

## بهبود عملکرد سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید CdTe با لایه‌های بافر مختلف

محمد دانایی، شیوا خانی، احسان نوروززاده و محسن وحدانی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان

پست الکترونیکی: danaie@profs.semnan.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۴/۲۵)

### چکیده

در این مقاله عملکرد لایه بافر سلول خورشیدی لایه نازک کادمیوم تلوراید (CdTe) با استفاده از نرم‌افزار SCAPS بهینه‌سازی شده است. در ابتدا پنج لایه بافر مختلف از جمله CdS،  $\text{In}_2\text{S}_3$ ، ZnO، ZnSe، ZnS و ضخامت‌های متغیر از ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر در ساختار سلول خورشیدی جایگزین شده‌اند و مشاهده شده است که هر چقدر ضخامت لایه بافر افزایش یافته است، میزان بازدهی کاهش می‌یابد، زیرا با بیشتر شدن ضخامت لایه بافر، جذب نور در این لایه بیشتر شده و میزان کمتری از نور در لایه جاذب (CdTe) جذب می‌شود. سپس عملکرد سلول خورشیدی با لایه‌های بافر مختلف با هم مورد مقایسه قرار گرفته و تأثیر هر یک از لایه‌ها بر چهار پارامتر اصلی سلول خورشیدی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که لایه بافر ZnS تقریباً در تمام ضخامت‌ها دارای بازدهی بالاتری نسبت به سایر مواد است، که دلیل این امر بزرگ‌تر بودن شکاف نواری این ماده نسبت به سایر مواد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی، لایه نازک، لایه بافر، شکاف نواری، لایه جاذب

### ۱. مقدمه

نوع سلول‌های از سلول‌های خورشیدی لایه نازک کمتر است. سلول خورشیدی لایه نازک CdTe یکی از قطعات فوتولتایی مناسب از نظر بازده و هزینه ساخت به حساب می‌آید. ساختار CdTe یک نیمه‌هادی مرکب از گروه II-VI است و ویژگی مهم این ماده، انرژی شکاف نواری مستقیم آن است که مقداری نزدیک به مقدار بهینه مطابق با طیف خورشیدی برای تبدیل حداکثر انرژی فوتولتایی دارد. شکاف نواری مستقیم ۱.۵ eV و ضریب جذب بالای CdTe به این معنی است که در گستره وسیعی

سلول‌های خورشیدی لایه نازک CdTe مدتهاست که به خاطر بازده بالا و هزینه ساخت کم مورد توجه جهانی قرار گرفته‌اند. دو عامل اصلی در عملکرد هر سلول خورشیدی افزایش بازدهی و کاهش هزینه ساخت می‌باشد. بر این اساس مواد و فناوری‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از جمله سلول‌های خورشیدی دیگری که هزینه ساخت کم دارند می‌توان به سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای [۱ و ۲] اشاره کرد، اما میزان بازدهی این

حرارتی در یک سلول خورشیدی لایه نازک بسیار اهمیت دارد. در مرجع [۹]، لایه  $\text{CuO}$  نازک به عنوان لایه بافر بین ماده  $\text{CdTe}$  نوع p و الکتروود فلزی قرار گرفته است، که این کار پایداری سلول خورشیدی را به طور چشمگیری افزایش داده است. بلوری شدن دوباره  $\text{CdTe}$  با استفاده از کادمیوم کلرید ( $\text{CdCl}_2$ ) یک فرایند حیاتی برای دستیابی به دستگاه‌های فوتولتایی با کارایی بالا می‌باشد [۱۰].

تلفات ناشی از بازتاب، بازدهی همه انواع سلول‌های خورشیدی را کاهش می‌دهد. اولین تلفات ناشی از بازتاب بین شیشه و هوا اتفاق می‌افتد، بنابراین برای حداقل کردن تلفات ناشی از بازتاب، پوششی شامل چهار لایه نازک و متناوب از مواد دی‌الکتریکی مانند  $\text{ZrO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  استفاده شده است [۱۱]. استفاده از ماده  $\text{NiO}$ ، به عنوان لایه بافر انتقال حفره را به صورت هموار از  $\text{CdTe}$  به  $\text{NiO}$  ممکن می‌کند. همچنین لایه بافر  $\text{NiO}$  به عنوان یک بازتابنده میدان پستی برای الکترون‌های تولید شده توسط فوتون عمل می‌کند، بنابراین در اصل میزان بازترکیب حامل می‌تواند به طور چشمگیری در ناحیه اتصال پستی کاهش یابد، بنابراین ولتاژ مدار باز را بهبود می‌دهد. مزیت دیگر استفاده از ماده  $\text{NiO}$  به عنوان لایه بافر این است که، مقدار  $\text{Cu}$  کمتری برای ساخت سلول خورشیدی مورد نیاز است و پایداری آن به طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۱۲]. استفاده از لایه بافر شفاف با مقاومت بالا، به افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی با لایه بافر  $\text{CdS}$  کمک می‌کند. در [۱۳]، از لایه‌های شفاف با مقاومت بالای  $\text{ZnO}$  در دهامای مختلف استفاده شده است که دمای بالای لایه‌نشانی  $\text{ZnO}$  بازدهی سلول را افزایش می‌دهد. در [۱۴]، بسیاری از نمونه‌ها با ماده اتصال پستی  $\text{Cu}/\text{Au}$  با زمان‌های زدایش (etching) متفاوت تهیه شده‌اند و با استفاده از تنش‌های گرمایی، نوری و الکتریکی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. سلول‌های خورشیدی با زدایش بهینه دارای تخریب بسیار کم هستند. بیشترین کاهش بازدهی برای سلول‌های غیر زدایش شده است، با وجود این که بازدهی اولیه‌شان به بزرگی بازدهی سلول‌های با لایه‌های جاذب زدایش شده می‌باشد. استفاده از لایه بافر  $\text{ZnTe}$  در اتصال پستی سلول‌های

از طول موج‌ها از فرابنفش تا شکاف نواری  $\text{CdTe}$  (۸۲۵ nm) می‌توان بهره کوانتمی بالایی را از سلول انتظار داشت. فوتون‌های با طول موج کم و با انرژی بیشتر از انرژی شکاف نواری  $\text{CdTe}$  جذب این ماده می‌شوند، به این ترتیب ماده  $\text{CdTe}$  مناسبی برای سلول‌های خورشیدی لایه نازک به حساب می‌آید. با توجه به ضریب جذب بالای  $\text{CdTe}$  برای فوتون‌های با انرژی بیشتر از  $E_g$  آن، تنها ضخامت کمی (در حدود ۲ تا  $8 \mu\text{m}$ ) از لایه  $\text{CdTe}$  برای جذب ۹۹٪ از فوتون‌های طیف خورشیدی  $\text{AM}1.5$  کافی است، که این مقدار حدوداً ۱۰۰ برابر کمتر از ضخامت سلول‌های خورشیدی سیلیکن بلوری است [۳-۵].

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی سلول‌های خورشیدی لایه نازک بر پایه لایه جاذب  $\text{CdTe}$  صورت گرفته است، که در آنها از روش‌های متعددی جهت رسیدن به بازده بالا بهره گرفته شده است. در مرجع [۶]، برای رسیدن به سلول خورشیدی با بازده بالا از تصفیه پلاسما اکسیژن استفاده شده است. آنها با استفاده از تصفیه سطح لایه‌های بافر و  $\text{FTO}$  توانسته‌اند میزان بازدهی را نسبت به حالت اولیه دو درصد افزایش دهند. روش دیگری که برای افزایش بازدهی سلول خورشیدی به کار گرفته شده است، اثر میدان الکتریکی در اتصال پستی است [۷ و ۸]. در یک سلول خورشیدی  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  با توجه به عرض ناحیه تخلیه پیوند، حامل‌های الکتریکی تولید شده در فواصل بیشتر از  $10 \mu\text{m}$  از فصل مشترک لایه‌های  $\text{CdTe}$  و  $\text{CdS}$  نقش بسیار کمی در سازوکار هدایت الکتریکی بازی می‌کنند. از این رو کاهش ضخامت لایه  $\text{CdTe}$  به منظور کاهش ماده مصرفی و همچنین کاهش تلفات بازترکیب امری حائز اهمیت است. از سوی دیگر، با کاهش ضخامت لایه  $\text{CdTe}$  احتمال بازترکیب سطحی حامل‌ها در اتصال پستی افزایش می‌یابد و باعث افت کمیت‌های سلول می‌شود. بنابراین در تعیین ضخامت بهینه لایه جاذب  $\text{CdTe}$  باید ملاحظات دقیقی صورت گیرد. در این حالت با قرار دادن ماده‌ای با انرژی شکاف نواری بزرگ در اتصال پستی و ایجاد میدان الکتریکی، امکان کاهش ضخامت لایه جاذب  $\text{CdTe}$  و در عین حال غلبه بر باز ترکیب سطحی در اتصال پستی فراهم می‌شود. انتخاب لایه بافر با مقاومت الکتریکی پایین، بازدهی بالا و پایداری

ساخته می‌شوند، که از جمله مواد مورد استفاده در ساخت سلول‌های لایه نازک به CdTe، CIGS (مس ایندیم گالیوم سلنید) و a-Si می‌توان اشاره کرد. ضخامت پوشش از چند نانومتر تا ده‌ها میکرومتر متفاوت می‌باشد و بسیار نازک‌تر از فناوری قدیمی و اولین نسل سلول‌های خورشیدی سیلیکون بلوری است، که از ویفرهای سیلیکونی تا ۲۰۰ میکرو متر استفاده می‌کند. این امر باعث می‌شود تا سلول‌های لایه نازک انعطاف‌پذیر بوده، وزن و نیروی مقاومت هوای کمتری داشته باشند. این فناوری به عنوان مواد نیمه‌شفاف شیشه‌ای فوتولتایی برای پوشاندن پنجره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در دیگر کاربردهای تجاری سلول‌های لایه نازک میان دو صفحه شیشه‌ای قرار می‌گیرند، و به صورت پنل‌های خورشیدی در برخی از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های برق فوتولتایی جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. فناوری لایه نازک از فناوری قدیمی سیلیکون بلوری ارزان‌تر است ولی کارآمدی کمتری نسبت به آن دارد. اما در طول سال‌های اخیر کارآمدی و بازده لایه‌های خورشیدی به صورت چشمگیری ارتقاء یافته است، و کارآمدی سلول آزمایشگاهی ساخته شده از CdTe به درصد بالایی رسیده است و اکنون با پلی‌سیلیکون، که در حال حاضر در بیشتر اتصالات فوتولتایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، هم تراز است.

استفاده از CdTe در تولید سلول خورشیدی لایه نازک برترین فناوری ساخت لایه نازک می‌باشد. در حدود ۵٪ تولیدات فوتولتایی جهانی و بیش از نیمی از بازار لایه نازک در دست این فناوری می‌باشد. کارآمدی آزمایشگاهی سلولی به صورت چشمگیری در طول سال‌های اخیر افزایش یافته است و نزدیک به کارآمدی سیلیکون چند بلوری است. CdTe همچنین دارای کمترین میزان زمان برگشت انرژی نسبت به تمامی فناوری‌های تولید انبوه فوتولتایی می‌باشد. فراوانی تلوریم، که تلوراید شکل آنیونی شده آن است، قابل مقایسه با پلوتونیوم موجود در پوسته زمین می‌باشد و به صورت چشمگیری در هزینه ماژول نقش دارد.

### ۳. ساختار پیشنهادی

شکل ۱ ساختار پیشنهادی برای شبیه‌سازی یک سلول خورشیدی CdTe را نشان می‌دهد. این سلول خورشیدی تحت تابش طیف

خورشیدی CdTe، باعث افزایش بازدهی خواهد شد [۱۵]. در مرجع [۱۶]، اکسیداسیون سطح پشتی مقدار ولتاژ مدار باز را افزایش و بازدهی سلول را بهبود داده است.

یکی از مشکلات سلول‌های لایه نازک CdTe، داشتن شکاف نواری بالای این ماده است. به همین خاطر در [۱۷] و [۱۸]، از Se در ترکیب CdTe استفاده کرده‌اند که منجر به تشکیل ماده CdSeTe شده است. با این روش شکاف نواری کاهش می‌یابد که با تغییر Se می‌توان آن را کنترل کرد. در [۱۸]، شکاف نواری از ۱٫۵ الکترون ولت تا ۱٫۳۸ الکترون ولت کاهش یافته که منجر به افزایش جریان اتصال کوتاه گردیده است، به عبارتی دیگر در طول موج‌های بلند، جمع‌آوری جریان افزایش می‌یابد. در مرجع [۱۹]، به منظور افزایش جریان و بهبود آرایش نواری از MzO به جای CdS استفاده کرده‌اند و Te را به عنوان اتصال پشتی انتخاب نموده‌اند. در مرجع [۲۰]، به بررسی اثرات ZnTe بر روی CdTe پرداخته است تا بازده و پایداری ماژول افزایش یابد. در مرجع [۲۱]، برای افزایش ولتاژ مدار از لایه‌ای بین CdTe و الکتروود استفاده شده است.

هدف این تحقیق بررسی اثرات ناشی از تغییر لایه بافر [۲۲]، بر کمیت‌های سلول خورشیدی و ارایه ماده مناسب برای ایجاد یک سلول خورشیدی با بازده بهتر است، زیرا انتخاب لایه بافر مناسب نقشی کلیدی در عملکرد سلول‌های خورشیدی لایه نازک CdTe دارد. چون لایه بافر یک نیمه هادی نوع n است، می‌تواند با نیمه هادی نوع p (لایه جاذب) پیوند p-n تشکیل دهد و باعث ایجاد میدان الکتریکی شود و اثر فوتولتایی ایجاد کند. بنابراین لایه بافر باید به صورتی باشد که در بخش طیف نور مرئی خورشید شفاف باشد تا اجازه عبور نور به لایه جاذب را بدهد.

### ۲. ساختار اساسی سلول خورشیدی CdTe

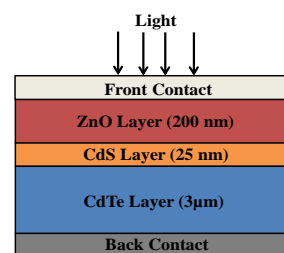
سلول خورشیدی لایه نازک، که سلول فوتولتایی لایه نازک نیز نامیده می‌شود، نسل دوم سلول‌های خورشیدی است که از قرار دادن یک یا چند لایه یا پوشش نازک از مواد فوتولتایی بر روی لایه‌ای از شیشه، پلاستیک یا فلز درست می‌شود. از لحاظ تجاری سلول‌های خورشیدی لایه نازک با استفاده از فناوری‌های مختلفی

جدول ۱. کمیت‌های فیزیکی مواد به کار رفته در شبیه‌سازی.

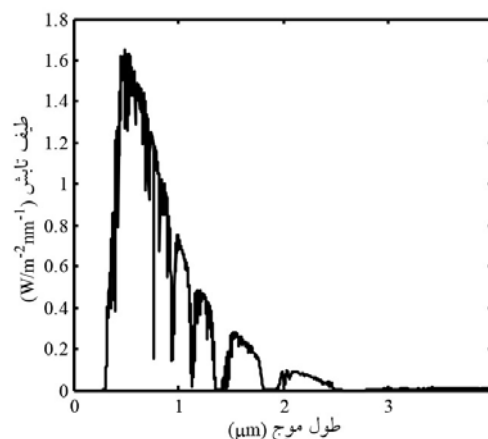
کمیت‌ها	n-ZnO	n-CdS	p-CdTe
شکاف نواری، $E_g$ (ev)	۳٫۳	۲٫۵۸	۱٫۵
الکترون خواهی، $X_e$ (ev)	۴٫۶	۴٫۱	۴٫۲۸
ثابت دی‌الکتریک، $\epsilon_r$	۹	۹٫۲	۹٫۴
چگالی حالت‌ها در نوار هدایت، $N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.2 \times 10^{18}$	$1.5 \times 10^{18}$	$7.5 \times 10^{17}$
چگالی حالت‌ها در نوار ظرفیت، $N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{18}$
تحرک الکترون، $\mu_n$ ( $\text{cm}^2 / \text{Vs}$ )	۱۰۰	۵۴۰	۳۲۰
تحرک حفره، $\mu_p$ ( $\text{cm}^2 / \text{Vs}$ )	۲۵	۲۸	۴۰
غلظت الکترون و حفره، n و p ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{18}$	$1.1 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{14}$

ساختار بازترکیب بالایی وجود دارد و موجب کاهش بازده سلول خورشیدی می‌شود. بنابراین، با اضافه کردن ناحیه‌ای مانند ZnO میدانی ایجاد می‌شود که سبب جداسازی حامل‌ها می‌شود، در نتیجه سرعت بازترکیب کاهش می‌یابد و به افزایش بازده کمک می‌کند. با توجه به انرژی شکاف نواری بزرگ CdTe یکی از چالش‌های موجود در رابطه با سلول خورشیدی CdTe انتخاب فلز مناسب برای تشکیل یک اتصال اهمی با مقاومت کم است. جدول ۱ کمیت‌های فیزیکی مواد به کار رفته در شبیه‌سازی‌های این مقاله را نشان می‌دهد.

هدف این مقاله در ابتدا بررسی اثر تغییر ضخامت لایه بافر CdS بر کمیت‌های اصلی ( $\eta$ ، FF،  $J_{sc}$  و  $V_{oc}$ ) است، از این رو به منظور سادگی از بررسی تأثیر لایه‌های اتصال جلویی و اتصال پشتی صرف نظر می‌کنیم. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ خلاصه شده‌اند، همان‌طور که مشاهده می‌شود با بیشتر شدن ضخامت لایه بافر CdS از ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر مقدار کمیت‌های  $\eta$ ، FF و  $J_{sc}$  کمتر می‌شود و مقدار  $V_{oc}$  تغییرات زیادی ندارد. پس هر چقدر ضخامت لایه بافر کمتر باشد، عملکرد و بازدهی سلول خورشیدی بهتر است؛ زیرا با کمتر شدن ضخامت لایه بافر، جذب نور در این لایه کمتر شده و میزان بیشتری از نور در لایه جاذب (CdTe)، جذب می‌شود و این عامل، عملکرد سلول را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱. ساختار سلول خورشیدی لایه نازک CdTe پیشنهادی.



شکل ۲. طیف نور خورشید در سطح زمین AM ۱٫۵.

مرکب Am ۱٫۵ قرار می‌گیرد، که این طیف نور خورشید در سطح زمین در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. لایه‌های تشکیل‌دهنده این پیوند شامل هادی جلو، ZnO، CdS، CdTe و هادی عقب هستند. لایه ZnO در اینجا برای ایجاد یک میدان کمکی مورد استفاده قرار گرفته است. زیرا ساختار کلی سلول خورشیدی متشکل از اتصال p-n است، که در این

۱. Open circuit voltage

۲. Short circuit current

۳. Fill factor

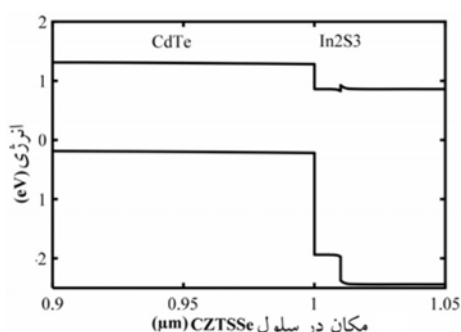
۴. Efficiency

جدول ۲. تغییرات کمیت‌های اساسی با تغییر ضخامت لایه بافر Cds.

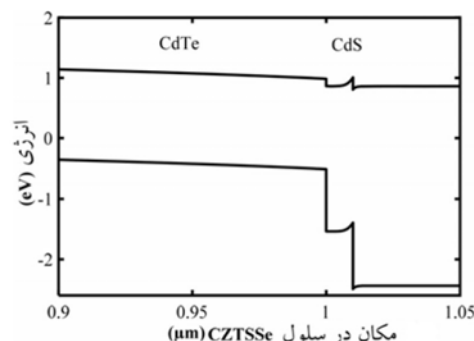
ضخامت Cds (nm)	$V_{oc}$ (v)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
۱۰	۰,۵۳۱۴	۲۶,۴۷	۶۵,۲۷	۹,۱۸
۲۰	۰,۵۳۱۹	۲۶,۱۱	۶۴,۹۷	۹,۰۲۵۶
۳۰	۰,۵۳۲۱	۲۵,۸	۶۴,۸۱	۸,۹
۴۰	۰,۵۳۲۲	۲۵,۵۱	۶۴,۷۳	۸,۷۹
۵۰	۰,۵۳۲۲	۲۵,۲۵	۶۴,۶۷	۸,۶۹
۶۰	۰,۵۳۲۲	۲۵	۶۴,۶۳	۸,۶
۷۰	۰,۵۳۲۲	۲۴,۷۶	۶۴,۶	۸,۵۱
۸۰	۰,۵۳۲۲	۲۴,۵۴	۶۴,۵۷	۸,۴۳
۹۰	۰,۵۳۲۲	۲۴,۳۳	۶۴,۵۴	۸,۳۶
۱۰۰	۰,۵۳۲۲	۲۴,۱۳	۶۴,۵۲	۸,۲۹

جدول ۳. ثابت شبکه مربوط به لایه‌های بافر مختلف.

CdTe	ZnS	ZnSe	ZnO	$In_2S_3$	CdS	لایه‌های بافر مختلف ثابت شبکه (آنگستروم)
۶,۴۸۲	۵,۴۲	۵,۶۶۸	۴,۵۸	۶,۴۲۵	۵,۸۳	



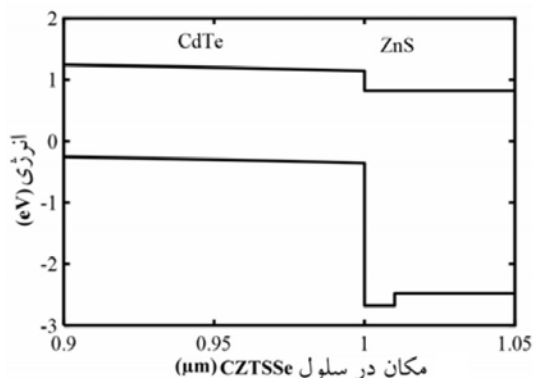
شکل ۴. نمودار تراز انرژی برای لایه بافر  $In_2S_3$ .



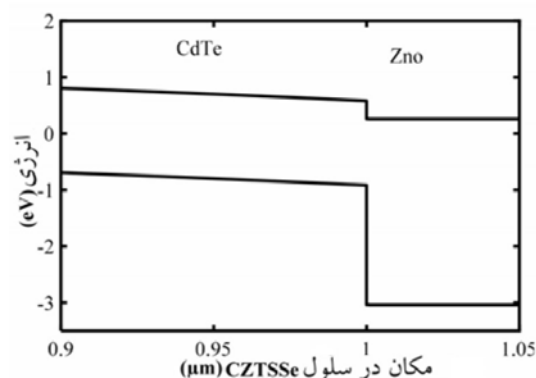
شکل ۳. نمودار تراز انرژی برای لایه بافر CdS.

$V_{oc}$  را بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار  $V_{oc}$  در تمام ضخامت‌ها برای  $In_2S_3$  و کمترین مقدار برای ZnSe به دست آمده است. همچنین میزان تغییرات  $V_{oc}$  در ضخامت‌های کم بیشتر می‌باشد و در ضخامت‌های زیاد این کمیت تقریباً ثابت می‌ماند، زیرا در ضخامت‌های کم لایه بافر، میزان بازترکیب کاهش پیدا می‌کند که این کاهش بازترکیب، جریان اشباع معکوس را کاهش می‌دهد، کاهش جریان اشباع

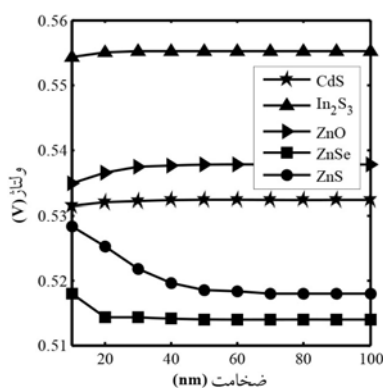
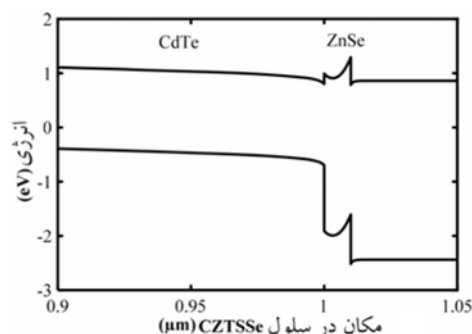
در ادامه لایه‌های بافر  $ZnO$ ،  $In_2S_3$ ،  $ZnSe$  و  $ZnS$  با ضخامت‌های متغیر از ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر در ساختار سلول خورشیدی جایگزین شده‌اند. سپس اثر هر یک از این لایه‌ها بر روی چهار کمیت اصلی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۳ ثابت شبکه مربوط به لایه‌های بافر مختلفی که در ساختار پیشنهادی جایگزین شده‌اند را نشان می‌دهد. همچنین نمودار ترازهای انرژی برای تمام لایه‌های بافر مختلف در اشکال ۳ تا ۷ نشان داده شده‌اند. شکل ۸ تغییرات



شکل ۶. نمودار تراز انرژی برای لایه بافر ZnS.



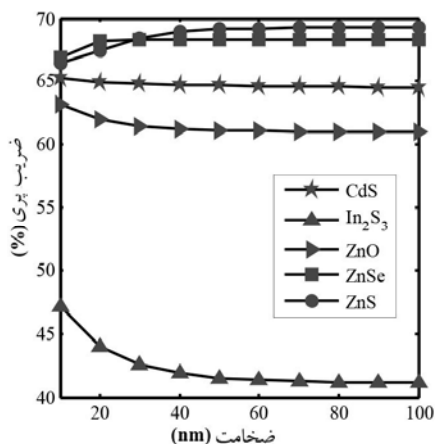
شکل ۵. نمودار تراز انرژی برای لایه بافر ZnO.

شکل ۸. منحنی  $V_{oc}$  سلول خورشیدی بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف.

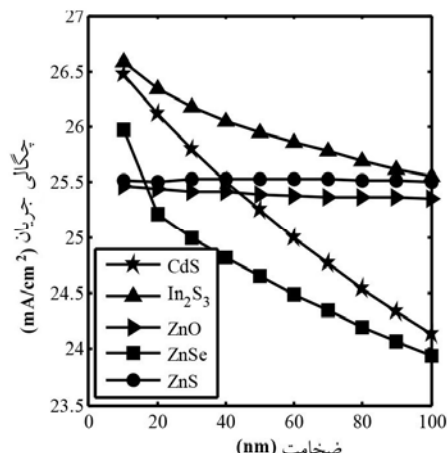
شکل ۷. نمودار تراز انرژی برای لایه بافر ZnSe.

ضخامت‌های کمتر جریان اتصال کوتاه بیشتر است. به این دلیل که در ضخامت‌های کمتر، حامل‌های تولید شده سریعاً و قبل از بازترکیب به لایه جاذب می‌رسند و در آنجا از یکدیگر جدا می‌شوند و جریان جاری می‌گردد. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که ضخامت کمتر سبب کاهش بازترکیب و افزایش جمع‌آوری حامل‌ها و در نتیجه افزایش جریان می‌گردد. دیگر نکته‌ای که در شکل ۹ نمایان است، کاهش چشم‌گیر جریان در  $In_2S_3$ ،  $ZnSe$  و  $CdS$  است. از آنجا که در این مواد ضریب جذب کم است، ضخامت تأثیرش بیشتر است در حالی که در  $ZnO$  و  $ZnS$  افزایش و کاهش ضخامت تأثیر زیادی بر جریان ندارد؛ آن هم به این دلیل که ضریب جذب در این مواد بالاست. شکل ۱۰ تغییرات FF را بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف نشان می‌دهد.

معکوس باعث افزایش ولتاژ مدار باز می‌گردد. از طرفی دیگر کاهش ضخامت لایه بافر باعث می‌گردد تا حامل‌های تولید شده قبل از بازترکیب به ناحیه تخلیه و میدان اصلی برسند که این امر باعث جمع‌آوری و جداسازی حامل‌ها می‌شود و به افزایش ولتاژ کمک می‌کند. برای دو ماده  $ZnS$  و  $ZnSe$  به دلیل این که الکترون‌خواهی کمتر و نزدیک به  $CdTe$  دارند، در نتیجه حرکت حامل‌ها بیشتر می‌شود و سبب افزایش بازترکیب می‌گردد. این امر سبب افزایش جریان اشباع معکوس در نتیجه کاهش ولتاژ مدار باز برای این دو ماده می‌شود. به علت این که در ضخامت‌های بالا میزان بازترکیب تقریباً ثابت می‌ماند، در نتیجه جریان اشباع معکوس ثابت است پس ولتاژ به اشباع می‌رود. شکل ۹ تغییرات  $J_{sc}$  را بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، در



شکل ۱۰. منحنی  $J_{sc}$  سلول خورشیدی بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف

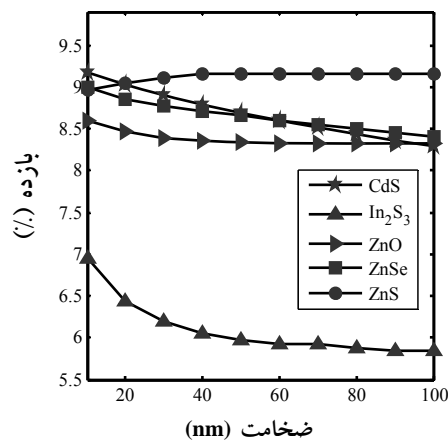


شکل ۹. منحنی  $J_{sc}$  سلول خورشیدی بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف.

شکل ۱۱ تغییرات  $\eta$  را بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف نشان می‌دهد. بازده سلول متأثر از سه کمیت  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$  است. با توجه به کاهش چشمگیر FF در  $In_2S_3$  انتظار می‌رود که کمترین بازده مربوط به این لایه بافر باشد. با نگاهی به شکل ۱۱، مشاهده می‌گردد که این پیش‌بینی محقق شده است و همچنین بیشترین بازده مربوط به ZnS است که این مسئله ناشی از شکاف نواری و FF بالای این ماده است که سبب می‌گردد حامل‌های بیشتری به لایه جاذب برسند.

#### ۴. بحث و نتایج

چندین روش برای افزایش میزان نور ورودی به سلول و کاهش میزان نورگریزی بدون جذب، مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مشخص‌ترین روش‌ها که در این مقاله نیز به کار گرفته شده است، استفاده از لایه بافر با شکاف نواری بزرگ‌تر و ضخامت کمتر است، که این امر باعث کاهش منطقه‌ای که مانع رسیدن نور به سلول می‌شود، می‌باشد و در نتیجه بازده را افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از تأثیر تغییر ضخامت لایه بافر بر کمیت‌های اصلی سلول در پنج ساختار با پنج لایه بافر مختلف در شکل‌های ۸ تا ۱۱ با یکدیگر مقایسه شدند. یک سلول خورشیدی در ساده‌ترین حالت یک پیوند p-n است که مشخصه جریان-ولتاژ آن به ناحیه چهارم منتقل شده است، به



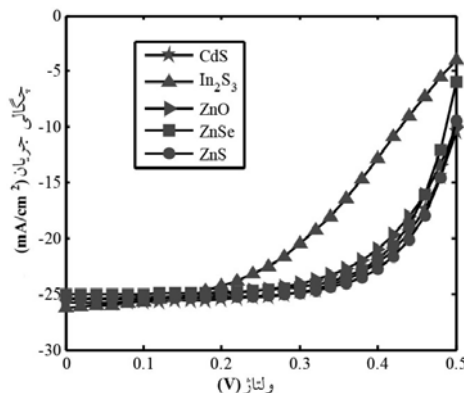
شکل ۱۱. منحنی بازده سلول خورشیدی بر حسب ضخامت برای لایه‌های بافر مختلف.

همان گونه که در شکل ۱۰، مشاهده می‌گردد، در  $In_2S_3$  برخلاف آن چه در جریان و ولتاژ مشاهده کردیم، مقدار بسیار کمی دارد که این امر ناشی از ضریب ایده‌آل ( $n$ ) است، که این هر چه مقدار ضریب در سلول بیشتر باشد مقدار FF کاهش می‌یابد. با توجه به این که در سلول خورشیدی با  $In_2S_3$  ضریب ایده‌آل بالاست، مقدار FF کم است. نکته دیگری که مشاهده می‌گردد، مطابق با آن چه انتظار داشتیم ضخامت تأثیر زیادی بر FF ندارد، زیرا این کمیت متأثر از فرآیند ساخت و مقاومت سری و موازی سلول است.

دارد نمی‌تواند یک بافر مناسب برای سلول خورشیدی CdTe باشد، اما ZnS به عنوان یک ماده مناسب برای لایه بافر سلول خورشیدی به خاطر ماهیت سمی بودن ماده CdS توصیه می‌شود، همچنین دارای یک بازدهی نزدیک به CdS است. ZnO و ZnSe نیز می‌توانند مواد مناسبی برای لایه بافر باشند.

## ۵. نتیجه‌گیری

نرم‌افزار SCAPS در شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی CdTe که تحت طیف AM1.5 عمل می‌کنند، مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌سازی سلول خورشیدی و بررسی شبیه‌سازی دقیق روی سلول‌های لایه نازک CdTe تک سلولی با لایه‌های بافر مختلف انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که  $\text{In}_2\text{S}_3$  نسبت به دیگر لایه‌ها ولتاژ و جریان بالاتری دارد ولی FF آن نسبت به دیگر لایه‌ها به شدت کاهش یافته است، به همین خاطر بازدهی پایین‌تری نسبت به دیگر لایه‌ها دارد. در بین این لایه‌های بافر، ZnS می‌تواند به عنوان یک جایگزین برای لایه بافر CdS با بازدهی بالا قرار بگیرد. همچنین ضخامت‌های متفاوت از لایه‌های بافر مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و مشاهده شد که ضخامت لایه بافر تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سلول خورشیدی به ویژه جریان و ولتاژ می‌گذارد. با توجه به سمی بودن CdS، استفاده از ZnS به جای آن می‌تواند در حفظ محیط زیست اثر مطلوب‌تری داشته باشد.



شکل ۱۲. مقایسه منحنی J-V سلول خورشیدی برای لایه‌های بافر مختلف.

این معنی که به بار توان تحویل می‌دهد. جریان اتصال کوتاه سلول برابر با حامل‌های تولید شده نوری هستند که توسط میدان جداسازی و به ترمینال‌های خارجی منتقل شده‌اند. اما با توجه به بازترکیب‌های موجود در قطعه این مقدار همواره از حامل‌های نوری تولید شده کمتر است. در اینجا نیز منحنی J-V این ساختارها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است، که ضخامت لایه بافر در اینجا برای تمام مواد ۲۵ نانومتر می‌باشد. میزان بازدهی برای لایه‌های CdS،  $\text{In}_2\text{S}_3$ ، ZnO، ZnSe، ZnS به ترتیب برابر با ۸٫۹۵، ۶٫۲۳، ۸٫۴، ۸٫۸۱، ۹٫۰۷ است، که ZnS دارای بیشترین مقدار بازدهی به دلیل دارا بودن شکاف نواری بزرگ‌تر و  $\text{In}_2\text{S}_3$  دارای کمترین مقدار بازدهی است. با توجه به نتایج به دست آمده و با توجه شکل ۱۲، می‌توان گفت که  $\text{In}_2\text{S}_3$  به خاطر بازدهی کم و خمیدگی که در نمودار J-V

## مراجع

۱. ع بهجت، ف جعفری ندوشن، ع خوشرو، و م قشنی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۴، ۴ (۱۳۹۳) ۳۶۱.
۲. Z Anajafi and M Marandi, *Iranian Journal of Physics Research* **16**, 2 (2016) 173.
۳. S M Sze and Kwok K ng, "Physics of Semiconductor Devices", 3rd edition. Wiley, New York (2007).
۴. I F Fauzi, M Mohammad Shahimin, and M Mazalan, "Simulation of Cadmium Telluride Solar Cells Structure", Proceeding of 2010 IEEE Student Conference on Research and Development (2010) 392.
۵. M A Mannan, M S Adjan, and M Z Kabir, *Solid State Electronics* **63** (2011) 49.
۶. A Cimaroni, N Paudel, B Paquin, D Swanson, and Y Yan, "Effects of Oxygen Plasma Treatment on the Performance of CdTe Thin-Film Solar Cells", IEEE In Photovoltaic Specialist Conference (2015).
۷. S Khosroabadi, S H Keshmiri, *Optics express* **22**, 103 (2014) 921.
۸. S Benabbas, Z Rouabah, N Bouarissa and N Chelali, *Optik-International Journal for Light and Electron*



- Hammond, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **136** (2015) 213.
17. D E Swanson, J R Sites, and W S Sampath, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **159** (2017) 389.
18. J D Poplawsky, W Guo, N Paudel, A Ng, K More, D Leonard, and Y Yan, *Nature Communications* **7** (2016) 12537.
19. J M Kephart, J W McCamy, Z Ma, A Ganjoo, F M Alamgir, and W S Sampath, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **157** (2016) 266.
20. C A Wolden, A Abbas, J Li, D R Diercks, D M Meysing, T R Ohno, and J M Walls, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **147** (2016) 203.
21. A L Fahrenbruch, "Exploring Back Contact Technology to Increase CdS/CdTe Solar Cell Efficiency", MRS Online Proceedings Library Archive (2007) 1012.
22. M Moradi, R Teimouri, M Saadat, and M Zahedifar, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* **136** (2017) 222.
- Optics* **127**, 15 (2016) 6210.
9. H T Masood, K Shen, Q Li, D Xiao and D Wang, *IEEE Journal of Photovoltaics* **7**, 4 (2017) 1124.
10. B Maniscalco, A Abbas, J W Bowers, P M Kaminski, K Bass, G West, and J M Walls, *Thin Solid Films* **582** (2015) 115.
11. P M Kaminski, F Lisco, and J M Walls, *IEEE Journal of Photovoltaics* **4**, 1 (2014) 452.
12. D Xiao, X Li, X, D Wang, Q Li, K Shen, and D Wang, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **169**, 18 (2017) 61.
13. F Bittau, A Abbas, K L Barth, J W Bowers, and J M Walls, *Thin Solid Films* **633** (2017) 92.
14. I Rimmaudo, A Salavei, E Artegiani, D Menossi, M Giarola, G Mariotto, and A Romeo, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **162** (2017) 127.
15. C A Wolden, A Abbas, J Li, D R Diercks, D M Meysing, T R Ohno, and J M Walls, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **147** (2016) 203.
16. S L Rugen-Hankey, A J Clayton, V Barrioz, G Kartopu, S J C Irvine, S J D McGettrick, and D