

## ساخت و مطالعه خواص ساختاری و اپتیکی ساختار دولایه‌ای تلورید

### کادمیوم/سولفید کادمیوم بر روی زیرلایه ITO

رضا زارعی مقدم، حمید رضاقلی پور دیزجی\*، محمدحسین احسانی، محمدحسین میرحاج

آزمایشگاه لایه‌نشانی، گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۶ ویرایش نهائی: ۱۳۹۵/۱۲/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

#### چکیده

در این پژوهش به ساخت و مطالعه خواص ساختاری و اپتیکی، نحوه رشد لایه‌ها و بازده کوانتومی ساختار دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم بر روی زیرلایه ITO جهت ساخت سلول‌های خورشیدی پایه تلورید کادمیوم پرداخته شده است. دولایه‌ای اشاره شده به کمک روش لایه‌نشانی فیزیکی در فاز بخار (PVD) ساخته شد. به منظور یافتن ساختار بلوری مربوط به هرکدام از لایه‌ها و یا مشاهده فاز جدید تشکیل شده در قسمت سطح مشترک آنها، از آزمون پراش اشعه X استفاده گردید. به کمک این آزمون فاز سه تایی  $CdTe_{1-x}S_x$  در  $\theta = 89.95^\circ$  مشاهده گردید که به نفوذ کردن دو لایه در همدیگر ارتباط داده شده است. مطالعات اپتیکی، تغییر میزان عبوردهی نور را در مقایسه با نمونه تلورید کادمیوم خالص نشان می‌دهد. یکنواختی سطح نمونه‌ها، اندازه ضخامت آنها و بررسی ریخت ستون‌های رشد یافته به کمک آزمون FESEM بررسی گردید. تصاویر FESEM نشان داد که رشد لایه‌ها یکنواخت و به صورت ستونی هستند. بازدهی کوانتومی نشان داد که طی پدیده فوتولتائیک، همه فوتون‌ها با طول موج ۸۰۰ نانومتر می‌توانند هر کدام یک الکترون تولید نمایند. بررسی نمودار I-V ساختار دو لایه‌ای ساخته شده بازدهی سلول ۱/۴ درصد و ضریب پری ۰/۶۵ را نشان می‌دهد.

**کلیدواژگان:** سلول‌های خورشیدی پایه تلورید کادمیوم، زیرلایه ITO، لایه‌نشانی فیزیکی بخار.

#### مقدمه

ساخت سلول‌های خورشیدی پایه تلورید کادمیوم CdTe با بازده ۶ درصد که اولین بار در سال ۱۹۷۲ توسط بونت و روبنهورست صورت پذیرفت و بعدها، بازده ۱۶/۵ درصد توسط محققان مرکز انرژی‌های تجدید شدمی ملی آمریکا در سال ۲۰۰۲ به دست آمده است [۱]. در این چهار دهه، دانش فیزیک سلول‌ها و اصول عملکردشان به همراه ایجاد تخصص‌هایی در روش‌های لایه‌نشانی و فناوری ساخت آنها به طور پیوسته رشد یافته است. اکنون دو سازنده بزرگ، سلول‌های خورشیدی تلورید کادمیوم را بر پایه مدل فوتولتائیک و به صورت تجاری تولید می‌کنند: شرکت

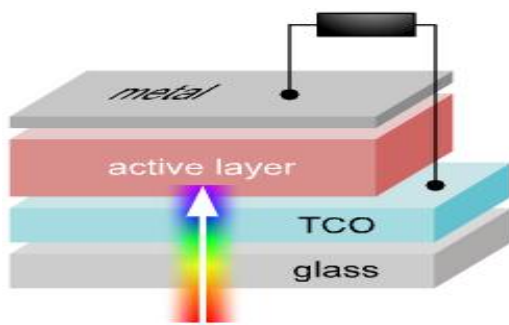
Antec Solar در آلمان و Solar First در ایالات

متحده آمریکا در سال ۲۰۱۱ شرکت First Solar اعلام کرد که سلول خورشیدی با بازده ۱۷/۳ تولید کرده است [۲]. این نتیجه رکورد بازده ۱۶/۵ درصد را شکست [۳]. با تلاش‌های مداوم، محققان مرکز تحقیق و توسعه مرکز انرژی‌های تجدید شدمی ملی آمریکا توانستند سلول خورشیدی تلورید کادمیوم با بازده ۱۹/۶ درصد در سال ۲۰۱۳ تولید کنند [۴] و در آگوست سال ۲۰۱۴ شرکت First Solar توانست یک سلول خورشیدی تلورید کادمیوم با بازده ۲۱ درصد تولید کند [۵].

تلورید کادمیوم ماده‌ای است که به طور ویژه برای لایه‌های نازک فوتولتائیک بسیار مناسب می‌باشد [۶].

\*نویسنده مسئول: hrgholipour@semnan.ac.ir

هدف نهایی آزمایش‌های لایه‌نشانی، رسیدن به ساختار دو لایه‌ای تلورید کادمیوم/ سولفید کادمیوم/ ITO بوده که ITO، زیرلایه مورد استفاده می‌باشد. با همراه شدن یک لایه به‌عنوان اتصال نهایی (اتصال فلزی)، ساختار به‌دست آمده، نوع ساده‌ای از یک سلول خورشیدی می‌باشد. شکل ۱، ساختار چند لایه‌ای مورد استفاده در یک سلول خورشیدی به‌طور کلی را نشان می‌دهد. در این شکل، مقصود از active layer، همان پیوندگاه p-n بوده که بخش اصلی سلول به‌حساب می‌آید. در مورد سلول خورشیدی تلورید کادمیوم، دو لایه‌ای CdTe/CdS همان active layer یا لایه فعال می‌باشد.



شکل ۱. ساختار چند لایه‌ای به‌صورت طرح وارده در یک سلول خورشیدی.

### کارهای آزمایشگاهی

دستگاهی که از آن جهت تهیه لایه‌های نازک استفاده گردید، HINDHIVAC مدل 15F6 ساخت هندوستان می‌باشد. مشخصات این دستگاه عبارت است از: ۱- پمپ مؤثر ۷ liter/sec، ۲- فشار نهایی در حدود  $5 \times 10^{-6}$  mbar، ۳- جریان تبخیر تا ۲۰۰ آمپر، ۴- مشخصات برقی تک فاز، ۵۰ هرتز و ۲۳۰ ولت. به‌منظور رسیدن به شرایط بهینه لایه‌نشانی به هدف ساختن یک ساختار دو لایه‌ای، ابتدا تک لایه‌های تلورید کادمیوم و سولفید کادمیوم آلائیده با ایندیم ساخته شد

این ماده دارای نوار ممنوعه‌ای (گاف انرژی) برابر با ۱/۴۵ الکترون ولت بوده که در بازه بهینه ۱/۲ تا ۱/۵ به‌منظور تبدیل بیشینه انرژی فوتولتائیک قرار دارد [۷]. تلورید کادمیوم تنها ترکیب متعادل تلوریوم و کادمیوم (Cd-Te) در نمودار فاز مربوط به آنها بوده که این عامل باعث آن می‌شود که این ماده به‌صورت ترکیبی استیوکیومتریک به‌کمک روش‌های متفاوت لایه‌نشانی ساخته شوند. انرژی‌های پیوندی زیاد مربوط به پیوندهای کادمیوم-تلوریوم، کادمیوم-سولفور، حلالیت بی‌نهایت کوچک ترکیبات تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم در آب و فشار بخار پایین این ترکیبات از نقطه نظر محیطی مزیت‌های بسیار بزرگی به‌شمار می‌روند. تلورید کادمیوم با روش‌های مختلفی مانند روش کندوپاش<sup>۱</sup> [۸]، لایه‌نشانی تبخیر خلا<sup>۲</sup> [۹-۱۱]، تصعید فضای محصور<sup>۳</sup> [۱۲-۱۴] و لایه‌نشانی انتقال بخار<sup>۴</sup> [۱۵] ساخته می‌شوند.

در سلول‌های خورشیدی بر پایه تلورید کادمیوم، سولفید کادمیوم لایه بسیار مناسب بوده که به‌دلیل شفافیت (برای طول موج‌های بزرگتر از ۵۲۰ نانومتر) به‌عنوان لایه پنجره یا روزنه در نظر گرفته می‌شود. در تمام سلول‌های خورشیدی حاضر، لایه پنجره، اکسید رسانای شفاف<sup>۵</sup> مانند SnO<sub>x</sub> بوده و لایه سولفید کادمیوم بسیار نازک‌تر از آن ساخته می‌شود. به‌این دلیل لایه CdS لایه بافر و یا واسط نیز نامیده می‌شود. در این پژوهش ایندیوم تین اکساید (ITO) به‌عنوان زیرلایه انتخاب شد. یکی از دلایل انتخاب این لایه، برتری جهت گیری بلوری با ساختار هگزاگونال نسبت به مکعبی است؛ زیرا که ساختار هگزاگونال به‌منظور به‌کارگیری در بخش پنجره سلول‌های خورشیدی مناسب‌تر است [۱۶-۱۷].

<sup>4</sup> Vapor transport deposition

<sup>5</sup>TCO

<sup>1</sup> Magnetron sputtering deposition

<sup>2</sup> Vacuum evaporation deposition

<sup>3</sup> Close-spaced sublimation

تلورید کادمیوم نیز با شرایط لایه‌نشانی جدول ۱ بر روی لایه سولفید کادمیوم با ضخامت ۲۰۰۰ نانومتر لایه‌نشانی شد. سپس ساختار دو لایه‌ای در دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت بازپخت با شرایط خلأ  $10^{-4}$  میلی بار قرار گرفت.

دستگاه UV-Visible مدل Shimadzu، برای گرفتن طیف‌های نوری و آنالیزهای اپتیکی استفاده شد. پراش اشعه ایکس توسط دستگاه XRD مدل ADVANCE-D8 (از نمونه‌ها توسط دستگاه FESEM مدل HITACHI S-4160 اندازه‌گیری شد.

### نتایج و بحث

#### آزمون پراش اشعه X

به‌منظور یافتن ساختارهای بلوری مربوط به هرکدام از لایه‌ها و یا در صورت احتمال، کشف فاز جدید تشکیل شده در قسمت سطح مشترک از آنالیز پراش اشعه X استفاده شد.

لازم به‌ذکر است به‌دلیل بالا بودن ضخامت تلورید کادمیوم (۲۰۰۰ نانومتر)، دیده شدن صفحات رشد یافته بلوری سولفید کادمیوم یا لایه ITO مشکل می‌باشد، اما فاز جدید تشکیل شده در سطح مشترک (در صورت وجود) را به‌وسیله همین آنالیز می‌توان جستجو کرد. شکل ۲ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به ساختار دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ وجود لایه‌های سولفید کادمیوم و تلورید کادمیوم و اثر زیرلایه به‌وضوح مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که به‌دلیل زیاد بودن ضخامت لایه تلورید کادمیوم قله غالبی مربوط به دسته صفحات (۱۱۱) در  $2\theta = 24.3^\circ$  ظاهر می‌شود.

همچنین بررسی نتایج طیف XRD حضور اکسید تلوریم را در نمونه‌ها نشان می‌دهد. این موضوع

و خواص اپتیکی و ساختاری آنها مورد بررسی قرار گرفت. شرایط لایه‌نشانی بهینه طبق جدول ۱ به‌دست آمد و در ساخت دولایه‌ای تلورید کادمیوم و سولفید کادمیوم آلاینده با ایندیم مورد استفاده قرار گرفت. جزئیات آرایش ایندیوم در سولفید کادمیم در مقاله میرحاج و همکاران اشاره شده است [۱۷].

جدول ۱. پارامترهای لایه‌نشانی لایه‌ها.

دمای زیرلایه (°C)	نرخ لایه‌نشانی (Å/s)	فشار شروع لایه‌نشانی (mbar)	فاصله چشمه تا زیرلایه (cm)	ماده
۲۱۰	۵	$2 \times 10^{-5}$	۱۷٫۵	In-CdS
۲۴۰	۱۰	$10^{-4}$	۱۵	CdTe

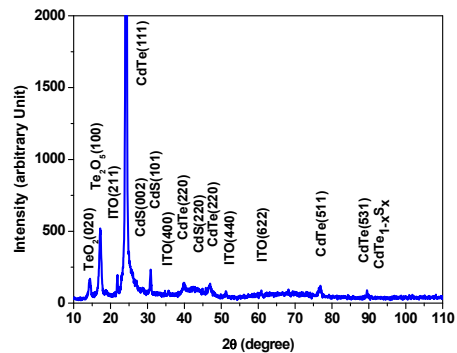
مواد توسط روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی با استفاده از بوتله حرارتی و در محفظه خلأ تبخیر شدند. لازم به ذکر است که به‌منظور کنترل نرخ لایه‌نشانی از بوتله درپوش‌دار استفاده شد که روزنه‌ای دایره‌ای شکل به قطر ۳ میلی متر روی آن به‌منظور عبور شار بخار مواد، در نظر گرفته شده بود. این امر باعث عملکرد نقطه‌ای چشمه شده که به تبع آن یکنواختی بیشتر زیر لایه‌ها از نقطه نظر ضخامت لایه‌ها حاصل می‌آید. به‌منظور گرم کردن زیرلایه‌ها از گرمکن رسانشی که شامل یک المنت ۲۰۰۰ واتی با پوشش صفحه مولیبدن بود، استفاده شد. لایه سولفید کادمیوم آلاینده به‌عنوان لایه نخست روی زیرلایه ITO مطابق شرایط لایه‌نشانی ذکر شده جدول ۱ با ضخامت ۲۰۰ نانومتر لایه‌نشانی شد. به‌منظور پایین آوردن مقاومت الکتریکی لایه سولفید کادمیوم، از ایندیم (۵ درصد وزنی) به‌عنوان ناخالصی استفاده شد [۱۷]. همچنین ایندیم یکی از آلاینده‌های مؤثر به‌منظور به‌دست آوردن سولفید کادمیوم آلاینده از نوع n می‌باشد، به‌دلیل آنکه الکترون اضافی حاصل از یون  $In^{3+}$  به‌جای یون  $Cd^{2+}$  جایگزین می‌شود [۱۸]. لایه

### آزمون میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی

شکل ۴الف، تصویر FESEM یا میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از سطح مقطع سلول بدون اتصال نهایی می‌باشد که طرز تشکیل دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم را نشان می‌دهد. با وجود آنکه مقیاس اندازه‌گیری تصویر بالا ۲ میکرومتر می‌باشد، تا حدودی می‌توان به پوشش دهی خوب لایه سولفید کادمیوم روی ITO پی‌برد. همچنین یکنواختی ضخامت این لایه در تقریباً همه قسمت‌های پوشش داده شده مشخص می‌باشد. لایه تلورید کادمیوم نیز که با ضخامت بسیار بیشتر روی سولفید کادمیوم قرار دارد از یکنواختی خوبی برخوردار بوده و رشد ستونی آن در تصویر مشخص می‌باشد. تصویر پایین اتصال دو لایه را با مقیاس ۶۰۰ نانومتر نشان می‌دهد تا رشد ستونی تلورید کادمیوم بهتر معلوم گردد. در شکل ۴ب، همچنین می‌توان سطح مشترک دو لایه را نیز مورد بررسی قرار داد. از آنجایی که مقیاس تصویر ۶۰۰ نانومتر می‌باشد، می‌توان گفت که اتصال دو لایه به‌طور کامل شکل گرفته و جدایی میان آنها وجود ندارد. شکل ۴ج، سطح فوقانی لایه تلورید کادمیوم را با مقیاس ۵۰۰ نانومتر نشان می‌دهد که اتصال نهایی باید روی آن قرار گیرد. سطح لایه هموار و یکنواخت به‌نظر می‌رسد.

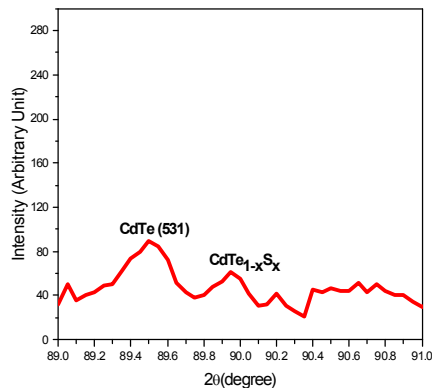
البته قابل ذکر است هنگامی که ضخامت لایه از یک میکرومتر بیشتر می‌شود، شکاف‌هایی به‌صورت عمودی در آن به‌وجود می‌آید که این موضوع می‌تواند اثر مثبت و یا منفی داشته باشد. تأثیر منفی از این جهت که این شکاف‌ها می‌تواند باعث اتصال لایه بالایی به لایه زیری گردد و اختلالی را مانند انتقال بارهای الکتریکی در مجموعه به‌وجود آورد. اما همین شکاف‌ها، سطح مؤثر تماس دو لایه را بیشتر می‌کند. به‌عنوان مثال، اگر لایه فوقانی بتواند به‌عنوان یک آلایند عمل نماید، تا آرایش از نوع p یا n لایه پایین را به اندازه مطلوبی افزایش

می‌تواند به‌دلیل بالا بودن دمای زیرلایه در زمان لایه‌نشانی باشد.



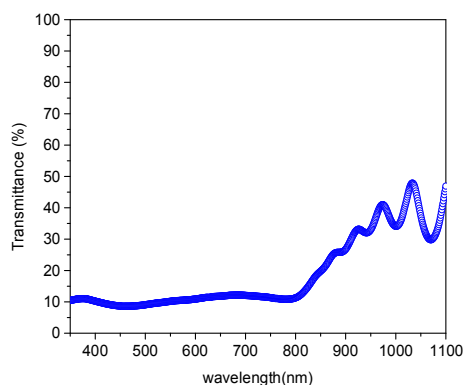
شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به ساختار دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم ITO.

نکته بعدی که می‌توان در طیف اشعه ایکس نمونه مشاهده کرد (شکل ۳)، وجود فاز  $CdTe_{1-x}S_x$  است که از جایگزینی سولفور در جایگاه تلوریم در لایه تلورید کادمیوم ناشی می‌شود. این موضوع می‌تواند به‌دلیل تفاوت ثابت شبکه مربوط به تلورید کادمیوم (هگزاگونال،  $0.3618$  نانومتر) نسبت به ثابت شبکه سولفید کادمیوم (مکعبی،  $0.3571$  نانومتر) باشد که به بخش از سولفور اجازه می‌دهد تا در جایگاه تلوریم قرار گیرد. گاپتا و همکاران نیز وجود این فاز را در این زوایا را گزارش داده‌اند [۱۹].



شکل ۳. الگوی پراش اشعه ایکس، نشان دهنده طرح اختلاطی دو لایه تلورید کادمیوم و سولفید کادمیوم.

مشاهده می‌شود، به دلیل وجود لایه سولفید کادمیوم زیر تلورید کادمیوم می‌باشد که این موضوع می‌تواند لبه جذب مربوط به کل سلول را از تک لایه تلورید کادمیوم متمایز سازد. شکل ۵ عبوردهی نوری کل سلول را نشان می‌دهد.

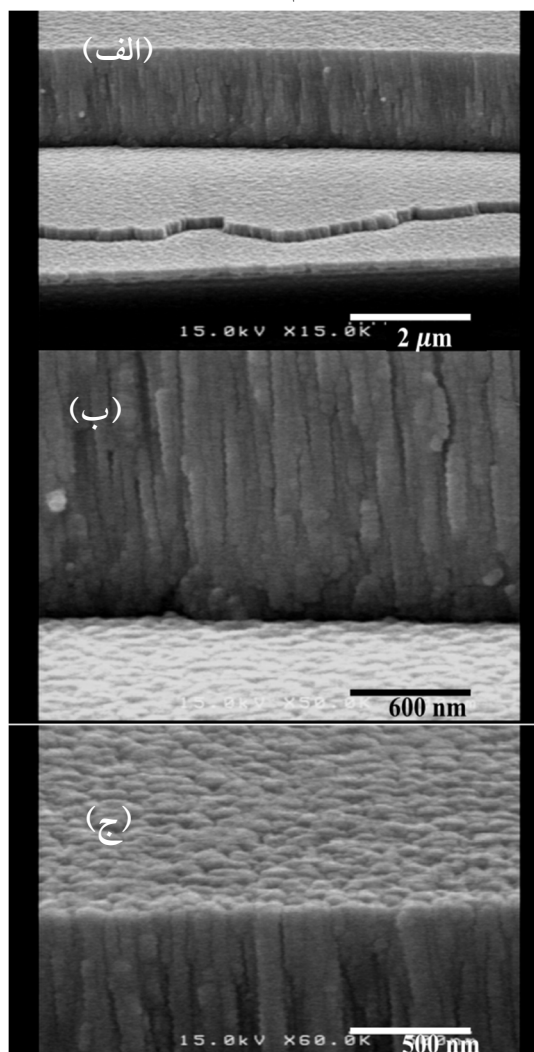


شکل ۵. طیف عبوردهی نوری برحسب طول موج مربوط به ساختار چند لایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم/ITO.

به منظور مقایسه بهتر، شکل ۶ میزان عبوردهی نوری سه نمونه تلورید کادمیوم با زیرلایه شیشه، تلورید کادمیوم با زیرلایه ITO و دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که لایه تلورید کادمیوم در هر سه نمونه تحت شرایط یکسان، از حیث دمای زیرلایه (۲۰۰ درجه سانتیگراد) و نرخ لایه‌نشانی (۱۰ آنگستروم بر ثانیه) لایه‌نشانی شده‌اند. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که لبه جذب نوری تلورید کادمیوم با زیرلایه ITO در ۸۰۸ نانومتر، تلورید کادمیوم با زیرلایه شیشه در ۷۹۲ نانومتر و دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم در ۷۶۷ نانومتر قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لبه نواری مربوط به تلورید کادمیوم با زیرلایه ITO بیشترین نزدیکی را به لبه جذب ایده‌آل تلورید کادمیوم یعنی ۸۳۰ نانومتر از خود نشان می‌دهد.

از حیث میزان عبوردهی نوری نیز، لایه مذکور کمترین مقدار عبوردهی را در بازه طول موج‌ها از خود نشان

دهد، این سطح تماس بیشتر، مفید می‌باشد. معمولاً اتصال نهایی چنین نقشی را نیز برای قسمت جاذب نور که در اینجا تلورید کادمیوم می‌باشد، ایفا می‌نماید.



شکل ۴. تصاویر FESEM از لایه‌ها. (الف) تصویر مربوط به سطح مقطع دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم. (ب) سطح مقطع دولایه تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم از نمایی نزدیکتر (۶۰۰ نانومتر). (ج) تصویر مربوط به سطح فوقانی لایه تلورید کادمیوم (زیرلایه اتصال نهایی).

### بررسی ویژگی‌های اپتیکی

عبوردهی نوری مربوط به کل ساختار سلول (بدون اتصال نهایی) در دمای اتاق، تقریباً لبه جذب مربوط به تلورید کادمیوم در طول موج‌هایی در حدود ۷۶۷ نانومتر را نشان می‌دهد. اختلاف کمی که بین لبه جذب

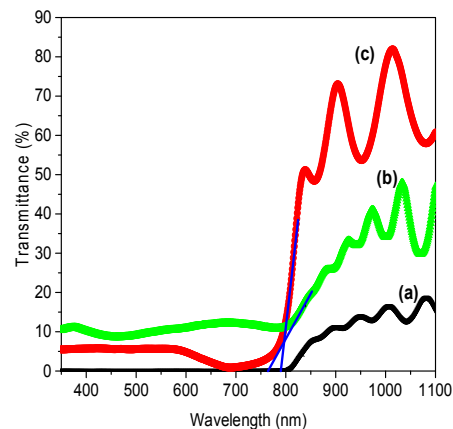
### بازده کوانتومی<sup>۱</sup>

بازده کوانتومی به نسبت تعداد الکترون‌های تولید شده‌ای که در پایانه‌های<sup>۲</sup> سلول جمع می‌شوند به تعداد فوتون‌های ورودی، اطلاق می‌گردد؛ از این رو، اندازه‌گیری بازده کوانتومی پاسخ اپتیکی سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. تعداد الکترون‌های تولید شده به دلیل اثر فوتولتائیک، با اندازه‌گیری جریان حاصل از سلول تحت تابش نور در طول موج‌های متفاوت به دست می‌آید و تعداد فوتون‌ها با اندازه‌گیری جریان استاندارد سلول خورشیدی مرجع<sup>۳</sup> در هر طول موجی محاسبه می‌شود [۲۱].

$$QE_{ideal}(\lambda) = \exp(-\alpha_{TCO}d_{TCO}) \times \exp(-\alpha_{CdS}d_{CdS}) \times \exp(1 - \exp(-\alpha_{CdTe}d_{CdTe}))$$

رابطه بالا بازده کوانتومی را معرفی می‌کند. در این رابطه ضریب جذب مربوط به لایه اکسید رسانای شفاف ( $\alpha_{TCO}$ ) نیز لحاظ شده است. از آنجایی که در طول موج‌های مرئی این لایه (یعنی ITO) تقریباً همه نور ورودی را از خود عبور می‌دهد، ضریب جذب آن را تقریباً برابر صفر در نظر گرفته و به این ترتیب جمله اول برابر ۱ می‌شود. نمودار بازده کوانتومی مربوط به سلول تهیه شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

داده به گونه‌ای که تقریباً طول موج‌های کوچکتر از ۸۰۸ نانومتر را همان‌گونه که در طیف مشهود است، به طور کامل جذب می‌نماید. همچنین گاف انرژی دولایه‌ای از روش تاک محاسبه گردید که مقدار ۱٫۶۷ الکترون ولت به دست آمد. این مقدار به گاف انرژی تلورید کادمیوم نزدیک می‌باشد [۲۰].



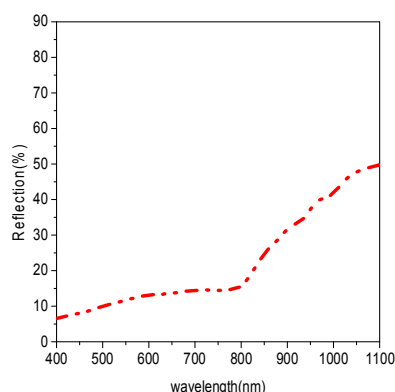
شکل ۶. مقایسه طیف‌های عبوردهی برحسب طول موج مربوط به سه نمونه (a) تلورید کادمیوم با زیرلایه ITO، (b) دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم با زیرلایه ITO، (c) تلورید کادمیوم با زیرلایه شیشه.

با توجه به ویژگی سطح مشترکی دو لایه مانند پدید آمدن فاز جدید بلوری (فاز سه‌تایی) و تغییر اندازه دانه‌بندی در این قسمت و همچنین ظهور نقائص یا ناکاملی‌های بلوری، مقدار عبوردهی مشاهده شده قابل قبول می‌باشد. عبوردهی برای تقریباً تمام بازه مرئی به طور میانگین برابر ۱۰ درصد بوده و این به این معنی است که ۹۰ درصد نور در تلورید کادمیوم جذب می‌شود.

<sup>1</sup> Quantum Efficiency

<sup>2</sup> Terminals

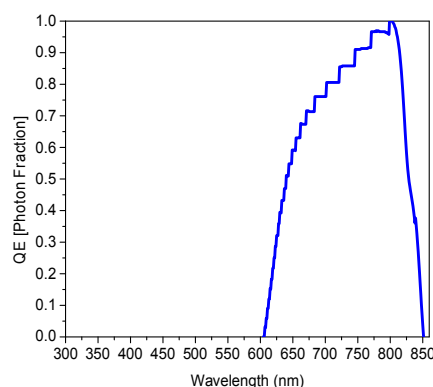
<sup>3</sup> این سلول خورشیدی مرجع، توسط مرکز NREL در آمریکا کالیبره شده است.



شکل ۸. نمودار بازتاب نوری سلول برحسب طول موج.

اگر بازتاب ( $R\%$ ) کسری از فوتون‌های ورودی که از ساختار چندلایه‌ای بازتاب می‌شود را نشان دهد،  $1-R\%$ ، با صرف نظر از وجود مسئله پراکندگی در سطح شیشه هنگام ورود، کسری از فوتون‌ها خواهد بود که به سلول وارد می‌شود. حال اگر اطلاعات مربوط به بازده کوانتومی و  $1-R\%$  در یک نمودار برحسب طول موج رسم گردد، در محدوده طول موجی خاصی این دو نمودار تطابق پیدا کرده و هماهنگ می‌شوند. این بدین معنی است که در این بازه، طول موج فوتون‌ها به اندازه کافی برای لایه سولفید کادمیوم کوچک نبوده تا توسط آن جذب گردد [۲۰]، به این ترتیب در این بازه طول موجی هر فوتونی که بازتاب نشود، می‌تواند به درون ساختار رفته، به لایه تلورید کادمیوم رسیده، توسط آن جذب شود و یک الکترون تولید کند.

قسمت فوقانی نمودار بازتاب، اطلاعاتی راجع به تعداد فوتون‌های بازتاب شده در اختیار می‌دهد و قسمت پایین آن به سلول وارد می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، به دلیل عدم وجود لایه ضد بازتاب<sup>۴</sup> در ساختار سلولی، جایی که بازده کوانتومی سلول به بیشینه خود در بازه طول موج‌های ۷۴۰ تا ۸۲۵ نانومتر می‌رسد، نور دریافتی توسط سلول بازتاب داده می‌شود.



شکل ۷. نمودار بازده کوانتومی (نسبت فوتون‌هایی که با طول موج‌های متفاوت در سلول خورشیدی تلورید کادمیوم به الکترون تبدیل می‌شوند).

تفسیر عمومی نمودار فوق بدین صورت است که، کسری از فوتون‌های ورودی در بازه طول موجی ۶۰۰ تا ۸۵۰ نانومتر می‌توانند الکترون تولید نمایند. به عنوان مثال تمام فوتون‌ها با طول موج ۸۰۰ نانومتر می‌توانند الکترون تولید نمایند. اما این کسر برای طول موج‌های دیگر از ۱ کمتر است، به عنوان نمونه ۵۰ درصد فوتون‌های ورودی با طول موج ۶۴۰ نانومتر الکترون تولید می‌کنند.

مسئله مهم دیگر میزان بازتاب نوری ساختار سلول می‌باشد. این موضوع که چه فوتون‌هایی با چه طول موجی به سلول وارد می‌شوند تا در تولید الکترون‌ها نقش ایفا نمایند، از روی نمودار بازتاب معین می‌گردد. مقایسه و کنار هم گذاشتن اطلاعات به دست آمده از روی این نمودار و بازده کوانتومی، ما را در رسیدن به قضاوت‌های صحیح‌تر از عملکرد سلول کمک می‌نماید. از این رو نمودار بازتاب نوری مربوط به سلول خورشیدی تهیه شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

<sup>4</sup> Antireflection

نسبت بیشینه توان قابل دسترس سلول به توان استاندارد میزان نور رسیده به سطح را بازده سلول می‌گویند. نسبت بیشینه توان قابل دسترس به ولتاژ مدار باز و جریان مدار بسته را ضریب پری سلول می‌گویند. با استفاده از نمودار I-V ولتاژ مدار باز  $V_{oc}$  و جریان مدار بسته  $I_{sc}$  به ترتیب عبارتند از:  $27.5 \text{ mV}$  و  $7.86 \text{ mA/cm}^2$ . به این ترتیب بازده ( $\eta$ ) و ضریب پری سلول (FF) را می‌توان به دست آورد [۲۱].

$$\eta = \frac{P_{max}/A}{P_{inc}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{inc}} = 1.40 \quad 2$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} = 0.65 \quad 3$$

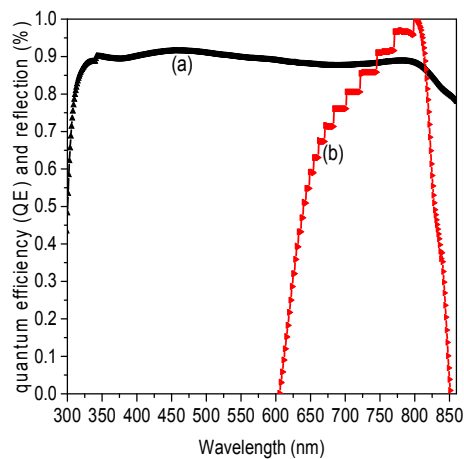
که  $A$  سطح مؤثر سلول و برابر با  $1 \text{ cm}^2$  می‌باشد، یعنی سطحی که اتصال نهایی پوشانده است.

$P_{inc}$  توان استاندارد میزان نور رسیده به زمین از طرف خورشید هنگامی است که خورشید در اوج باشد، که مقدار آن معمولاً  $100 \text{ mw/cm}^2$  در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

### نتیجه گیری

دولایه‌ای تلورید کادمیوم/سولفید کادمیوم بر زیرلایه ITO با استفاده از روش لایه‌نشانی بخار فیزیکی ساخته شد. تصاویر گرفته شده توسط آزمون FESEM نشان می‌دهد که رشد لایه‌ها یکنواخت و به صورت ستونی هستند. آزمون ساختاری گرفته شده نشان داد که ثابت شبکه مربوط به تلورید کادمیوم ( $0.36481 \text{ nm}$ ) از ثابت شبکه سولفید کادمیوم (مکعبی،  $0.35818 \text{ nm}$ ) بزرگتر است. این موضوع اجازه تشکیل فاز سه تایی  $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$  را می‌دهد زیرا سولفور می‌تواند به داخل تلورید کادمیوم نفوذ کند. مطالعات اپتیکی، تغییر میزان عبوردهی نور را به نسبت تلورید کادمیوم خالص نشان می‌دهد. بازدهی کوانتومی نشان داد که طی پدیده فوتولناثیک، همه فوتونها با طول موج  $800 \text{ nm}$  می‌توانند هر کدام یک الکترون تولید نمایند. پس از

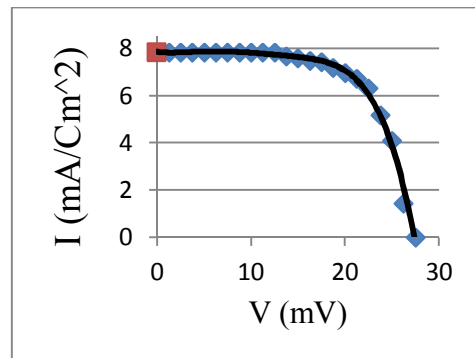
این موضوع می‌تواند عامل مهمی در پایین آمدن عملکرد سلول و بازده آن نسبت به گزارشات موجود [۲۱] به‌شمار رود. مقایسه نموداری شکل ۹، کمک بسیار شایانی در رسیدن به فهم پاسخ اپتیکی سلول به‌دست می‌دهد.



شکل ۹. مقایسه نمودار بازتاب نوری با نمودار بازده کوانتومی (a) نمودار بازتاب نوری (b) نمودار بازده کوانتومی.

### اندازه‌گیری مشخصه I-V

برای اندازه‌گیری بازده سلول یک مدار ساده شامل یک رئوستا، ولت‌متر، آمپر متر و یک منبع نور قوی با توان تابشی حداقل  $40000$  لوکس نیاز است. پس از تشکیل دادن مدار و به‌دست آوردن داده‌های مورد نیاز، نمودار ولتاژ جریان هر یک از سلول‌ها را ترسیم می‌کنیم. نمودار I-V مربوط به سلول در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱۰. مشخصه جریان-ولتاژ مربوط به سلول تلورید کادمیوم.



structural properties of cadmium telluride films grown by glancing angle deposition. *Physica Scripta* **88** (2013) 025602-025609.

[11] F.H. Siyanaki, H.R. Dizaji, M.H. Ehsani S. Khorramabadi. The effect of substrate rotation rate on physical properties of cadmium telluride films prepared by a glancing angle deposition method, *Thin Solid Films* **577** (2015) 128-133.

[12] C.S. Ferekides, D. Marinskiy, V. Viswanathan, B. Tetali, V. Palekis, P. Selvaraj, D.L. Morel, High efficiency CSS CdTe solar cells. *Thin Solid Films* **361** (2000) 520-526.

[13] A. Nowshad, T. Isaka, A. Yamada, M. Konagai. Highly efficient 1 $\mu$ m thick CdTe solar cells with textured TCOs. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **67** (2001) 195-201.

[14] J. Britt, C. Ferekides. Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Applied Physics Letters* **62** (1993) 2851-2852.

[15] J.M. Kestner, S. McElvain, S. Kelly, T.R. Ohno, L.M. Woods, C.A. Wolden, An experimental and modeling analysis of vapor transport deposition of cadmium telluride. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **83** (2004) 55-65.

[16] J. Lee, Raman scattering and photoluminescence analysis of B-doped CdS thin films, *Thin Solid Films* **451** (2004) 170-174.

[17] M.H. Mirhaj, H.R. Dizaji, M.H. Ehsani F. Hosseini. Substrate temperature effect on physical properties of In-doped CdS thin films. *Chalcogenide Letters* **9** (2012) 193-199.

[18] J.A. Davila-Pintle, R. Lozada-Morales, Electro-Optical characterization of insitu indium doped CdS thin film by chemical bath, *Advances In Technology Of Materials And Materials Processing Journal* **8** (2006) 1.

[19] A. Gupta, I. Matulionis, Effect of CdTe thickness reduction in high efficiency CdS/CdTe solar cells, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 668 (2001) 641-646.

اتصال گذاری ساختار دو لایه‌ای توسط طلا با استفاده از نمودار I-V، بازدهی سلول ۱/۴ درصد و ضریب پری آن ۰/۶۵ به دست آمد.

## مرجع‌ها

[1] J. Poortmans, A. Vladimir, *Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications*, John Wiley & Sons, (2006).

[2] <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=593994>.

[3] X. Wu, R.G. Dhere, D.S. Albin, T.A. Gessert, C. DeHart, J.C. Keane, A. Duda, T.J. Coutts, S. Asher, D.H. Levi, H.R. Moutinho, High-efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cells. *In Proceedings of NCPV program review meeting* **47** (2001) 995-1000.

[4] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop. Solar cell efficiency tables. *Progress in photovoltaics: research and applications*, **23** (2015) 1-9.

[5] <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=864399>.

[6] M.D. Archer, M.A. Green, editors. *Clean electricity from photovoltaics*. World Scientific (2014).

[7] S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, John Wiley & Sons Inc, New York, (1981).

[8] A.D. Compaan, A. Gupta, S. Lee, S. Wang, J. Drayton. High efficiency, magnetron sputtered CdS/CdTe solar cells. *Solar Energy* **77** (2004) 815-822.

[9] Z.R. Khan, M. Zulfeqar, M.S. Khan. Structural, optical, photoluminescence, dielectric and electrical studies of vacuum-evaporated CdTe thin films. *Bulletin of Materials Science* **35** (2012) 169-174.

[10] M.H. Ehsani, H.R. Dizaji, S. Azizi, S.G. Mirmahalle, F.H. Siyanaki. Optical and

[۲۰] ا. کمپانی، ب. قنبری شوهانی، ع. خرسند زاک، مشخصه‌یابی و بررسی خواص اپتیکی نانوپودر تلوراید کادمیم سنتز شده به روش هیدروترمال، مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای ۱۲ (۱۳۹۵)، ۷۸-۷۱.

[21] L. Chen, Random Deposition Model of CdS Layer in CdS/CdTe Thin-Film Solar Cells, M.Sc. Thesis, Colorado State University (2008).

# **Fabrication and investigation on structural and optical properties of cadmium telluride/cadmium sulfide bilayer structure on ITO substrate**

**Reza Zarei Moghadam, Hamid Rezagholipour Dizaji\*, Mohammad Hossein Ehsani, Mohammad Hossein Mirhaj**

Thin Film Laboratory, Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 17.10.2016    Final revised: 18.03.2017    Accepted: 29.05.2017

## **Abstract**

In this investigation, fabrication and investigation on structural and optical properties, the layer growth and quantum efficiency of CdS/ CdTe bi-layer structure on ITO substrate for the production of cadmium telluride- base solar cells are dealt with. The mentioned bi-layer was made by using physical vapor deposition (PVD) method. In order to find the crystal structure of the individual layers or observation of new phase formed at their interface, X-ray diffraction analysis was used. With the help of this analysis, CdTe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> ternary phase was observed at  $2\Theta=89.95^\circ$  which has been attributed to the inter diffusion of the two layers. Optical studies show the change in optical transmission compared to the pure cadmium telluride. The surface uniformity and thickness of the specimens and morphology of the grown columns were investigated by FESEM analysis. The FESEM images showed that the layers growth was in uniform columnar form. Quantum efficiency showed that during photovoltaic phenomenon, all photons with a wavelength of 800 nm can produce either an electron. I-V plot study of the prepared bi-layer structure shows a cell efficiency of 1.4 percent and fill factor of 0.65.

**Keywords:** Iron-carbon core-shell structures, Nanocapsule, Arc-discharge method, Microwave properties

---

\* Corresponding Author: hrgholipour@semnan.ac.ir