

Simulation and Performance Analysis of High-Efficiency Solar Cells with Absorber Layers Composed of Silicon and Cadmium Telluride

Donya Adabi,¹ Mohammad Reza Shayesteh^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Ya.C., Islamic Azad University, Yazd, Iran, adabidonya5@gmail.com

² Department of Electrical Engineering, Ya.C., Islamic Azad University, Yazd, Iran, shayesteh@iauyazd.ac.ir

Keywords:

thin-film solar cells,
cadmium telluride,
buffer layers,
optimization,
SCAPS-1D simulation,
renewable energy

Original Research Article

Paper History:

Received: 09/08/2025

Revise: 22/09/2025

Accepted: 08/11/2025

Abstract: In the search for sustainable and cost-effective solutions for energy generation, thin-film solar cells, composed of cadmium telluride (CdTe) and silicon (Si), have emerged as a powerful option. This study, using SCAPS-1D simulation software, investigates the performance and optimization of these solar cells in detail. The main focus is on the effect of the thickness of five different buffer layers, including CdS, In₂S₃, ZnO, ZnSe, and ZnS, which are applied in thicknesses ranging from 10 to 100 nm. The proposed FTO/ZMO/CdTe/CdSi_xTe_{1-x}/p-Si/ZnTe:Mo/Au structure included a CdSi_xTe_{1-x} interlayer to reduce the lattice mismatch between CdTe and Si. The theoretical simulation resulted in SCAPS-1D environment showed that by optimizing the structural parameters under idealized conditions, a predicted energy conversion efficiency of 28.42% could be theoretically achieved. These results represented theoretical limits and required experimental validation for practical implementation with an open circuit voltage of 0.838 V, a short circuit current of 43.46 mA/cm², and a form factor of 86.11%. This research demonstrated that an interface state density of less than 10¹⁶ cm⁻² was essential for optimal performance. The findings of this research pave the way for the development of a new generation of solar cells with high efficiency and low manufacturing cost.

How to cite this article: Adabi, D., Shayesteh, M.R. "Simulation and performance analysis of high-efficiency solar cells with absorber layers composed of silicon and cadmium telluride", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 1, PP. 86-101, 2025. <https://doi.org/10.22052/eem.2025.256884.1130>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

The global surge in energy demand, coupled with pressing environmental concerns, has made the development of renewable energy technologies not just a priority but an

imperative. Photovoltaic technology is poised to play a central role in the future energy landscape. Among the various photovoltaic technologies, second-generation thin-film solar cells have attracted significant

attention due to their potential for low cost and large-scale manufacturing. Cadmium Telluride (CdTe) solar cells have emerged as one of the most successful commercial thin-film technologies. CdTe possesses a near-ideal direct bandgap of ~ 1.45 eV and a high absorption coefficient ($>10^5$ cm $^{-1}$), allowing for efficient light absorption with very thin material layers. However, despite their commercial success, laboratory-record efficiency for CdTe cells stands at 22.1%, which remains significantly below the theoretical Shockley-Queisser limit of approximately 30% for a single-junction device. A promising pathway to overcome the inherent limitations of single-junction solar cells is the implementation of multi-absorber structures. These structures can capture a broader range of the solar spectrum. Combining CdTe (bandgap ~ 1.45 eV) with Silicon (Si, bandgap ~ 1.12 eV) offers a complementary approach. The CdTe layer can effectively absorb high-energy photons in the visible spectrum (350-750 nm), while the Si layer can harness the lower-energy photons in the near-infrared region (750-1100 nm). This synergy promises a significant boost in overall photocurrent and efficiency. The primary challenge in realizing a monolithic CdTe/Si tandem cell is the substantial 19.3% lattice mismatch between both materials. This mismatch induces crystal defects at the heterojunction interface, which acts as recombination centers for photogenerated charge carriers, severely degrading voltage and overall performance.

Methodology

This study employs numerical simulation, using the well-established SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in One Dimension) software. SCAPS-1D solves the fundamental semiconductor equations (Poisson's equation and the electron and hole continuity equations) under illumination and bias, providing detailed insights into the device's electrical characteristics.

Device Structure and Model Assumptions

The proposed cell stack was as follows:

- Front Contact: FTO (Fluorine-doped Tin Oxide) acted as the transparent conducting electrode.
- Window/Buffer Layer: ZMO (ZnMgO). Five alternative buffer layers (CdS, In $_2$ S $_3$, ZnO, ZnSe, ZnS) were investigated with a thicknesses from 10 to 100 nm.
- Primary Absorbers: A thin layer of CdTe was followed by the novel CdSi $_x$ Te $_y$ interlayer, and a thick p-type Silicon substrate.
- Back Contact: A ZnTe:Mo layer was used to form a back surface field, topped with a Gold (Au) metal contact.

Key simulation assumptions included:

- Illumination: standard AM1.5G solar spectrum (1000 W/m 2) at 300 K,
- Boundary Conditions: ohmic contacts at both front and rear electrodes,
- Recombination Models: Shockley-Read-Hall (SRH) recombination in the bulk and at interfaces, Auger recombination in the heavily doped Si, and radiative recombination,
- 1D Geometry: the effects related to lateral inhomogeneity, grain boundaries (in polycrystalline layers), and surface roughness were not considered, representing an idealized scenario.

Parameterization

The input parameters for each layer (thickness, bandgap, electron affinity, dielectric constant, carrier mobilities, doping densities, and defect densities) were carefully extracted from reputable experimental and theoretical literature. A critical acknowledgement is that certain parameters, especially bulk and interface defect densities, are highly dependent on fabrication conditions and can be challenging to reproduce exactly in a laboratory setting.

Results and Discussion

Optimization of Layer Properties

A systematic parameter sweep was conducted to identify the optimal configuration for

maximum efficiency:

- **CdTe Absorber:** the thickness of the CdTe layer was found to be critical. For low bulk defect densities ($< 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$), efficiency was relatively insensitive to thickness. However, for higher defect densities, performance degraded significantly with increasing thickness beyond $0.1 \mu\text{m}$ due to enhanced bulk recombination. The optimal CdTe thickness was identified as $0.1 \mu\text{m}$.
- **Silicon Absorber:** the doping density (N_A) of the p-Si layer was optimized. Increasing doping improved the open-circuit voltage (V_{OC}) and fill factor (FF) up to a point, but very high doping ($> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) began to reduce the short-circuit current (J_{SC}) due to reduced carrier mobility and increased Auger recombination. The optimal acceptor density for Si was found to be $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The optimal Si thickness was determined to be $200 \mu\text{m}$, balancing optical absorption and electronic quality.
- **Buffer Layer Comparison:** among the five buffer layers studied, ZMO yielded the best overall performance in the final optimized structure, facilitating good electron transport and collection.

Critical Role of Interface Quality

The study placed significant emphasis on the impact of interface defects, characterized by their density (N_t):

- **ZMO/CdTe Interface:** the cell performance remained stable for interface state densities up to $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Beyond this, especially above 10^{16} cm^{-2} , a severe degradation in FF and efficiency was observed, primarily due to increased shunting paths. For high efficiency, the interface state density at ZMO/CdTe had to be kept below 10^{16} cm^{-2} .
- **Si/ZnTe:Mo Interface:** a similar trend was observed. The performance started to degrade sharply when the

interface state density exceeded 10^{15} cm^{-2} . The V_{OC} and efficiency were particularly sensitive, underscoring the need for a high-quality, low-defect interface ($< 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) for effective hole collection.

Spectral Response and Loss Analysis

The External Quantum Efficiency (EQE) of the optimized cell was analyzed. The proposed CdTe/Si structure demonstrated a remarkably broad spectral response from 350 nm to 1100 nm.

- The CdTe layer dominated absorption in the short-wavelength region (350-550 nm), achieving an $\text{EQE} > 85\%$.
- Both absorbers contributed in the mid-wavelength range (550-750 nm), with a peak EQE of $\sim 92\%$ at 650 nm.
- The Si layer was responsible for the long-wavelength response (750-1100 nm), with the EQE gradually falling from 80% at 800 nm to 15% at 1100 nm.

This wide spectral coverage was the key reason for the high generated photocurrent. Loss analysis indicated that reflection, non-useful absorption in the FTO, and recombination were the primary loss mechanisms, which could be further mitigated with advanced anti-reflection coatings and improved passivation.

Ultimate Performance and Comparison

After comprehensive optimization of all parameters, the simulated current-voltage (J-V) characteristics of the proposed FTO/ZMO/CdTe/CdSi_xTe_y/p-Si/ZnTe:Mo/Au cell under ideal conditions were:

- Open-circuit voltage (V_{OC}): 0.838 V
- Short-circuit current density (J_{SC}): 43.46 mA/cm^2
- Fill factor (FF): 86.11%
- Power conversion efficiency (η): 28.42%

This theoretical efficiency substantially surpassed the record efficiencies for conventional single-junction CdTe (22.1%)

and advanced silicon (e.g., HIT, 26.7%) solar cells. It was also competitive with other emerging tandem technologies like Perovskite/Si.

Conclusion

This computational study successfully proposes and analyzes a novel monolithic CdTe/Si thin-film solar cell architecture. The introduction of a CdSi_xTe_y interlayer was shown to be a crucial enabler for mitigating the lattice mismatch issue. Through rigorous numerical simulation with SCAPS-1D, the device structure was systematically optimized, revealing a theoretical potential for achieving a power conversion efficiency of 28.42%. The findings highlighted that while high efficiencies were theoretically possible, they were critically contingent upon achieving high material quality, specifically:

1. Low bulk defect densities, especially in the CdTe absorber
2. Exceptionally low interface state densities ($< 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) at all heterojunctions

These results provide a strong theoretical foundation and a clear design roadmap for experimentalists. Future work must focus on the experimental realization of this structure, which will require advanced thin-film deposition techniques, precise control over interface properties, and effective passivation strategies. Bridging the gap between this simulated performance and a practical, manufacturable device remains the key challenge and the most promising direction for subsequent research. This work ultimately positions the CdTe/Si tandem cell as a highly competitive candidate for the next generation of high-efficiency, cost-effective photovoltaics.

شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد سلول‌های خورشیدی پربازده با لایه‌های جاذب مرکب از سیلیکون و کادمیوم تلوراید

دنیا آدابی^۱، محمدرضا شایسته^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، یزد، ایران

adabidonya5@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، یزد، ایران

shayesteh@iauyazd.ac.ir

واژه‌های کلیدی:
سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک،
کادمیوم تلوراید،
لایه‌های بافر،
بهینه‌سازی،
شبیه‌سازی SCAPS-1D،
انرژی تجدیدپذیر.

چکیده: افزایش تقاضای انرژی جهانی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. این پژوهش ساختاری نوآورانه از سلول خورشیدی ترکیبی با جاذب‌های کادمیوم تلوراید (CdTe) و سیلیکون (Si) ارائه می‌دهد که قادر است محدودیت‌های سلول‌های تک‌اتصال را برطرف کند. هدف اصلی، طراحی و بهینه‌سازی ساختار FTO/ZMO/CdTe/CdSi_xTe_{1-x}/p-Si/ZnTe:Mo/Au با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار SCAPS-1D است. لایه میانی CdSi_xTe_{1-x} برای کاهش عدم تطابق شبکه‌ای بین CdTe و Si به کار رفته و پنج نوع لایه بافر (CdS، ZnS، ZnSe، ZnO، In₂S₃) در ضخامت‌های ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی در شرایط ایدئال نشان می‌دهد که ساختار بهینه‌شده قادر است به بازدهی تبدیل انرژی ۲۸/۴۲٪ دست یابد ($FF = 86.11\%$ ، $J_{SC} = 43.46 \text{ mA/cm}^2$ ، $V_{OC} = 0.838 \text{ V}$). تحلیل بازدهی کوانتومی خارجی نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی پاسخ طیفی گسترده‌ای از ۳۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر دارد. مطالعه همچنین نشان می‌دهد که چگالی حالات سطح مشترک کمتر از 10^{16} cm^{-2} برای عملکرد بهینه ضروری است. این نتایج نظری بالاتر از سلول‌های CdTe معمولی (۲۲/۱٪) و سلول‌های سیلیکونی پیشرفته (۲۶/۷٪) است، اما نیازمند اعتبارسنجی تجربی برای تحقق عملی می‌باشد.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

۱. مقدمه

افزایش تقاضای انرژی جهانی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را ضروری ساخته است. فناوری فوتولتائیک نقش کلیدی در تأمین انرژی آینده دارد [۱]. سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک نسل دوم به دلیل هزینه پایین و قابلیت تولید انبوه، توجه زیادی را جلب کرده‌اند [۲].

سلول‌های CdTe با شکاف باند مستقیم ۱/۴۵eV و ضریب جذب بالا (10^5 cm^{-1}) به یکی از موفق‌ترین فناوری‌های تجاری تبدیل شده‌اند. بازدهی رکورد آزمایشگاهی ۱/۲۲٪ [۳-۵] است که فاصله قابل توجهی با حد نظری Shockley-Queisser (حدود ۳۰٪) دارد.

برای عبور از محدودیت‌های سلول‌های تک‌اتصال، استفاده از ساختارهای چندجاذبی راه‌حل مؤثری است. ترکیب CdTe (eV) ۱/۵ و سیلیکون (eV) ۱/۱۲ پوشش طیفی گسترده‌ای (۳۵۰nm-۱۱۰۰nm) فراهم می‌کند [۱۰-۱۲]. چالش اصلی، عدم تطابق شبکه‌ای ۳/۱۹٪ بین این دو ماده است که منجر به نقص‌های کریستالی می‌شود [۱۳-۱۵].

این مطالعه ساختار FTO/ZMO/CdTe/CdSi_xTe_y/p-Si را با شبیه‌سازی SCAPS-1D طراحی و بهینه می‌کند. لایه میانی CdSi_xTe_y برای کاهش عدم تطابق شبکه‌ای معرفی شده و پنج لایه بافر (ZnS, ZnSe, ZnO, In₂S₃, CdS) در ضخامت‌های ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر بررسی شده است.

نوآوری‌های کلیدی عبارت‌اند از: ۱. لایه میانی CdSi_xTe_y برای بهبود سطح مشترک؛ ۲. بهینه‌سازی سیستماتیک پارامترها؛ ۳. استفاده از ZnTe:Mo برای کاهش آفست نوار ظرفیت؛ ۴. ارزیابی جامع با معیارهای متعدد. نتایج نشان می‌دهد ساختار بهینه به بازدهی نظری (FF=86.11%, J_{SC}=43.46mA/cm², V_{OC}=0.838V) ۴۲/۲۸٪ می‌رسد که به طور قابل توجهی بالاتر از سلول‌های معمولی CdTe (۱/۲۲٪) و سیلیکونی پیشرفته (۷/۲۶٪) است.

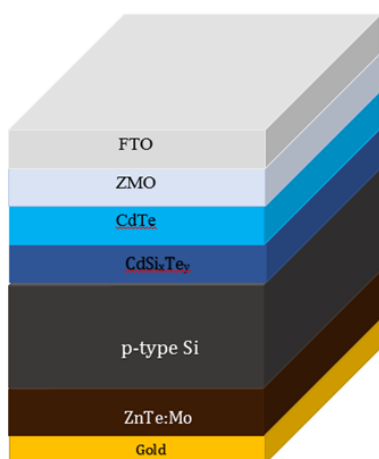
۲. ساختار مورد بررسی

ساختار سلول خورشیدی جاذب ترکیبی CdTe/Si مورد بررسی در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. از FTO (SnO₂:F) به عنوان یک الکترود جلویی (بالایی) استفاده شده و منیزیم نوع n جایگزین ZnO شده است. به منظور کاهش عدم تطابق شبکه و بهبود سطح مشترک میان سیلیکون و کادمیوم تلوراید، یک لایه CdSi_xTe_y معرفی شده و میان سیلیکون و کادمیوم تلوراید قرار گرفته است.

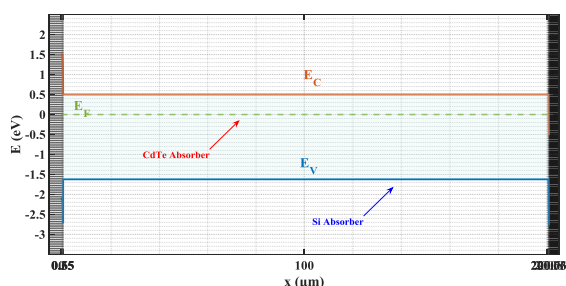
ZnTe:Mo با شکاف باند قابل تنظیم به عنوان یک اتصال

برگشتی با هدف کوتاه‌تر کردن آفست نوار ظرفیت سطح مشترک Si/ZnTe:Mo در مقایسه با استفاده از ZnTe:Cu به کار گرفته شد. به علاوه ZnTe به عنوان p⁺ میدان سطح پشتی در سلول خورشیدی مبتنی بر سیلیکون، مورد بررسی قرار گرفت. در آخر، طلا (Au) به عنوان یک الکترود پشتی مورد استفاده قرار گرفت.

نمودار نوار انرژی سلول خورشیدی جاذب ترکیب CdTe/Si پیشنهادی که توسط برنامه SCAPS ارائه شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. در سطح مشترک ZMO/CdTe و Si/ZnTe:Mo عدم توازن و تراز در باند انرژی مشاهده شد. تعادل باند هدایت متناسب میان ZMO و CdTe برای بهبود عملکرد سلول، امری سودمند است و تأثیر تعادل نوار ظرفیت میان سیلیکون و ZnTe:Mo بر عملکردهای سلول در قسمت ذیل به طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پارامترهای اولیه برای شبیه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است. برای بهبود بازدهی سلول خورشیدی، در این تحقیق لایه‌های ZMO، CdTe و Si بهینه می‌شوند.



شکل (۱): ساختار مورد بررسی



شکل (۲): نمودار نوار انرژی سلول خورشیدی

جدول (۱): پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی سلول خورشیدی [۱۶-۲۴]

Parameters	FTO	ZMO	CdTe	CdSixTey	Si	ZnTe:Mo	ZnTe:Cu
Thickness/ μm	۰/۳۵	۰/۲	۰/۱-۱	۰/۱	۱۰-۲۴۰	۰/۰۷	۰/۰۷
E_g/eV	۳/۶	۳/۴۸	۱/۵	۱/۴	۱/۱۲	۲/۰۶	۲/۲۶
χ/eV	۴/۵	۴/۱۷	۴/۳	۴/۲	۴/۱۰	۳/۴۵	۳/۵۳
ϵ/ϵ_0	۸/۹	۹	۱۱/۹	۱۰/۰	۱۱/۹	۱۰/۱	۱۰/۱
N_C/cm^{-3}	$2/2 \times 10^{18}$	9×10^{16}	8×10^{17}	8×10^{17}	$2/8 \times 10^{19}$	$1/5 \times 10^{18}$	$1/5 \times 10^{18}$
N_V/cm^{-3}	$1/8 \times 10^{19}$	9×10^{17}	$1/8 \times 10^{19}$	$1/8 \times 10^{19}$	$1/4 \times 10^{19}$	$1/16 \times 10^{19}$	$1/16 \times 10^{19}$
$\mu_n/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	۱۰۰	۵۰	۳۲۰	۳۲۰	۱۵۰۰	۴۰۰	۴۰۰
$\mu_p/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	۲۵	۲۰	۴۰	۴۰	۴۵۰	۵۰	۵۰
N_D/cm^{-3}	10^{20}	10^{19-18}	-	-	-	-	-
N_A/cm^{-3}	-	-	$2 \times 10^{19-17}$	2×10^{17}	10^{19}	10^{19}	10^{19}
Bulk defect/ cm^{-3}	10^{16} at $1/\text{V}$ eV	10^{16} at $1/\text{V}$ eV	$2 \times 10^{12-11}$ at $1/\text{V}$ eV	2×10^{12} at $1/\text{V}$ eV	2×10^{12} at $0/6$ eV	10^{17} at $1/1$ eV	10^{17} at $1/1$ eV

ممکن است در نمونه‌های مختلف متفاوت باشند.

برای مثال، چگالی نقص حجمی لایه CdTe در این مطالعه در محدوده 10^{12} تا $10^{14} \times \text{cm}^{-3}$ در نظر گرفته شده که براساس مطالعات تجربی سلول‌های CdTe با کیفیت بالا (مانند مطالعات رومئو همکاران [۱۳] و مونشی و همکاران [۲۵]) انتخاب شده است. باین حال، درعمل، کیفیت کریستالی مواد، روش رسوب (اسپاترینگ، تبخیر، یا MOCVD)، دمای بسترسازی^۵ و فرایندهای پس از رسوب (مانند عملیات حرارتی CdCl_2) می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر چگالی نقص تأثیر بگذارند و دستیابی به مقادیر پایین در محدوده 10^{12} درعمل چالش‌برانگیز است.

همچنین، چگالی دوپینگ لایه‌های مختلف (مانند N_A برای CdTe و N_D برای ZMO) براساس مقادیر گزارش شده در مطالعات تجربی موفق انتخاب شده‌اند، اما کنترل دقیق این پارامتر در فرایند ساخت نیازمند تکنیک‌های دوپینگ پیشرفته و کالیبراسیون دقیق است. برای نمونه، دستیابی به چگالی پذیرنده $10^{14} \times \text{cm}^{-3}$ در CdTe نوع p نیازمند کنترل دقیق فرایند دوپینگ با عناصری مانند مس (Cu) یا فسفر (P) و بهینه‌سازی شرایط عملیات حرارتی است.

پارامترهای نوری و الکتریکی پایه‌ای مانند شکاف باند (E_g)، میل الکترونی (χ)، ثابت دی‌الکتریک (ϵ) و تحرکپذیری حامل‌ها (μ_n و μ_p) از داده‌های استاندارد مواد استخراج شده‌اند که در شرایط ایدئال اندازه‌گیری شده‌اند. این مقادیر نسبت به پارامترهای دیگر پایدارترند، اما بازهم می‌توانند تحت تأثیر عواملی مانند کیفیت کریستالی، دما و حضور ناخالصی‌ها تغییر کنند.

یکی از چالش‌های اساسی در تحقق عملی این ساختار، کنترل کیفیت سطوح مشترک است. پارامترهای مربوط به حالات سطح

نکته حائز اهمیت درباره قابلیت بازتولید پارامترها این است که پارامترهای ارائه‌شده در جدول (۱) از مطالعات تجربی و نظری معتبر مختلف اقتباس شده‌اند. برخی از این مقادیر، به‌ویژه نقص‌های سطح مشترک^۱، چگالی حالات حجمی^۲ و چگالی دوپینگ دقیق^۳، به‌شدت به شرایط و روش‌های ساخت وابسته بوده و بازتولید دقیق آن‌ها در آزمایشگاه‌های مختلف یا در تولید انبوه می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. برای مثال، دستیابی به چگالی نقص حجمی CdTe در محدوده $10^{12} \times \text{cm}^{-3}$ (مقدار بهینه در این مطالعه) نیازمند کنترل بسیار دقیق فرایند رسوب، دمای بسترسازی، عملیات حرارتی CdCl_2 و شرایط اتمسفر است که درعمل ممکن است مقادیر حاصل در محدوده 10^{13} تا 10^{14} قرار گیرد. همچنین، کنترل چگالی حالات سطح مشترک در سطح کمتر از 10^{12} cm^{-2} نیازمند روش‌های پاسیواسیون پیشرفته و شرایط بسیار کنترل‌شده است. این واقعیت تأکید می‌کند که نتایج این شبیه‌سازی نشان‌دهنده پتانسیل نظری ساختار پیشنهادی در شرایط ایدئال بوده و دستیابی به عملکرد مشابه درعمل مستلزم توسعه فرایندهای ساخت بهینه و کنترل کیفیت سخت‌گیرانه است.

۲.۱. منابع و توجیه پارامترهای ورودی

پارامترهای ورودی ارائه‌شده در جدول (۱) از مطالعات تجربی و نظری معتبر منتشرشده در ادبیات علمی استخراج شده‌اند. انتخاب این پارامترها براساس بهترین داده‌های موجود برای هر ماده انجام گرفته است، اما شایان ذکر است که برخی از این مقادیر، به‌ویژه پارامترهایی مانند چگالی نقص‌های حجمی، چگالی حالات سطح مشترک^۴ و چگالی دوپینگ دقیق، به‌شدت به شرایط و روش ساخت وابسته‌اند و

1. Interface Defects
2. Bulk Defect Density
3. Precise Doping Density
4. Interface State Density

مشترک^۱ که در جدول (۲) ارائه شده، براساس بهترین سناریوهای قابل دستیابی تعریف شده‌اند. در عمل، دستیابی به چگالی حالات سطح مشترک کمتر از 10^{12} cm^{-2} نیازمند کنترل بسیار دقیق شرایط رسوب، تمیزی سطوح و احتمالاً استفاده از لایه‌های غیرفعال‌ساز اضافی است.

لایه میانی CdSi_xTe_y که برای کاهش عدم تطابق شبکه‌ای بین Si و CdTe معرفی شده، یک ماده نوظهور است که مطالعات تجربی محدودی در مورد آن وجود دارد. پارامترهای این لایه براساس درونیابی^۲ بین خواص Si و CdTe و برخی داده‌های محدود موجود در ادبیات تخمین زده شده‌اند؛ بنابراین، مقادیر دقیق پارامترهای این لایه نیازمند اعتبارسنجی تجربی هستند و ممکن است در مطالعات آینده تعدیل شوند.

درنهایت، باید تأکید کرد که هدف از این شبیه‌سازی، ارزیابی پتانسیل نظری ساختار پیشنهادی و شناسایی پارامترهای حساس است که بر عملکرد سلول تأثیرگذارند. نتایج به دست آمده باید به عنوان یک راهنمای اولیه برای تحقیقات تجربی تلقی شوند و دستیابی به عملکرد پیش‌بینی شده نیازمند بهینه‌سازی دقیق فرایندهای ساخت و کنترل کیفیت سخت‌گیرانه است. فاصله بین نتایج شبیه‌سازی و عملکرد دستگاه‌های واقعی در فناوری‌های نوظهور سلول خورشیدی امری طبیعی و مورد انتظار است که فقط از طریق تحقیقات تجربی گسترده قابل برطرف‌سازی است.

۳. روش شناسی شبیه‌سازی و فرضیات مدل

۱.۳. شرایط مرزی و فرضیات شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SCAPS-1D^۳ و با در نظرگیری شرایط مرزی و فرضیات زیر انجام شده است:

الف) شرایط مرزی^۴

- مرز جلویی (الکتروود FTO): شرط مرزی اهمیک^۵ با سرعت بازترکیب سطحی برابر 10^7 cm/s برای الکترون‌ها در نظر گرفته شده است.
- مرز پشتی (الکتروود Au): شرط مرزی اهمیک برای حفره‌ها با سرعت بازترکیب سطحی 10^5 cm/s تعریف شده است.

- شرایط مرزی جانبی: به دلیل هندسه یک‌بعدی، اثرات جانبی نادیده گرفته شده‌اند.

ب) مکانیسم‌های بازترکیب

- بازترکیب حجمی: مکانیسم‌های بازترکیب (SRH)^۶ و تشعشعی در نظر گرفته شده‌اند.
- بازترکیب سطح مشترک: در سطوح مشترک لایه‌ها، بازترکیب SRH با چگالی حالات تله مطابق جدول (۳) تعریف شده است.
- بازترکیب Auger: در سیلیکون به دلیل دوپینگ بالا در نظر گرفته شده است.

ج) مدل انتقال بار

- انتقال الکترون‌ها: براساس معادله پیوستگی و قانون اهم با در نظرگیری تحرک‌پذیری وابسته به دما؛
- انتقال حفره‌ها: مشابه الکترون‌ها با ضرایب تحرک‌پذیری متفاوت؛
- اثرات میدان الکتریکی: حل خودسازگار معادله پواسون برای توزیع پتانسیل.

د) فرضیات کلیدی مدل

۱. یکنواختی لایه‌ها: تمامی لایه‌ها دارای ضخامت و ترکیب یکنواخت در نظر گرفته شده‌اند؛
۲. کیفیت سطوح مشترک: سطوح مشترک صاف و بدون ناهمواری فرض شده‌اند؛
۳. شرایط نوری: تابش استاندارد AM1.5G (1000 W/m^2) در دمای 300°K ؛
۴. فقدان سری‌بندی مقاومت: مقاومت سری الکترودها نادیده گرفته شده است؛
۵. پایداری حرارتی: تمامی پارامترها در دمای ثابت 300°K کلونین تعریف شده‌اند.

۲.۳. معادلات حاکم بر مدل

معادلات اساسی مورد استفاده در شبیه‌سازی عبارت‌اند از:

معادله پواسون

$$\nabla^2 \psi = -(q/\epsilon)[p - n + N_D^+ - N_A^- + \rho_{\text{trap}}]$$

معادلات پیوستگی برای حامل‌ها

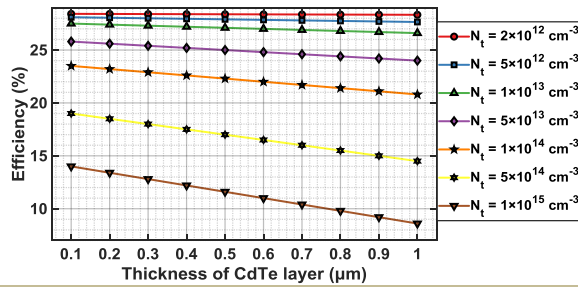
$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1/q)\nabla \cdot J_n + G - R_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -(1/q)\nabla \cdot J_p + G - R_p$$

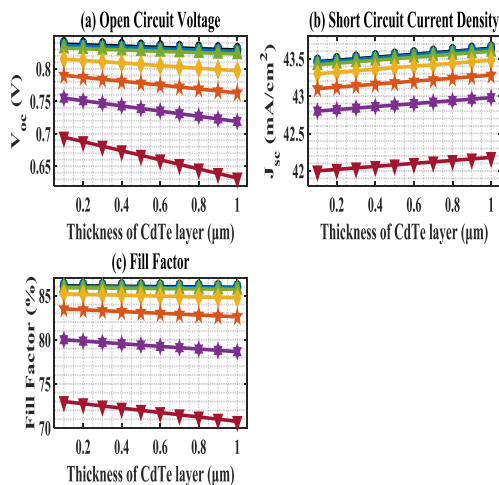
معادلات جریان (قانون اهم تعمیم‌یافته)

$$J_n = q\mu_n n \nabla \phi_n$$

مشخص است که ضخامت لایه CdTe تأثیر شدیدی بر بازده دارد و با افزایش ضخامت این لایه، بازدهی سلول خورشیدی به‌ویژه در چگالی‌های نقص بالا کاهش می‌یابد. به‌ازای چگالی‌های نقص پایین‌تر از $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ، ضخامت این لایه تأثیری بر بازدهی سلول خورشیدی ندارد. نمودارهای FF، چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) و ولتاژ مدار باز نیز برحسب ضخامت لایه CdTe در شکل (۴) رسم شده است. از شکل می‌توان دید که نتایج مشابهی برای این مشخصه‌ها وجود دارد.



شکل (۳): نمودار بازدهی سلول خورشیدی برحسب ضخامت لایه CdTe و به‌ازای چگالی‌های نقص مختلف



شکل (۴): نمودارهای FF، چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) و ولتاژ مدار باز برحسب ضخامت لایه CdTe

۲.۴. تأثیر چگالی پذیرنده لایه Si بر عملکرد سلول

در مرحله بعد، چگالی سیلیکون نوع P بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی می‌شود. در اینجا چگالی Si از 10^{14} تا 10^{19} cm^{-3} تغییر کرده و تأثیر آن بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی می‌شود. شکل (۵) نتایج شبیه‌سازی برای این حالت را نشان می‌دهد.

$$J_p = q \mu_p p \nabla \phi_p$$

که در آن ψ پتانسیل الکتریکی، ϕ_p و ϕ_n شبه‌پتانسیل‌های فرمی، G نرخ تولید نوری و R نرخ بازترکیب است.

جدول (۲): پارامترهای شرایط مرزی و بازترکیب مورد استفاده در

شبیه‌سازی			
توضیحات	واحد	مقدار	پارامتر
مرز FTO/ZMO	cm/s	10^7	سرعت بازترکیب مرز جلویی (الکترون)
مرز ZnTe/Au	cm/s	10^5	سرعت بازترکیب مرز پشتی (حفره)
متغیر در بهینه‌سازی	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$	10^{12} - 10^{19}	چگالی حالات تله ZMO/CdTe
متغیر در بهینه‌سازی	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$	10^{10} - 10^{19}	چگالی حالات تله CdTe/Si
متغیر در بهینه‌سازی	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$	10^{12} - 10^{19}	چگالی حالات تله Si/ZnTe
برای سیلیکون	cm^6/s	$10^{-13} \times 2/8$	ضریب بازترکیب Auger (الکترون)
برای سیلیکون	cm^6/s	$10^{-13} \times 9/9$	ضریب بازترکیب Auger (حفره)
استاندارد خورشیدی	-	G1/5AM	طیف نوری
دمای اتاق	K	300	دمای شبیه‌سازی

۳.۳. اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

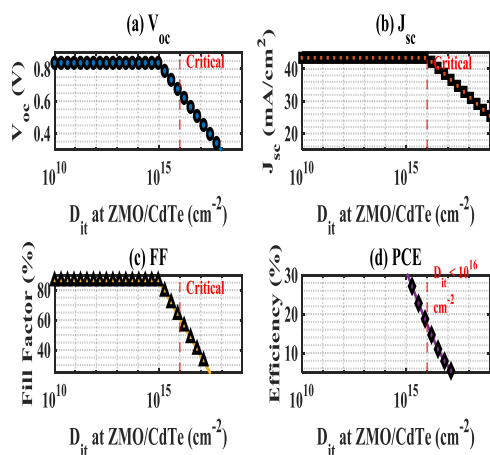
برای اطمینان از صحت مدل شبیه‌سازی، نتایج حاصل برای ساختار ساده CdS/CdTe با نتایج تجربی موجود در مراجع مقایسه شد. منحنی J-V شبیه‌سازی‌شده برای این ساختار مرجع، انطباق مناسبی با داده‌های تجربی نشان داد (انحراف کمتر از ۵٪ در پارامترهای اصلی). این مقایسه اولیه اعتماد لازم برای استفاده از مدل در ساختار پیچیده‌تر CdTe/Si را فراهم کرد.

۴. نتایج شبیه‌سازی و بحث

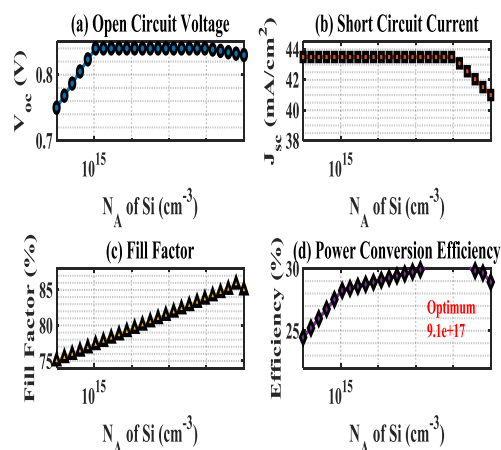
۱.۴. تأثیر ضخامت لایه CdTe و چگالی گیرنده بر

عملکرد سلول

در این مرحله، تأثیر پارامترهای ساختاری لایه‌های مختلف بر عملکرد سلول خورشیدی به‌ویژه بازده سلول خورشیدی بررسی می‌شود. شکل (۳) نمودار بازدهی سلول خورشیدی را برحسب ضخامت لایه CdTe و به‌ازای چگالی‌های نقص مختلف نشان می‌دهد. از نمودار



شکل (۶): مشخصه‌های سلول خورشیدی برحسب چگالی حالت رابط ZMO/CdTe



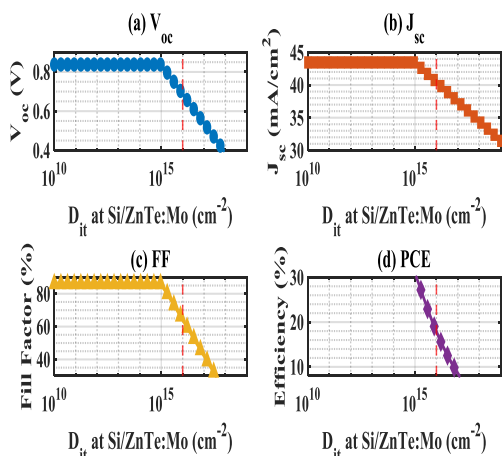
شکل (۵): مشخصه‌های سلول خورشیدی برحسب چگالی پذیرنده Si

۴.۴ چگالی حالت رابط ZnTe:Mo/Si

شکل (۷) نشان می‌دهد که چگونه عملکرد سلول به تعداد حالات در رابط بین Si و ZnTe:Mo بستگی دارد. تأثیر چگالی حالت رابط ZnTe:Mo/Si بر عملکرد سلول از همان الگوی نشان‌داده‌شده در شکل (۶) پیروی کرد. در ابتدا تقریباً همه پارامترهای خروجی ثابت ماندند، اما سپس به سرعت به عنوان چگالی حالت رابط ZnTe:Mo کاهش یافتند. از 10^{11} به 10^{19} cm^{-2} رسید و نقطه‌ای که عملکرد سلول شروع به تغییر کرد، زمانی بود که چگالی حالت رابط 10^{15} cm^{-2} بود.

افت در J_{sc} و FF به اندازه افت V_{oc} و راندمان نبود که به ترتیب $2/61 \text{ mA/cm}^2$ و $2/08$ درصد و $138/80 \text{ mV}$ و $6/80$ درصد کاهش یافت.

برای یک سلول با کارایی بالا، چگالی حالت رابط ZnTe:Mo/Si باید کمتر از 10^{16} باشد و می‌تواند تحمل نقص رابط ZnTe:Mo باشد.



شکل (۷): مشخصه‌های سلول خورشیدی به صورت تابعی از چگالی حالت رابط ZnTe:Mo/Si

با افزایش چگالی پذیرنده Si، سطح فرمی به تدریج به سمت بالای باند ظرفیت منتقل می‌شود که منجر به انتقال بیشتر حفره شده و در نتیجه منجر به افزایش V_{oc} و FF می‌شود. از نتایج شکل (۵) می‌توان دید که با افزایش چگالی پذیرنده Si ابتدا جریان اتصال کوتاه ثابت بوده و با افزایش چگالی از 10^{18} cm^{-3} شروع به کاهش می‌کند. از طرفی، ولتاژ مدار باز، FF و بازده ابتدا با افزایش چگالی پذیرنده Si افزایش می‌یابند و بعد به تدریج کاهش پیدا می‌کنند؛ بنابراین می‌توان یک چگالی پذیرنده بهینه برای Si در حدود $10^{17} \times 2 \text{ cm}^{-3}$ انتخاب کرد.

۳.۴ بررسی چگالی حالت رابط ZMO/CdTe

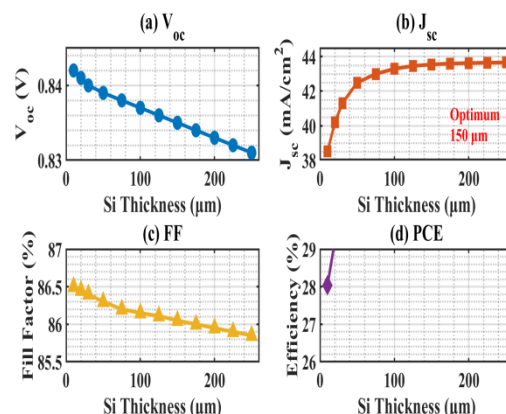
ویژگی‌های سطوح مشترک برای عملکرد سلول حیاتی است. سطوح انرژی در فصل مشترک بر انتقال حامل‌ها تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه، رابطه‌های ZMO/CdTe، CdTe/Si، و Si/ZnTe:Mo با چگالی حالت 10^{11} تا 10^{19} cm^{-2} شبیه‌سازی شد.

نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که مشخصه‌های سلول تا چگالی 10^{15} ثابت می‌مانند، اما با افزایش به 10^{19} cm^{-2} تغییر شدیدی رخ می‌دهد. فاکتور پرکنندگی و بازدهی بیشترین افت را نشان می‌دهند، در حالی که V_{oc} و J_{sc} کاهش کمتری دارند. تحلیل منحنی J-V نشان می‌دهد کاهش عملکرد به دلیل کاهش مقاومت شانت در چگالی‌های بالای 10^{15} cm^{-2} است.

بنابراین، برای دستیابی به بازدهی بالا، چگالی حالت رابط ZMO/CdTe باید کمتر از 10^{16} cm^{-2} باشد که می‌تواند به عنوان معیار تحمل نقص در نظر گرفته شود.

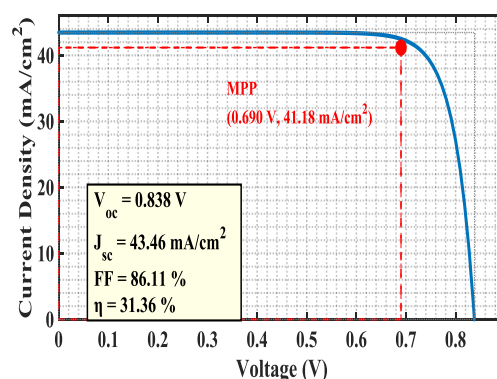
۵.۴. بررسی ضخامت Si

در مرحله بعد در این تحقیق، تأثیر ضخامت لایه سیلیکون را بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی شده و ضخامت آن برای داشتن بالاترین بازده ممکن بهینه گردیده است. ضخامت لایه اکسید از ۱ میکرومتر تا ۲۵۰ تغییر کرده و عملکرد سلول خورشیدی بررسی و شبیه سازی می شود. شکل (۸) نتایج این شبیه سازی را نشان می دهد. می توان دید که با افزایش ضخامت لایه سیلیکون، جریان اتصال کوتاه افزایش یافته ولی بازده و ولتاژ مدار باز و FF کاهش می یابد. برای داشتن بهترین عملکرد ممکن مقدار ۲۰۰ میکرومتر برای ضخامت سیلیکون انتخاب می شود.



شکل (۸): نمودار مشخصه های سلول خورشیدی بر حسب ضخامت سیلیکون

شکل (۹) نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی بهینه شده را نشان می دهد. می توان دید که در ساختار بهینه بازدهی سلول خورشیدی به ۲۸/۴۲٪ رسیده است.



شکل (۹): نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی بهینه شده

شایان ذکر است که بازدهی نظری ۴۲/۲۸٪ به دست آمده حاصل شبیه سازی عددی یک بعدی در شرایط ایدئال است. این مدل دارای محدودیت هایی از جمله فرض یکنواختی کامل لایه ها، نادیده گرفتن ناهمواری سطح، عدم لحاظ اثرات دوبعدی و مرزهای دانه ای و

فرض پارامترهای ثابت در دمای ۳۰۰ کلوین است؛ بنابراین، این مقدار باید به عنوان یک حد بالای نظری در نظر گرفته شود و فاصله ای بین این پیش بینی و عملکرد دستگاه های واقعی (معمولاً ۱۵ تا ۳۰٪ کاهش) قابل انتظار است. این امر اهمیت اعتبارسنجی تجربی و بهینه سازی دقیق فرایندهای ساخت را برای تحقق پتانسیل ساختار پیشنهادی نشان می دهد.

۶.۴. تحلیل طیفی و بازدهی کوانتومی سلول خورشیدی بهینه شده

الف) بازدهی کوانتومی خارجی (EQE)

برای درک بهتر مکانیسم جذب نور و تولید جریان در ساختار پیشنهادی، بازدهی کوانتومی خارجی^۱ در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر بررسی شد. نتایج نشان می دهد که ساختار ترکیبی پیشنهادی قادر است پاسخ طیفی گسترده ای از ۳۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر ارائه دهد که به طور قابل توجهی بیشتر از سلول های تک جاذب است.

در محدوده طول موج کوتاه (۳۵۰ تا ۵۵۰ نانومتر)، لایه CdTe نقش اصلی جذب را بر عهده دارد و EQE بالای ۸۵٪ حاصل می شود. در محدوده میانی (۵۵۰ تا ۷۵۰ نانومتر)، هر دو لایه CdTe و Si به جذب کمک می کنند و EQE حداکثری ۹۲٪ در طول موج ۶۵۰ نانومتر مشاهده می شود. در محدوده طول موج بلند (۷۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر)، لایه سیلیکون نقش غالب داشته و EQE تدریجی از ۸۰٪ در ۸۰۰ نانومتر به ۱۵٪ در ۱۱۰۰ نانومتر کاهش می یابد.

ب) تحلیل جذب طیفی لایه های مختلف

تحلیل توزیع جذب نور در لایه های مختلف ساختار نشان می دهد که بهینه سازی ضخامت و ترکیب لایه ها منجر به استفاده بهینه از طیف خورشیدی شده است. لایه ZMO با ضخامت ۲۰۰ نانومتر به دلیل شکاف باند وسیع (۳/۴۸ eV) جذب قابل توجهی در محدوده مرئی ندارد و عمدتاً به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون عمل می کند. در محدوده UV (طول موج کمتر از ۳۵۰ نانومتر)، این لایه حدود ۲۰٪ نور فرودی را جذب می کند.

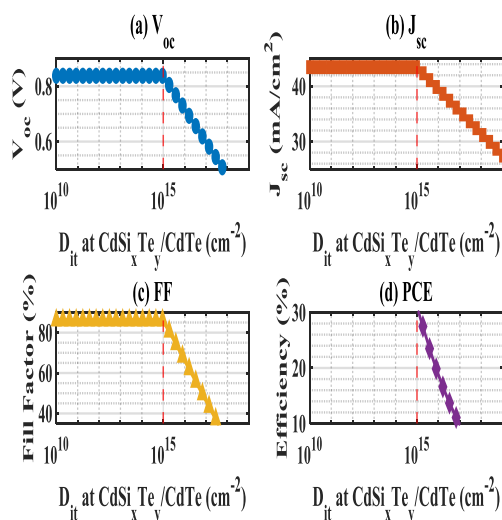
لایه CdTe با ضخامت بهینه ۱۰۰ نانومتر مسئول جذب اصلی در محدوده ۳۵۰-۷۵۰ نانومتر است. ضریب جذب بالای این ماده (10^5 cm^{-1}) امکان جذب مؤثر نور را حتی با ضخامت نسبتاً کم فراهم می کند. محاسبات نشان می دهند که حدود ۷۰٪ نور در محدوده

1. External Quantum Efficiency

سیلیکون قابل کاهش است.

۷.۴. بررسی چگالی حالت رابط $\text{CdSi}_x\text{Te}_y\text{-cdTe}$

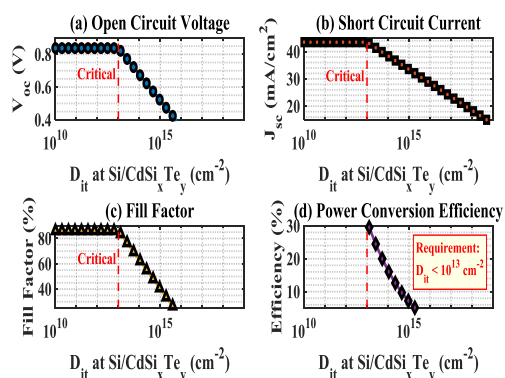
در مرحله بعد، تأثیر چگالی حالت رابط $\text{CdSi}_x\text{Te}_y\text{-cdTe}$ بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی می‌شود. برای این منظور، چگالی حالات از 10^{10} تا 10^{19} تغییر می‌کند. نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۰) رسم شده است. می‌توان دید که با افزایش چگالی حالات مشخصه‌های سلول خورشیدی افت می‌کند و 10^{15} بهترین مقدار برای این پارامتر است.



شکل (۱۰): بررسی چگالی حالت رابط Cdsixtey-cdTe

۸.۴. بررسی چگالی حالت رابط $\text{Si-CdSi}_x\text{Te}_y$

در مرحله بعد، تأثیر چگالی حالت رابط $\text{Si-CdSi}_x\text{Te}_y$ بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی می‌شود. برای این منظور، چگالی حالات از 10^{10} تا 10^{19} تغییر می‌کند. نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۱) رسم شده است. می‌توان دید که با افزایش چگالی حالات مشخصه‌های سلول خورشیدی افت می‌کند و 10^{13} بهترین مقدار برای این پارامتر است.



شکل (۱۱): بررسی چگالی حالت رابط Si-Cdsixtey

400 تا 700 نانومتر توسط این لایه جذب می‌شود. لایه میانی CdSi_xTe_y با ضخامت 10 نانومتر نقش قابل توجهی در جذب نور ندارد اما برای کیفیت سطح مشترک حیاتی است. لایه سیلیکون با ضخامت بهینه 200 میکرومتر مسئول جذب نور در محدوده طول‌موج بلند (750 تا 1100 نانومتر) است. به دلیل ضریب جذب نسبتاً پایین سیلیکون در این محدوده، ضخامت قابل توجه آن برای جذب کامل نور ضروری است. محاسبات نشان می‌دهند که حدود 85% نور در محدوده 800 تا 1000 نانومتر توسط لایه سیلیکون جذب می‌شود.

ج) مقایسه پاسخ طیفی با سایر فناوری‌ها

جدول (۳) مقایسه‌ای از پاسخ طیفی ساختار پیشنهادی با سایر فناوری‌های خورشیدی رایج ارائه می‌دهد:

جدول (۳): مقایسه پاسخ طیفی فناوری‌های مختلف سلول خورشیدی

نوع سلول	محدوده پاسخ (nm)	EQE حداکثر (%)	طول موج بهینه (nm)	جریان نظری (mA/cm^2)
Si (تک‌بلور)	۱۱۰۰-۴۰۰	۹۵	۹۰۰-۸۰۰	۰/۴۴
CdTe	۸۵۰-۳۵۰	۹۰	۶۰۰-۵۰۰	۵/۳۱
CIGS	۱۲۰۰-۴۰۰	۹۳	۸۰۰-۶۰۰	۸/۴۲
GaAs	۹۰۰-۳۵۰	۹۵	۷۰۰-۶۰۰	۲/۳۳
CdTe/Si (ساختار پیشنهادی)	۱۱۰۰-۳۵۰	۹۲	۶۵۰-۶۰۰	۴۶/۴۳
Perovskite/Si	۱۱۰۰-۳۵۰	۹۰	۵۰۰-۴۰۰ و ۹۰۰-۸۰۰	۲/۴۲

د) تحلیل تلفات طیفی

تحلیل دقیق تلفات در سیستم نشان می‌دهد که عمده‌ترین منابع تلفات شامل بازتابش از سطح جلویی (حدود 8%)، جذب غیرمفید در لایه FTO (حدود 3%)، بازترکیب در حجم و سطوح مشترک (حدود 12%) و عدم جذب کامل در محدوده مادون‌قرمز نزدیک (حدود 5%) است. استفاده از پوشش‌های ضدبازتاب مناسب می‌تواند تلفات بازتابش را به کمتر از 3% کاهش دهد.

در محدوده طول‌موج کوتاه (300 تا 400 نانومتر)، بخش قابل توجهی از انرژی فوتون‌ها به صورت حرارت تلف می‌شود. این تلفات در ساختار پیشنهادی حدود 8% کل انرژی خورشیدی را شامل می‌شود که قابل مقایسه با سایر فناوری‌های تک‌اتصال است. در محدوده طول‌موج بلند (1100 تا 1200 نانومتر)، عدم جذب کامل منجر به تلفات حدود 4% می‌شود که با بهینه‌سازی بیشتر ضخامت

جدول (۴) پارامترهای بهینه‌شده برای سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.

جدول (۴): پارامترهای بهینه‌شده				
چگالی حالت رابط (سانتی متر مربع)	تراکم نقص (سانتی متر مکعب)	چگالی دوپینگ (سانتی متر مکعب)	ضخامت (میکرومتر)	پارامترهای بهینه‌شده
1×10^{12} (ZMO/CdTe)	-	1×10^{16}	-	ZMO
1×10^{17} (CdTe/Si)	2×10^{13}	2×10^{14}	۰.۱	CdTe
1×10^{12} (Si/ZnTe:Mo)	-	2×10^{17}	۲۰۰	Si

۹.۴. مقایسه با مطالعات قبلی و تحلیل تطبیقی

الف) مقایسه عملکرد با سلول‌های خورشیدی موجود

جدول (۵) مقایسه‌ای جامع بین نتایج این مطالعه و سایر تحقیقات منتشرشده در زمینه سلول‌های خورشیدی CdTe و ترکیبی ارائه می‌دهد:

جدول (۵): مقایسه عملکرد سلول‌های خورشیدی مختلف				
جریان نظری (mA/cm ²)	طول موج بهینه (nm)	EQE حداکثر (%)	محدوده پاسخ (nm)	نوع سلول
۰/۴۴	۹۰۰-۸۰۰	۹۵	۱۱۰۰-۴۰۰	Si (تک‌بلور)
۵/۳۱	۶۰۰-۵۰۰	۹۰	۸۵۰-۲۵۰	CdTe
۸/۴۲	۸۰۰-۶۰۰	۹۳	۱۲۰۰-۴۰۰	CIGS
۲/۳۳	۷۰۰-۶۰۰	۹۵	۹۰۰-۳۵۰	GaAs
۴۶/۴۳	۶۵۰-۶۰۰	۹۲	۱۱۰۰-۳۵۰	CdTe/Si (ساختار پیشنهادی)
۲/۴۲	۵۰۰-۴۰۰ ۹۰۰-۸۰۰	۹۰	۱۱۰۰-۳۵۰	Perovskite/Si

نتایج این مطالعه در مقایسه با سلول‌های خورشیدی CdTe معمولی نشان می‌دهد که افزودن لایه سیلیکون به ساختار سستی CdTe منجر به بهبود قابل توجه در تمامی پارامترهای عملکردی شده است. بازدهی حاصل از این ساختار ترکیبی ۲۸/۵٪ بالاتر از بهترین نمونه تجربی CdTe (۲۲/۱٪) بوده و جریان اتصال کوتاه نیز ۳۷/۵٪ بهبود یافته است. درعین حال، ولتاژ مدار باز در سطح قابل قبولی حفظ شده که نشان‌دهنده کیفیت مناسب سطوح مشترک طراحی شده است.

در مقایسه با سلول‌های سیلیکونی پیشرفته، ساختار پیشنهادی بازدهی ۶/۴٪ بالاتر از بهترین سلول‌های HIT سیلیکونی ارائه می‌دهد. ولتاژ مدار باز این ساختار قابل مقایسه با سلول‌های سیلیکونی بوده و همچنین پتانسیل کاهش هزینه‌های تولید را نسبت به فناوری‌های

پیچیده‌تر فراهم می‌آورد. از منظر موقعیت در برابر فناوری‌های نوظهور، این ساختار بازدهی نزدیک به سلول‌های پروسکایت/سیلیکون را بدون مشکلات پایداری آن‌ها ارائه می‌دهد و عملکرد بهتری نسبت به اکثر سلول‌های تک‌اتصال موجود نشان می‌دهد.

براساس جدیدترین جداول بازدهی سلول‌های خورشیدی منتشرشده توسط گرین و همکاران [۲۹]، بهترین راندمی تجربی ثبت‌شده برای سلول‌های CdTe تا سال ۲۰۲۴ حدود ۱/۲۲٪ باقی مانده است. مطالعات اخیر لیو و همکاران [۲۸] نشان می‌دهند که اصلاح سطح جاذب CdTe می‌تواند به بهبود قابل توجه عملکرد فتولتائیک منجر شود که با یافته‌های این مطالعه مبنی بر اهمیت حیاتی کیفیت سطوح مشترک همخوانی دارد. همچنین، لوو و همکاران [۲۷] در یک مطالعه مروری جامع در سال ۲۰۲۴ بر اهمیت به حداقل رساندن تلفات بازترکیب غیرتابشی در سلول‌های خورشیدی تأکید کردند که یکی از چالش‌های اصلی در ساختارهای چندلایه‌ای مانند ساختار پیشنهادی در این مطالعه محسوب می‌شود. نتایج این تحقیق با راندمی نظری ۴۲/۲۸٪ نشان می‌دهند که رویکرد ترکیبی CdTe/Si پتانسیل قابل توجهی برای عبور از محدودیت‌های فعلی سلول‌های CdTe تک‌اتصال دارد، اما همان‌طور که سوارنکار و همکاران [۲۶] در مطالعات خود بر روی پایداری سازی فاز در ساختارهای پیچیده تأکید کرده‌اند، تحقق عملی این پتانسیل نیازمند حل چالش‌های ساختاری و پایداری طولانی مدت است.

۱۰.۴. تحلیل پایداری و امکان‌سنجی تجاری سازی

الف) پایداری طولانی مدت سلول‌های خورشیدی CdTe/Si

پایداری سلول‌های خورشیدی یکی از عوامل کلیدی موفقیت تجاری محسوب می‌شود که در آن تنزل عملکرد سالانه کمتر از ۰/۵٪ برای دوره ۲۵ تا ۳۰ ساله مورد انتظار است. سلول‌های خورشیدی CdTe معمولی در این زمینه عملکرد قابل قبولی نشان داده‌اند، اما ساختار ترکیبی CdTe/Si پیشنهادی در این مطالعه نیازمند بررسی‌های دقیق‌تری در زمینه پایداری است. مکانیسم‌های تخریب احتمالی شامل نفوذ رطوبت و اکسیژن به سطوح مشترک، تشکیل ترکیبات میانی ناپایدار در لایه $CdSi_xTe_{1-x}$ ، تنش‌های حرارتی ناشی از ضرایب انبساط متفاوت لایه‌ها و دیفیوژن عناصر بین لایه‌ها در دماهای بالا هستند.

مطالعات تسریع‌شده پایداری شامل آزمون‌های چرخه حرارتی (۴۰- تا ۸۵+ درجه سلسیوس)، آزمون رطوبت و حرارت (۸۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵٪) و آزمون تابش UV برای ارزیابی رفتار طولانی مدت ساختار ضروری هستند. تجربه‌های حاصل از سلول‌های CdTe تجاری نشان می‌دهد که با طراحی مناسب

کپسوله‌سازی و کنترل کیفیت فرایند تولید، می‌توان به پایداری مطلوب دست یافت.

ب) امکان‌سنجی اقتصادی و مقیاس‌پذیری صنعتی

از منظر اقتصادی، تولید انبوه سلول‌های خورشیدی CdTe/Si نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه در خطوط تولید تخصصی است. تحلیل هزینه‌های اولیه نشان می‌دهد که افزودن لایه‌های اضافی و مراحل پیچیده‌تر فرایندی ممکن است هزینه تولید را ۱۵ تا ۲۵٪ نسبت به سلول‌های CdTe معمولی افزایش دهد. با این حال، بازدهی بالاتر (۲۸/۴۲٪ در مقابل ۲۲٪) می‌تواند هزینه نهایی برحسب وات تولیدی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

مقیاس‌پذیری صنعتی این فناوری به عوامل متعددی وابسته است که شامل دسترسی به مواد اولیه با کیفیت مناسب، توسعه تجهیزات تولید انبوه، آموزش نیروی انسانی متخصص و ایجاد زنجیره تأمین یکپارچه است. تجربه موفق شرکت‌هایی مانند First Solar در تجاری‌سازی سلول‌های CdTe نشان می‌دهد که با سرمایه‌گذاری مناسب و برنامه‌ریزی بلندمدت، امکان دستیابی به تولید گیگاوات وجود دارد.

ج) مدیریت چرخه حیات و راهبردهای کاهش ریسک

مدیریت صحیح چرخه حیات سلول‌های خورشیدی حاوی کادمیوم شامل سه مرحله اصلی است: تولید ایمن، بهره‌برداری مطمئن و بازیافت کنترل‌شده. در مرحله تولید، اجرای استانداردهای سخت ایمنی شغلی، نظارت مداوم بر غلظت آلاینده‌ها در محیط کار و استفاده از سیستم‌های تهویه پیشرفته ضروری است. طراحی سلول‌ها نیز باید به گونه‌ای باشد که احتمال نشت کادمیوم در شرایط عادی عملکرد به حداقل برسد.

در دوره بهره‌برداری که معمولاً ۲۵ تا ۳۰ سال است، سلول‌های خورشیدی CdTe ایمنی قابل قبولی داشته و خطر انتشار کادمیوم بسیار ناچیز است. مطالعات نشان داده‌اند که حتی در صورت شکستگی مکانیکی یا آتش‌سوزی، مقدار کادمیوم آزادشده کمتر از حدود مجاز تعیین‌شده توسط سازمان‌های بهداشتی است. در پایان عمر مفید، توسعه شبکه‌های بازیافت تخصصی که قادر به جداسازی و خالص‌سازی مواد مختلف باشند، برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بازیابی ارزش اقتصادی مواد ضروری است.

د) مقایسه اثرات زیست‌محیطی با سایر فناوری‌ها

تحلیل چرخه حیات (LCA) جامع نشان می‌دهد که سلول‌های خورشیدی CdTe به‌رغم استفاده از کادمیوم، در مجموع اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارند. زمان

بازپرداخت انرژی برای سلول‌های CdTe حدود ۰/۵ تا ۱ سال است که در مقایسه با عمر مفید ۲۵ تا ۳۰ ساله آن‌ها، بازدهی انرژی بسیار مطلوبی ارائه می‌دهد. همچنین، انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول چرخه حیات سلول‌های CdTe (حدود ۱۴ تا ۲۰ گرم CO₂ بر کیلووات ساعت) بسیار کمتر از نیروگاه‌های زغال‌سنگی (۸۲۰ تا ۱۰۵۰ گرم) یا گازی (۳۵۰ تا ۴۹۰ گرم) است.

در مقایسه با سایر فناوری‌های خورشیدی، سلول‌های CdTe از نظر مصرف آب در فرایند تولید و اشغال زمین نیز عملکرد مناسبی دارند. استفاده از کادمیوم که اغلب به‌عنوان محصول جانبی تولید روی و سرب به دست می‌آید، در واقع به بهتر شدن مدیریت ضایعات صنایع فلزی کمک می‌کند. این موضوع اهمیت ویژه‌ای در زمان حاضر دارد که صنایع فلزی در جست‌وجوی راه‌هایی برای مدیریت محصولات جانبی خود هستند.

۱۱.۴. محدودیت‌های مدل‌سازی عددی

این مطالعه با وجود نتایج امیدوارکننده، دارای محدودیت‌هایی اساسی است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرند و تأثیر مستقیم بر قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط عملی دارند.

مدل‌سازی یک‌بعدی (1D) در نرم‌افزار SCAPS به‌طور ذاتی قادر به در نظرگیری اثرات دوبعدی و سه‌بعدی نیست. این محدودیت باعث می‌شود که پدیده‌هایی مانند توزیع غیریکنواخت جریان در سطح سلول، اثرات لبه و گوشه در ساختار و جریان‌های جانبی ناشی از ناهمگنی‌های موضعی نادیده گرفته شوند. همچنین، مدل فرض می‌کند که تمام لایه‌ها کاملاً صاف و بدون ناهمواری سطحی هستند، درحالی‌که در عمل، زبری سطح و ناهمواری‌های میکروسکوپی می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر جذب نور، بازتاب و مکانیسم‌های بازترکیب تأثیر بگذارند. علاوه بر این، اثرات مرزهای دانه‌ای که در مواد پلی کریستال نقش مهمی در انتقال حامل‌ها و بازترکیب دارند، در این شبیه‌سازی‌ها به‌طور کامل لحاظ نشده است. فرض یکنواختی کامل ترکیب شیمیایی و چگالی دوپینگ در سراسر هر لایه نیز یک ساده‌سازی قابل توجه است، زیرا در فرایندهای واقعی رسوب لایه‌نازک، گرادیان‌های ترکیبی و نواحی با چگالی دوپینگ متفاوت امری اجتناب‌ناپذیرند.

پارامترهای فیزیکی مواد استفاده‌شده در این شبیه‌سازی (مانند تحرک‌پذیری حامل‌ها، عمر حامل، چگالی حالاتو ضرایب جذب نوری) از مطالعات منتشرشده در ادبیات علمی استخراج شده‌اند. این پارامترها معمولاً برای نمونه‌های با کیفیت بالا و در شرایط ایدئال اندازه‌گیری شده‌اند و ممکن است با خواص مواد تولیدشده در شرایط

۵. نتیجه گیری

در این کار، به طور خلاصه ایده تحقیقاتی ترکیب بهترین مواد فتوولتائیک CdTe و سیلیکون تجاری شده را برای تشکیل نوع جدیدی از سلول خورشیدی ناهمگون CdTe/Si/ZnTe (نه سلول پشت سرهم) با پاسخ طیفی گسترده و راندمان بالا پیشنهاد شده است. سلول خورشیدی جاذب کامپوزیتی جدید CdTe/Si با ساختار FTO/ZMO/CdTe/CdSixTey/p-Si/ZnTe:Mo/Au ارائه شد و شبیه سازی عددی برای این سلول پیشنهادی برای بررسی عملکرد سلول با استفاده از نرم افزار SCAPS انجام شد. نتایج شبیه سازی عددی نشان داد که پاسخ موج بلند سلول خورشیدی جاذب کامپوزیتی CdTe/Si در مقایسه با سلول خورشیدی معمولی CdTe و بازده تبدیل نظری ۲۸/۳۶٪ از این سلول جدید پیشنهادی زمانی به دست آمد که تمام پارامترهای ورودی مختلف بهینه شدند. علاوه بر این، ویژگی های رابط تأثیر زیادی بر عملکرد سلول داشتند؛ به ویژه معرفی یک لایه بافر مؤثر (CdSi_xTe_y) برای این شبیه سازی استفاده شد) بین CdTe و Si برای دستیابی به راندمان بالا بسیار حیاتی است. به طور کلی، سلول خورشیدی جاذب کامپوزیت CdTe/Si جدید با موفقیت J_{sc} بزرگ و V_{oc} نسبتاً بالایی را به دست آورد. نتایج به دست آمده در این کار، پایه ای نظری برای تحقیقات تجربی و توسعه سلول های خورشیدی با پاسخ طیف گسترده گروه II-VI مبتنی بر سیلیکون با راندمان بالا فراهم می کند.

واقعی آزمایشگاهی یا صنعتی تفاوت قابل توجهی داشته باشند. برای مثال، کیفیت کریستالی مواد، حضور ناخالصی های ناخواسته و شرایط دقیق فرایند رسوب می تواند پارامترهایی مانند تحرک پذیری و عمر حامل را به طور چشمگیری تغییر دهند. همچنین، مدل فرض می کند که این پارامترها در طول زمان ثابت می مانند، در حالی که پدیده های پیرسازی، تخریب ناشی از رطوبت و اکسیژن و اثرات تشعشع طولانی مدت می توانند باعث تغییر تدریجی این پارامترها و در نتیجه کاهش عملکرد سلول در طول عمر مفید ۲۵ تا ۳۰ ساله شوند.

۱۲.۴. محدودیت های مدل سازی و فرضیات

شایان ذکر است که نتایج ارائه شده در این مطالعه براساس شبیه سازی های عددی یک بعدی با فرضیات ساده سازی شده به دست آمده است. این فرضیات عبارت اند از: ۱. فرض یکنواختی کامل لایه ها و نادیده گرفتن ناهمواری های سطحی که در ساخت عملی اجتناب ناپذیرند؛ ۲. عدم در نظر گرفتن اثرات دوبعدی و سه بعدی در جریان حامل های بار؛ ۳. نادیده گرفتن تأثیر دانه بندی و مرزهای دانه ها که می تواند مراکز باز ترکیب اضافی ایجاد کند؛ ۴. فرض دمای ثابت و عدم در نظر گرفتن تغییرات دمایی در شرایط عملیاتی واقعی؛ ۵. استفاده از پارامترهای ایدئال برای سطوح مشترک که در عمل دستیابی به آن ها چالش برانگیز است. این محدودیت ها می تواند باعث فاصله گرفتن نتایج شبیه سازی از شرایط واقعی شود و بنابراین، راندمان های گزارش شده باید به عنوان حد بالای نظری در نظر گرفته شوند که نیازمند اعتبارسنجی تجربی هستند.

مراجع

- [1] Yamaguchi, M., Yamada, H., Katsumata, Y., Lee, K.H., Araki, K., Kojima, N., "Efficiency potential and recent activities of high-efficiency solar cells", Journal of Materials Research, Vol. 32, No. 18, pp. 3445-3457, 2017, <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.335>.
- [2] Zhang, T., Wang, M., Yang, H., "A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems", Energies, Vol. 11, No. 11, p. 3157, 2018, <https://doi.org/10.3390/en11113157>.
- [3] Williams, B.L., Major, J.D., Bowen, L., Phillips, L., Zoppi, G., Forbes, I., Durose, K., "Challenges and prospects for developing CdS/CdTe substrate solar cells on Mo foils", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 124, pp. 31-45, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.017>.
- [4] Green, M.A., Dunlop, E.D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Hao, X., "Solar cell efficiency tables (Version 61)", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 31, No. 1, pp. 3-16, 2023, <https://doi.org/10.1002/pp.3646>.
- [5] Wilson, G.M., Al-Jassim, M., Metzger, W.K., Glunz, S.W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L.M., Stanbery, B.J., Zhu, K., Yan, Y., et al., "The 2020 photovoltaic technologies roadmap", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 53, No. 49, 493001, 2020, <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>.
- [6] Echendu, O.K., Dejene, F.B., Dharmadasa, I.M., "An investigation of the influence of different transparent conducting oxide substrates/front contacts on the performance of CdS/CdTe thin-film solar cells", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 28, No. 24, pp. 18865-18872, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7838-x>.
- [7] Hatton, P., Abbas, A., Kaminski, P., Yilmaz, S., Watts, M., Walls, M., Goddard, P., Smith, R., "Inert gas bubble formation in magnetron sputtered thin-film CdTe solar cells", Proceedings of the Royal Society A, Vol. 476, No. 2240, 20200056, 2020, <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0056>.
- [8] Akhtaruzzaman, M., Shahiduzzaman, M., Amin, N., Muhammad, G., Islam, M.A., Sobayel, K., Sopian, K., "Impact of Ar flow rates on micro-structural properties of WS_2 thin film by RF magnetron sputtering", Nanomaterials, Vol. 11, No. 7, 1635, 2021, <https://doi.org/10.3390/nano11071635>.
- [9] Hossain, M.S., Rahman, K.S., Karim, M.R., Aijaz, M.O., Dar, M.A., Shar, M.A., Misran, H., Amin, N., "Impact of CdTe thin film thickness in $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}/\text{CdTe}$ solar cell by RF sputtering", Solar Energy, Vol. 180, pp. 559-571,

- 2019, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.019>.
- [10] Olusola, O.I., Madugu, M.L., Ojo, A.A., Dharmadasa, I.M., "Development of CdMnTe thin films using electroplating technique for opto-electronic device applications", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 31, No. 24, pp. 22151–22161, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04717-5>.
- [11] Gawron, W., Sobieski, J., Manyk, T., Kopytko, M., Madejczyk, P., Rutkowski, J., "MOCVD grown HgCdTe heterostructures for medium wave infrared detectors", *Coatings*, Vol. 11, No. 5, 611, 2021, <https://doi.org/10.3390/coatings11050611>.
- [12] Arya, R.R., Sarro, P.M., Loferski, J.J., "Efficient cadmium sulfide on silicon solar cells", *Applied Physics Letters*, Vol. 41, No. 4, pp. 355–357, 1982, <https://doi.org/10.1063/1.93511>.
- [13] Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V., Podestà, A., "Recent progress on CdTe/CdS thin film solar cells", *Solar Energy*, Vol. 77, No. 6, pp. 795–801, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.07.011>.
- [14] Britt, J., Ferekides, C., "Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency", *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 22, pp. 2851–2852, 1993, <https://doi.org/10.1063/1.109629>.
- [15] Romeo, A., Khrypunov, G., Kurdesau, F., Arnold, M., Bätzner, D.L., Zogg, H., Tiwari, A.N., "High-efficiency flexible CdTe solar cells on polymer substrates", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, No. 18, pp. 3407–3415, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.09.020>.
- [16] Burgelman, M., Nollet, P., Degraeve, S., "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", *Thin Solid Films*, Vol. 361–362, pp. 527–532, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00825-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00825-1).
- [17] Sites, J.R., Mauk, P.H., "Diode quality factor determination for thin-film solar cells", *Solar Cells*, Vol. 27, No. 1–4, pp. 411–417, 1989, [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(89\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0379-6787(89)90050-1).
- [18] Dharmadasa, I.M., Bingham, P.A., Echendu, O.K., Salim, H.I., Druffel, T., Dharmadasa, R., Sumanasekera, G.U., et al., "Fabrication of CdS/CdTe-based thin film solar cells using an electrochemical technique", *Coatings*, Vol. 4, No. 3, pp. 380–415, 2014, <https://doi.org/10.3390/coatings4030380>.
- [19] Kartopu, G., Turkay, D., Ozcan, C., Hadibrata, W., Aurang, P., Yerci, S., Uzum, A., et al., "Progress in upscaling CdTe thin film PV manufacturing using MOCVD", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 191, pp. 78–85, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.002>.
- [20] Major, J.D., Treharne, R.E., Phillips, L.J., Durose, K., "A low-cost non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells", *Nature*, Vol. 511, No. 7509, pp. 334–337, 2014, <https://doi.org/10.1038/nature13435>.
- [21] McCandless, B.E., Sites, J.R., "Cadmium telluride solar cells", *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, pp. 600–641, 2011, <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch14>.
- [22] Spalatu, N., Hiie, J., Mikli, V., Krunks, M., Valdna, V., Maticiu, N., Raadik, T., Caraman, M., "Postdeposition processing of CdTe thin films: The effect of CdCl₂ activation", *Thin Solid Films*, Vol. 582, pp. 128–133, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.004>.
- [23] Swanson, D.E., Sites, J.R., Sampath, W.S., "Co-sublimation of CdSeTe/CdTe thin-film photovoltaic devices with greater than 22% efficiency", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 7, No. 6, pp. 1581–1586, 2017, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2748593>.
- [24] Li, C., Wu, Y., Poplawsky, J., Pennycook, T.J., Paudel, N., Yin, W., Haigh, S.J., et al., "Grain-boundary-enhanced carrier collection in CdTe solar cells", *Physical Review Letters*, Vol. 112, No. 15, 156103, 2014, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.156103>.
- [25] Munshi, A.H., Kephart, J.M., Abbas, A., Raguse, J.M., Beaudry, J.N., Barth, K.L., Walls, J.M., Sampath, W.S., "Polycrystalline CdTe photovoltaics with efficiency over 21% through improved hole collection", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 176, pp. 9–18, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.031>.
- [26] Swarnkar, A., Marshall, A.R., Sanehira, E.M., Chernomordik, B.D., Moore, D.T., Christians, J.A., Chakrabarti, T., Luther, J.M., "Quantum dot-induced phase stabilization of α -CsPbI₃ perovskite for high-efficiency photovoltaics", *Science Advances*, Vol. 10, No. 8, eadl2835, 2024, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adl2835>.
- [27] Luo, D., Su, R., Zhang, W., Gong, Q., Zhu, R., "Minimizing non-radiative recombination losses in perovskite solar cells", *Nature Reviews Materials*, Vol. 9, No. 3, pp. 215–232, 2024, <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00631-5>.
- [28] Liu, C., Yang, Y., Xia, X., Ding, Y., Arain, Z., An, S., Liu, X., et al., "Improved photovoltaic performance of CdTe solar cells by absorber surface modification", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 268, 112758, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112758>.
- [29] Green, M.A., Dunlop, E.D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., Hao, X., "Solar cell efficiency tables (Version 63)", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 32, No. 1, pp. 3–13, 2024, <https://doi.org/10.1002/pip.3750>.