بررسی اثر نقاط کوانتومی CdSe/ZnS هسته/پوسته بر روی مشخصه های یک سلول خورشیدی سیلیکونی

لازمی، مسعود[۱]؛ عسگری، اصغر[۱و۲و۳]

[۱] پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز

[۲] دانشکده مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر، دانشگاه استرالیای غربی، استرالیا

[۳] قطب علمی فوتونیک، دانشگاه تبریز

چکیده

سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به صورت عمده نور مرئی را جذب می‌کنند، این در حالی است که خورشید نور فرابنفش، مرئی و مادون قرمز را گسیل می‌کند. یکی از روش‌های افزایش بازده تبدیل توان سلول‌های خورشیدی سیلیکونی استفاده از نقاط کوانتومی است. نقاط کوانتومی کاربردهای فراوانی در سلول‌های خورشیدی، آشکارسازها، حسگرها و ادوات دیگر دارد. نقاط کوانتومی CdSe/ZnS هسته/پوسته فوتون‌های پرانرژی را جذب و آن‌ها را تبدیل به فوتون‌های کم‌انرژی می‌کنند، به عبارتی نور فرابنفش را جذب و نور مرئی را گسیل می‌کنند. بنابراین، استفاده از نقاط کوانتومی CdSe/ZnS هسته/پوسته باعث جذب گستره‌ی طول موجی بیشتری از نور فرابنفش می‌شود. در این مقاله توان جذب شده‌ی کل، بازتاب سطحی، نرخ تولید و نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای یک سلول خورشیدی سیلیکونی حساس‌شده با نقاط کوانتومی با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe/ZnS توان جذب شده‌ی کل را در گستره‌ی طول موجی فرابنفش افزایش می‌دهد و باعث افزایش نرخ تولید جفت الکترون-حفره و همچنین باعث افزایش ٪۳۱/۶۳ در بازده تبدیل توان سلول خورشیدی سیلیکونی می شود.

Investigation effect of CdSe/ZnS core/shell quantum dots on the characteristics of a silicon solar cell

Lazemi, Masoud[1]; Asgari, Asghar[1, 2, 3]

[1] Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz
[2] School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Western Australia
[3] Photonics Center of Excellence, University of Tabriz

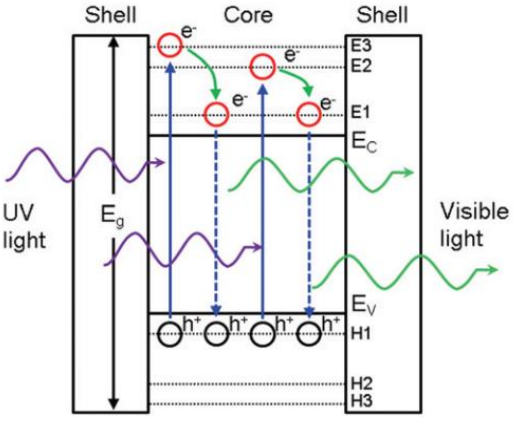
Abstract

Silicon solar cells mainly absorb visible light, while sun emits ultraviolet, visible and infrared light. One way to increasing the power conversion efficiency of the silicon solar cells is to implementing the quantum dots (QDs). The QDs have various applications in solar cells, detectors, sensors and other devices. CdSe/ZnS core/shell QDs absorb high-energy photons and converting them to low-energy photons; they absorb ultraviolet light and emit visible light. Thus, implementing CdSe/ZnS core/shell QDs leads to absorbing a wide range of ultraviolet wavelength spectrum. In this paper the total absorbed power, surface reflection, generation rate and current density-voltage curve for a quantum dot-sensitized silicon solar was investigated by means of finite difference time domain (FDTD) method. The results showed that the implementing CdSe/ZnS core/shell QDs increase the total absorbed power in ultraviolet wavelength region and leads to increasing the electron-hole pair generation rate and 31.63% power conversion efficiency enhancement.

PACS No.80

مقدمه

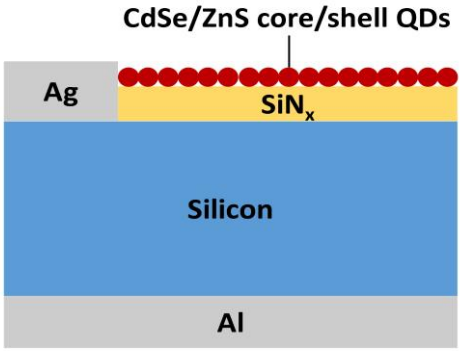
نقاط کوانتومی، بلورهای نیمرسانای نانو-مقیاس هستند که به خاطر کم-هزینه بودن فرآیند تولید و قابلیت تنظیم کردن شکاف نواری مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. از این ویژگی‌ها می‌توان در سلول‌های خورشیدی [۱]، آشکارسازها [۲] و حسگرها [۳] و ادوات دیگر بهره برد. استفاده از سلول‌های خورشیدی می‌تواند باعث صرفه‌جویی در مصرف برق و در نتیجه حفظ منابع انرژی فسیلی شود. امروزه ساخت سلول‌های خورشیدی کم-هزینه و بازده-بالا از مهمترین هدف‌های محققان است. یکی از این روش‌ها، استفاده از نقاط کوانتومی است. نقاط کوانتومی انواع مختلفی دارند که یکی از آنها نقطه کوانتومی CdSe/ZnS است که در آن CdSe به عنوان هسته و ZnS به عنوان پوسته می‌باشد. انرژی شکاف نواری ZnS پهن تر از انرژی شکاف نواری CdSe است، بنابراین در این نقاط کوانتومی ZnS به عنوان یک سد پتانسیل عمل می‌کند و باعث گسسته شدن چگالی حالت‌ها در نوار رسانش و ظرفیت CdSe می‌شود [٤]. وقتی نور فرابنفش به این نقاط کوانتومی تابش می‌کند یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش رفته و زمانی که می‌خواهد به حالت پایه خود برگردد با حفره‌ی موجود در نوار ظرفیت بازترکیب شده و نور مرئی گسیل می‌کند (شکل ۱). طول موج این نور به انرژی شکاف نواری CdSe بستگی دارد. بنابراین این نقاط کوانتومی نور فرابنفش را تبدیل به نور مرئی می‌کنند، به عبارت دیگر فوتون‌های پرانرژی تبدیل به فوتون‌های کم‌انرژی می‌شوند [٤].



شکل ۱ : نمودار نوار انرژی نقطه کوانتومی CdSe/ZnS هسته/پوسته. این نقاط کوانتومی نور فرابنفش را جذب و آن را تبدیل به نور مرئی می‌کنند [٤].

ساختار سلول خورشیدی حساس‌شده با نقاط کوانتومی

برای شبیه‌سازی مشخصه‌های سلول خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی، ساختار شکل ۲ را در نظر می گیریم [٤].



شکل ۲: ساختار سلول خورشیدی سیلیکونی که در آن از نقاط کوانتومی CdSe/ZnS با اندازه ی هسته ٤/۹ نانومتر و اندازه‌ی پوسته ۱/۳ نانومتر استفاده شده است. اندازه‌ی نقاط کوانتومی برگرفته از نتایج تجربی مرجع [٤] می‌باشد.

محاسبه توان جذب شده‌ی کل

گام اول محاسبه‌ی شدت میدان الکتریکی است که وابستگی طول موجی دارد. برای محاسبه‌ی کارایی یک ساختار اپتیکی، محاسبه توان جذب شده‌ی کل در ناحیه‌ی فعال آن بسیار ضروری است. برای محاسبه‌ی این کمیت در یک ساختار پیچیده نیاز به روش‌های عددی از جمله روش FDTD[۱] و FDFD[۲] می‌باشد. روش FDTD شامل تقسیم کردن حجم ناحیه‌ی شبیه سازی به شبکه‌های عددی گسسته و حل کردن معادلات ماکسول در فضا در سراسر شبکه‌ها است. در اینجا از برنامه‌ی متلب برای حل معادلات استفاده شده‌است.

بنابر نظریه‌ی الکترومغناطیس بردار پوئین‌تینگ از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۵]:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \qquad (۱)$$

جذب در واحد حجم از دیورژانس بردار پوئین‌تینگ به دست می‌آید.

[۱] Finite Difference Time Domain

[۲] Finite Difference Frequency Domain

محاسبه‌ی نرخ تولید جفت الکترون–حفره

اگر هر فوتون جذب شده در ناحیه‌ی فعال، یک جفت الکترون–حفره تولید کند، برای محاسبه‌ی نرخ تولید الکترون در واحد حجم می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد [۶]:

$$G(\vec{r},\omega)=\int_{solar\ spectrum}\left(\frac{\varepsilon''\left|\vec{E}(\omega)\right|^2}{2\hbar}\right)d\omega \qquad (۲)$$

که $\left|\vec{E}(\omega)\right|^2$ مربع بزرگی میدان الکتریکی در داخل ساختار که ناشی از تابش خورشیدی می‌باشد، ε'' قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک ماده جاذب و $\hbar$ ثابت پلانک کاهش‌یافته است. در اینجا فقط جذب لایه سیلیکونی را بررسی می‌کنیم، اما جذب می‌تواند در لایه‌های دیگر نیز رخ بدهد.

محاسبه‌ی چگالی جریان مدار–کوتاه

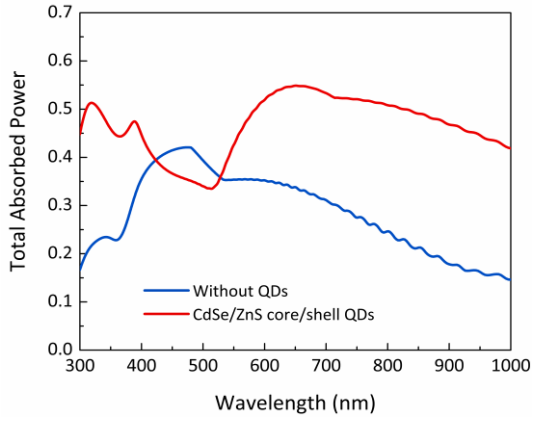
برای محاسبه‌ی چگالی جریان مدار–کوتاه (J_{sc}) می‌توان از نرخ تولید $G(\vec{r},\omega)$ روی حجم ناحیه فعال انتگرال‌گیری کرد که از رابطه‌ی زیر بدست می آید [۶]:

$$J_{sc}=\frac{q}{A}\int G(\vec{r},\omega)dV \qquad (۳)$$

که در آن q بار الکترون و A مساحت ناحیه‌ی فعال سلول خورشیدی است.

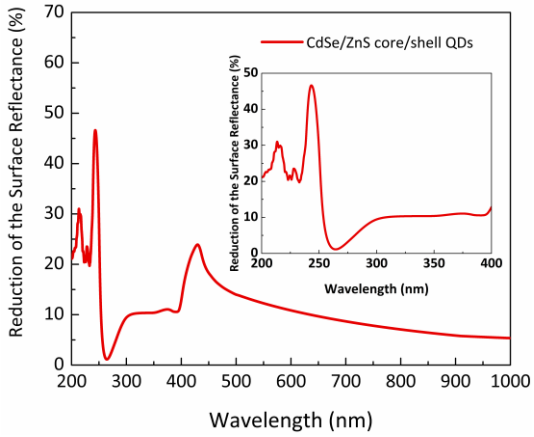
نتایج

شکل ۳ توان جذب شده‌ی کل برای دو حالت ۱: سلول خورشیدی سیلیکونی بدون نقاط کوانتومی و ۲: سلول خورشیدی سیلیکونی حساس‌شده با نقاط کوانتومی CdSe/ZnS را در ناحیه‌ی طول موجی ۳۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. نتیجه‌ی بدست آمده نشان می‌دهد که به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe/ZnS باعث افزایش توان جذب شده‌ی کل در ناحیه‌ی طول موجی فرابنفش (۳۰۰ نانومتر تا ۴۲۲ نانومتر) و علاوه بر آن در ناحیه‌ی طول موجی (۵۲۸ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر) می‌شود.



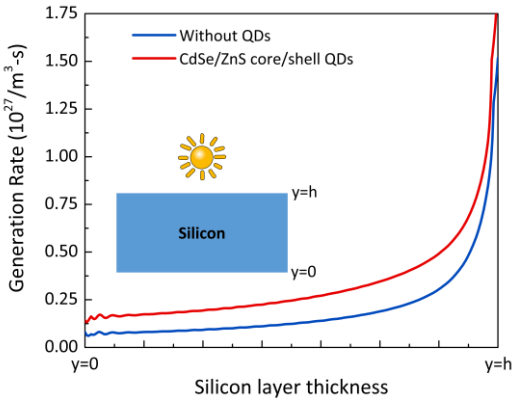
شکل ۳ : توان جذب شده کل در ناحیه‌ی طول موجی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر.

شکل ٤ نمودار کاهش بازتاب سطحی نسبت به حالت بدون نقاط کوانتومی محاسبه شده در ناحیه‌ی طول موجی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. از این نمودار ملاحظه می‌شود که به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe/ZnS بازتاب سطحی را در ناحیه‌ی فرابنفش به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد. از آنجایی که نقاط کوانتومی CdSe/ZnS فوتون‌های پرانرژی را تبدیل به فوتون‌های کم‌انرژی می‌کنند بنابراین به کار بردن این نقاط کوانتومی باعث کاهش بازتاب سطحی نسبت به سلول خورشیدی بدون نقاط کوانتومی می‌شوند، به عبارتی فوتون‌های بیشتری می‌توانند به ناحیه‌ی فعال سلول خورشیدی برسند و در نتیجه‌ی آن بازتاب سطحی کمتر شود.



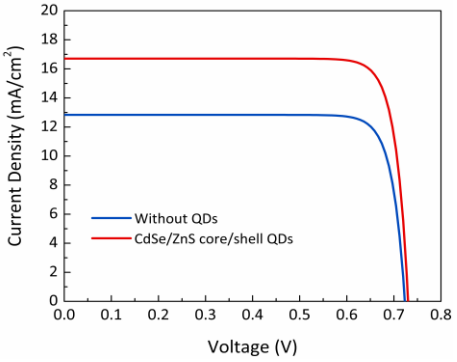
شکل٤ : نمودار کاهش بازتاب سطحی نسبت به حالت بدون نقاط کوانتومی. به کاربردن نقاط کوانتومی CdSe/ZnS در سلول خورشیدی سیلیکونی بازتاب سطحی را نسبت به سلول خورشیدی بدون نقاط کوانتومی کاهش میدهد. نمودار ضمیمه شده، کاهش بازتاب سطحی را در ناحیه‌ی ۲۰۰ تا ٤۰۰ نانومتر (ناحیه‌ی فرابنفش) نشان می‌دهد.

شکل ۵ نمودار نرخ تولید $G(\vec{r},\omega)$ محاسبه شده برای دو حالت در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe/ZnS باعث افزایش نرخ تولید نسبت به سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی می‌شود. نکته‌ی قابل توجه این است که نرخ تولید در سطح سلول خورشیدی (جایی که تحت تابش نور خورشید قرار می‌گیرد) بیشترین مقدار خود را دارد و رفته‌رفته کاهش می‌یابد.



شکل۵ : نرخ تولید برای سلول خورشیدی سیلیکونی بدون نقطه کوانتومی و سلول خورشیدی سیلیکونی حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe/ZnS. مقدار h برابر ۳/۵ میکرون می باشد.

شکل ٦ منحنی چگالی جریان–ولتاژ (J-V) برای دو حالت بحث شده را نشان می‌دهد. ملاحظه می شود که چگالی جریان مدار–کوتاه در حالت بدون نقاط کوانتومی برابر ۱۲/۸۳ mA/cm^2 و در حالت حساس شده با نقاط کوانتومی CdSe/ZnS برابر ۱٦/۷۱ mA/cm^2 است. بنابراین به کار بردن نقاط کوانتومی J_{sc} را نسبت به حالت بدون نقاط کوانتومی ۳۰/۲٤٪ افزایش می دهد.



شکل٦ : نمودار چگالی جریان–ولتاژ.

جدول ۱ مشخصه‌های محاسبه شده‌ی سلول خورشیدی، از جمله ولتاژ مدار–باز (V_{oc})، چگالی جریان مدار–کوتاه (J_{sc})، ضریب پر شدن (FF) و بازده تبدیل توان سلول خورشیدی (η) را نشان می دهد.

جدول۱ : مشخصه های محاسبه شده

	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی	۰/۷۲	۱۲/۸۳	۸٤/۸٥	۷/۸۷
سلول خورشیدی حساسبا نقطه کوانتومی CdSe/ZnS	۰/۷۳	۱٦/۷۱	۸٤/۹٦	۱۰/۳٦

نتیجه گیری

استفاده از نقاط کوانتومی CdSe/ZnS توان جذب شده‌ی کل در ناحیه‌ی طول موجی فرابنفش (۳۰۰ نانومتر تا ٤۲۲ نانومتر) و علاوه بر آن در ناحیه‌ی طول موجی (٥۲۸ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر) و نرخ تولید $G(\vec{r},\omega)$ را افزایش داد. چگالی جریان مدار–کوتاه و بازده تبدیل توان برای سلول خورشیدی بدون نقاط کوانتومی به ترتیب برابر ۱۲/۸۳ mA/cm^2 و ۷/۸۷٪ و برای سلول خورشیدی حساس‌شده با نقاط کوانتومی CdSe/ZnS به ترتیب برابر ۱٦/۷۱ mA/cm^2 و ۱۰/۳٦٪ بدست آمد. بنابراین نتیجه می‌گیریم استفاده از نقطه کوانتومی CdSe/ZnS با اندازه‌ی هسته ٤/۹ nm و اندازه‌ی پوسته ۱/۳ nm در یک سلول خورشیدی سیلیکونی، چگالی جریان مدار–کوتاه و بازده تبدیل توان را به ترتیب ۳۰/۲٤٪ و ۳۱/٦۳٪ می‌دهد.

مرجع‌ها

[۱] E. H. Sargent, “Colloidal quantum dot solar cells,” *Nat. Photonics*, vol. **6**, no. 3, (2012) 133–135.

[۲] G. Konstantatos, I. Howard, A. Fischer, S. Hoogland, J. Clifford, E. Klem, L. Levina, and E. H. Sargent; “Ultrasensitive solution-cast quantum dot photodetectors,” *Nature*, vol. **442**, no. 7099, (2006), 180–183.

[۳] S. W. Baek, J. H. Shim, H. M. Seung, G. S. Lee, J. P. Hong, K. S. Lee, and J. G. Park; “Effect of core quantum-dot size on power-conversion-efficiency for silicon solar-cells implementing energy-down-shift using CdSe/ZnS core/shell quantum dots,” *Nanoscale*, vol. **6**, no. 21, (2014), 12524–12531.

[٤] S. W. Baek, J. H. Shim, H. M. Seung, G. S. Lee, J. P. Hong, K. S. Lee, and J. G. Park; “Effect of core quantum-dot size on power-conversion-efficiency for silicon solar-cells implementing energy-down-shift using CdSe/ZnS core/shell quantum dots,” *Nanoscale*, vol. **6**, no. 21, (2014), 12524–12531.

[٥] J.D. Jackson; *Classical Electrodynamics*; 3rd edition, John Wiley and Sons, (1998) 259.

[٦] J. Wu and Z. M. Wang, Eds.; *Quantum Dot Solar Cells*, vol. **15**. New York, NY: Springer New York, (2014).