



لایه‌نشانی نانوذرات کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌های رسانای شفاف به روش تبخیر حرارتی

مریم قلی‌زاده آرشتی*، لیدا بابازاده حبشی، منیر کمالیان، و ابراهیم حسنی

گروه فیزیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیکی: m.gholizadeh@iausr.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۶/۱۳)

چکیده

نانوذرات کادمیوم تلوراید با روش تبخیر حرارتی در دمای زیرلایه 200°C و فشار 2×10^{-5} mbar بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای که با لایه‌های نازک شفاف و رسانای اکسید ایندیم آلییده به قلع (ITO) و اکسید قلع آلییده شده با فلورین (FTO) پوشش داده شده است، لایه‌نشانی شد. ضخامت لایه‌های تهیه شده حدود 200 nm تعیین شد. ساختار، خواص اپتیکی، الکتریکی و ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها به ترتیب توسط پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)، مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ (I-V) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تحلیل شدند. طیف‌های XRD ساختار مکعبی لایه نازک کادمیوم تلوراید لایه‌نشانی شده بر روی هر دو زیرلایه ITO و FTO را نشان می‌دهند. جهت‌گیری ترجیحی فیلم‌های لایه‌نشانی شده نیز از راستای (۱۱۱) برای زیرلایه ITO به (۲۲۰) برای زیرلایه FTO تغییر کرد. اندازه بلورینگی لایه‌ها روی ITO و FTO در این راستاها به ترتیب برابر با حدود $23/41$ و $34/84$ نانومتر به دست آمد. با استفاده از طیف سنجی UV-Vis در محدوده طول موج 200 nm – 1200 nm طیف‌های عبور از لایه‌های نازک مشخص شد. گاف انرژی اپتیکی لایه‌های نازک روی زیرلایه‌های ITO و FTO به ترتیب $1/63\text{ eV}$ و $1/60\text{ eV}$ محاسبه شد. منحنی I-V رسانایی الکتریکی بیشتر لایه نازک کادمیوم تلوراید بر روی FTO را در مقایسه با ITO نشان می‌دهد. تصاویر ریخت‌شناسی سطح، همگنی و یکنواختی سطح را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کادمیوم تلوراید، لایه‌نشانی تبخیر حرارتی، گاف انرژی، اندازه بلورینگی، ضریب خاموشی

۱. مقدمه

نازک بر خوردار است. علاوه بر خواص اپتیکی مطلوب کادمیوم تلوراید، ارزان بودن و تنوع در روش‌های ساخت آن، استفاده از پوشش‌های لایه نازک این ماده در ساخت وسایل الکترواپتیکی مانند اتصالات p-n در سلول‌های خورشیدی، آشکارسازها، نانو حسگرها، ترانزیستورها و فتوکاتالیست‌ها و دیودهای نوری و

نیم‌رسانای کادمیوم تلوراید از عناصر گروه II-IV به دلیل داشتن گاف انرژی آرمانی ($1/5\text{ eV}$) و ضریب جذب بالا ($>10^5\text{ cm}^{-1}$) از جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات سال‌های اخیر در ساخت لایه‌های

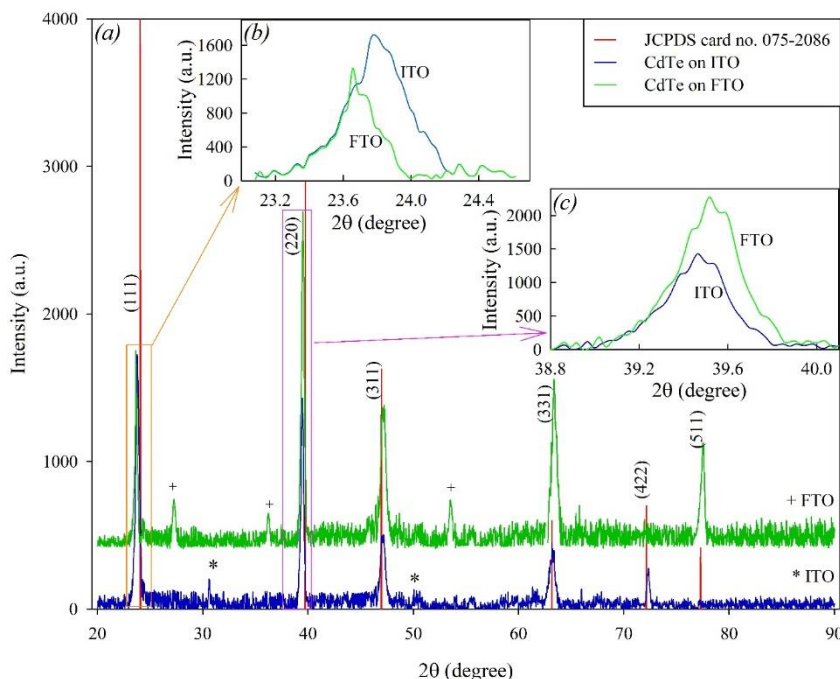
قرار می‌گیرد.

۲. روش تحقیق

در این کار از پودر CdTe با درصد خلوص ۹۹/۹۹ ساخت شرکت سیگما آلدریج استفاده شد. شیشه‌های شفاف و رسانای ITO و FTO به ترتیب با ضخامت ۱ mm و ۳ mm و مقاومت ۸ Ohm/sq و ۵ Ohm/sq به عنوان زیرلایه در این کار استفاده شدند. قبل از انجام لایه‌نشانی، مراحل آماده‌سازی شامل تمیز کردن زیرلایه‌ها با استون، محلول آب صابون و آب مقطر به مدت ۱۰ دقیقه و تنظیم ولتاژ دستگاه برای ایجاد خلأ در محفظه حدود ۴ ساعت به طول انجامید. در فرایند لایه‌نشانی با روش تبخیر حرارتی، نانوذرات کادمیوم تلوراید روی بوتۀ مسطح قایقی شکل از جنس مولیبدن قرار داده شدند و فرایند در فشار 2×10^{-5} mbar و دمای 200°C به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. برای انتقال کادمیوم تلوراید تبخیر شده به طرف زیرلایه‌ها جریان الکتریکی اعمال شده در حدود ۱۰۰ آمپر، آهنگ لایه-نشانی $1/8 \text{ \AA/s}$ و توان دوسر بوتۀ W ۱۰۰۰ اعمال شد. ضخامت لایه‌ها توسط نمایشگر کریستالی کوارتز که درست زیر نگهدارنده زیرلایه قرار دارد در طول فرایند لایه‌نشانی کنترل شد. همچنین پس از لایه‌نشانی، ضخامت لایه‌های تهیه شده به وسیله دستگاه تداخل‌سنج نوری تعیین شد.

ساختار لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید با استفاده از طیف‌های به دست آمده از پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD) (مدل X'Pert PRO MPD ساخت شرکت PANalytical هلند) با تابش مس در طول موج 1.5406 \AA و رنج 2θ ، 20° درجه تا 90° درجه با اندازه گام $0.026^\circ \text{ min}^{-1}$ بررسی شد. طیف‌های عبور نور از لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌ها با استفاده از طیف‌سنج فرابنفش- مرئی (UV-Vis) (مدل لامبدا ۲۵، ساخت شرکت پارکین المر محصول آمریکا) در محدوده طول موجی $200\text{--}1200 \text{ nm}$ در دمای اتاق تهیه شدند. خواص الکتریکی لایه‌ها با رسم منحنی جریان-ولتاژ که از مشخصه‌یاب الکتریکی I-V (الکترومتر مدل ۶۵۱۷b ساخت شرکت کیثلی آمریکا) به دست آمد، مطالعه شد. تصاویر ریخت‌شناسی سطح

غیره رونق چشمگیری یافته است [۸-۱]. تلاش برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی نیمه هادی از طریق لایه‌نشانی نانوذرات کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌های مناسب به روش‌های مختلف همچنان ادامه دارد. از جمله روش‌های لایه‌نشانی نانوذرات کادمیوم تلوراید می‌توان روش‌های سل-ژل، تبخیر حرارتی، کندوپاش [۹]، لیزری پالسی [۱۰]، رسوبدهی چرخشی [۱۱]، تبخیر باریکه الکترونی [۱۲] را نام برد. تبخیر حرارتی یکی از مؤثرترین روش‌های لایه‌نشانی برای رشد لایه‌های نازک با کیفیت بالا روی زیرلایه است. در این روش ذرات تبخیر شده با سرعت بالا و در مسیر مستقیم منتشر شده و به زیرلایه می‌رسد و بنابراین اتلاف ذرات و همچنین احتمال تشکیل اکسید ماده روی زیرلایه به حداقل می‌رسد [۱۳]. استفاده از زیرلایه‌های مناسب یکی از عوامل بهبود خواص فیزیکی و اپتیکی لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید است. دستگاه‌های فتوولتائیک سنتی روی زیرلایه شیشه ساخته شدند که به دلیل داشتن بازدهی پایین و محدودیت‌های زیاد در افزایش آن، در سال‌های اخیر جایگاه خود را به زیرلایه‌های رسانای شفاف از اکسید مواد (TCO) مانند FTO، ITO، اکسید روی آلاییده شده با آلومنیوم (AZO) و اکسید روی آلاییده شده با ایندیوم (IZO) دادند که شفافیت بیش از 80% دارند [۱۴]. در پیکربندی سلول‌های خورشیدی، زیرلایه‌های TCO معمولاً به عنوان اتصال جلویی با کادمیوم سولفید (CdS) مورد استفاده قرار می‌گیرند و خواص لایه نازک کادمیوم سولفید روی انواع لایه‌های TCO در کارهای قبلی مطالعه شد [۱۵]. تایواری و همکارانش در سال ۲۰۰۳ برای اولین بار از این زیرلایه‌ها در اتصال مستقیم با کادمیوم تلوراید استفاده کردند و بازده سلول خورشیدی را حدود $7/9\%$ به دست آوردند [۱۶]. در این کار، به منظور بررسی تأثیر خواص زیرلایه‌های TCO روی خواص فیزیکی و اپتیکی لایه نازک کادمیوم تلوراید، نانوذرات کادمیوم تلوراید با روش تبخیر حرارتی بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای رسانای ITO و FTO لایه‌نشانی شد. در این روش که در محیط خلأ انجام می‌شود به کمک اعمال جریان الکتریکی ماده تبخیر شده و به دلیل اختلاف فشار بین محل کادمیوم تلوراید و زیرلایه‌ها، بر روی زیرلایه‌ها که مقاومت حرارتی بالایی دارند



شکل ۱. (a) الگوی پراش XRD لایه‌های کادمیوم تلوراید لایه‌نشانی شده بر روی زیرلایه‌های ITO و FTO (برای وضوح طیف‌ها، ارتفاع طیف FTO به اندازه 42° واحد انتقال داده شد)، (b) الگوهای پراش برای جهت‌گیری (۱۱۱) و (c) الگوهای پراش برای جهت‌گیری (۲۲۰).

(۲۲۰) است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با تغییر زیرلایه‌ها، جهت‌گیری ترجیحی لایه‌های رشد یافته از (۱۱۱) به (۲۲۰) تغییر می‌کند که می‌تواند به علت یکی از این دلایل باشد: (۱) ساختار ستونی و رسانایی بیشتر FTO در مقایسه با ITO [۱۷]، (۲) طبیعت ساختاری زیرلایه‌ها (FTO ساختار چهار وجهی دارد در حالی که ساختار مکعبی ITO گزارش شده است) [۱۸]، تفاوت در میزان تحرک و غلظت حامل‌های بار [۱۹] و (۴) عدم تطابق شبکه لایه کادمیوم تلوراید با زیرلایه‌ها [۲۰]. ارتفاع قله اصلی لایه روی FTO بیشتر از ITO است که نشان‌دهنده بلورینگی بیشتر لایه‌های انباشت شده روی FTO است. الگوهای پراش لایه‌های انباشت شده روی زیرلایه ITO، وجود قله‌های دیگری را در موقعیت‌های زاویه‌ای در $39/46^\circ$ ، $47/19^\circ$ ، $63/17^\circ$ و $72/36^\circ$ نشان می‌دهد که به ترتیب مطابق با جهت‌گیری‌های (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۳۳۱) و (۴۲۲) هستند. به طور مشابه در الگوهای پراش لایه‌های کادمیوم تلوراید که روی زیرلایه FTO لایه‌نشانی شدند، قله‌هایی در موقعیت‌های زاویه‌ای $23/66^\circ$ ، $47/23^\circ$ و $63/37^\circ$ و $77/56^\circ$ دیده می‌شوند

لایه نازک نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) (مدل MIRA3، ساخت شرکت TE-SCAN، چک) به دست آمده است.

۳. یافته‌ها و بحث

۳.۱. مطالعه ساختاری

طیف‌های XRD لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید با استفاده از نرم‌افزار دقیق Pert High Score X' تحلیل شده و با تطابق نتایج به دست آمده با الگوی پراش مرجع ICCD فازهای ترکیب مشخص شدند. شکل ۱، الگوی پراش پرتو ایکس لایه نازک کادمیوم تلوراید روی هر دو زیرلایه را نشان می‌دهد. الگوهای پراش در هر دو طیف ساختار مکعبی لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید را نشان می‌دهند. قله اصلی پراش لایه‌های رشد یافته روی زیرلایه ITO در $2\theta = 23/78^\circ$ قرار دارد که مطابق با جهت‌گیری ترجیحی (۱۱۱) است، در حالی که موقعیت زاویه‌ای قله اصلی پراش لایه‌های رشد یافته روی زیرلایه FTO در $2\theta = 39/51^\circ$ قرار دارد که مطابق با جهت‌گیری ترجیحی

جدول ۱. نتایج حاصل از تحلیل الگوی XRD لایه نازک کادمیوم تلوراید.

ضریب بافت	پارامتر شبکه (Å)	چگالی ناهنجایی ($\times 10^{-4} \text{ m}^{-2}$)	میکروتنش ($\times 10^{-3}$)	اندازه بلورینگی (nm)	زاویه (2θ)	زیرلایه
۱/۷۳۱	۶/۴۶۸	۱۹/۳	۹/۷	۲۲/۷۳	۲۳/۷۸	ITO
۱/۲۱۴	۶/۴۶۱	۲۱/۳	۱۰/۴	۲۱/۶۴	۳۹/۴۶	
۰/۸۷۱	۶/۴۵۵	۲۸/۱	۱۳/۴	۱۸/۸۶	۴۷/۱۹	
۰/۸۱۱	۶/۴۳۹	۲۴/۷	۱۲/۳	۲۰/۱۱	۶۳/۱۷	
۰/۷۰۱	۶/۴۴۸	۲۵/۹	۱۲/۵	۱۹/۶۳	۷۲/۳۶	
۰/۹۰۳	۶/۴۷۱	۲۱/۷	۱۰/۷	۲۱/۴۸	۲۳/۶۶	FTO
۱/۹۳۶	۶/۴۶۵	۸/۲	۷/۹	۳۴/۸۴	۳۹/۵۱	
۱/۱۰۱	۶/۴۶۰	۱۷/۱	۹/۱	۲۴/۱۸	۴۷/۲۳	
۱/۳۷۷	۶/۴۵۸	۲۲/۸	۱۱/۶	۲۰/۹۳	۶۳/۳۷	
۰/۹۲۲	۶/۴۲۱	۲۲/۶	۱۱/۴	۲۱/۰۳	۷۷/۱۶	

است. θ زاویه براگ، $I(hkl)$ شدت اندازه‌گیری شده هر قله و $I_0(hkl)$ شدت مرجع همان قله در JCPDS و N تعداد قله‌های مشاهده شده است. نتایج حاصل از تحلیل XRD در جدول ۱، آورده شده است. پارامتر شبکه به دست آمده برای لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید روی هر دو زیر لایه کمتر از مقدار آن برای توده نانوذرات کادمیوم تلوراید ($6/481 \text{ \AA}$) است که بیانگر تنش کششی ایجاد شده در اثر عدم تطابق شبکه‌های نانو ذرات کادمیوم تلوراید و زیرلایه‌ها است. همان گونه که در جدول ۱، مشخص شده است اندازه بلورک‌هایی که روی FTO رشد کرده‌اند بیشتر از ITO است که نتیجه کاهش FWHM است و علت آن کاهش کمبود شبکه و میکروتنش است که نشان‌دهنده بلوری بودن خوب لایه نازک است [۱۵]. کیفیت جهت‌گیری در صفحات مختلف را می‌توان از ضریب بافت (معادله ۵) تعیین کرد. مقادیر ضریب بافت بالاتر از ۱ نشان‌دهنده تمایل لایه‌ها برای جهت‌گیری ترجیحی در آن صفحه است. همان گونه که مشاهده می‌شود بیشترین ضریب بافت برای لایه‌های رشد یافته روی زیرلایه‌های ITO و FTO به ترتیب در صفحات (۱۱۱) و (۲۲۰) است و بنابراین جهت‌گیری ترجیحی در الگوی XRD لایه‌ها را تأیید می‌کند.

که به ترتیب مطابق با جهت‌گیری‌های (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۳۳۱) و (۵۱۱) هستند. الگوهای XRD به دست آمده از لایه‌های انباشت شده روی هر دو زیرلایه، تشکیل نشدن لایه‌های اکسیدی را تأیید می‌کند. نتایج الگوی پراش به دست آمده با کارت مرجع JCPDS به شماره ۲۰۸۶-۷۵ مطابقت دارد.

با استفاده از ضرایب میلر (hkl)، پارامتر شبکه (a) ساختار کریستالی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (1)$$

پارامترهای ساختاری مانند ابعاد نانو بلورک‌ها D ، میکروتنش ε ، چگالی ناهنجایی δ و ضریب بافت T_C لایه به ترتیب از روابط دبای-شرر، هال، ویلیامسون-اسمالمن و هریس به دست آورده شدند [۲۲-۲۵].

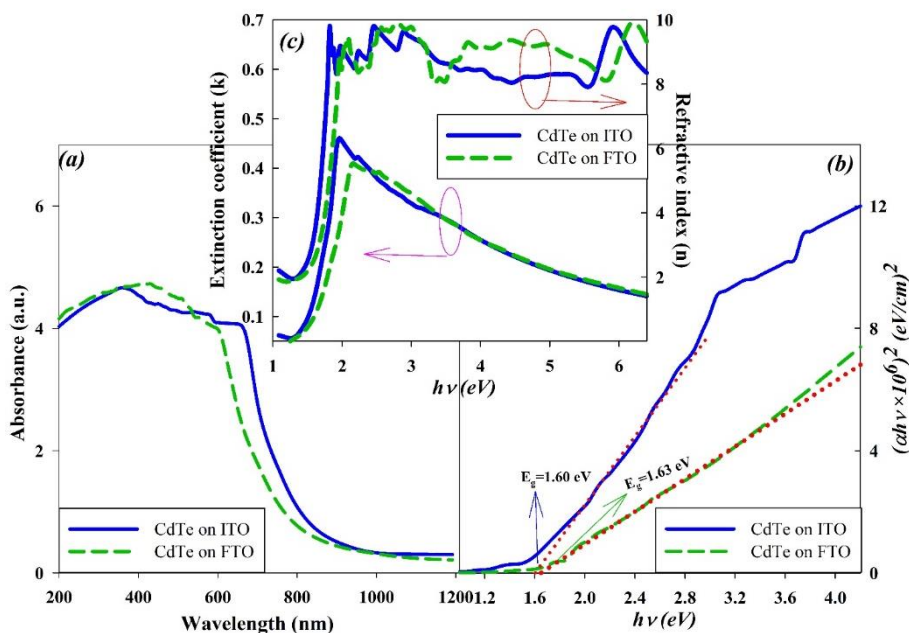
$$D = \left(\frac{0.94\lambda}{w \cos \theta} \right), \quad (2)$$

$$w \cos \theta = \varepsilon \sin \theta + \frac{\lambda}{D}, \quad (3)$$

$$\delta = \left(\frac{1}{D^2} \right), \quad (4)$$

$$T_C(hkl) = \frac{I(hkl)/I_0(hkl)}{\frac{1}{N} \sum_N I(hkl)/I_0(hkl)}, \quad (5)$$

که در آن w پهنای پرتو در نصف شدت بیشینه (FWHM) قله



شکل ۲. (a) طیف اپتیکی جذب از لایه نازک کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌های ITO و FTO. (b) نمودار تاک بر حسب انرژی فوتون فرودی و (c) نمودار تغییرات ضریب خاموشی و شکست سطح لایه‌ها بر حسب انرژی فوتون.

$$(\alpha h\nu)^n = C(h\nu - E_g), \quad (7)$$

که در آن E_g گاف انرژی اپتیکی لایه نازک است. C یک مقدار ثابت است که به تحرک بارها بستگی دارد و مقدار آن بین m^{-1} تا $10^7 - 10^8$ و n برای لایه‌هایی با گاف انرژی مستقیم برابر با ۲ است. مقدار گاف انرژی برای لایه‌های نازک رشد یافته روی زیرلایه‌های ITO و FTO به ترتیب برابر با ۱/۶۰ eV و ۱/۶۳ eV به دست آمد که با گزارش‌های قبلی مطابقت دارد [۲۹]. گاف انرژی لایه نازک کادمیوم تلوراید رشد یافته روی هر دو زیرلایه بیشتر از مقدار متداول آن (۱/۵ eV) است که نشان می‌دهد زیرلایه‌های رسانا در افزایش گاف انرژی مؤثرند. همچنین لایه‌های انباشته روی زیرلایه FTO بیشتر از ITO است که می‌توان آن را به بالاتر بودن میزان انتقال الکترون در زیرلایه FTO مرتبط کرد [۳۰]. ضریب خاموشی (k) و ضریب شکست (n) لایه‌ها از روابط زیر به دست آمده [۳۱] و در شکل ۲، c، بر حسب انرژی فوتون رسم شده‌اند.

$$k = \frac{\alpha \lambda}{2\pi}, \quad (8)$$

$$n = \left[\frac{(1+R) + \{(1+R)^2 - (1-R)^2(1+k^2)\}^{1/2}}{(1-R)} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

۲.۳. مطالعه خواص اپتیکی

طیف جذب نور از لایه‌های نازک رشد یافته کادمیوم تلوراید بر روی زیرلایه‌های ITO و FTO با استفاده از طیف‌سنج نوری فرابنفش-مرئی در بازه طول‌موج ۲۰۰-۱۲۰۰ nm در دمای اتاق تهیه شده و در شکل ۲، a، نشان داده شده است. مقدار جذب (A) از لگاریتم نسبت نور فرودی (I_0) به لایه نازک به نور عبوری (I) از آن لایه به دست می‌آید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار جذب در ناحیه مرئی زیاد است که نشان‌دهنده جذب بودن لایه نازک کادمیوم تلوراید است ولی در ناحیه فرو قرمز با افزایش طول‌موج مقدار جذب کاهش می‌یابد و شفاف بودن این ماده را در ناحیه فرو قرمز تأیید می‌کند [۲۶]. ضریب جذب (α) با استفاده از قانون بیر-لامبرت-بوگوه محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$\alpha = \frac{2.303A}{d}, \quad (6)$$

که در آن d ضخامت لایه‌ها است. گاف انرژی لایه نازک کادمیوم تلوراید از برونیایی خطی نمودار تاک ($Tauc$) که با استفاده از معادله زیر رسم شده است (شکل ۲، b) محاسبه شد [۲۸].

جدول ۲. برخی از پارامترهای اپتیکی و الکتریکی لایه نازک کادمیوم تلوراید در طول موج ۸۰۰ nm

زیرلایه	گاف انرژی (eV)	ضریب خاموشی	ضریب شکست	مقاومت ویژه ($\times 10^4 \Omega \text{ cm}$)
ITO	۱/۶۰	۰/۱۱۸	۲/۸۹۷	۳/۷۸۶
FTO	۱/۶۳	۰/۰۸۹	۲/۳۷۶	۱/۶۰۶

FTO است و نشان می‌دهد رسانایی الکتریکی این لایه در مقایسه با لایه انباشته شده روی ITO بیشتر است. چناندر و همکارانش رفتار مشابهی را برای لایه‌های رشد یافته کادمیوم سولفید (CdS) مشاهده کرده [۱۵] و دلیل آن را شکسته شدن پیوندهای کووالانسی در لایه‌های کادمیوم سولفید در اثر انرژی فوتون فرودی بیان کرده اند که منجر به تشکیل زوج الکترون-حفره آزاد برای رسانندگی الکتریکی می‌شود. مطالعات قبلی تأیید می‌کنند که خواص الکتریکی لایه‌های پلی کریستال متفاوت از لایه‌های تک کریستال است که می‌تواند به مسدود شدن مسیر جریان الکتریکی، در اثر ایجاد موانع پتانسیل حامل‌های بار در مرز دانه‌ها نسبت داده شود [۳۵].

۳.۴. ریخت‌شناسی سطح

شکل ۴ تصویری از ریخت‌شناسی سطح لایه نازک کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌های ITO و FTO به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) را نشان می‌دهد. برای آماده‌سازی لایه نازک برای انجام تصویر برداری، سطح لایه کاملاً تمیز شده و به دلیل آن که لایه‌ها رسانایی زیادی ندارند، برای استفاده در میکروسکوپ الکترونی روبشی با طلا پوشش داده شد. میکروگراف‌های با وضوح بالای SEM نشان می‌دهند که توزیع ذرات کادمیوم تلوراید لایه نشانی شده روی زیرلایه‌ها یکنواخت بوده و سطح لایه‌ها فاقد هرگونه نقصی از جمله ترک خوردگی، حفره و غیره است. همچنین این نانوذرات به شکل دایره‌هایی با قطرهای کمتر از ۵۰ نانومتر هستند بنابراین فاصله بین نانوذرات کم بوده و جذب نور در ناحیه فرابنفش و مرئی از لایه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در تصاویر نقاط سفیدی دیده می‌شود که بیانگر وجود دو نوع ذره با جهت‌گیری ترجیحی متفاوت (۱۱۱) و (۲۲۰) است [۳۶].

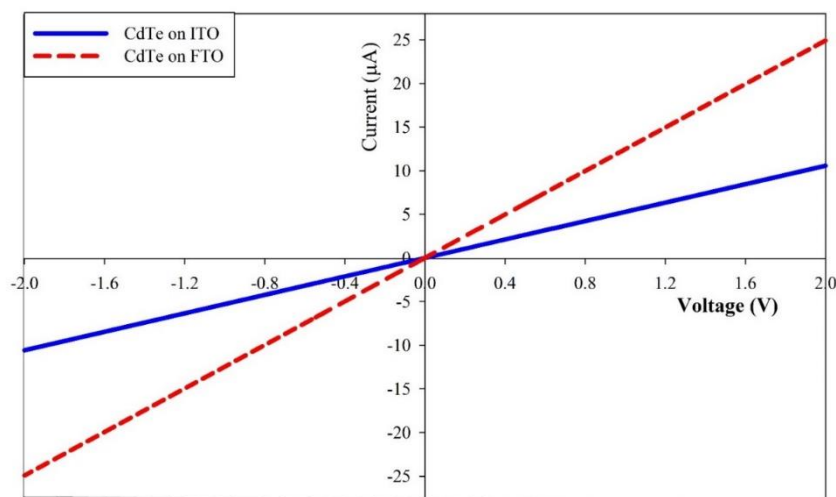
که در آن λ طول‌موج و R ضریب بازتاب از سطح لایه نازک است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۲]:

$$R = 1 - (T / \exp(-A))^{1/5}, \quad (10)$$

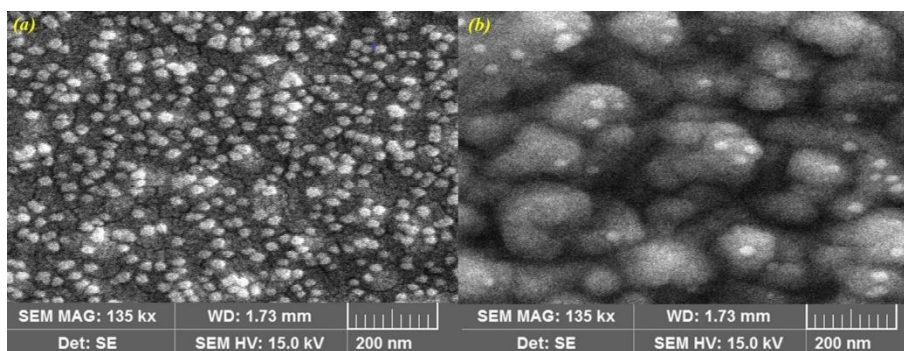
تعیین ضریب خاموشی لایه‌ها برای محاسبه غلظت نانوذرات مهم است. برخلاف برخی گزارش‌های قبلی بر عدم وابستگی ضریب خاموشی به اندازه ذرات، ویلیام و همکارانش وابستگی ضریب خاموشی را به اندازه ذرات نشان دادند [۳۳]. بنابراین افزایش ضریب خاموشی لایه‌ای رشد یافته بر هردو زیرلایه، با افزایش انرژی فوتون تا حدود گاف انرژی لایه افزایش و سپس کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از کوچک بودن اندازه ذرات انباشته شده روی زیرلایه‌ها باشد. ضریب شکست لایه‌ها نیز با افزایش انرژی فوتون افزایش می‌یابد که ممکن است به دلیل تطابق بسامد تابش الکترومغناطیسی و الکترون‌ها در ماده باشد [۳۴]. نتایج حاصل از بررسی خواص اپتیکی لایه نازک کادمیوم تلوراید در جدول ۲، فهرست شده است.

۳.۳. مطالعه خواص الکتریکی

مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید به روش چهار اتصالی اندازه‌گیری شد و فاصله بین چهار پروب از یکدیگر حدود ۲ mm است. مقاومت الکتریکی لایه‌های رشد یافته روی زیرلایه‌های ITO و FTO (پس از حذف مقادیر مربوط به خود زیرلایه) به ترتیب برابر با $3.786 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ و $1.606 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ به دست آمد که در جدول ۲، داده شده است. منحنی I-V رسم شده در شکل ۳، نشان می‌دهد که جریان الکتریکی در لایه‌های رشد یافته یک تابع خطی بر حسب ولتاژ است. جریان الکتریکی در لایه نازک انباشته شده روی زیرلایه FTO بیشتر از ITO است که ناشی از رشد بیشتر دانه‌ها و کاهش مرز دانه‌ها در لایه نازک انباشته شده روی



شکل ۳. منحنی جریان-ولتاژ لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌های ITO و FTO.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی برای لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید روی زیرلایه ITO (a) و FTO (b).

تبخیر حرارتی است. کاهش پارامتر شبکه لایه‌های رشد یافته در مقایسه با توده نانوذرات نشان‌دهنده عدم تطابق لایه کادمیوم تلوراید با زیرلایه‌هاست که منجر به ایجاد تنش کششی شده و همچنین یکی از عوامل تغییر جهت‌گیری ترجیحی لایه‌ها از (۱۱۱) به (۲۲۰) است. خواص اپتیکی لایه‌های تهیه شده نشان می‌دهد لایه رشد یافته روی زیرلایه FTO در مقایسه با ITO، میزان جذب بالاتری در ناحیه فرابنفش-مرئی دارد و همچنین افزایش میزان انتقال الکترون در زیرلایه FTO نسبت به ITO، گاف انرژی بالاتری را نتیجه می‌دهد و تطابق خوبی با مطالعات قبلی دارد. کوچک بودن ابعاد نانوبلورک‌ها رفتار دوگانه‌ای را برای ضریب خاموشی لایه‌ها نزدیک گاف انرژی نتیجه می‌دهد. منحنی جریان-ولتاژ رفتار اهمی خطی را برای هر دو زیرلایه نشان می‌دهد و کاهش مقاومت الکتریکی لایه‌های رشد یافته

و کاهش تعداد این نقاط سفید در شکل ۴. b، تغییر جهت‌گیری ترجیحی لایه نازک کادمیوم رشد یافته روی FTO را تأیید می‌کند

۴. نتیجه‌گیری

پارامترهای ساختاری لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید روی زیرلایه‌های ITO و FTO مانند ابعاد نانوبلورک‌ها (D)، میکروتنش (ε)، چگالی ناهنجاری (δ) و پارامتر شبکه (a) توسط الگوهای حاصل از پراش پرتو ایکس محاسبه شد. نتایج به دست آمده از رابطه شرر، اندازه بلورینگی برای تمام جهت-گیری‌های لایه‌های رشد یافته روی هر دو زیرلایه را در رنج ۱۸ تا ۳۵ نانومتر نشان می‌دهد که تأییدی بر ساخت لایه‌های نازک با اندازه بلورینگی کوچک با استفاده از لایه‌نشانی به روش

روی زیرلایه FTO در مقایسه با ITO منجر به تغییر خواص ساختاری مانند جهت‌گیری ترجیحی و خواص اپتیکی مانند افزایش گاف انرژی می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یکنواختی و همگنی لایه‌های رشد یافته را نشان می‌دهد. همچنین وجود دو نوع ذره با جهت‌گیری‌های (۱۱۱) و (۲۲۰) نتایج حاصل از XRD را تأیید می‌کند. نتایج به دست آمده در این کار استفاده از لایه‌های رسانای شفاف مخصوصاً FTO را به عنوان زیر لایه در تهیه لایه‌های نازک برای کاربردهای مختلفی از جمله ساخت دستگاه‌های الکترواپتیکی مانند سلول‌های خورشیدی پیشنهاد می‌دهد.

مراجع

1. L Ma, et al., *Applied Surface Science* **349** (2015) 740.
2. J-H. Yang, et al., *Semiconductor Science and Technology* **31** (2016) 083002.
3. M A Islam, et al., *IEEE Access* **8** (2020) 193560.
4. Y-T Zhang, J Song, and Q-F Sun, *Journal of Physics: Condensed Matter* **26** (2014) 085301.
5. L A Kosyachenko, et al., *Semiconductor Science and Technology* **27** (2011) 015007.
6. M Kokubun, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **623**, 1 (2010) 425.
7. L Ma, et al., *Journal of Alloys and Compounds* **828** (2020) 154406.
8. A Hochreiner, et al., *Applied Physics Letters* **98** (2011) 021106.
9. P Bartolo-Pérez, et al., *Surface and Coatings Technology* **155** (2002) 16.
10. J Ramiro, et al., *Thin Solid Films* **361** (2000) 65.
11. D Verma, A Ranga Rao, and V Dutta, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **93** (2009) 1482.
12. V V Brus, et al., *Solar Energy* **112** (2015) 78.
13. Z M Nassar, M H Yükselici, and A A Bozkurt, *physica status solidi (b)* **253** (2016) 1104.
14. Z Chen, et al., *Langmuir* **29** (2013) 13836.
15. S Chander and M S Dhaka, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **28** (2017) 6852.
16. A.N. Tiwari, et al., *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **12** (2004) 33.
17. M Kim, et al., *Current Applied Physics* **10** (2010) S455.
18. M A Aouaj, et al., *Materials Research Bulletin* **44** (2009) 1458.
19. J T Wang, et al., *Scientific Reports* **4** (2014) 3679.
20. S H Yoon and D-J Kim, *Journal of Crystal Growth* **303** (2007) 568.
21. K Ravichandran, et al., *Materials Research Innovations* **20** (2016) 187.
22. A L Patterson, *Physical Review* **56** (1939) 978.
23. G K Williamson and R E Smallman, *Philosophical Magazine* **1** (1956) 34.
24. G K Williamson and W H Hall, *Acta Metallurgica* **1** (1953) 22.
25. G B Harris, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **43** (1952) 113.
26. C M Randall and R D Rawcliffe, *Applied Optics* **7** (1968) 213.
27. H Abitan, H Bohr and P Buchhave, *Applied Optics* **47** (2008) 5354.
28. J Tauc, *Materials Research Bulletin* **3** (1968) 37.
29. E Hasani, et al., *Journal of Electronic Materials* **48** (2019) 4283.
30. A S Elmezayyen, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **48** (2015) 175502.
31. E. Hasani, et al., *Journal of Electronic Materials* **49** (2020) 4134.
32. S Sandeep and K Dhananjaya, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **73** (2015) 012149.
33. W W Yu, et al., *Chemistry of Materials* **15** (2003) 2854.
34. K Punitha, et al., *Journal of Applied Physics* **116** (2014) 213502.
35. S Chander and M S Dhaka, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **80** (2016) 62.
36. Z Chen, et al., *Optics Express* **26** (2018) 22123.