Electrochemical deposition of CdTE and investigating the effect of potential deviation from stoichiometric potential

Fateme Amirsardari Darjaz¹, Ali Mashreghi^{2*}

1- M.Sc. student of Materials Science and Engineering, Materials Science and Engineering Department, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2-Associate Professor, Materials Science and Engineering Department, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Received: 2025/03/09 Accepted: 2025/04/05

Use your device to scan and read the article online



DOI: 10.71905/jnm.2025.1201558

Keywords:

Electrochemical deposition; CdTe; Elemental atomic ratio; Solar cell.

Abstract

CdTe solar cells have a significant position in photovoltaic market due to their high efficiency and low cost. Among the various deposition techniques, electrochemical deposition offers simple and inexpensive method for CdTe fabrication. At a specific voltage, stoichiometric CdTe films can be obtained. Since the reduction potential of tellurium ions is more positive than that of cadmium ions, anodic deviation from the stoichiometric voltage leads to tellurium-rich CdTe films, while cathodic deviation results in cadmium-rich CdTe films. In this study, CdTe thin films were electrochemically deposited at the stoichiometric voltage of 1600 mV, as well as at slightly anodic (1580 mV) and cathodic (1620 mV) voltages. Elemental analysis using energy dispersive spectroscopy (EDS) method revealed that the Cd/Te atomic ratios at 1580, 1600. and 1620 mV were 0.97, 1.00, and 1.03, respectively This finding indicates the formation of tellurium-rich, stoichiometric and cadmium-rich CdTe layers. Xray diffraction (XRD) analysis confirmed that all deposited layers were single phase CdTe without any secondary phases. The real thickness of the obtained films, measured via scanning electron microscopy (SEM) cross-sectional images, was compared with the theoretical thickness calculated from currenttime curves. The obtained results revealed a decrease in deposition efficiency with cathodic deviation. Top-view SEM images showed that all CdTe layers consisted of micrometer sized dendritic structures. The obtained results demonstrate that by controlling deposition voltage, CdTe films with tailored stoichiometry can be produced, enabling precise control over their electrical properties for photovoltaic applications.

Citation: Amirsardari Darjaz Fateme, Mashreghi Ali. Electrochemical deposition of CdTE and investigating the effect of potential deviation from stoichiometric potential. Journal of New Materials; 2025 15(58):1-15

Corresponding author: Ali Mashreghi

Address: Associate Professor, Materials Science and Engineering Department, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran Tell: +987137354520 Email: mashreghi@sutech.ac.ir

Extended Abstract

Introduction:

Cadmium telluride (CdTe) is a promising material as absorber layer in thin-film solar cells, due to its optimal direct bandgap (~1.45 eV) and high absorption coefficient of sun light, making it suitable candidate in photovoltaic applications. Compared to silicon-based solar cells, CdTe cells offer advantages such as costeffectiveness, lower material consumption, and ease of large-scale fabrication. Among different CdTe deposition techniques, electrochemical deposition (ECD) is a simple, low-cost, and scalable technique. The composition and properties of CdTe films are highly dependent on the deposition voltage. At a specific voltage, which will be named as stoichiometric voltage, CdTe layer with stoichiometric composition is deposited. Since Te has a more positive reduction potential than Cd, Te is more easily reduced than Cd. As a result, anodic deviation from stoichiometric voltage leads to deposition of Te-rich CdTe layer and cathodic deviation from stoichiometric voltage results in Cd-rich CdTe layers. The ability to fine-tune the Cd/Te molar ratio via controlling deposition voltage can be useful to manipulate the electrical properties of CdTe films. Accordingly, Te-rich CdTe layer exhibits p-type behavior and Cdrich CdTe layer demonstrates n-type characteristic. In the present work, the influence of small deviation of CdTe deposition potential from stoichiometric potential on obtained CdTe layer was investigated.

Methodology

CdTe thin films were electrodeposited using two-electrode configuration, with fluorinedoped tin oxide (FTO) glass as the cathode and a graphite rod as the anode. The electrolyte consisted of cadmium sulfate (3CdSO₄.8H₂O, from Alfa-Aeasar) and tellurium oxide (TeO₂, from Kanto) dissolved in water/sulfuric acid solution. The pH of obtained electrolyte was adjusted to 3.14 ± 0.01 . The electrochemical deposition of CdTe was performed at three voltages: 1580 mV (anodic deviation), 1600 mV (stoichiometric voltage), and 1620 mV (cathodic deviation). The CdTe layers were deposited for 4 hours for all deposition potentials. The temperature of electrolyte was maintained at 70 °C. During deposition, the electrolyte was stirred continuously and vigorously. After deposition, the films were rinsed with deionized water and dried under nitrogen flow. The structural, compositional, and morphological characteristics of the films were analyzed using multiple techniques including; X-ray diffraction (XRD) to confirm phase purity and phase structure of obtained layers, Scanning electron microscopy (SEM) to examine surface morphology and real thickness of deposited **Energy-dispersive** CdTe layer and spectroscopy (EDS) to determine elemental composition and Cd/Te molar ratio. Currenttime (I-t) measurements were dome during **deposition** to evaluate deposition kinetics and to calculate theoretical thickness of obtained layers.

Results and Discussion

XRD analysis confirmed that all films were composed of the CdTe compound, without any secondary phases. However, the preferred orientation varied depending on deposition voltage. The Te-rich film (1580 mV) exhibited a strong preferential orientation along [111] crystallographic direction. Grain size of deposited CdTe layers was determined from peak broadening of XRD pattern using Williamson-Hall plot method. The grain size was measured as 33 nm, 24 nm and 17 nm for CdTe layers deposited at 1580, 1600 and 1620 mV, respectively. This finding may be due to the increased nucleation driving force by making deposition potential more cathodic. Elemental analysis was done by EDS According measurement. to these measurements, the Cd/Te atomic ratios of 0.97, 1.00, and 1.03 was obtained for CdTe layers electrochemically deposited at 1580, 1600, and 1620 mV, respectively. This confirmed the expected shift in stoichiometry, with anodic deposition leading to Te-rich films, while cathodic deposition resulted in Cd-rich layers. These compositional changes have direct implications for electrical behavior, as Te-rich films favor p-type conductivity due to excess Te acceptor states, whereas Cd-rich films exhibit n-type behavior due to Cd-induced donor levels. By tuning deposition voltage. intrinsic, p-type, and n-type CdTe films can be selectively fabricated without external doping. Real thickness CdTe layers of electrochemically deposited at different potentials were determined from cross sectional SEM images. For each sample, five SEM images were obtained at different locations along CdTe layer and the measured thicknesses were averaged. The measurements revealed real film thicknesses of 594 nm, 717 nm and 826 nm for CdTe layers electrochemically deposited at deposition potentials of 1580, 1600 and 1620 mV, respectively. The theoretical thickness of CdTe layers deposited at different deposition potentials were calculated from I-t curve according to Faraday's law. The theoretical thicknesses of 2130 nm, 2550 nm, and 3570 nm were calculated for CdTe layers electrochemically deposited at deposition potentials of 1580, 1600 and 1620 mV, respectively. The deposition efficiency was calculated as the ratio of real thickness to theoretical thickness. The observed reduction in deposition efficiency at more cathodic voltages is attributed to enhanced hydrogen evolution, which competes with CdTe deposition and lowers energy utilization efficiency.

Top-view SEM images showed all films had dendritic structures, with micron-scale branches composed of nanometer-sized grains. Dendrite size increased with anodic deviation and decreased with cathodic deviation from stoichiometric potential. This can be demonstrated by considering higher nucleation density at more cathodic potentials.

Conclusion

This study demonstrates that minor deviations from the stoichiometric deposition potential significantly affect the obtained CdTe layer. **XRD analysis** confirmed single-phase CdTe layer for all samples without any secondary phases. **EDS results** indicated precise control over Cd/Te molar ratio through voltage tuning, allowing for fabrication of Cd-rich, Te-rich and stoichiometric CdTe layers. The real and theoretical thicknesses of CdTe layers increased with increasing deposition potential. **Deposition efficiency** decreased with cathodic deviation may be due to competing hydrogen evolution reaction. **SEM analysis** revealed micrometer dendritic morphologies.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

This work is based upon research funded by Iran National Science Foundation (INSF) under project No. 4034835. This work was also supported by Shiraz University of Technology. The authors are grateful for these supports.

Authors' contributions

Both authors had equal contribution.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest

مقاله پژوهشی

لایهنشانی تلورید کادمیوم به روش لایهنشانی الکتروشیمیایی و بررسی تأثیر انحراف از ولتاژ استوکیومتری

فاطمه امیرسرداری'، علی مشرقی^{۲*}

۱– دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران ۲– دانشیار دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

> تاریخ دریافت: ۱٤+۳/۱۲/۱۹ تاریخ پذیرش:۱٤+٤/+۱/۱٦

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI: 10.71905/jnm.2025.1201558

واژههای کلیدی: لایهنشانی الکتروشیمیایی، تلورید کادمی*وم،* نسبت اتمی عناصر، سلول خورشیدی.

چکیدہ

سلول های خورشیدی تلورید کادمیوم جایگاه ویژهای در بازار سلول های خورشیدی دارند. یکی از روش های ساده و ارزان قیمت ساخت لایه تلورید کادمیوم، روش الکتروشیمیایی است. در این پژوهش، لایه تلورید کادمیوم به روش لایه نشانی الکتروشیمیایی کاتدی با استفاده از محلولالکترولیت آبی لایه نشانی شد. به منظور جبران یون های تلوریوم تهی شده از محلول الکترولیت اشباع از یون تلوریوم استفاده شد. لایه نشانی در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۰۰ میلی ولت انجام شد. نتایج حاصل از الگوی پراش پرتو ایکس نشان داد که در هر سه ولتاژ فاز تلورید کادمیوم بدون شکل گیری فاز ثانویه ایجاد می شود. همچنین، با استفاده از الکوی پراش پرتو ایکس اندازه بلورک تلورید کادمیوم اندازه گیری شد که این مقدار برای هر سه ولتاژ لایه نشانی در حدوده نانومتری بود. نتایج آنالیز عنصری نشان داد که نسبت مولی کادمیوم به تلوریوم در لایه های اعمال شده در ولتاژهای ۱۸۵۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۰۰ میلی ولت به ترتیب نسبت مولی کادمیوم به تلوریوم در لایه های اعمال شده در ولتاژهای ۱۸۵۰، ۱۸۹۰ و ۱۶۰۰ میلی ولت به ترتیب میری فاز کانویو ایب اندازه گیری شد. فعای واقعی و تئوری لایه ها به ترتیب از تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی میلی ولت به ترتیب برابر با ۱۸۵۰ ۷۱۷ و ۲۸۶ نانومتر اندازه گیری شد و ضخامت تئوری بود. ۲۰۰۱ و ۱۹۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۱۹۵۹ ۷۱۷ و ۲۶۶ نانومتر اندازه گیری شد و ضخامت تئوری به ترتیب برابر با ۱۹۰۰، ۱۹۰۰ و ۱۹۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۱۹۵۹ ۷۱۷ و ۲۶۵ نانومتر اندازه گیری شد و ضخامت تئوری به ترتیب برابر با ۱۹۰۰، ۱۹۰۰ و ۱۹۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۱۹۵۹ ۷۱۷ و ۲۶۵ نانومتر اندازه گیری شد و ضخامت تئوری به تریب برابر با ۲۱۰، ۱۹۰۰ و ۱۹۲۰ مونه نشان داد که در تمام نمونه ها لایه تلورید کادمیوم متشکل از دندریت های میکرومتری است.

> * **نویسنده مسوول:** علی مشرقی **نشانی:** دانشیار ، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز **تلفن: ۹۸۷۱۳۷۳۵۴۵۲۰** پست الکترونیکی:mashreghi@sutech.ac.ir

۱-مقدمه

امروزه سلولهای خورشیدی یکی از فناوریهای پیش رو در تولید انرژی تجدید پذیر محسوب می شوند. تاکنون سه نسل سلولهای خورشیدی ارائه شده است [۱]. نسل اول سلولهای خورشیدی بر پایه تک بلور سیلیکون است، نسل دوم معروف به سلولهای خورشیدی لایه نازک است که شامل سلولهای خورشیدی با جاذب تلورید کادمیوم و سلول های خورشیدی با جاذب CIGS میشود و نسل سوم سلولهای خورشیدی حساس شده با رنگینه^۲ و سلول های خورشیدی پروسکایتی ۳ است. از لحاظ مقدار تولید، سلول های نسل اول جایگاه بالاتری نسبت به سلول های نسل دوم دارند. در حالی که سلولهای نسل سوم هنوز جایگاه قابل توجهی در بازار پیدا نکردهاند. از مزایای سلولهای خورشیدی نسل دوم نسبت به سلولهای خورشیدی نسل اول میتوان به سادگی فرآیند تولید و هزینه کمتر ساخت آنها و ضخامت کم لایه جاذب اشاره کرد [۲]. اخیراً تحقیقات بسیار گستردهای بر روی سلولهای خورشیدی تلورید کادمیوم انجام شده است که در نتیجه آن بازده این سلولها به حدود ۲۱٪ رسیده است [۳, ۴]. در نتیجه این افزایش روزافزون بازده تبدیل انرژی، تمایل به استفاده از سلولهای خورشیدی تلورید کادمیوم در مقایسه با سلولهای سیلیکونی رو به افزایش است. از طرفی، هر چقدر فرآیند تولید سلول های خورشیدی تلورید کادمیوم آسان تر و کم هزینه تر شود جایگاه این نوع سلولها در بازار ارتقاء می یابد. روشهای متفاوتی براى توليد سلولهاى خورشيدى تلوريد كادميوم مورد استفاده قرار می گیرد که از آن میان می توان به روش های لایه نشانی تبخیر حرارتی^۴ [۵]،لایهنشانی تصعید فضای بسته^۵ [۶]، لایهنشانی انتقال بخار^{$9} [Y] و لايه نشاني الكتروشيميايي^Y [<math>\Lambda$] اشاره نمود. روش</sup> لايهنشاني الكتروشيميايي، در مقايسه با ديگر روش هاي لايهنشاني تلورید کادمیوم، روشی سادهتر و کم هزینهتر است، به راحتی قابل اجرا در مقیاس صنعتی بوده، نیز ایجاد زیرساخت فرایند تولید صنعتی آن ساده و کم هزینه بوده و نیاز به دانش مهندسی پیچیده ای ندارد .

معمولاً لایهنشانی الکتروشیمیایی تلورید کادمیوم در حمام آبی اسیدی^۸ [۹–۱۱] انجام میشود. لایهنشانی الکتروشیمیایی تلورید کادمیوم در حمام اسیدی اولین بار توسط پنیکر^۹ و همکاران [۱۲] گزارش شد. در این روش یونهای کادمیوم و تلوریوم به ترتیب از انحلال سولفات کادمیوم (CdSO4) و اکسید تلوریوم

1 Copper-indium-gallium-selenide

- 2 Dye sensitized solar cells
- 3 Perovskite solar cell
- 4 Thermal evaporation 5 Close space sublimation
- 6 Vapor transport deposition

pH= 2-4 المعلول آب/اسید سولفوریک با 2-4 pH تامین می شود. کادمیوم به صورت یون Cd^{2+} و تلوریوم به صورت یون TeO_2 می شود. کادمیوم به صورت یون TeO_2^+ می شود. کادمیوم به صورت این روش، زیرلایه (که معمولاً شیشه با پوشش اکسید شفاف رسانا از نوع اکسید قلع آلائیده با فلوئور (۱ است) به عنوان کاتد در حمام لایه نشانی قرار داده می شود. در سطح کاتد یون های Cd^{2+} طی فرآیندهای کاتدی زیر به اتم های کادمیوم و تلوریوم احیا شده و لایه تلورید کادمیوم بر روی بر روی سطح کاتد لایه نشانی می شود:

 $Cd^{2+} + 2e^{-} = Cd$

HTeO₂⁺+3H⁺+4e⁻=2H₂O+ Te (۲) ازآنجایی که تلوریوم نسبت به کادمیوم بسیار نجیب تر است، لذا

(1)

انتظار مىرود كه در حين لايهنشانى الكتروشيميايي تنها تلوريوم احیا شود و یون کادمیوم به صورت محلول در الکترولیت باقی بماند و در نتیجه تنها لایه تلوریوم تشکیل شود. اما ازآنجایی که انرژی أزاد گیبس تشکیل تلورید کادمیوم از عناصر کادمیوم و تلوریوم بسيار منفى است، لذا بهجاى تشكيل لايه تلوريوم عنصرى، لايه تلوريد كادميوم طى مكانيزم لايهنشاني الكتروشيميايي تحت یتانسیلی^{۱۲} ایجاد می شود [۱۲]. بر اساس این مکانیزم، ابتدا یونهای⁺ HTeO₂ با گرفتن الکترون از کاتد احیا شده و اتمهای تلوریوم بر روی کاتد قرار می گیرد، پس از آن یون های ۲²⁺ با گرفتن الکترون از کاتد احیا شده و با اتمهای تلوریوم موجود روی کاتد ترکیب شده و تلورید کادمیوم شکل می گیرد. این تمایل به ترکیب شدن با اتم تلوریوم سبب می شود که ۲²⁺ Cd بالاتر امکان احیاشدن داشته باشد. برای جلوگیری از تشکیل فاز تلوريوم عنصرى در كنار تلوريد كادميوم، بايد نسبت غلظت تلوريوم به کادميوم بسيار کم و در حدود ٥-١٠ تا ٣-١٠ باشد. به طور معمول حمامهای اسیدی لایهنشانی تلورید کادمیوم حاوی یون های +2Cd و +HTeO با غلظت به ترتیب، حدود ۱ مولار و ⁻⁰ تا ^۳ -۱۰ مولار است. غلظت بسیار کم یون ⁺HTeO₂ در الكتروليت سبب مىشود كه پس از مدتى لايەنشانى كردن تلوريد كادميوم، الكتروليت از يون ⁺HTeO₂ تهى شده و نياز به انحلال مجدد تلوريوم در محلول باشد. تأمين مجدد يون تلوريوم در الکترولیت لایهنشانی، معمولاً به دو شیوه انجام می شود. در روش معمول که زیاد مورد استفاده قرار می گیرد، در بازههای زمانی مشخص محلول غليظ از يون +HTeO به الكتروليت اضافه

- 8 Acidic aqueous solution
- 9 Panicker et al.

- 10 Transparent conducting oxides(TCO)
- 11 Fluorine doped tin oxide (FTO)
- 12 Under potential deposition(UPD)

⁷ Electrochemical deposition

می شود. عیب این روش این است که دقیقاً مقدار تهی شده تلوريوم در الكتروليت معلوم نيست و لذا اضافه كردن تقريبي محلول غليظ شده از +HTeO₂، سبب تغييرات غلظت الكتروليت در حین لایهنشانی می شود. راه دیگر، اشباع کردن محلول الكتروليت از يون هاى +HTeO با اضافه كردن مقدار بيشتر TeO₂ بیش از حد حلالیت آن است. از آنجایی که میزان انحلال TeO2در محلول اسیدی بسیار کم است، لذا با ساخت محلول اشباع از TeO2 مى توان غلظت هاى مختلف TeO2 با مقدار بسيار کم در محدوده ^۵-۱۰ تا ۲۰^{-۳} مولار ایجاد کرد. از آنجایی که TeO₂ اضافى بهصورت حل نشده و بهصورت فاز جامد در محلول وجود دارد، با تهی
شدن محلول الکترولیت از یون $^+$ HTeO ، مقداری TeO₂ حل شده و جبران يون تهى شده را مىكند. حد حلاليت TeO₂ در محلول اسیدی تابع pH محلول است. یکی از اهداف این مقاله این است که نشان دهیم آیا با الکترولیت اشباع شده با اكسيد تلوريوم مي توان لايه تلوريد كادميوم استويكيومتري (يعنى ترکیب با نسبت اتمی کادیوم به تلوریوم برابر با ۱) تولید کرد.

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر لایه تلورید کادمیوم ایجاد شده به روش لايهنشاني الكتروشيميايي ولتاژ لايهنشاني است. طبق مكانيزم لايهنشاني تحت پتانسيل، هر چقدر پتانسيل لايهنشاني آندى تر باشد، پوشش حاصل غنى از عنصر نجيب تر (در اينجا تلوریوم) شده و هر چقدر پتانسیل کاتدی تر باشد، پوشش حاصل غنی از عنصر فعال تر (در اینجا کادمیوم) می شود. در یک ولتاژ میانی ترکیب استوکیومتری حاصل می شود [۱۳]. شایان ذکر است که محلول الکترولیت استفاده شده در مرجع ۱۳ برای لایهنشانی تلورید کادمیوم از تلوریوم اشباع نشده است. به همین دلیل، در آن مقاله برای جبران یون تهی شده تلوریوم در زمان های مشخص محلول تلوريوم به حمام لايهنشاني اضافه مي شد. لذا، هدف ديگر مقاله حاضر این است که تأثیر انحراف جزئی ولتاژ لایهنشانی از مقدار ولتاژ استوكيومتري (يعني ولتاژي كه لايه تلوريد كادميوم با ترکیب استوکیومتری حاصل می شود) بر لایه تلورید کادمیوم حاصل بررسی گردد. تا أنجایی که نویسندگان مقاله حاضر اطلاع دارند، تأثير انحراف ولتاژ لايهنشاني از ولتاژ استوكيومتري بر لايه تلوريد كادميوم حاصل از الكتروليت اشباع شده با تلوريوم، بررسي نشده است. اهمیت این موضوع آنجاست که ترکیب تلورید كادميوم استوكيومترى از لحاظ الكتريكي نيمههادى ذاتي محسوب شده و تلورید کادمیوم غنی از تلوریوم نیمههادی نوع p و تلورید کادمیوم غنی از کادمیوم نیمههادی نوع n محسوب مىشود. لذا اگر بتوان با آندىتر يا كاتدىتر كردن ولتاژ لايەنشانى به ترتیب تلورید کادمیوم غنی از تلوریوم و تلورید کادمیوم غنی از

1 Majority carrier

2 Schottky barrier solar cell

3 Heterojunction solar cell

کادمیوم تولید کرد میتوان بهراحتی، با تغییر ولتاژ لایهنشانی نوع حاملهای بار غالب^۱ تلورید کادمیوم را بهصورت دلخواه تغییر داد و انواع تلورید کادمیوم از نظر نوع حاملهای بار غالب تولید کرد. اهمیت نوع لایه تلورید کادمیوم از نظر حامل بار در امکان ساخت سلول های خورشیدی با سد شاتکی^۲ و با اتصال ناهمگون^۳ است. برای سلول خورشیدی سد شاتکی لایه تلورید کادمیوم باید از نوع n بوده و برای سلول خورشیدی از نوع اتصال ناهمگون، لایه تلورید کادمیوم بایستی از نوع P باشد.

دو هدف از انجام مقاله حاضر دنبال می شود. یک هدف این است که امکان لایهنشانی تلورید کادمیوم از محلول الکترولیت اشباع شده با تلوریوم بررسی شود. هدف دیگر این است که تأثیر انحراف جزئی ولتاژ لایهنشانی از مقدار ولتاژ استوکیومتری بر لایه تلورید کادمیوم حاصل بررسی گردد.

۲-روش انجام آزمایش

لايهنشانی الکتروشيميايی تلوريد کادميوم به روش دو الکترودی انجام شد [۱۳]. یک عدد FTO به طول ۲ سانتیمتر، عرض ۱ سانتیمتر و ضخامت ۳ میلیمتر و مقاومت سطحی ۱۵ اهم بر مربع به عنوان کاتد و یک عدد میله گرافیتی به قطر ۳ میلیمتر به عنوان أند انتخاب شد. ولتاژ لايهنشاني با استفاده از منبع تغذيه أرما اعمال شد. لایه نشانی در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد تحت هم زدن شدید محلول با دور همزن ۱۴۰۰ دور در دقیقه انجام شد. محلول الكتروليت لايهنشاني از انحلال سولفات كادميوم (CdSO₄.^o₂H₂O مارک آلفاایسر) و اکسید تلوریوم (TeO₂ مارک Kanto) در محلول أب/اسيد سولفوريک ساخته شد. پی اچ الکتروليت لايهنشاني ۰/۰۱ ± ۳/۱۴ اندازه گيري شد. محلول الكتروليت اشباع از يون تلوريوم بود و غلظت سولفات كادميوم در محلول الكتروليت لايهنشاني ۱ مولار انتخاب شد. لايهنشاني در ولتاژ هاي ۱۵۸۰، ۱۶۲۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت هر کدام به مدت ۴ ساعت انجام شد. قبل از لایهنشانی زیر لایههای FTO به ترتیب در حلالهای آب/مايع ظرفشويي، استون و آب مقطر و توسط حمام التراسونيك هر کدام به مدت ۴۸۰ ثانیه شستشو و سپس با دمش گاز نیتروژن خشک شد. پس از لایهنشانی نمونهها از الکترولیت خارج شدند و با آب مقطر شستشو و با دمش گاز نیتروژن خشک شدند.

ساختار کریستالی لایههای تلورید کادمیوم حاصل با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس^۴ تعیین شد. الگوی پراش پرتو ایکس با استفاده از دستگاه XRD اندازه گیری شد. برای این اندازه گیری پرتو Cu_{kα} و گامهای روبش °0.1 استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی از سطح و از مقطع لایه تلورید کادمیوم حاصل با

⁴ X-ray diffraction (XRD) pattern

استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ تهیه شد. همچنین آنالیز عنصری لایه حاصل به روش طیفسنجی پراکندگی انرژی^۲ با استفاده از دستگاه SEM انجام شد. ضخامت واقعی پوشش از تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع نمونه تعیین و ضخامت تئوری آن از منحنی جریان – زمان در حین لایهنشانی الکتروشیمیایی محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

لايه تلوريد كادميوم به روش الكتروشيميايي، در الكتروليت حاوى یون Cd^{2+} یون Cd^{2+} یون Cd^{2+} و با pH = ٣/١۴ ± ٠/٠١ ایجاد شد. تجربیات آزمایشگاهی گذشته نویسندگان مقاله نشان داد که لایهنشانی در ولتاژ ۱۶۰۰ میلی ولت منجر به لایه تلورید کادمیوم با ترکیب استوکیومتری (یعنی نسبت غلظت مولى كادميوم به تلوريوم در پوشش برابر با ۱) حاصل مى شود. از آنجایی که انتظار میرود انحراف جزئی از این مقدار ولتاژ چه در جهت ولتاژهای کاتدی و چه در جهت ولتاژهای آندی سبب تغییر ترکیب شیمیایی شود، لذا لایهنشانی علاوه بر ولتاژ ۱۶۰۰ میلی ولت در ولتاژهای ۱۵۸۰ میلی ولت (ولتاژ آندی تر) و ولتاژ ۱۶۲۰ میلی ولت (ولتاژ کاتدی تر) انجام شد. در هر ولتاژ، لایهنشانی به مدت ۴ ساعت انجام شد. شکل ۱ تصویر نمونههای حاصل از لایهنشانی در ولتاژهای مختلف را نشان میدهد. همانطور که مشاهده می شود، پوششهای حاصل همگی صاف و یکنواخت می باشند. همچنین، به طور کیفی پوشش های حاصل چسبندگی و مقاومت خوبی به سایش از خود نشان دادند.

برای تایید ایجاد فاز تلورید کادمیوم، آزمون پراش اشعه ایکس بر روی نمونهها انجام شد. شکل ۲ الگوی XRD نمونههای الیهنشانی شده در ولتاژهای مختلف را نشان میدهد. از مقایسه الگوی حاصل با الگوهای مرجع با کدهای^۳ ک41-40-00 و کادمیوم است) مشخص گردید که الگوی حاصل ناشی از پراش کادمیوم است) مشخص گردید که الگوی حاصل ناشی از پراش پرتو ایکس توسط لایه تلورید کادمیوم لایهنشانی شده و لایه رسانای FTO زیرین میباشد. پیکهای پراش ظاهر شده در زوایای [°] ۲۲/۷۲، [°] ۲۸/۲۹، [°] ۲۶/۸۴، [°] ۲۶/۸۴ و (۳۲۱) لایه تلورید کادمیوم و پیکهای پراش ظاهر شده در (۲۳۱) لایه تلورید کادمیوم و پیکهای پراش ظاهر شده در (۲۳) کاره تروایای [°] ۲۶/۵۲، [°] ۲۶/۸۴، [°] ۲۰/۸۴، [°] ۲۶/۸۶، [°] ۲۶/۸۶، [°] ۲۶/۵۲، [°] ۲۶/۸۴، [°] ۲۰/۸۴، [°] ۲۰/۵۴، [°] ۲۶/۸۶، [°] ۲۰/۵۲، [°] ۲۰/۸۴ و [°] ۲۰/۸۴، [°] ۲۰/۵۴، [°] ۲۰/۱۴) و (۲۰۱)

اکسید قلع می باشد. در الگوی پراش مربوط به لایه های تلورید کادمیوم لایهنشانی شده در ولتاژهای مختلف، تنها پیکهای تركيب تلوريد كادميوم و اكسيد قلع مشاهده مى شود. لذا مى توان نتیجه گرفت که با انحراف جزئی از ولتاژ استوکیومتری ۱۶۰۰ میلی ولت در جهات آندی و کاتدی فاز ثانویه در لایه تلورید کادمیوم حاصل ایجاد نمی شود. در الگوی مربوط به نمونه لایهنشانی شده در ولتاژ ۱۵۸۰ میلی ولت شدت پیک پراش مربوط به صفحات (۱۱۱) نسبت به دیگر صفحات بیشتر است که نشان دهنده رشد ترجیحی در جهات [۱۱۱] است. برای مقایسه بهتر، نسبت شدت پیک پراش صفحات (۱۱۱) به (۳۱۱) (یعنی نسبت معیاری از میزان رشد ترجیحی لایه تلورید کادمیوم ($I_{(111)}/I_{(311)}$ در نظر گرفته شد. نسبت (I(11)/I(311 برای نمونه های لایهنشانی شده در ولتاژهای مختلف در شکل ۳ (الف) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود، با انحراف آندی^۴ از ولتاژ استویکیومتری، لایهنشانی به صورت ترجیحی تر در جهات [۱۱۱] اتفاق مى افتد. اما با انحراف كاتدى⁶ از ولتاژ استويكيومترى لايهنشاني بيشتر به صورت چند محوره⁶ اتفاق مي افتد. همچنين، ییک های براش مربوط به فاز تلورید کادمیوم در هر سه ولتاژ لایهنشانی پهنای قابل ملاحظه ای دارند، که نشان دهنده سایز نانومتری بلورکهای^۷ تلورید کادمیوم می باشد. لذا، اندازه بلورکهای لایه های تلورید کادمیوم لایهنشانی شده در ولتاژ های مختلف به روش ويليامسون-هال تعيين شد. براساس اين روش، بین پهنای پیک و زاویه پراش رابطه خطی زیر وجود دارد [۱۴]: $FWHM\cos\theta = \varepsilon\sin\theta + K\lambda/D$ (٣) دراین ابطه FWHM پهنای پیک در نصف ارتفاع، heta زاویه براگ،

اراین (بیل ایسان بین کر نطب از مان (بیا ۱۹۹۳) بر این این (بیا ۱/۵۴) (برابر با ۱/۵۴) (برابر با ۱/۵۴) آنگستروم)، ٤ میکروکرنش و Λ اندازه بلورک می اشد. برای رسم منحنی ویلیامسون – هال سه پیک مربوط به پراش صفحات منحنی ویلیامسون – هال سه پیک مربوط به پراش صفحات کادمیوم از عرض از مبدأ خط عبور داده شده از نقاط داده محاسبه کردید. نتایج اندازه بلورک تلورید کادمیوم در ولتاژهای مختلف در شکل π (ب) آمده است. همان طور که مشاهده می شود، با انحراف آندی از ولتاژ استوکیومتری اندازه بلورک تلورید کادمیوم از فازایش یادازه این اندراف اندازه بلورک تلورید کادمیوم از فازایش اندراف اندراف آندی از ولتاژ استوکیومتری، اندازه بلورک تلورید کادمیوم اندراف اندراف آندی از ولتاژ استوکیومتری اندازه افزایش یادر در این امر را می توان افزایش نیرومحرکه لایه نشانی با افزایش بیش–پتانسیل با

¹ Scanning electron microscope (SEM)

² Energy dispersive spectroscopy (EDS)

³ JCPDS file number

⁴ Anodic bias

⁵ Cathodic bias

⁶ Equiaxially

⁷ Crystallite

¹ Overpotential

هسته گذاری راحت تر انجام شده وسبب افزایش غلظت حجمی هسته ها و در نتیجه افزایش تعداد بلورک ها و کاهش اندازه بلورک می شود.

بهمنظور تعيين نسبت اتمى عناصر كادميوم به تلوريوم (نسبت Cd/Te) در پوشش تلورید کادمیوم حاصل، از أنالیز عنصری EDSاستفاده شد. طیف حاصل از EDS لایههای تلورید کادمیوم الیهنشانی شده در ولتاژهای مختلف در شکل ۴ آمده است. دستگاه EDS پیکهایی ظاهر شده در این طیفها را مربوط به خطوط ویژه^۱ عناصر کربن، اکسیژن، سیلیکون، کادمیوم، قلع، تلوريوم، طلا و سوريوم ۲ تشخيص داده است. عنصر كربن همواره به صورت آلودگی در تمام نمونه های EDS ظاهر می شود. عنصر اکسیژن مربوط به لایه FTO و زیر لایه شیشه (SiO₂) است. عناصر سیلیکون و قلع به ترتیب مربوط به زیر لایه شیشه و لایه رسانای FTO است. عنصر طلا مربوط به پوشش نازک طلاست که در حین تست SEM و EDS برای رسانا کردن نمونه اعمال شده است. عنصر سوریوم که در گروه اکتانیدها قرار میگیرد بهراحتی در طبیعت مشاهده نمی شود و-طبق گفته کاربر SEM، دستگاه معمولاً آن را اشتباه تشخیص میدهد. ازآنجایی که فوتون های اشعه Ma عنصر Cm در انرژی متفاوت از انرژی فوتون های ۲eLa، CdLb، مرافتد؛ لذا TeLa و TeLa اتفاق می افتد؛ لذا درنظر گرفتن این عنصر در محاسبه غلظت عناصر توسط دستگاه EDSخطایی در محاسبه غلظت عناصر کادمیوم و تلوریوم ایجاد نمی کند. غلظت عناصر مذکور در نمونه های لایه نشانی شده در ولتاژهای مختلف در جدول ۱ آمده است .

براین اساس غلظت عناصر کادمیوم و تلوریوم در لایه تلورید کادمیوم لایه نشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰ میلیولت، به ترتیب ۳٪/۴۹ و ٪/۰۰۵، در لایه تلورید کادمیوم لایه نشانی شده در ولتاژ ۱۶۰۰ میلی ولت، به ترتیب ٪/۰۰۰ و ٪/۰۰۰ و در لایه تلورید کادمیوم لایه نشانی شده در ولتاژ ۲۶۲۰ میلی ولت، به ترتیب ۸۰/۰۰ و ٪/۴۹ است ۲. بر این اساس، نسبت غلظت اتمی عنصر کادمیوم به تلوریوم در نمونه های لایه نشانی شده در ولتاژهای محاسبه شد. این نتایج نشان می دهد که به سادگی با کمی انحراف محاسبه شد. این نتایج نشان می دهد که به سادگی با کمی انحراف می توان لایه تلورید کادمیوم غنی از کادمیوم و یا تلورید کادمیوم غنی از تلوریوم به دست آورد. در صورتی که این انحراف به سمت ولتاژهای مثبت تر باشد (انحراف آندی) لایه حاصل غنی از تلوریوم

2 Characteristic line (K α , K β , L α , L β) 3 Curium

می شود و برعکس اگر انحراف به سمت ولتاژهای منفی تر باشد (انحراف کاتدی) لایه حاصل غنی از کادمیوم خواهد بود .

علاوه بر پارامتر نسبت غلظت اتمی کادمیوم به تلوریوم، که متأثر از انحراف آندی یا کاتدی ولتاژ لایهنشانی از ولتاژ استوکیومتری است، انتظار میرود که سرعت لایهنشانی تلورید کادمیوم نیز متأثر از ولتاژ لایهنشانی باشد. همان طور که اشاره شد، لایهنشانی در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلیولت همگی در مدتزمان یکسان ۴ ساعت انجام شد. لذا از آنجایی که مدتزمان لایهنشانی ثابت است، ضخامت لایه تلورید کادمیوم حاصل معیاری از سرعت لايهنشانى است. ضخامت لايه تلوريد كادميوم (ضخامت اندازه گیری شده یا tm) از تصاویر SEM که از سطح مقطع نمونه گرفته شد، به دست آمد. شکل ۵ تصاویر SEM از سطح مقطع لایههای تلورید کادمیوم لایهنشانی شده در ولتاژهای مختلف ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت را نشان میدهد. برای هر نمونه پنج تصویر SEM از پنج مکان مختلف گرفته شد، که برای هر نمونه تنها یک تصویر در شکل ۵ آمده است. میانگین ضخامت لایه FTO برای هر سه نمونه لایهنشانی شده در ولتاژهای مختلف حدود ۴۵۰ نانومتر اندازه گیری شد. میانگین ضخامت لایه تلورید کادمیوم لایهنشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۵۹۴، ۷۱۷ و ۸۲۶ نانومتر تعیین شد. با توجه به مدت زمان الیهنشانی که ۴ ساعت بود و با تقسیم ضخامت الیه ایجاد شده بر مدت زمان لایهنشانی سرعت لایهنشانی برای لایههای تلورید کادمیوم لایهنشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۱۴۸، ۱۷۹ و ۲۰۷ نانومتر بر ساعت تعيين گرديد. افزايش سرعت لايهنشاني الكتروشيميايي کاتدی با افزایش ولتاژ کاتدی زیر لایه امری مرسوم در لایهنشانی الكتروشيميايي است.

علاوه بر ضخامت واقعی، ضخامت تئوری لایههای تلورید کادمیوم حاصل نیز محاسبه شد. ضخامت تئوری با استفاده از منحنی جریان-زمان حین لایهنشانی تعیین گردید. ضخامت تئوری پوشش لایهنشانی شده به روش الکتروشیمیایی از قانون فاراده و بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود [۱۵]:

 $tth = \frac{QM}{nFdA} \tag{(f)}$

Q در رابطه بالا th th ضخامت تئوری لایه تلورید کادمیوم حاصل، Q مقدار کل بار الکتریکی وارد شده به کاتد که برابر است با سطح زیر منحنی جریان–زمان، M جرم مولی تلورید کادمیوم که برابر است با است با ۲۴۰/۰۱ گرم بر مول، F ثابت فاراده که برابر است که در ۹۶۴۸۵ کولمب بر مول و A سطح لایهنشانی شده است که در

۳از آنجایی که دقت تعیین غلظت عناصر در تست EDS برای عناصر سنگین در حدود دهم درصد است لذا غلظت عناصر کادمیوم و تلوریوم در پوشش تلورید کادمیوم تا یک دهم درصد گرد شده است .

<u>M</u>

اینجا برابر با ۱ سانتی متر مربع است. d چگالی تلورید کادمیوم برابر با ۵/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب میباشد. n تعداد الکترون مصرف شده در کاتد به ازای احیای یک مولکول تلورید کادمیوم است، که بر اساس واکنشهای الکتروشیمیایی (۱) و (۲) که در مقدمه آمده است برابر با ۶ در نظر گرفته می شود. منحنی جریان - زمان در حین لایهنشانی الکتروشیمیایی تلورید کادمیوم در ولتاژهای مختلف در شکل ۶ آمده است . همان طور که در این شكل ديده مى شود، در لحظه ابتدايى لايه نشانى جريان لحظه اى زیادی عبور می کند و پس از مدت زمانی کاهش سریع پیدا کرده و جريان به يک مقدار مانا ا ميرسد. اين جريان زياد ابتدايي مربوط به شارژ لایه دوگانه ۲ در فصل مشترک کاتد/الکترولیت است. جریان حالت مانا در لایهنشانیهای انجام شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلیولت به ترتیب برابر با ۲۱۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ میکروآمپر اندازه گیری شد. در نتیجه، مقدار کل بار وارد شده به کاتد (Q) که برابر با سطح زیر منحنی است به ترتیب برابر با ۳/۰، ۳/۶ و ۵/۰ کولمب اندازه گیری شد. لذا، با استفاده از رابطه (۴) مقدار ضخامت تئوری لایه تلورید کادمیوم حاصل در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب، برابر با ۲۱۳۰، ۲۵۵۰ و ۳۵۷۰ نانومتر محاسبه شد. مقادیر ضخامت واقعی و تئوری نمونههای لایهنشانی شده در ولتاژهای مختلف در شکل ۷ (الف) آمده است. تفاوت میان ضخامت واقعی و ضخامت تئوری معیاری از بازده لایهنشانی است. این پارامتر نشاندهنده درصدی از توان مصرفى فرايند لايهنشانى است كه صرف ايجاد لايه مورد نظر می شود. بقیه جریان صرف فرایندهای زائدی مثل احیای یون ⁺H به گاز H₂ فرایندهای دیگری می شود. بازده لایه نشانی (η) از رابطه زیر به دست میآید .

 $\eta(\%) = \frac{t_m}{t_{th}} \times 100 \tag{(a)}$

در رابطه بالا t_m و t_m به ترتیب ضخامت اندازه گیری شده و ضخامت تئوری لایه تلورید کادمیوم است. مقادیر بازده لایهنشانی برای فرایند لایهنشانی تلورید کادمیوم در ولتاژهای مختلف محاسبه شد که مقادیر آن در شکل ۷ (ب) آمده است. همانطور که مشاهده می شود بازده لایهنشانی در ولتاژ ۱۶۲۰ میلی ولت کمتر است که دلیل آن افزایش نرخ احیای H^+ به H_2 با افزایش ولتاژ کاتدی به عنوان یک فرایند زائد می باشد.

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح تلورید کادمیوم لایهنشانی شده در در ولتاژ های مختلف را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود، لایه تلورید کادمیوم ساختار دندریتی با ابعاد میکرومتری دارد. براساس نتایج اندازه بلورک که بر اساس الگوی XRD بدست آمد و در پاراگراف های قبل آمده است، این دندریت ها چند بلور^۳ بوده و خود از بلورک های نانومتری تشکیل شده اند. همانطور که مشاهده می شود، با انحراف آندی از ولتاژ اندی همانطور که مشاهده می شود، با انحراف آندی از ولتاژ استویکیومتری، اندازه دندریت ها افزایش یافته و با انحراف کاتدی از ولتاژ استویکیومتری اندازه دندریت ها کاهش می یابد. علائم اختصاری که در متن مقاله آمده است و تعریف آنها در جدول

٤-نتيجه گيري:

۲ آمده است.

لايهنشاني الكتروشيميايي در ولتاژ استوكيومتري ۱۶۰۰ ميلي ولت و ولتاژ های آندی تر و کاتدی تر یعنی ولتاژ های به ترتیب ۱۵۸۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت انجام شد. نتایج XRD نشان داد که در هر سه ولتاژ لایه حاصل تک فاز بوده و فاز ثانویه ای مشاهده نشد. نسبت اتمى كادميوم به تلوريوم براساس نتايج آناليز عنصرى EDS برای سه ولتاژ ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۱/۰۷، ۱/۰۰ و ۱/۰۳ اندازه گیری شد که نشان دهنده تشكيل لايه تلوريد كادميوم به ترتيب غنى از تلوريوم، استوکیومتری و غنی از کادمیوم در این ولتاژ ها است. ضخامت واقعى لايه ها در سه ولتاژ لايهنشاني ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ ميلي ولت برابر با ۵۹۴، ۷۱۷ و ۸۲۶ نانومتر و ضخامت تئوری آن ها به ترتيب ۲۱۳۰، ۲۵۵۰ و ۳۵۷۰ تعيين شد. مشاهده شد که با انحراف کاتدی از پتانسیل استوکیومتری بازده لایهنشانی به دلیل رخ داد فرآیند های کاتدی زائد به مقدار ۲۳٪ کاهش می یابد. تصاویر SEM از سطح نمونه نشان داد که لایه حاصل متشکل از دندریت های میکرومتری هستند.

٥-قدردانى:

این اثر تحت حمایت بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح «۴۰۳۴۸۳۵» انجام شده است. همچنین از حمایت دانشگاه صنعتی شیراز برای انجام این پژوهش استفاده شد. از بنیاد ملی علم ایران و نیز از دانشگاه صنعتی شیراز به دلیل حمایت های ایشان تشکر و قدردانی می شود.

1 Steady state

2 Double layer charging

3 Polycrystal

References

1. Pastuszak, J. and P. Węgierek, *Photovoltaic cell* generations and current research directions for their development. Materials, 2022. **15**(16): p. 5542.

2. Scarpulla, M.A., et al., *CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023. **255**: p. 112289.

3. Kujovic, L., et al., Achieving 21.4% efficient CdSeTe/CdTe solar cells using highly resistive intrinsic ZnO buffer layers. Advanced Functional Materials, 2024. **34**(14): p.YTYYAYA.

4. Metzger, W.K., et al., As-doped CdSeTe solar cells achieving 22% efficiency with– 0.23%/° C temperature coefficient. IEEE Journal of Photovoltaics, 2022. **12**(6): p. 1435-1438.. Kumarasinghe, P., et al., Thermally evaporated CdTe thin films for solar cell applications: optimization of physical properties. Materials Research Bulletin, 2017. **96**: p. 188-195.

5. Doroody, C., et al., *Temperature difference in close-spaced sublimation (CSS) growth of CdTe thin film on ultra-thin glass substrate.* Results in Physics, 2020. **18**: p. 103213.

6. Kestner, J.M., et al., *An experimental and modeling analysis of vapor transport deposition of cadmium telluride.* Solar energy materials and solar cells, 2004. **83**(1): p. 55-65.

7. Ling, J., et al., *Electrodeposition of CdTe thin films for solar energy water splitting*. Materials, 2020. **13**(7): p. 1536.

8. Lepiller, C. and D. Lincot, New facets of CdTe electrodeposition in acidic solutions with higher

tellurium concentrations. Journal of the Electrochemical Society, 2 :(۵)،۵۱ .۰۰۴p. C348.

9. Sella, C., P. Boncorps, and J. Vedel, *The electrodeposition mechanism of CdTe from acidic aqueous solutions*. Journal of the Electrochemical Society, 1986. **133**(10): p. 2043.

10. Yimamu, A., et al., *The effect of electrolytic solution pH on the properties of electrodeposited CdTe thin films for solar energy application.* Optical Materials, 2024. **151**: p. 115340.

11. Panicker, M., M. Knaster, and F. Kroger, *Cathodic deposition of CdTe from aqueous electrolytes.* Journal of the Electrochemical Society, 1978. **125**(4): p. 566.

12. Echendu, O., et al., *Electrochemical Deposition* of CdTe Semiconductor Thin Films for Solar Cell Application Using Two-Electrode and Three-Electrode Configurations: A Comparative Study. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. **2016**(1): p. 3581725.

13. Mashreghi, A., K. Maleki, and M. Moradzadeh, *Two-phase synthesized Cu2ZnSnS4 nanoparticles as inorganic hole-transporting material of paintable carbon-based perovskite solar cells.* Solar Energy, 2020. **201** :p. 547-554.

14. Ojo, A. and I. Dharmadasa, *Analysis of electrodeposited CdTe thin films grown using cadmium chloride precursor for applications in solar cells.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017. **28**: p. 14110-14120.



شکل ۱- تصاویر نمونه های لایهنشانی شده در ولتاژ های الف) ۱۵۸۰، ب)۱۹۰۰ و ج) ۱۹۲۰ میلی ولت.





شکل ۳- الف) نسبت شدت اشعه پراشیده از صفحات اتمی (۱۱۱) به (۳۱۱) و ب) اندازه بلورک لایه CdTe لایهنشانی شده در ولتاژ های مختلف.





۱١.



شکل ۵- تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه های لایهنشانی شده در ولتاژ های الف) ۱۹۸۰، ب) ۱۹۰۰ و ج) ۱۹۲۰ میلی ولت.





شکل ۷- الف ضخامت تئوری و ضخامت واقعی، ب) بازده لایهنشانی نمونه های لایهنشانی شده در ولتاژ های مختلف.



شکل ۸- تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه های لایهنشانی شده در ولتاژ های الف) ۱۵۸۰، ب)۱٦۰۰ و ج) ۱٦۲۰ میلی ولت.

	غلظت اتمی عناصر برحسب (٪)		
alic	نمونه لایهنشانی شده در ولتاژ	نمونه لایهنشانی شده در ولتاژ	نمونه لایهنشانی شده در ولتاژ
عناصر	1580mv	1600mv	1620mv
С	25.34	26.34	23.11
0	24.70	26.08	27.44
Si	0.87	0.64	0.36
Cd	16.69	17.71	19.44
Sn	10.00	7.00	5.55
Те	17.15	17.68	18.79
Au	4.90	4.20	4.79
Cm	0.36	0.36	0.51

جدول ۱- غلظت اتمی عناصر حاصل از تست eds بر روی نمونههای لایهنشانی شده در ولتاژهای مختلف

	•
تعريف پارامتر	حروف اختصاري
پهنای پیک در نصف ارتفاع	FWHM
زاویه براگ	θ
ميكروكرنش	З
ثابت نزدیک به ۱	K
طول موج پرتو ايکس	λ
اندازه بلور ک	D
ضخامت تئوري لايه تلوريد كادميوم	t _{th}
ضخامت واقعى لايه تلوريد كادميوم	t _m
مقدار کل بار الکتریکی وارد شده به کاتد	Q
جرم مولی تلورید کادمیوم	М
تعداد الکترون مصرف شده در کاتد به ازای احیای یک مولکول تلورید کادمیوم	n
ثابت فاراده	F
چگالی تلورید کادمیوم	d
سطح لایەنشانی شدہ	A
بازده لایه نشانی	η

جدول ۲- تعریف حروف اختصاری که در متن مقاله آمده است