

Design and numerical modeling of CdTe nanostructured thin film solar cell and the effect of CdSe_xTe_{1-x} intermediate layer on the efficiency enhancement by SCAPS-1D software

Saeedeh Souri ^a, Maziar Marandi ^{b*}

^{a, b} Physic Department, Faculty of Science, Arak University, Arak 38156, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Souri S, Marandi M. Design and numerical modeling of CdTe nanostructured thin film solar cell and the effect of CdSe_xTe_{1-x} intermediate layer on the efficiency enhancement by SCAPS-1D software. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023; 2(4): 385-392.

 <https://10.52547/masm.2.4.385>

KEYWORDS

Thin film,
numerical modeling,
SCAPS-1D,
CdSe_xTe_{1-x}.

ABSTRACT

In this study, we combined the experimental work performed using a one-dimensional simulation program to simulate the capacity of a solar cell. Simulation can be used to show the real effects of a phenomenon on the target subject, under controlled and regulated conditions. In this here, CdTe based thin film solar cell has been investigated under AM 1.5 global spectrum with using Solar Cell Capacitance Simulator-1D (SCAPS-1D) software. Initially, solar cells with nanostructured FTO/TiO₂/n-CdSe/p-CdTe were considered as the elementary cells and FTO/ TiO₂/n-CdSe/p- CdSe_{1-x}Te_x/p-CdTe as the upgraded cells. The purpose of this study was to investigate the key role of layer CdSe_xTe_{1-x}. The results of the analyzes showed that the presence of CdSe_xTe_{1-x} nanostructured layer, between p- type CdTe absorber layer and n- type CdSe layer increased PCE from 14.05% to 21.98%, JSC from 20.42. mA/ cm² to 26.06 mA/cm², FF from 54.73% to 57.69% and VOC from 1.25 V to 1.46 V compared to the elementary cell.

Extended Abstract

1. Introduction

Much research has been done in the field of third generation thin film solar cells, such as Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS) and cadmium telluride (CdTe). The reason for the popularity of these types of cells is their cost-effectiveness because in their production, less material is consumed compared to ordinary monocrystalline cells [1, 2]. CdTe technology is about 30% cheaper than CIGS technology and about 40% cheaper than a-Si technology [3]. Various researchers around the world have used different software to simulate CdTe-based photovoltaic cells. This process has continued until the desired values are achieved. Using numerical modeling, without wasting cost and materials, different structures can be designed and analyzed to finally obtain the useful amount of parameters needed to build new structures with greater efficiency and stability. In photovoltaic cells, CdTe ($E_g \approx 1.5$ eV at room temperature) is used as an absorbed layer because it illustrates high absorption behavior with an absorption coefficient of around 10^4 cm⁻¹ in the visible spectral region. Recent reaserch has concentrated on the use of a CdSe layer to partner CdTe, either in addition to or as a substitution for CdS. A group of researchers reported higher current densities and higher responses from 860 nm to 910 nm in CdSe / CdTe solar cells. In contrast to CdS, CdSe is also known as an attractive partner layer material for CdTe due to its low lattice mismatch of about 6% with CdTe (compared to CdS) and

higher solubility in the CdTe adsorbent layer. Previous research at the university of toledo has reported the efficiency of about 15% of CdSe / CdTe thin film photovoltaic devices with an area of 0.08 cm² [4]. The diffusion of Se in the CdTe layer

* Corresponding author. Tel.: 09183612988

E-mail address: m-marandi@araku.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.2.4.385>.

Received: May 18, 2022; Received in revised form: November 14, 2022; Accepted: January 24, 2023.

© Author



is expected to reduce the bandgap of CdTe due to bowing effects, which clarifies the increased response for long-wavelength photons. Full penetration of the CdSe layer into the CdTe layer has been reported that increased light current in short wavelength regions. In recent years, the presence of CdSe_xTe_{1-x} nanostructured layer has led to a significant increase in power conversion efficiency, which mainly leads to an increase in optical current and improved lifetime of the absorber carrier [5]. By changing the band gap of the CdTe layer towards the theoretically optimal values, it is possible to increase the photocurrent and thus the efficiency in the photovoltaic cell. Various ways can be taken to change the band gap of the CdTe layer. One of these hopeful ways is doping of Se element in the CdTe and forming the CdSe_xTe_{1-x} layer because it can reduce its band gap to 1.36 eV [6].

In this work, we investigate photovoltaic performance FTO/TiO₂/n-CdSe/p-CdSe_xTe_{1-x}/p-CdTe/Pt nanostructured thin film solar cell using Scaps Software (1D) under an AM 1.5 light spectrum, in which FTO serves as the front contact, TiO₂ layer as the window layer, CdTe as the absorber layer and CdSe partner layer for absorber layer and CdSe_xTe_{1-x} secondary absorber layer, Pt as back contact play role in this cell.

2. Numerical Modeling

Software analysis and evaluation, with considering all aspects (without cost loss), have a significant role in the design and production of high-performance solar cells. Popular software such as COMSOL, SILVACO ATLAS, AMPS-1D, WXAMPS and SCAPS-1D, by numerical modeling to solve the equations of properties of semiconductor materials used in photovoltaic cells. Among the mentioned software, Solar Cell Capacitance Simulator (SCAPS-1D) is more favorite than other simulators by modeling a maximum of seven layers and unusual measurements. It is advanced by Electronics group and Information Systems (ELIS) of the University of Gent, Belgium. SCAPS can have the most alternating.

Table 1. The physical parameters required for the simulation the FTO/TiO₂/CdSe/ CdSe_xTe_{1-x}/ CdTe/Pt thin film solar cell [9-11].

Parameter	FTO	TiO ₂	CdSe	CdSe _x Te _{1-x}	CdTe
Thickness (nm)	300	160	50	500	50
Bandgap (eV)	3.5	3.3	1.7	1.39	1.5
Dielectric permittivity	9	10	10	10	9.4
CB effective density of states (cm ⁻³)	1 E 19	1.8 E 18	1E 17	1 E 17	1 E 17
VB effective density of states (cm ⁻³)	1 E 18	2.5 E 19	1E 18	1.8 E 18	1E18
Electron mobility (cm ² /Vs)	20	100	100	320	320
Hole mobility (cm ² /Vs)	10	25	25	40	40

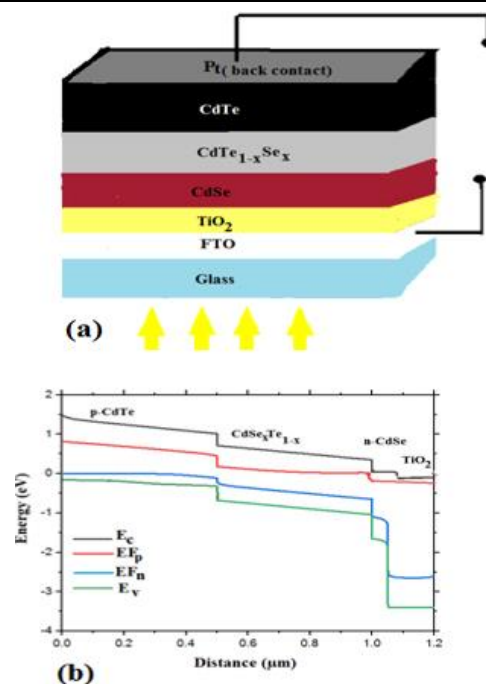


Figure 1. (a) the structure plan and (b) Schematic band diagram of the FTO/TiO₂/CdSe/ CdSe_xTe_{1-x}/ CdTe/Pt thin film solar cell.

current (AC) and direct current (DC) measurements in dark and light situations. It containing the current voltage diagram (J - V), that various parameters such as power conversion efficiency (PCE), short circuit current density (Jsc), open circuit voltage (Voc), fill factor (FF%) are extracted at various temperatures. Also quantum efficiency (QE%), capacitance frequency spectroscopy C(f), capacitance +voltage spectroscopy C(V), generation and recombination profiles, carrier current densities, band diagrams that describe correctly the energy bands Ec and Ev at the interface between the layers, etc [1, 2]. Figure 1 shows the structure plan and Schematic of band diagram of the FTO/TiO₂/n-CdSe/ p-CdSe_xTe_{1-x}/ p-CdTe /Pt thin film solar cell. The materials parameters required for the simulation are listed in Table 1.

3. Results and discussions

Figure 2 shows the current-voltage and quantum efficiency curves for elementary and upgraded nanostructured thin film solar cell. The effect of $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ layer between the CdTe absorber layer and the CdSe layer in the Simulation results is quite evident. In Figure 2 (b), quantum efficiency (QE) as a function of wavelength of the solar cell structure is shown. Photovoltaic parameters are listed in Table 2. The absorption maximum wavelength (λ_{\max}) from UV spectrum is obtained from the equation (1) that $E_g = \text{bandgap energy (eV)}$ is (Observed from UV-Vis Spectrum).

$$\lambda(\text{nm}) = 1240(\text{eV}\cdot\text{nm}) / E_g(\text{eV}) \quad (1)$$

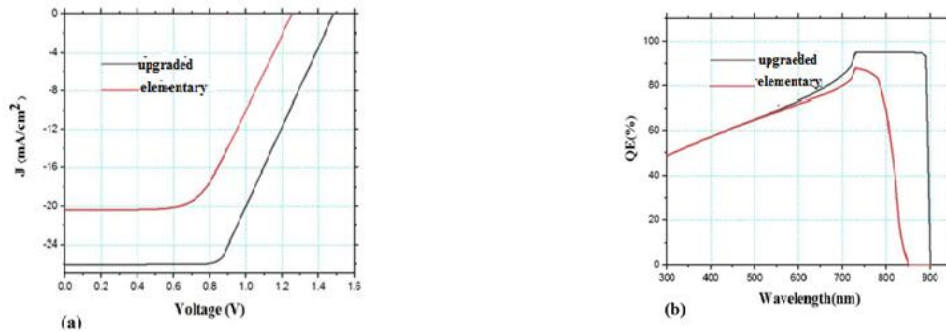


Figure 2. J-V (a) and (b) quantum efficiency (QE) curves for elementary and upgraded thin film solar cell.

Table 2 The photovoltaic parameters (PV) of the elementary and upgraded cell

Cell	Voc (v)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Elementary cell	1.25	20.42	54.73	14.05
Upgraded cell	1.46	26.06	57.69	21.98

3.1. Effect of $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ absorber layer defects on the PV performance

Defect density of $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ absorber layer effects the solar cells efficiency. Decrease in defect densities effect yield limited recombination and trap cores and increase the performance of solar cells. Defects at the interface level has a key task to controlling of the surface recombination [9-11]. According to Figure 3 with incrementing the defect density of $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ layer leads to reduce in all photovoltaic parameters, because faster electrons and holes of the interface are captured, the higher is the surface recombination velocity.

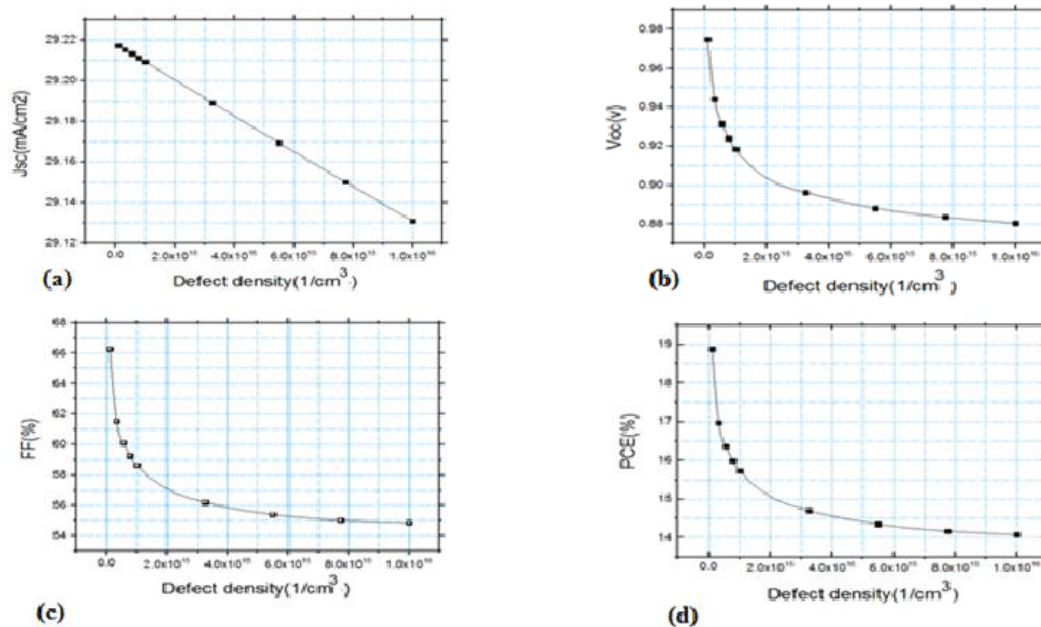


Figure 3 The simulated curves of JSC (a), VOC (b), FF(c), PCE(d) of the $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ layer vs the defect density

4. Conclusion

In this article, we simulated FTO/TiO₂/n-CdSe/p-CdTe/Pt a thin film solar cell using SCAPS- 1D software. The effect of changing different structural and electronic parameters of the layers was investigated until to achieved the optimal value. The presence of the $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ intermediate layer ($X = 0.32$ and the $E_g = 1.39$ eV) between CdSe nanostructured thin film and CdTe nanostructured thin film improved incident light harvest in long wavelength, so more photogenerated charge carriers are produced and increased the power conversion efficiency from 14.05% to 21.98 %.



طراحی و مدل سازی عددی سلول خورشیدی لایه نازک نانوساختار CdTe و تأثیر لایه میانی $CdSe_xTe_{1-x}$ بر افزایش بازدهی آن توسط نرم افزار SCAPS-1D

سعیده سوری الف، مازیار مرندی ب*

الف دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک، ایران، saeedeh_soori@araku.ac.ir

ب* دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-marandi@araku.ac.ir

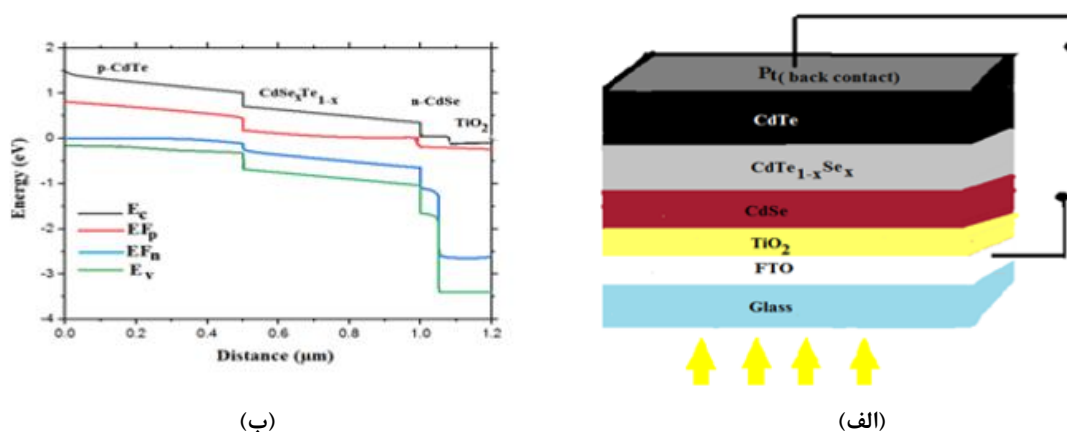
واژگان کلیدی	چکیده
مدل سازی عددی، اسکپس یک بعدی، $CdSe_xTe_{1-x}$	در این مطالعه، ما کار تجربی انجام شده را با استفاده از یک برنامه شبیه سازی یک بعدی ترکیب نمودیم، تا ظرفیت سلول خورشیدی را شبیه سازی نماییم. از شبیه سازی می توان برای نشان دادن اثرات واقعی یک پدیده بر روی سوژه مورد نظر، تحت شرایط کنترل شده و تنظیم شده استفاده کرد. در اینجا، سلول خورشیدی لایه نازک مبتنی بر CdTe تحت طیف AM 1.5 global با استفاده از نرم افزار Solar Cell Capacitance Simulator-1D (SCAPS-1D) مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا سلول خورشیدی با ساختار FTO/TiO ₂ /n-CdSe/p- CdSe _x Te _{1-x} /p-CdTe به عنوان سلول اولیه و FTO/TiO ₂ /n-CdSe/p-CdTe به عنوان سلول ارتقا یافته در نظر گرفته شد. هدف از این مطالعه بررسی نقش کلیدی لایه $CdSe_xTe_{1-x}$ بود. نتایج آنالیزها نشان داد که حضور لایه نانوساختار $CdSe_xTe_{1-x}$ بین لایه جاذب CdTe نوع p و لایه CdSe نوع n، PCE را از ۱۴/۰۵٪ به ۲۱/۹۸٪، J_{sc} از ۲۰/۴۲ mA/cm ² تا ۲۶/۰۶ mA/cm ² ، FF از ۵۴/۷۳٪ تا ۵۷/۶۹٪ و V_{oc} از ۱/۲۵ V تا ۱/۴۶ V نسبت به سلول اولیه تغییر می دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴	

۱- مقدمه

تحقیقات زیادی در زمینه سلول های خورشیدی لایه نازک نسل سوم، مانند $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) و تلورید کادمیوم (CdTe) انجام شده است. دلیل محبوبیت این نوع سلول ها مقرون به صرفه بودن آنهاست زیرا در تولید آنها مواد کمتری در مقایسه با سلول های تک کریستالی معمولی مصرف می شود [۱،۲]. فناوری CdTe حدود ۳۰ درصد ارزان تر از فناوری CIGS و حدود ۴۰ درصد ارزان تر از فناوری a-Si است [۳]. محققان مختلف در سراسر جهان از نرم افزارهای مختلفی برای شبیه سازی سلول های فتوولتائیک مبتنی بر CdTe استفاده کرده اند. این روند تا رسیدن به مقادیر مورد نظر ادامه یافته است. با استفاده از مدل سازی عددی، بدون اتلاف هزینه و مصالح، می توان سازه های مختلف را طراحی و تجزیه و تحلیل کرد تا در نهایت مقدار مفید پارامترهای مورد نیاز برای ساخت سازه های جدید با کارایی و پایداری بیشتر به دست آید. در سلول های فتوولتائیک CdTe ($E_g \approx 1.5$ eV) در دمای اتاق) به عنوان یک لایه جاذب استفاده می شود زیرا رفتار جذب بالایی را با ضریب جذب حدود 10^4 cm⁻¹ در ناحیه طیفی مرئی نشان می دهد. تحقیقات اخیر بر استفاده از یک لایه CdSe برای مشارکت با CdTe، علاوه بر یا به عنوان جایگزینی برای CdS متمرکز شده است. گروهی از محققان چگالی جریان بالاتر و پاسخ های بالاتر را از ۸۶۰ نانومتر تا ۹۱۰ نانومتر در سلول های خورشیدی CdSe/CdTe گزارش کردند. برخلاف CdS، CdSe همچنین به عنوان

یک ماده لایه شریک جذاب برای CdTe شناخته می‌شود، زیرا عدم تطابق شبکه کم آن در حدود ۶٪ (در مقایسه با CdS) و حلالیت بالاتر در لایه جذب CdTe دارا می‌باشد. تحقیقات قبلی در دانشگاه تولدو کارایی حدود ۱۵ درصد از دستگاه‌های فتوولتائیک لایه نازک CdSe/CdTe را با مساحت ۰.۰۸ سانتی متر مربع گزارش کرده است [۴]. انتشار Se در لایه CdTe انتظار می‌رود که شکاف باند CdTe را به دلیل اثرات خمشی کاهش دهد، که پاسخ افزایش یافته برای فوتون‌های با طول موج بلند را روشن می‌کند. نفوذ کامل لایه CdSe به لایه CdTe گزارش شده است که باعث افزایش جریان نور در مناطق با طول موج کوتاه شده است. در سال‌های اخیر، وجود لایه نانوساختار $CdSe_xTe_{1-x}$ منجر به افزایش قابل توجهی در راندمان تبدیل شده است که عمدتاً منجر به افزایش جریان نوری و بهبود طول عمر حامل جذب می‌شود [۵]. با تغییر فاصله باند لایه CdTe به سمت مقادیر بهینه نظری، می‌توان جریان نوری و در نتیجه راندمان را در سلول فتوولتائیک افزایش داد. راه‌های مختلفی را می‌توان برای تغییر شکاف باند لایه CdTe در نظر گرفت. یکی از این راه‌های امیدوارکننده، دوپینگ عنصر Se در CdTe و تشکیل لایه $CdSe_xTe_{1-x}$ است زیرا می‌تواند شکاف باند آن را به $1/36$ ev کاهش دهد [۶].

در این کار، ما عملکرد فتوولتائیک سلول خورشیدی لایه نازک نانوساختار $FTO/TiO_2/n-CdSe/p-CdSe_xTe_{1-x}/p-CdTe/Pt$ را با استفاده از نرم‌افزار Scaps (1D) تحت طیف نور AM 1.5، که در آن FTO به عنوان الکترود جلویی عمل می‌کند، بررسی می‌کنیم لایه TiO_2 به عنوان لایه پنجره، CdTe به عنوان لایه جذب و CdSe به عنوان لایه کمک‌کننده برای لایه جذب و لایه جذب ثانویه $CdSe_xTe_{1-x}$ ، Pt به عنوان الکترود کاتد در این سلول نقش دارند.



شکل ۱ (الف) نمودار نوار انرژی و (ب) شماتیک سلول خورشیدی لایه نازک $FTO/TiO_2/CdSe/CdSe_xTe_{1-x}/CdTe/Pt$

جدول ۱ پارامترهای فیزیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی سلول خورشیدی لایه نازک.

CdTe	$CdSe_xTe_{1-x}$	CdSe	TiO_2	FTO	Parameter
۵۰	۵۰۰	۵۰	۱۶۰	۳۰۰	ضخامت (nm)
۱/۵	۱/۳۹	۱/۷	۳/۳	۳/۵	شکاف انرژی (eV)
۹/۴	۱۰	۱۰	۱۰	۹	گذردهی دی‌الکتریک
$1 \text{ E } 17$	$1 \text{ E } 17$	$1 \text{ E } 17$	$1/8 \text{ E } 18$	$1 \text{ E } 19$	چگالی مؤثر نوار رسانش (cm^{-3})
$1 \text{ E } 18$	$1/8 \text{ E } 18$	$1 \text{ E } 18$	$2/5 \text{ E } 19$	$1 \text{ E } 18$	چگالی مؤثر نوار ظرفیت (cm^{-3})
۳۲۰	۳۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	تحرک الکترونی (cm^2/Vs)
۴۰	۴۰	۲۵	۲۵	۱۰	تحرک حفره (cm^2/Vs)

۲- مدل سازی عددی

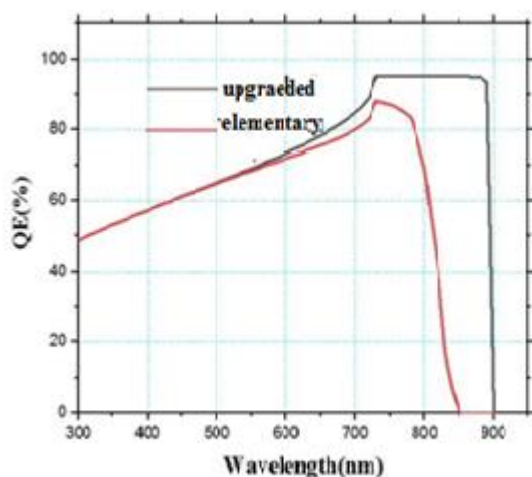
تحلیل و ارزیابی نرم‌افزار با در نظر گرفتن تمامی جوانب (بدون افت هزینه) نقش بسزایی در طراحی و تولید سلول‌های خورشیدی با کارایی بالا دارد. نرم‌افزارهای معروفی مانند COMSOL، SILVACO ATLAS، AMPS-1D، WXAMPS و SCAPS-1D، با مدل‌سازی عددی معادلات خواص مواد نیمه‌هادی مورد استفاده در سلول‌های فتوولتائیک را حل می‌کنند. در بین نرم‌افزارهای ذکر شده، شبیه‌ساز خازنی سلول خورشیدی (SCAPS-1D) با مدل‌سازی حداکثر هفت لایه و اندازه‌گیری‌های

غیرعادی، محبوبیت بیشتری نسبت به شبیه‌سازهای دیگر دارد. این توسط گروه الکترونیک و سیستم‌های اطلاعاتی (ELIS) دانشگاه گنت بلژیک توسعه یافته است. SCAPS می‌تواند بیشترین اندازه‌گیری جریان متناوب (AC) و جریان مستقیم (DC) را در شرایط تاریک و روشن داشته باشد. حاوی نمودار ولتاژ جریان (J - V) است که پارامترهای مختلفی مانند راندمان تبدیل توان (PCE)، چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، ضریب پر (FF) در دماهای مختلف استخراج می‌شوند. همچنین راندمان کوانتومی (%QE)، طیف‌سنجی فرکانس ظرفیت $C(f)$ ، طیف‌سنجی ظرفیت + ولتاژ $C(V)$ ، پروفیل‌های تولید و نو ترکیب، چگالی جریان حامل، نمودارهای بانندی که نوارهای انرژی E_c و E_v را در سطح مشترک بین لایه‌ها به درستی توصیف می‌کنند. و غیره [۷، ۸]. شکل ۱ طرح ساختاری و شماتیک نمودار نواری سلول خورشیدی لایه نازک FTO/TiO₂/n- CdSe/p- CdSe_xTe_{1-x}/p-CdTe/Pt را نشان می‌دهد. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول ۱ لیست شده است.

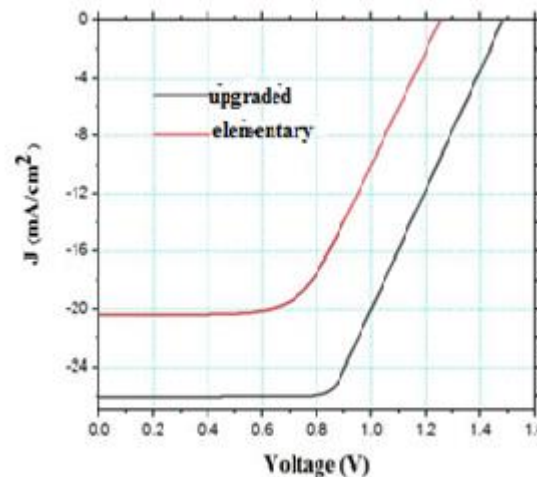
۳- نتایج

شکل ۲ منحنی‌های جریان-ولتاژ و بازده کوانتومی را برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک نانو ساختار اولیه و ارتقا یافته نشان می‌دهد. تأثیر لایه CdSe_xTe_{1-x} بین لایه جذب‌کننده CdTe و لایه CdSe در نتایج شبیه‌سازی کاملاً مشهود است. در شکل ۲ (ب) بازده کوانتومی (QE) به‌عنوان تابعی از طول موج ساختار سلول خورشیدی نشان داده شده است. پارامترهای فتوولتاییک در جدول ۲ ذکر شده‌اند. حداکثر طول موج جذب (λ_{max}) از طیف UV-Vis، از رابطه (۱) به دست می‌آید که E_g شکاف انرژی مشاهده شده از طیف (UV-Vis) است.

$$\lambda(nm) = 1240 (ev \cdot nm) / E_g(ev) \quad (1)$$



(ب)



(الف)

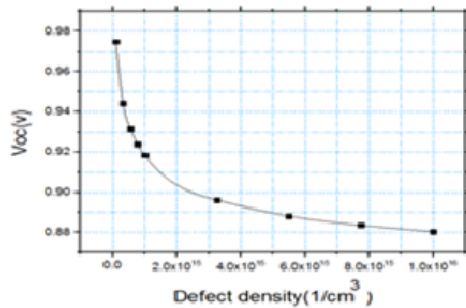
شکل ۲ (الف) چگالی جریان - ولتاژ (J-V) و (ب) منحنی‌های بازده کوانتومی (QE) برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک اولیه و ارتقا یافته.

جدول ۲ پارامترهای فتوولتاییک (PV) سلول اولیه و ارتقا یافته.

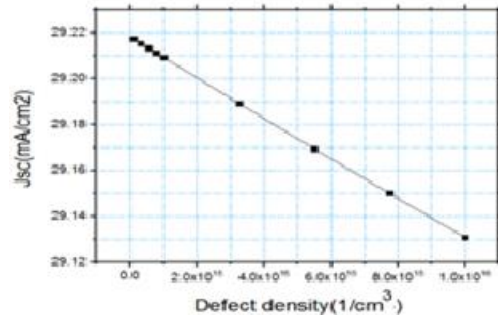
PCE (%)	FF (%)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (v)	سلول
۱۴/۰۵	۵۴/۷۳	۲۰/۴۲	۱/۲۵	سلول اولیه
۲۱/۹۸	۵۷/۶۹	۲۶/۰۶	۱/۴۶	سلول ارتقا یافته

۳-۱- تأثیر چگالی نقص لایه CdSe_xTe_{1-x} بر عملکرد PV

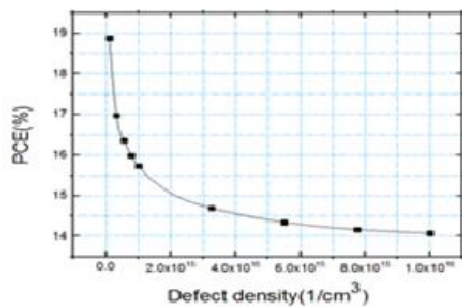
چگالی نقص لایه جاذب CdSe_xTe_{1-x} بر کارایی سلول‌های خورشیدی تأثیر می‌گذارد. کاهش آن سبب محدود شدن نو ترکیبی باز ترکیب و دام‌ها و عیوب هسته‌ها می‌شود و عملکرد سلول‌های خورشیدی را افزایش می‌دهد. نقص در سطح رابط یک وظیفه کلیدی برای کنترل باز ترکیب سطح است [۹-۱۱]. مطابق شکل ۳، با افزایش چگالی نقص لایه CdSe_xTe_{1-x} منجر به کاهش تمام پارامترهای فتوولتاییک می‌شود، زیرا الکترون‌ها و حفره‌های سریع‌تر باز ترکیب می‌شوند.



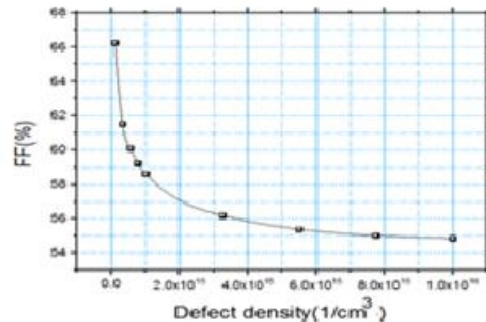
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳ منحنی‌های شبیه‌سازی شده پارامترهای فتوولتائیک لایه CdSe_xTe_{1-x} در مقابل چگالی نقص.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله سلول خورشیدی FTO/TiO₂/n-CdSe/p-CdTe/Pt را با استفاده از نرم‌افزار SCAPS-1D شبیه‌سازی کردیم. تاثیر تغییر پارامترهای مختلف ساختاری و الکترونیکی لایه‌ها تا رسیدن به مقدار بهینه مورد بررسی قرار گرفت. وجود لایه میانی CdSe_xTe_{1-x} با $X=0.32$ و $E_g = 1.39$ eV بین لایه‌های نازک نانوساختار CdSe و CdTe، برداشت نور فرودی را در طول موج بلند بهبود بخشید، بنابراین حامل‌های بار نوری بیشتری تولید می‌شوند و بازدهی مؤثر را از ۱۴/۰۵٪ تا ۲۱/۹۸٪ افزایش می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] Bernal-Condia A, Sánchez-Cely JA, Bastidas-Rodriguez JD, Botero-Londono MA, Mantilla-Villalobos MA. Simulation of a thin-film solar cell based in kesterite using Matlab. 1 ed: IOP Publishing. p. 012020.
- [2] SÜRÜCÜ G, GÜLİÜ HH, Bayraklı Ö, Parlak M. Enhancement in photovoltaic characteristics of CdS/CdTe heterojunction. Politeknik Dergisi. 2017;20:801-5.
- [3] Nykyruy LI, Yavorskyi RS, Zapukhlyak ZR, Wisz G, Potera P. Evaluation of CdS/CdTe thin film solar cells: SCAPS thickness simulation and analysis of optical properties. Optical Materials. 2019;92:319-29.
- [4] Paudel NR, Yan Y. Enhancing the photo-currents of CdTe thin-film solar cells in both short and long wavelength regions. Applied Physics Letters. 2014;105:183510.
- [5] Zaunbrecher KN, Kuciauskas D, Swartz CH, Dipppo P, Edirisooriya M, Ogedengbe OS, et al. Impact of extended defects on recombination in CdTe heterostructures grown by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters. 2016;109:091904.
- [6] Lingg M, Buecheler S, Tiwari AN. Review of CdTe_{1-x}Se_x Thin Films in Solar Cell Applications. Coatings. 2019;9:520.
- [7] Khattak YH. Modeling of high power conversion efficiency thin film solar cells. 2019.

- [8] Burgelman M, Verschraegen J, Degrave S, Nollet P. Modeling thin-film PV devices. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2004;12:143-53.
- [9] Teyou Ngoupo A, Ouédraogo S, Ndjaka JM. Numerical analysis of interface properties effects in CdTe/CdS: O thin film solar cell by SCAPS-1D. *Indian Journal of Physics*. 2019;93:869-81.
- [10] Cheraghizade M, Jamali-Sheini F, Shabani P. Annealing temperature of nanostructured SnS on the role of the absorber layer. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019;90:120-8.
- [11] Tan K, Lin P, Wang G, Liu Y, Xu Z, Lin Y. Controllable design of solid-state perovskite solar cells by SCAPS device simulation. *Solid-State Electronics*. 2016;126:75-80.