

Research Paper

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

**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. X-ray 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 current-time 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):1-16

Corresponding author: Ali Mashreghi

Address: Associate Professor, Materials Science and Engineering Department, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Email: mashreghi@sutech.ac.ir

DOI: [10.71905/jnm.2025.1201558](https://doi.org/10.71905/jnm.2025.1201558)

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 cost-effectiveness, 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 Cd-rich 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 fluorine-doped tin oxide (FTO) glass as the cathode and a graphite rod as the anode. The electrolyte consisted of cadmium sulfate ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, from Alfa-Aesar) and tellurium oxide (TeO_2 , 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 CdTe layer and **Energy-dispersive spectroscopy (EDS)** to determine elemental composition and Cd/Te molar ratio. **Current-time (I-t) measurements were done 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 measurement. According 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 of CdTe layers 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^۱، 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

چکیده

سلول‌های خورشیدی تلورید کادمیوم جایگاه ویژه‌ای در بازار سلول‌های خورشیدی دارند. یکی از روش‌های ساده و ارزان قیمت ساخت لایه تلورید کادمیوم، روش الکتروشیمیایی است. در این پژوهش، لایه تلورید کادمیوم به روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی کاتدی با استفاده از محلول‌الکترولیت آبی لایه‌نشانی شد. به منظور جبران یون‌های تلوریوم تهی شده از محلول الکترولیت اشباع از یون تلوریوم استفاده شد. لایه‌نشانی در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ 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 می‌شود. همچنین، با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس اندازه بلورک تلورید کادمیوم اندازه‌گیری شد که این مقدار برای هر سه ولتاژ لایه‌نشانی در محدوده نانومتری بود. نتایج آنالیز عنصری نشان داد که نسبت مولی کادمیوم به تلوریوم در لایه‌های اعمال شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۱/۰۰ و ۱/۰۳ است. ضخامت واقعی و تئوری لایه‌ها به ترتیب از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و منحنی جریان-زمان اندازه‌گیری شد. ضخامت واقعی لایه‌های اعمال شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۷۱۷، ۵۹۴ و ۸۲۶ نانومتر اندازه‌گیری شد و ضخامت تئوری به ترتیب برابر با ۲۱۳۰، ۲۵۵۰ و ۳۵۷۰ نانومتر محاسبه شد. با مقایسه این دو پارامتر بازده لایه‌نشانی برای لایه‌های اعمال شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی ولت به ترتیب برابر با ۲۸٪، ۲۸٪ و ۲۳٪ اندازه‌گیری شد. تصاویر میکروسکوپی سطح نمونه نشان داد که در تمام نمونه‌ها لایه تلورید کادمیوم متشکل از دندریت‌های میکرومتری است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

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



واژه‌های کلیدی:

لایه‌نشانی الکتروشیمیایی، تلورید کادمیوم، نسبت اتمی عناصر، سلول خورشیدی.

* نویسنده مسؤول: علی مشرقی

نشانی: دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز

تلفن: ۰۹۱۷۹۶۹۶۲۸۲

پست الکترونیکی: mashreghi@sutech.ac.ir

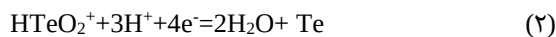
DOI: 10.71905/jnm.2025.1201558

۱- مقدمه

امروزه سلول‌های خورشیدی یکی از فناوری‌های پیش رو در تولید انرژی تجدید پذیر محسوب می‌شوند. 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 سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگینه^۲ می‌شود و نسل سوم سلول‌های خورشیدی پروسکایتی^۳ است. از لحاظ مقدار تولید، سلول‌های نسل اول جایگاه بالاتری نسبت به سلول‌های 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 سلول‌های خورشیدی تلورید کادمیوم آسان‌تر و کم هزینه‌تر شود جایگاه این نوع سلول‌ها در بازار ارتقاء می‌یابد. روش‌های متفاوتی برای تولید سلول‌های خورشیدی تلورید کادمیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد که از آن میان می‌توان به روش‌های لایه‌نشانی تبخیر حرارتی^۴ [۵]، لایه‌نشانی تصعید فضای بسته^۵ [۶]، لایه‌نشانی انتقال بخار^۶ [۷] و لایه‌نشانی الکتروشیمیایی^۷ [۸] اشاره نمود. روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی، در مقایسه با دیگر روش‌های لایه‌نشانی 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 تلوریم به ترتیب از انحلال سولفات کادمیوم (CdSO₄) و اکسید تلوریم

(TeO₂) در محلول آب/اسید سولفوریک با pH= 2-4 تامین می‌شود. کادمیوم به صورت یون Cd²⁺ و تلوریم به صورت یون HTeO₂⁺ در محلول حضور دارد. در این روش، زیرلایه (که معمولاً شیشه با پوشش اکسید شفاف رسانا^{۱۰} از نوع اکسید قلع آلانید با فلوتور^{۱۱} است) به عنوان کاتد در حمام لایه‌نشانی قرار داده می‌شود. در سطح کاتد یون‌های Cd²⁺ و HTeO₂⁺ طی فرآیندهای کاتدی زیر به اتم‌های کادمیوم و تلوریم احیا شده و لایه تلورید کادمیوم بر روی سطح کاتد لایه‌نشانی می‌شود:



از آنجایی که تلوریم نسبت به کادمیوم بسیار نجیب‌تر است، لذا انتظار می‌رود که در حین لایه‌نشانی الکتروشیمیایی تنها تلوریم احیا شود و یون کادمیوم به صورت محلول در الکترولیت باقی بماند و در نتیجه تنها لایه تلوریم تشکیل شود. اما از آنجایی که انرژی آزاد گیبس تشکیل تلورید کادمیوم از عناصر کادمیوم و تلوریم بسیار منفی است، لذا به جای تشکیل لایه تلوریم عنصری، لایه تلورید کادمیوم طی مکانیزم لایه‌نشانی الکتروشیمیایی تحت پتانسیلی^{۱۲} ایجاد می‌شود [۱۲]. بر اساس این مکانیزم، ابتدا یون‌های HTeO₂⁺ با گرفتن الکترون از کاتد احیا شده و اتم‌های تلوریم بر روی کاتد قرار می‌گیرد، پس از آن یون‌های Cd²⁺ با گرفتن الکترون از کاتد احیا شده و با اتم‌های تلوریم موجود روی کاتد ترکیب شده و تلورید کادمیوم شکل می‌گیرد. این تمایل به ترکیب شدن با اتم تلوریم سبب می‌شود که Cd²⁺ در پتانسیل‌های بالاتر امکان احیاء داشته باشد. برای جلوگیری از تشکیل فاز تلوریم عنصری در کنار تلورید کادمیوم، باید نسبت غلظت تلوریم به کادمیوم بسیار کم و در حدود ۱۰^{-۵} تا ۱۰^{-۳} باشد. به طور معمول حمام‌های اسیدی لایه‌نشانی تلورید کادمیوم حاوی یون‌های Cd²⁺ و HTeO₂⁺ با غلظت به ترتیب حدود ۱ مولار و ۱۰^{-۵} تا ۱۰^{-۳} مولار است. غلظت بسیار کم یون HTeO₂⁺ در الکترولیت سبب می‌شود که پس از مدتی لایه‌نشانی کردن تلورید کادمیوم، الکترولیت از یون HTeO₂⁺ تهی شده و نیاز به انحلال مجدد تلوریم در محلول باشد. تأمین مجدد یون تلوریم در الکترولیت لایه‌نشانی، معمولاً به دو شیوه انجام می‌شود. در روش معمول که زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، در بازه‌های زمانی مشخص محلول غلیظ از یون HTeO₂⁺ به الکترولیت اضافه

7 Electrochemical deposition

8 Acidic aqueous solution

9 Panicker et al.

10 Transparent conducting oxides(TCO)

11 Fluorine doped tin oxide (FTO)

12 Under potential deposition(UPD)

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

می‌شود. عیب این روش این است که دقیقاً مقدار تهی شده تلوریوم در الکترولیت معلوم نیست و لذا اضافه کردن تقریبی محلول غلیظ شده از HTeO_2^+ ، سبب تغییرات غلظت الکترولیت در حین لایه‌نشانی می‌شود. راه دیگر، اشباع کردن محلول الکترولیت از یون‌های HTeO_2^+ با اضافه کردن مقدار بیشتر TeO_2 بیش از حد حلالیت آن است. از آنجایی که میزان انحلال TeO_2 در محلول اسیدی بسیار کم است، لذا با ساخت محلول اشباع از TeO_2 می‌توان غلظت‌های مختلف TeO_2 با مقدار بسیار کم در محدوده 10^{-5} تا 10^{-3} مولار ایجاد کرد. از آنجایی که TeO_2 اضافی به صورت حل نشده و به صورت فاز جامد در محلول وجود دارد، با تهی شدن محلول الکترولیت از یون HTeO_2^+ ، مقداری TeO_2 حل شده و جبران یون تهی شده را می‌کند. حد حلالیت TeO_2 در محلول اسیدی تابع pH محلول است. یکی از اهداف این مقاله این است که نشان دهیم آیا با الکترولیت اشباع شده با اکسید تلوریوم می‌توان لایه تلورید کادمیوم استوکیومتری (یعنی 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 لایه‌نشانی الکتروشیمیایی ولتاژ لایه‌نشانی است. طبق مکانیزم لایه‌نشانی تحت پتانسیل، هر چقدر پتانسیل لایه‌نشانی آندی‌تر باشد، پوشش حاصل غنی از عنصر نجیب‌تر (در اینجا تلوریوم) شده و هر چقدر پتانسیل کاتدی‌تر باشد، پوشش حاصل غنی از عنصر فعال‌تر (در اینجا کادمیوم) می‌شود. در یک ولتاژ میانی ترکیب استوکیومتری حاصل می‌شود [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 تلوریوم به حمام لایه‌نشانی اضافه می‌شد. لذا، هدف دیگر مقاله حاضر این است که تأثیر انحراف جزئی ولتاژ لایه‌نشانی از مقدار ولتاژ استوکیومتری (یعنی ولتاژی که لایه تلورید کادمیوم با ترکیب استوکیومتری حاصل می‌شود) بر لایه تلورید کادمیوم حاصل بررسی گردد. تا آنجایی که نویسندگان مقاله حاضر اطلاع دارند، تأثیر انحراف ولتاژ لایه‌نشانی از ولتاژ استوکیومتری بر لایه تلورید کادمیوم حاصل از الکترولیت اشباع شده با تلوریوم، بررسی نشده است. اهمیت این موضوع آنجاست که ترکیب تلورید کادمیوم استوکیومتری از لحاظ الکتریکی نیمه‌هادی ذاتی محسوب شده و تلورید کادمیوم غنی از تلوریوم نیمه‌هادی نوع p و تلورید کادمیوم غنی از کادمیوم نیمه‌هادی نوع n محسوب می‌شود. لذا اگر بتوان با آندی‌تر یا کاتدی‌تر کردن

ولتاژ لایه‌نشانی به ترتیب تلورید کادمیوم غنی از تلوریوم و تلورید کادمیوم غنی از کادمیوم تولید کرد می‌توان به راحتی، با تغییر ولتاژ لایه‌نشانی نوع حامل‌های بار غالب^۱ تلورید کادمیوم را به صورت 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 می‌شود. 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

لایه‌نشانی الکتروشیمیایی تلورید کادمیوم 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 آند انتخاب شد. ولتاژ لایه‌نشانی با استفاده از منبع تغذیه آرما اعمال شد. لایه‌نشانی در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد تحت هم زدن شدید محلول با دور همزن ۱۴۰۰ دور در دقیقه انجام شد. محلول الکترولیت لایه‌نشانی از انحلال سولفات کادمیوم ($\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ مارک آلفایسر) و اکسید تلوریوم (TeO_2 مارک Kanto) در محلول آب/اسید سولفوریک ساخته شد. پی اچ الکترولیت لایه‌نشانی $0.1 \pm 3/14$ اندازه‌گیری شد. محلول الکترولیت اشباع از یون تلوریوم بود و غلظت سولفات کادمیوم در محلول الکترولیت لایه‌نشانی ۱ مولار انتخاب شد. لایه‌نشانی در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت هر کدام به مدت ۴ ساعت انجام شد. قبل از لایه‌نشانی زیر لایه‌های FTO به ترتیب در حلال‌های آب/مایع ظرفشویی، استون و آب مقطر و توسط حمام آلتراسونیک 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 اندازه‌گیری شد. برای این اندازه‌گیری

4 X-ray diffraction (XRD) pattern

1 Majority carrier

2 Schottky barrier solar cell

3 Heterojunction solar cell

پرتو $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ و گام‌های روبش 0.1° استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی از سطح و از مقطع لایه تلورید کادمیوم حاصل با 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

لایه تلورید کادمیوم به روش الکتروشیمیایی، در الکترولیت حاوی یون Cd^{2+} (غلظت ۱ مولار) و اشباع شده با یون H_2TeO_4^+ و با $\text{pH} = 3.14 \pm 0.01$ 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 مولی کادمیوم به تلوریوم در پوشش برابر با ۱) حاصل می‌شود. از آنجایی که انتظار می‌رود انحراف جزئی از این مقدار ولتاژ چه در جهت ولتاژهای کاتدی و چه در جهت ولتاژهای آنودی سبب تغییر ترکیب شیمیایی شود، لذا لایه‌نشانی علاوه بر ولتاژ ۱۶۰۰ میلی ولت در ولتاژهای ۱۵۸۰ میلی ولت (ولتاژ آنودی 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 می‌شود، پوشش‌های حاصل همگی صاف و یکنواخت می‌باشند. همچنین، به طور کیفی پوشش‌های 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 لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. از مقایسه الگوی حاصل با الگوهای مرجع با کدهای^۳ 00-041-1445 و 00-15-0770 (که به ترتیب مربوط به فازهای اکسید قلع و تلورید 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 2θ 23.76° ، 39.11° ، 46.29° ، 62.84° و 71.12° به ترتیب مربوط به صفحات اتمی (۱۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۳۳۱) و (۴۲۲) لایه تلورید کادمیوم و پیک‌های پراش ظاهر شده در زوایای 2θ 26.52° ، 33.69° ، 37.73° ، 51.53° ، 54.56° و 61.64°

65.51° ، 78.29° و 80.59° به ترتیب مربوط به صفحات (۱۱۰)، (۱۰۱)، (۲۰۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۰)، (۳۰۱)، (۳۲۱) و (۴۰۰) اکسید قلع می‌باشد. در الگوی پراش مربوط به لایه‌های تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف، تنها پیک‌های ترکیب تلورید کادمیوم و اکسید قلع مشاهده می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با انحراف جزئی از ولتاژ استوکیومتری ۱۶۰۰ میلی ولت در جهت آنودی و کاتدی فاز ثانویه در لایه تلورید کادمیوم حاصل ایجاد نمی‌شود. 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 $I_{(111)}/I_{(311)}$) معیاری از میزان رشد ترجیحی لایه تلورید کادمیوم در نظر گرفته شد. نسبت $I_{(111)}/I_{(311)}$ برای نمونه‌های لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف در شکل ۳ (الف) رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با انحراف آنودی^۴ از ولتاژ استوکیومتری، لایه‌نشانی به صورت ترجیحی‌تر در جهات [۱۱۱] اتفاق می‌افتد. اما با انحراف کاتدی^۵ از ولتاژ استوکیومتری لایه‌نشانی بیشتر به صورت چند محوره^۶ اتفاق می‌افتد. همچنین، پیک‌های پراش مربوط به فاز تلورید کادمیوم در هر سه ولتاژ لایه‌نشانی پهنای قابل ملاحظه‌ای دارند، که نشان دهنده سایز نانومتری بلورک‌های^۷ تلورید کادمیوم می‌باشد. لذا، اندازه بلورک‌های لایه‌های تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف به روش ویلیامسون-هال تعیین شد. براساس این روش، بین پهنای پیک و زاویه پراش رابطه خطی زیر وجود دارد [۱۴]:

$$FWHM \cos \theta = \varepsilon \sin \theta + K\lambda/D \quad (3)$$

در این رابطه FWHM پهنای پیک در نصف ارتفاع، θ زاویه براگ، K ثابت نزدیک به ۱، λ طول موج پرتو $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ (برابر با 1.54 آنگستروم)، ε میکرو کرنش و D اندازه بلورک می‌باشد. برای رسم منحنی ویلیامسون - هال سه پیک مربوط به پراش صفحات (۱۱۱)، (۲۲۰) و (۳۱۱) در نظر گرفته شد. اندازه بلورک تلورید کادمیوم از عرض از مبدأ خط عبور داده شده از نقاط داده محاسبه گردید. نتایج اندازه بلورک تلورید کادمیوم در ولتاژهای مختلف در شکل ۳ (ب) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با انحراف آنودی از ولتاژ استوکیومتری، اندازه بلورک تلورید کادمیوم افزایش یافته و با انحراف کاتدی از ولتاژ استوکیومتری اندازه

6 Equiaxially
7 Crystallite

1 Scanning electron microscope (SEM)
2 Energy dispersive spectroscopy (EDS)
3 JCPDS file number
4 Anodic bias
5 Cathodic bias

بلورک تلورید کادمیوم کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان افزایش نیرومحركه لایه‌نشانی با افزایش بیش-پتانسیل^۱ با کاتدی‌تر کردن ولتاژ دانست. با افزایش نیرو محركه لایه‌نشانی، هسته‌گذاری راحت‌تر انجام شده و سبب افزایش غلظت حجمی هسته‌ها و در نتیجه افزایش تعداد بلورک‌ها و کاهش اندازه بلورک می‌شود.

به‌منظور تعیین نسبت اتمی عناصر کادمیوم به تلوریوم (نسبت Cd/Te) در پوشش تلورید کادمیوم حاصل، از آنالیز عنصری EDS استفاده شد. طیف حاصل از EDS لایه‌های تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف در شکل ۴ آمده است. دستگاه EDS پیک‌هایی ظاهر شده در این طیف‌ها را مربوط به خطوط ویژه^۲ عناصر کربن، اکسیژن، سیلیکون، کادمیوم، قلع، تلوریوم، طلا و سوربوم^۳ تشخیص داده است. عنصر کربن همواره به‌صورت آلودگی در تمام نمونه‌های EDS ظاهر می‌شود. 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 سوربوم که در گروه آکتانیدها قرار می‌گیرد به‌راحتی در طبیعت مشاهده نمی‌شود و طبق گفته کاربر SEM، دستگاه معمولاً آن را اشتباه تشخیص می‌دهد. از آنجایی‌که فوتون‌های اشعه M_α عنصر Cm در انرژی متفاوت از انرژی فوتون‌های Cd_{Lα}، Cd_{Lβ} و Te_{Lβ} اتفاق می‌افتد؛ لذا در نظر گرفتن این عنصر در محاسبه غلظت عناصر توسط دستگاه EDS خطایی در محاسبه غلظت عناصر کادمیوم و تلوریوم ایجاد نمی‌کند. غلظت عناصر مذکور در نمونه‌های لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف در جدول ۱ آمده است.

براین‌اساس غلظت عناصر کادمیوم و تلوریوم در لایه تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰ میلی‌ولت، به ترتیب ۴۹/۳٪ و ۵۰/۷٪، در لایه تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژ ۱۶۰۰ میلی‌ولت، به ترتیب ۵۰/۰٪ و ۵۰/۰٪ و در لایه تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژ ۱۶۲۰ میلی‌ولت، به ترتیب ۵۰/۹٪ و ۴۹/۱٪ است^۴. بر این اساس، نسبت غلظت اتمی عنصر کادمیوم به تلوریوم در نمونه‌های لایه‌نشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت به ترتیب ۰/۹۷، ۱/۰۰ و ۱/۰۳ محاسبه شد. این نتایج نشان می‌دهد که به سادگی با کمی انحراف از ولتاژ لایه‌نشانی که در آن ترکیب استوکیومتری ایجاد می‌شود می‌توان لایه تلورید کادمیوم غنی از کادمیوم و یا تلورید کادمیوم

غنی از تلوریوم به دست آورد. در صورتی که این انحراف به سمت ولتاژهای مثبت‌تر باشد (انحراف آندی) لایه حاصل غنی از تلوریوم می‌شود و برعکس اگر انحراف به سمت ولتاژهای منفی‌تر 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. همان‌طور که اشاره شد، لایه‌نشانی در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت همگی در مدت‌زمان یکسان ۴ ساعت انجام شد. لذا از آنجایی‌که مدت‌زمان لایه‌نشانی ثابت است، ضخامت لایه تلورید کادمیوم حاصل معیاری از سرعت لایه‌نشانی است. ضخامت لایه تلورید کادمیوم (ضخامت اندازه‌گیری شده یا t_m) 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 میلی‌ولت 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 اندازه‌گیری شد. میانگین ضخامت لایه تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت به ترتیب برابر با ۵۹۴، ۷۱۷ و ۸۲۶ نانومتر تعیین شد. با توجه به مدت‌زمان لایه‌نشانی که ۴ ساعت بود و با تقسیم ضخامت لایه ایجاد شده بر مدت‌زمان لایه‌نشانی سرعت لایه‌نشانی برای لایه‌های تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت به ترتیب برابر با ۱۴۸، ۱۷۹ و ۲۰۷ نانومتر بر ساعت تعیین گردید. افزایش سرعت لایه‌نشانی الکتروشیمیایی کاتدی با افزایش ولتاژ کاتدی زیر لایه امری مرسوم در لایه‌نشانی الکتروشیمیایی 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 می‌شود [۱۵]:

$$t_{th} = \frac{QM}{nFdA} \quad (4)$$

در رابطه بالا t_{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

۴ از 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.

1 Overpotential
2 Characteristic line (K_α, K_β, L_α, L_β)
3 Curium

شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ SEM از سطح تلورید کادمیوم لایه‌نشانی شده در در ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، لایه تلورید کادمیوم ساختار دندردیتی با ابعاد میکرومتری دارد. براساس نتایج اندازه بلورک که بر اساس الگوی XRD بدست آمد و در پاراگراف‌های قبل آمده است، این دندردیت‌ها چند بلور^۳ بوده و خود از بلورک‌های نانومتری تشکیل شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، با انحراف آندی از ولتاژ استوکیومتری، اندازه دندردیت‌ها افزایش یافته و با انحراف کاتدی از ولتاژ استوکیومتری اندازه دندردیت‌ها کاهش می‌یابد. علائم اختصاری که در متن مقاله آمده است و تعریف آنها در جدول ۲ آمده است.

۴- نتیجه‌گیری:

لایه‌نشانی الکتروشیمیایی در ولتاژ استوکیومتری ۱۶۰۰ میلی‌ولت و ولتاژهای آندی تر و کاتدی تر یعنی ولتاژهای به ترتیب ۱۵۸۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت انجام شد. نتایج XRD نشان داد که در هر سه ولتاژ لایه حاصل تک فاز بوده و فاز ثانویه‌ای مشاهده نشد. نسبت اتمی کادمیوم به تلوریوم براساس نتایج آنالیز عنصری EDS برای سه ولتاژ ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۱/۰۰ و ۱/۰۳ اندازه‌گیری شد که نشان دهنده تشکیل لایه تلورید کادمیوم به ترتیب غنی از تلوریوم، استوکیومتری و غنی از کادمیوم در این ولتاژها است. ضخامت واقعی لایه‌ها در سه ولتاژ لایه‌نشانی ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت برابر با ۵۹۴، ۷۱۷ و ۸۲۶ نانومتر و ضخامت تئوری آنها به ترتیب ۲۱۳۰، ۲۵۵۰ و ۳۵۷۰ تعیین شد. مشاهده شد که با انحراف کاتدی از پتانسیل استوکیومتری بازده لایه‌نشانی به دلیل رخ داد فرآیندهای کاتدی زائد به مقدار ۲۳٪ کاهش می‌یابد. تصاویر SEM از سطح نمونه نشان داد که لایه حاصل متشکل از دندردیت‌های میکرومتری هستند.

۵- قدردانی:

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 حمایت‌های ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

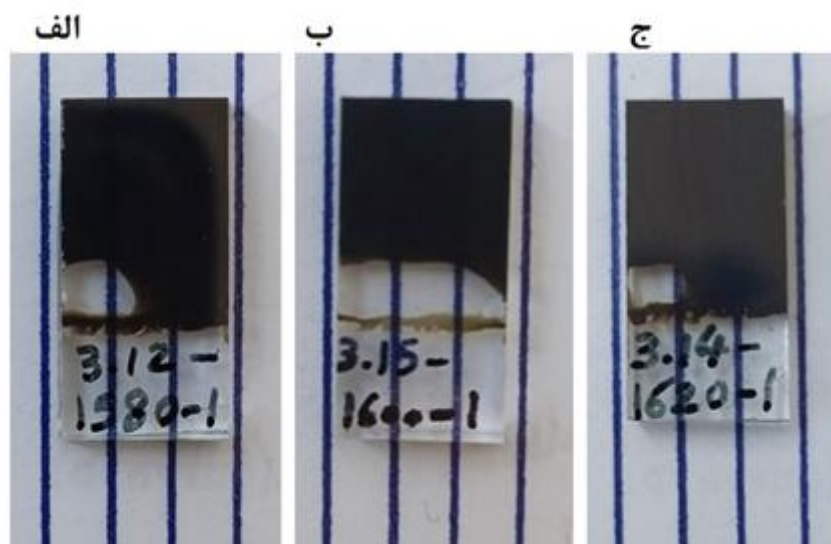
است با ۲۴۰/۰۱ گرم بر مول، F ثابت فاراده که برابر است با ۹۶۴۸۵ کولمب بر مول و A سطح لایه‌نشانی شده است که در اینجا برابر با ۱ سانتی متر مربع است. d چگالی تلورید کادمیوم برابر با ۵/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. n تعداد الکترون مصرف شده در کاتد به ازای احیای یک مولکول تلورید کادمیوم است، که بر اساس واکنش‌های الکتروشیمیایی (۱) و (۲) که در مقدمه آمده است برابر با ۶ در نظر گرفته می‌شود. منحنی جریان - زمان در حین لایه‌نشانی الکتروشیمیایی تلورید کادمیوم در ولتاژهای مختلف در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در لحظه ابتدایی لایه‌نشانی جریان لحظه‌ای زیادی عبور می‌کند و پس از مدت زمانی کاهش سریع پیدا کرده و جریان به یک مقدار مانا^۱ می‌رسد. این جریان زیاد ابتدایی 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 اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری شد. لذا، با استفاده از رابطه (۴) مقدار ضخامت تئوری لایه تلورید کادمیوم حاصل در ولتاژهای ۱۵۸۰، ۱۶۰۰ و ۱۶۲۰ میلی‌ولت 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 مصرفی فرایند لایه‌نشانی است که صرف ایجاد لایه مورد نظر می‌شود. بقیه جریان صرف فرایندهای زائدی مثل احیای یون H^+ به گاز H_2 فرایندهای دیگری می‌شود. بازده لایه‌نشانی (η) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\eta(\%) = \frac{t_m}{t_{th}} \times 100 \quad (5)$$

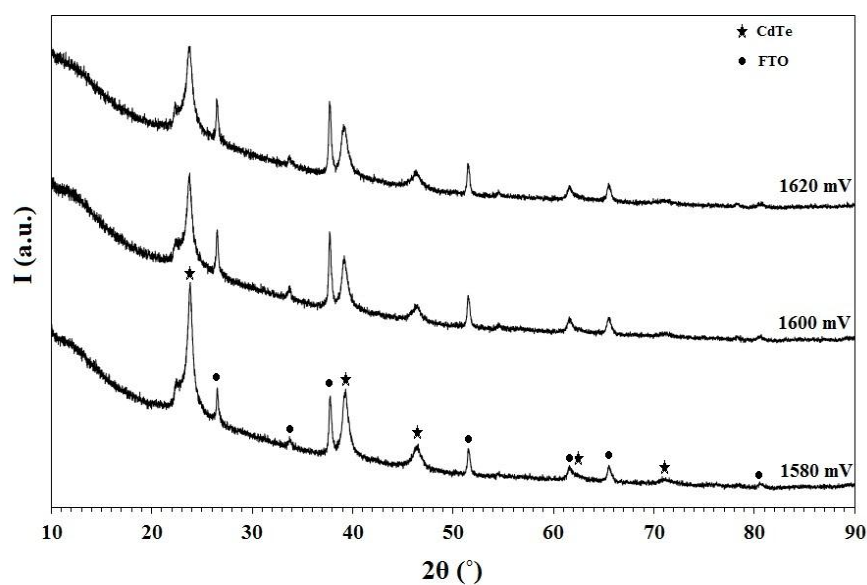
در رابطه بالا t_m و t_{th} به ترتیب ضخامت اندازه‌گیری شده و ضخامت تئوری لایه تلورید کادمیوم است. مقادیر بازده لایه‌نشانی برای فرایند لایه‌نشانی تلورید کادمیوم در ولتاژهای مختلف محاسبه شد که مقادیر آن در شکل ۷ (ب) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود بازده لایه‌نشانی در ولتاژ ۱۶۲۰ میلی‌ولت کمتر است که دلیل آن افزایش نرخ احیای H^+ به H_2 با افزایش ولتاژ کاتدی به عنوان یک فرایند زائد می‌باشد.

References

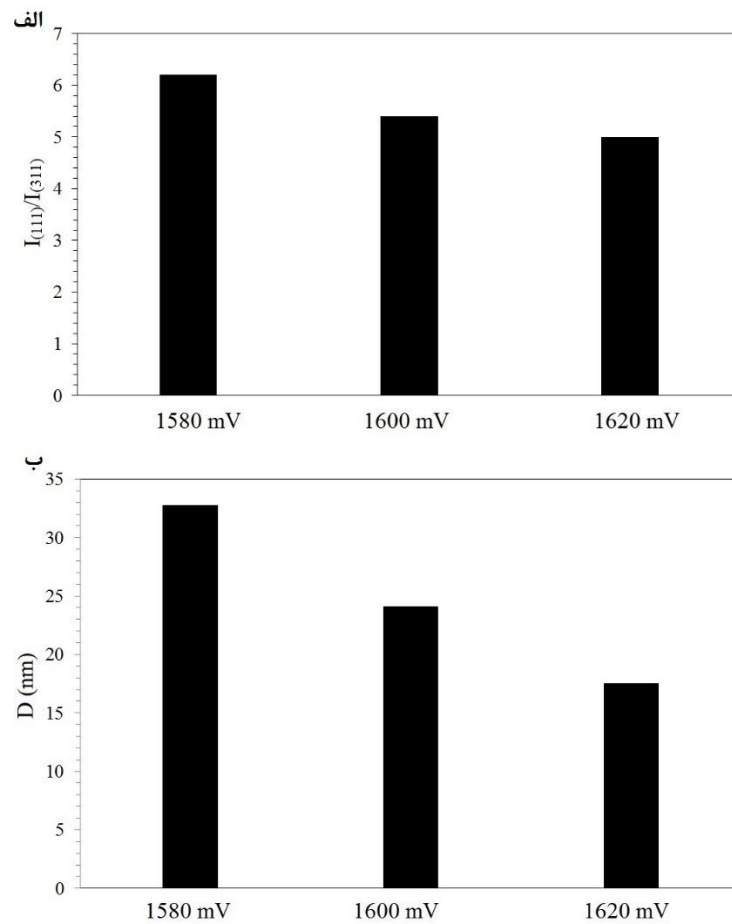
1. Pastuszak, J. and P. Węgierek, Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 2022. **15**(16): p. 5542.
2. Scarpulla, M.A., et al., CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials 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. ۲۳۱۲۰۲۸.
4. Metzger, W.K., et al., As-doped CdSeTe solar cells achieving 22% efficiency with $-0.23\%/^{\circ}\text{C}$ temperature coefficient. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2022. **12**(6): p. 1435-1438.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Ling, J., et al., Electrodeposition of CdTe thin films for solar energy water splitting. *Materials*, 2020. **13**(7): p. 1536.
9. Lepiller, C. and D. Lincot, New facets of CdTe electrodeposition in acidic solutions with higher tellurium concentrations. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004. **151**(5): p. C348.
10. 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.
11. 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.
12. Panicker, M., M. Knaster, and F. Kroger, Cathodic deposition of CdTe from aqueous electrolytes. *Journal of the Electrochemical Society*, 1978. **125**(4): p. 566.
13. 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.
14. Mashregi, 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.
15. 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.



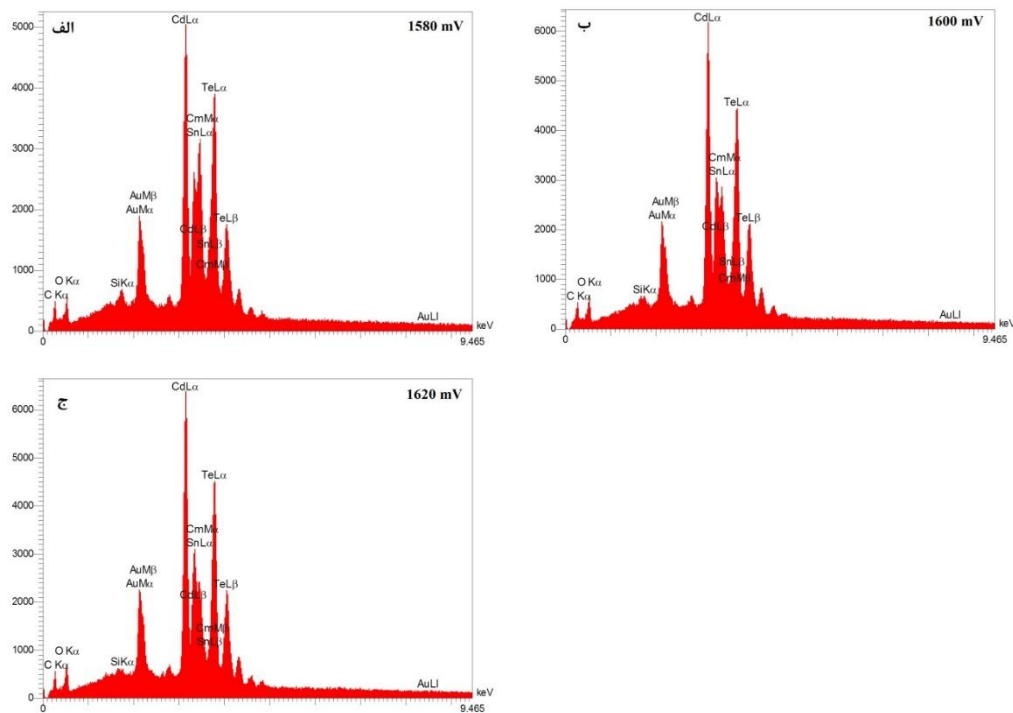
شکل ۱- تصاویر نمونه های لایه‌نشانی شده در ولتاژ های (الف) ۱۵۸۰، (ب) ۱۶۰۰ و (ج) ۱۶۲۰ میلی ولت.



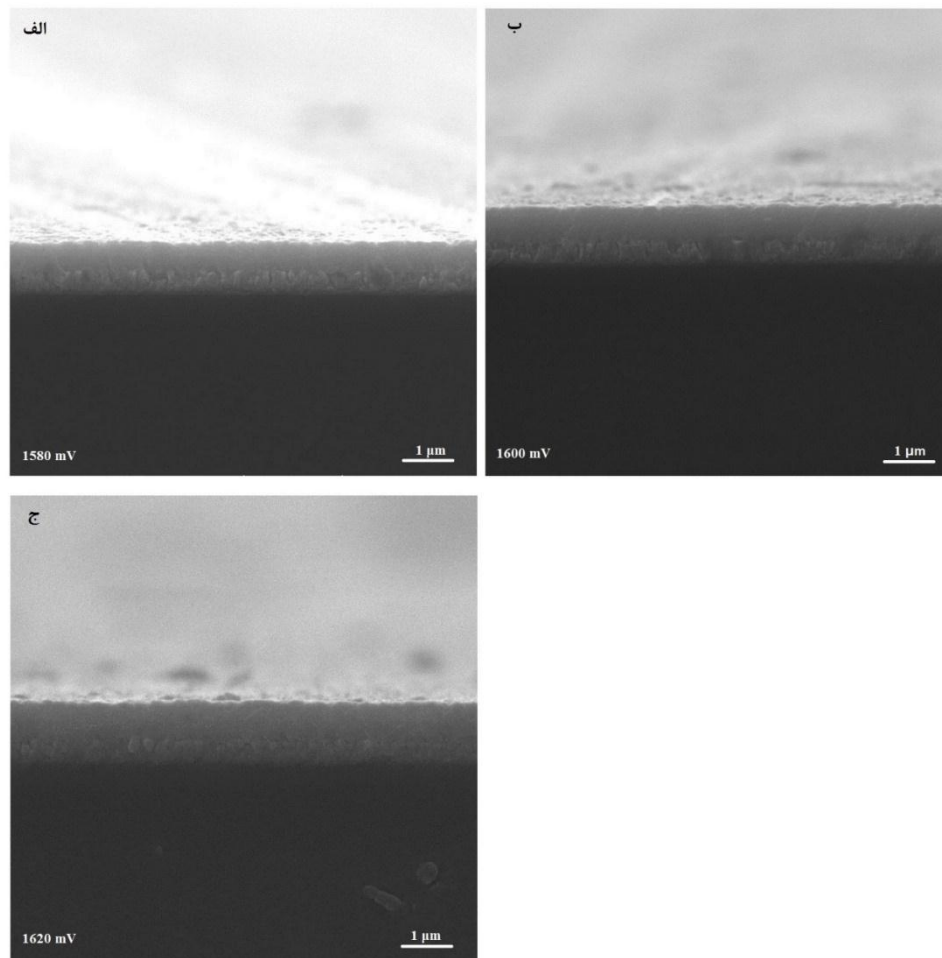
شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های لایه‌نشانی شده در ولتاژ های مختلف.



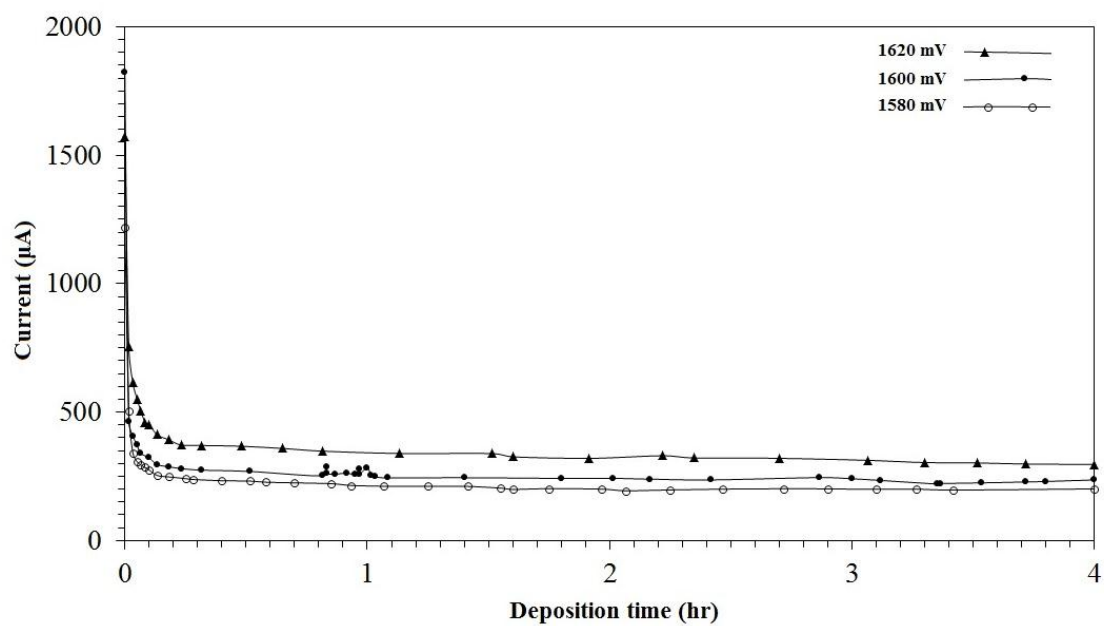
شکل ۳- الف) نسبت شدت اشعه پراشیده از صفحات اتمی (۱۱۱) به (۳۱۱) و ب) اندازه بلورک لایه CdTe لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف.



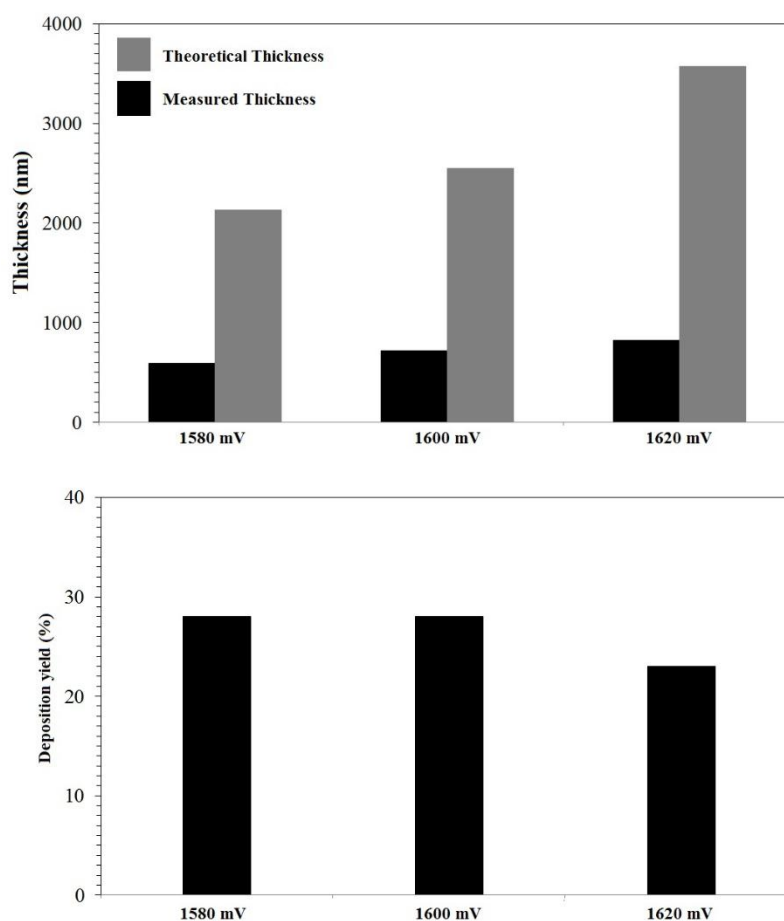
شکل ۴- طیف EDS نمونه‌های لایه‌نشانی شده در ولتاژهای الف) ۱۵۸۰، ب) ۱۶۰۰ و ج) ۱۶۲۰ میلی‌ولت.



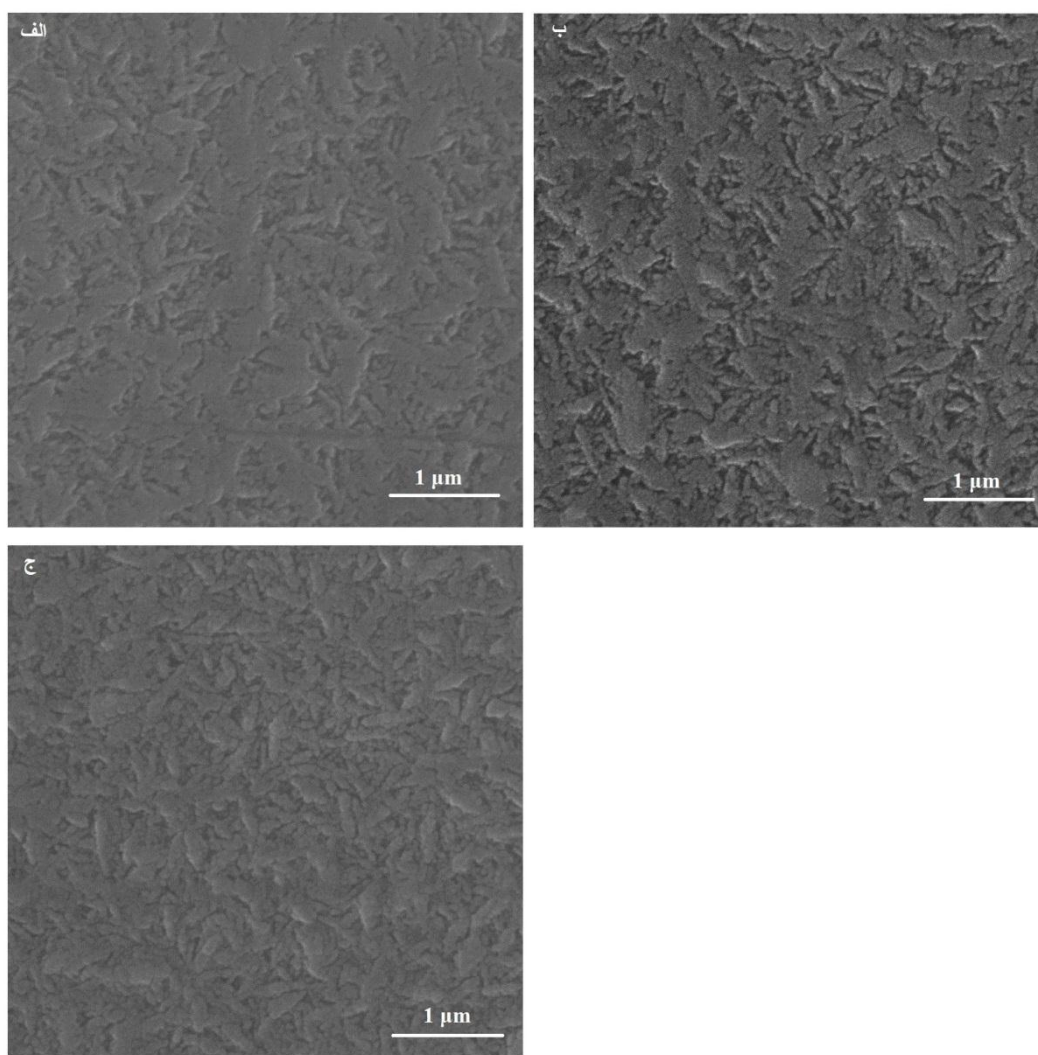
شکل ۵- تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه های لایه‌نشانی شده در ولتاژ های الف) ۱۵۸۰، ب) ۱۶۰۰ و ج) ۱۶۲۰ میلی ولت.



شکل ۶- منحنی جریان برحسب زمان نمونه های لایه‌نشانی شده در ولتاژ های مختلف.



شکل ۷- الف ضخامت تئوری و ضخامت واقعی، ب) بازده لایه‌نشانی نمونه‌های لایه‌نشانی شده در ولتاژهای مختلف.



شکل ۸- تصاویر SEM از سطح مقطع نمونه‌های لایه‌نشانی شده در ولتاژهای الف (۱۵۸۰، ب) ۱۶۰۰ و ج) ۱۶۲۰ میلی‌ولت.

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

عناصر	غلظت اتمی عناصر برحسب (%)		
	نمونه لایه‌نشانی شده در ولتاژ 1580mv	نمونه لایه‌نشانی شده در ولتاژ 1600mv	نمونه لایه‌نشانی شده در ولتاژ 1620mv
C	25.34	26.34	23.11
O	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
Te	17.15	17.68	18.79
Au	4.90	4.20	4.79
Cm	0.36	0.36	0.51

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

تعریف پارامتر	حروف اختصاری
پهنای پیک در نصف ارتفاع	FWHM
زاویه براگ	θ
میکرو کرنش	ε
ثابت نزدیک به ۱	K
طول موج پرتو ایکس	λ
اندازه بلورک	D
ضخامت تئوری لایه تلورید کادمیوم	t_{th}
ضخامت واقعی لایه تلورید کادمیوم	t_m
مقدار کل بار الکتریکی وارد شده به کاند	Q
جرم مولی تلورید کادمیوم	M
تعداد الکترون مصرف شده در کاند به ازای احیای یک مولکول تلورید کادمیوم	n
ثابت فاراده	F
چگالی تلورید کادمیوم	d
سطح لایه نشانی شده	A
بازده لایه نشانی	η