



# بررسی مشخصه‌های سلول خورشیدی سیلیکونی حساس شده توسط نقاط کوانتومی CdSe با روش FDTD

مسعود لازمی<sup>۱</sup> | اصغر عسگری<sup>۱،۲\*</sup>

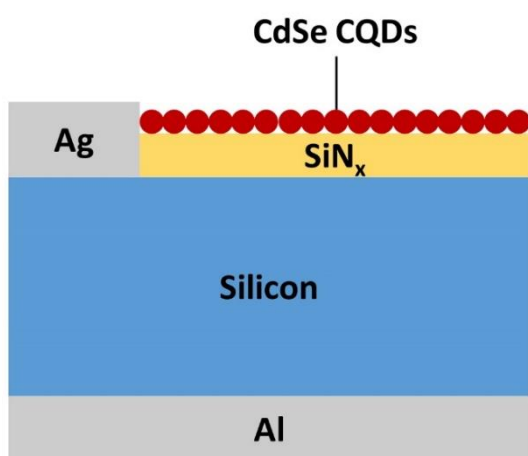
۱ گروه فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز  
 ۲ دانشکده مهندسی برق، الکترونیک و کامپیوتر، دانشگاه استرالیای غربی، استرالیا  
 ۳ قطب علمی فوتونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

نورگسیل [۵،۶]، حسگرها [۷]، لیزرها [۸] و پژوهش‌های بیولوژیکی [۹،۱۰] بهره برد.

استفاده از سلول‌های خورشیدی می‌تواند باعث صرفه جویی 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 نقاط کوانتومی CdSe است. این نقطه کوانتومی نور فرابنفش را تبدیل به نور مرئی می‌کند، به عبارت دیگر فوتون‌های پر انرژی را تبدیل به فوتون‌های کم انرژی می‌کند [۱۱].

## ۲ مدل‌سازی

برای شبیه سازی مشخصه‌های یک سلول خورشیدی سیلیکونی حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe، ساختار شکل ۱ را در نظر می‌گیریم.



شکل ۱ ساختار در نظر گرفته شده برای سلول خورشیدی سیلیکونی حساس شده با نقاط کوانتومی CdSe.

## چکیده

خورشید نور فرابنفش، مرئی و مادون قرمز را گسیل می‌کند، اما سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به صورت عمده نور مرئی را جذب می‌کنند. استفاده از نقاط کوانتومی روشی برای افزایش بازده تبدیل توان سلول‌های خورشیدی است. نقاط کوانتومی CdSe نور فرابنفش را جذب و نور مرئی را گسیل می‌کنند، بنابراین فوتون‌های پرانرژی تبدیل به فوتون‌های کم انرژی می‌شوند. در این مقاله با استفاده از روش FDTD مشخصه‌های یک سلول خورشیدی نقطه کوانتومی را شبیه سازی کردیم. به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe بازتاب سطحی را کاهش و چگالی جریان مدار-کوتاه و نرخ تولید را افزایش داد. افزایش بازده تبدیل توان در مقایسه با سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی ۲۲/۸۸٪ بدست آمد.

**واژگان کلیدی:** بازده تبدیل توان، روش FDTD، سلول خورشیدی سیلیکونی، نقاط کوانتومی CdSe

## ۱ مقدمه

نقاط کوانتومی، بلورهای نیمه رسانای نانو-مقیاس هستند که به خاطر کم-هزینه بودن فرآیند تولید و قابلیت تنظیم شدن گاف باندی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. از این قابلیت‌ها می‌توان در سلول‌های خورشیدی [۱،۲]، آشکارسازها [۳،۴]، دیودهای

دارد، زیرا بازده تبدیل توان سلول خورشیدی متناسب با این کمیت است.

### محاسبه ی بازده تبدیل توان

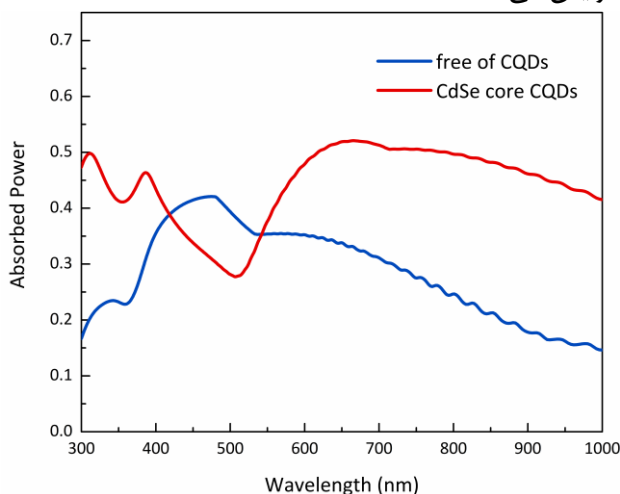
بازده تبدیل توان ( $\eta$ ) یک سلول خورشیدی از رابطه ی زیر بدست می آید [۱]

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{solar}}, \quad (4)$$

که  $V_{oc}$  ولتاژ مدار-باز،  $FF$  ضریب پرشدن و  $P_{solar}$  شدت خورشیدی فرودی ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) است.

### ۳ نتایج و بحث

شکل ۲ توان جذب در ناحیه ی طول موجی ۳۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر را برای دو حالت ۱: سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی و ۲: سلول خورشیدی حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe نشان می دهد. نتیجه ی بدست آمده نشان می دهد که به کار بردن نقطه کوانتومی CdSe توان جذب در ناحیه طول موجی فرابنفش (۳۰۰ نانومتر تا ۴۰۰ نانومتر) و علاوه بر آن در ناحیه ی طول موجی (۵۴۲ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر) را نیز افزایش می دهد.



شکل ۲ توان جذب در ناحیه ی طول موجی ۳۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر

شکل ۳ نمودار کاهش بازتاب سطحی محاسبه شده برای دو حالت در نظر گرفته شده را نشان می دهد. ملاحظه می شود

### محاسبه ی توان جذب

برای محاسبه ی کارایی یک ساختار اپتیکی، محاسبه ی توان جذب در ناحیه ی فعال آن بسیار ضروری است. برای محاسبه ی این کمیت در یک ساختار پیچیده نیاز به روش های عددی از جمله روش FDTD می باشد. روش FDTD شامل تقسیم کردن حجم ناحیه ی شبیه سازی به شبکه های عددی گسسته و حل کردن معادلات ماکسول در فضا در سراسر شبکه ها است. بنابر نظریه ی الکترومغناطیس بردار پوئین تینگ از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1)$$

و جذب در واحد حجم به صورت زیر به دست می آید [۱۲]:

$$Absorption = -\frac{1}{2} \text{Re} \vec{\nabla} \cdot \vec{S} \quad (2)$$

### محاسبه ی نرخ تولید جفت الکترون-حفره

اگر هر فوتون جذب شده در ناحیه ی فعال، یک جفت الکترون-حفره تولید کند، برای محاسبه ی نرخ تولید الکترون در واحد حجم می توان از رابطه ی زیر استفاده کرد [۱۲]:

$$G(\vec{r}, \omega) = \int_{solar \ spectrum} \left( \frac{\epsilon'' |\vec{E}(\omega)|^2}{2\hbar} \right) d\omega \quad (3)$$

که  $|\vec{E}(\omega)|^2$  بزرگی مربع میدان الکتریکی در داخل ساختار است که ناشی از تابش خورشیدی می باشد،  $\epsilon''$  قسمت موهومی تابع دی الکتریک ماده ی جاذب و  $\hbar$  ثابت پلانک کاهش یافته است.

### محاسبه ی چگالی جریان مدار-کوتاه

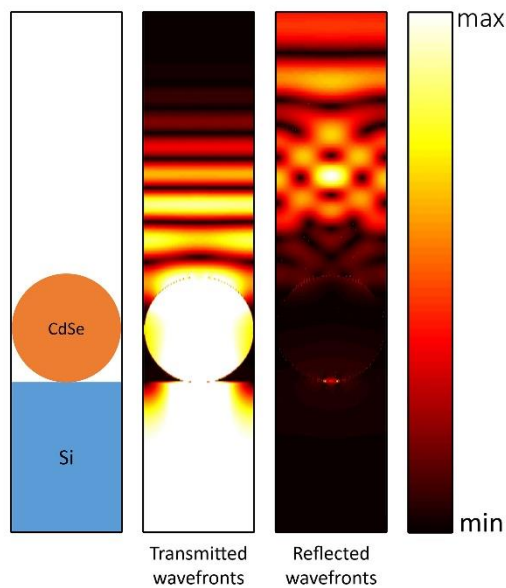
برای محاسبه ی چگالی جریان مدار-کوتاه ( $J_{sc}$ ) می توان از نرخ تولید  $G(\vec{r}, \omega)$  روی حجم ناحیه ی فعال انتگرال گیری کرد که از رابطه ی زیر بدست می آید [۱۲]

$$J_{sc} = \frac{q}{A} \int G(\vec{r}, \omega) dV \quad (4)$$

که در آن  $q$  بار الکترون و  $A$  مساحت ناحیه ی فعال سلول خورشیدی است. چگالی جریان مدار-کوتاه اهمیت بسیار زیادی

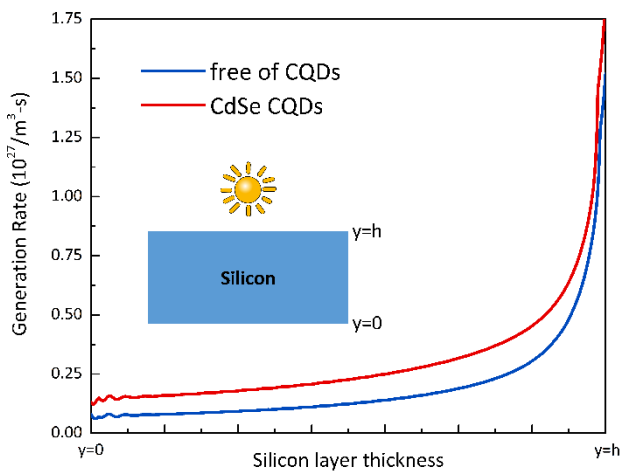
Finite Difference Time Domain

تخت باقی نمی‌مانند و در اثر برخورد با نقطه‌ی کوانتومی پراکنده می‌شوند.



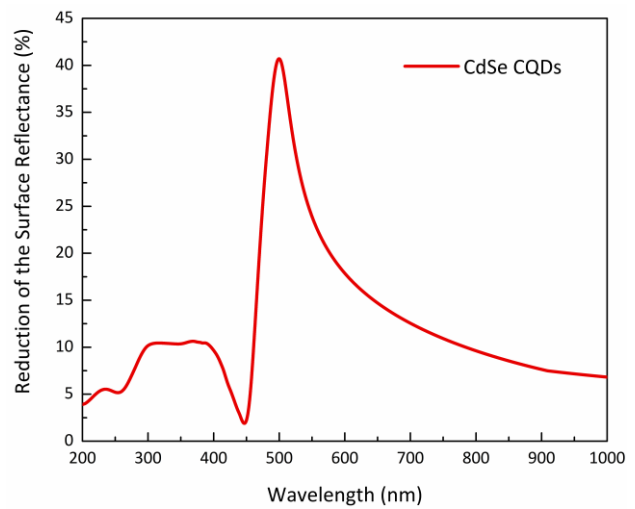
شکل ۵ طرح میدان الکتریکی وابسته به زمان مربوط به حالت حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe.

شکل ۶ نمودار نرخ تولید  $G(\vec{r}, \omega)$  محاسبه شده را نشان می‌دهد. به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe باعث افزایش نرخ تولید نسبت به سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی می‌شود. نکته 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 رفته رفته کاهش می‌یابد.



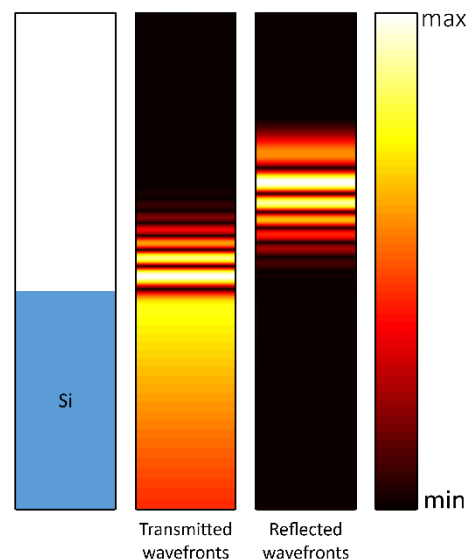
شکل ۶ نرخ تولید برای ۱: سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی و ۲: سلول خورشیدی حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe.

که به کار بردن نقاط کوانتومی CdSe باعث کاهش بازتاب سطحی نسبت به سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی می‌شود.



شکل ۳ کاهش بازتاب سطحی

شکل ۴ طرح میدان الکتریکی وابسته به زمان را نشان می‌دهد که مربوط به حالت بدون نقطه کوانتومی است. مشاهده می‌شود که در این حالت جبهه‌ی موج عبوری و بازتابی به صورت تخت باقی می‌ماند.



شکل ۴ طرح میدان الکتریکی وابسته به زمان مربوط به حالت بدون نقطه کوانتومی.

شکل ۵ طرح میدان الکتریکی وابسته به زمان را نشان می‌دهد که مربوط به حالت حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe است. در این حالت جبهه‌ی موج عبوری و بازتابی به صورت

جدول ۱ چگالی جریان مدار-کوتاه ( $J_{sc}$ )، ولتاژ مدارباز ( $V_{oc}$ )، ضریب پرشدن ( $FF$ ) و بازده تبدیل توان را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

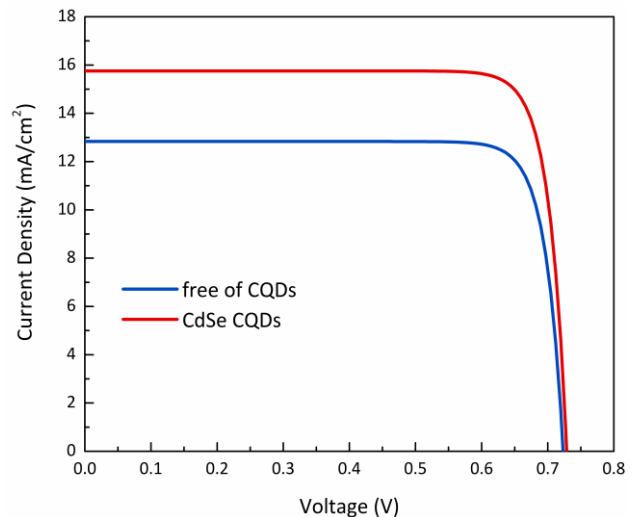
جدول ۱: مشخصه‌های محاسبه شده سلول‌های خورشیدی

$\eta$ (%)	$FF$ (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	
۷/۸۷	۸۴/۸۵	۰/۷۲	۱۲/۸۳	بدون نقطه کوانتومی
۹/۷۵	۸۴/۹۳	۰/۷۳	۱۵/۷۶	حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe

### ۴ نتیجه گیری

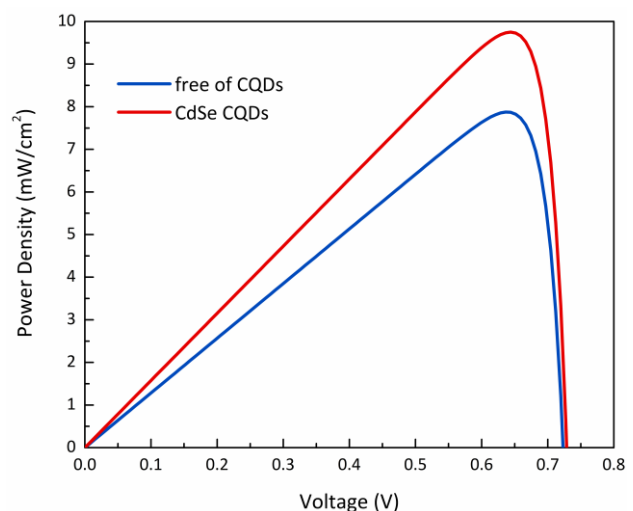
استفاده از نقاط کوانتومی CdSe توان جذب در ناحیه‌ی طول موجی فرابنفش (۳۰۰ نانومتر تا ۴۰۰ نانومتر) و علاوه بر آن در ناحیه‌ی طول موجی (۵۴۲ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر) و نرخ تولید  $G(\vec{r}, \omega)$  را افزایش داد. جریان مدار-کوتاه ( $J_{sc}$ ) و بازده تبدیل توان ( $\eta$ ) برای سلول خورشیدی بدون نقطه کوانتومی به ترتیب برابر  $12/83 \text{ mA/cm}^2$  و  $7/87\%$  و برای سلول خورشیدی حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe به ترتیب برابر  $15/76 \text{ mA/cm}^2$  و  $9/75\%$  بدست آمد. بنابراین نتیجه می‌گیریم که استفاده از نقطه کوانتومی CdSe در یک سلول خورشیدی سیلیکونی، جریان مدار-کوتاه ( $J_{sc}$ ) و بازده تبدیل توان ( $\eta$ ) را نسبت به سلول خورشیدی بدون نقاط کوانتومی به ترتیب  $22/83\%$  و  $23/88\%$  افزایش می‌دهد.

شکل ۷ نمودار چگالی جریان-ولتاژ برای دو حالت بحث شده را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که  $J_{sc}$  در حالت بدون نقطه کوانتومی برابر  $12/83 \text{ mA/cm}^2$  و در حالت حساس شده با نقطه کوانتومی CdSe برابر  $15/76 \text{ mA/cm}^2$  است. بنابراین به کار بردن نقطه کوانتومی  $J_{sc}$  را نسبت به حالت بدون نقطه کوانتومی  $22/83\%$  افزایش می‌دهد.



شکل ۷ نمودار چگالی جریان-ولتاژ

شکل ۸ نمودار چگالی توان-ولتاژ برای دو حالت بحث شده را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که استفاده از نقطه کوانتومی CdSe باعث افزایش چگالی توان می‌شود.



شکل ۸ نمودار چگالی توان-ولتاژ

## مراجع

- [1] A. G. Pattantyus-Abraham, I. J. Kramer, A. R. Barkhouse, X. Wang, G. Konstantatos, R. Debnath, L. Levina, I. Raabe, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, and E. H. Sargent, "Depleted-Heterojunction Colloidal Quantum Dot Solar Cells," *ACS Nano*, vol. 4, no. 6, pp. 3374–3380, Jun. 2010.
- [2] E. H. Sargent, "Colloidal quantum dot solar cells," *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 3, pp. 133–135, 2012.
- [3] 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, pp. 180–183, 2006.
- [4] S. M. Geyer, J. M. Scherer, N. Moloto, F. B. Jaworski, and M. G. Bawendi, "Efficient luminescent down-shifting detectors based on colloidal quantum dots for dual-band detection applications," *ACS Nano*, vol. 5, no. 7, pp. 5566–5571, 2011.
- [5] B. S. Mashford, M. Stevenson, Z. Popovic, C. Hamilton, Z. Zhou, C. Breen, J. Steckel, V. Bulovic, M. Bawendi, S. Coe-Sullivan, and P. T. Kazlas, "High-efficiency quantum-dot light-emitting devices with enhanced charge injection," *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 407–412, Apr. 2013.
- [6] Y. Yang, Y. Zheng, W. Cao, A. Titov, J. Hyvonen, J. R. Manders, J. Xue, P. H. Holloway, and L. Qian, "High-efficiency light-emitting devices based on quantum dots with tailored nanostructures," *Nat. Photonics*, 2015.
- [7] R. C. Somers, M. G. Bawendi, and D. G. Nocera, "CdSe nanocrystal based chem-/bio- sensors," *Chem Soc Rev*, vol. 36, no. 4, pp. 579–591, 2007.
- [8] V. I. Klimov, a a Mikhailovsky, S. Xu, a Malko, J. a Hollingsworth, C. a Leatherdale, H. Eisler, and M. G. Bawendi, "Optical Gain and Stimulated Emission in Nanocrystal Quantum Dots," *Science* (80-. ), vol. 290, no. 5490, pp. 314–317, 2000.
- [9] I. L. Medintz, H. T. Uyeda, E. R. Goldman, and H. Mattoussi, "Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing," *Nat. Mater.*, vol. 4, no. 6, pp. 435–446, Jun. 2005.
- [10] J. Zhou, Y. Yang, and C. Y. Zhang, "Toward Biocompatible Semiconductor Quantum Dots: From Biosynthesis and Bioconjugation to Biomedical Application," *Chem. Rev.*, vol. 115, no. 21, pp. 11669–11717, Nov. 2015.
- [11] 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, pp. 12524–12531, 2014.
- [12] J. Wu and Z. M. Wang, Eds., *Quantum Dot Solar Cells*, vol. 15. New York, NY: Springer New York, 2014.

# Investigation of CdSe Quantum-dot-sensitized Silicon Solar Cell Characteristics by Means of FDTD Method

M. Lazemi<sup>1</sup>, A. Asgari<sup>1, 2, 3\*</sup>

1 Photonics Department, Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz

2 School of Electrical, Electronic and Computer Engineering; University of Western Australia, Australia

3 Excellence Center for Photonics, University of Tabriz, Tabriz.

**Abstract** The sun emits ultraviolet (UV), visible and infrared light, however silicon-based solar cells mainly absorb visible light. The employing of the quantum dots (QDs) is a way to increasing the efficiency of the solar cells. CdSe QDs absorb UV light and emit visible light, thus high-energy photons are converting to low-energy photons. In this paper, we simulated the characteristics of a quantum dot solar cell by means of FDTD method. The employing of the CdSe QDs reduced the surface reflectance and enhanced short-circuit current density and generation rate. The enhancement of PCE is 23.88% comparing to solar cell without QDs.

**Keywords** Power Conversion Efficiency, FDTD Method, Silicon Solar Cell, CdSe Quantum Dots .

\* Correspondent Author Email: [asgari@tabrizu.ac.ir](mailto:asgari@tabrizu.ac.ir)