonio, and Steven Hegedus, eds. Handbook of photovoltaic science and engineering, P. 63-91, John Wiley & Sons, 2011.