



مقاله کامل پژوهشی

مقایسه خواص الکتریکی و اپتیکی لایه‌های نازک نانوساختاری  $\text{TeO}_2$  قبل و بعد از تابش گاما

توکل توحیدی\*

استادیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور، بناب، آذربایجان شرقی، ایران

**چکیده** دی‌اکسید تلوریم ( $\text{TeO}_2$ )، یکی از نیمه‌رساناهای مهم است که دارای خاصیت صوتی-اپتیکی بالا و پایداری شیمیایی و مکانیکی خوبی بوده و در دو فاز بی‌شکل و بلوری، برای مطالعات پایه و انواع کاربردها در فناوری، از جمله استفاده در قطعات اپتیکی، آشکارسازهای تابش گاما و حسگرهای گازی مناسب است. در این پژوهش، پس از تهیه لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$ ، به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی در خلأ، در سه ضخامت مختلف، تأثیر تابش پرتو گاما در محدوده ۴۰-۱۰ Gy و بازپخت حرارتی بر خواص نمونه‌ها، مطالعه و بررسی شد. نتایج میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)، تشکیل لایه‌ای با سطح یکنواخت را نشان داد. تحلیل نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که ساختار لایه نازک  $\text{TeO}_2$ ، قبل از بازپخت، به صورت بی‌شکل است، ولی بعد از بازپخت، در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، به صورت بلوری است. شدت جذب نوری، بعد از بازپخت و بعد از تابش گاما، افزایش، ولی شکاف انرژی کاهش یافت. جریان الکتریکی نمونه‌ها، با افزایش ضخامت لایه‌ها، دز پرتو گاما و بعد از بازپخت، افزایش یافت.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰

کلیدواژه‌ها:

دی‌اکسید تلوریم،

لایه نازک،

تابش گاما،

خواص اپتیکی،

خواص الکتریکی

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.254430.1137>URL: [https://www.jamt.ir/article\\_126403.html](https://www.jamt.ir/article_126403.html)

## Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 2, (Summer 2021), 71-82

Comparison of Optical and Electrical Properties of  $\text{TeO}_2$  Nanostructure Thin Films Before and After Gamma Radiation

Tavakkol Tohidi \*

Assistant Professor, Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Northwest Research Complex, Bonab, East Azerbaijan, Iran

## Paper History:

Received: 2020-11-04

Revised in revised form: 2020-12-31

Accepted: 2021-10-02

## Keywords:

 $\text{TeO}_2$ ,

Thin Film,

Gamma Irradiation,

Optical Properties,

Electrical Properties

**Abstract** Tellurium dioxide ( $\text{TeO}_2$ ) is an important semiconductor, which it has high acousto-optic figure of merit, chemical stability and mechanical durability and both in its crystalline and amorphous forms, making it suitable for theoretical studies and technological applications such as optical devices,  $\gamma$ -ray detectors, and gas sensors. In this work, the  $\text{TeO}_2$  thin film with three different thicknesses was prepared by vacuum thermal evaporation method. The effect of gamma irradiation in the range of 10-40 Gy and also the effect of thermal annealing on properties of  $\text{TeO}_2$  thin films were investigated. Scanning Electron Microscopy (SEM) results showed the formation of the film with smooth surface. X-Ray Diffraction (XRD) analysis were revealed that the as-deposited films were amorphous but after annealing at 400 °C, the crystalline phase of the samples occurred. The optical absorbance after annealing and gamma radiation was increased but the band

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، آذربایجان شرقی، بناب، مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، تلفن: ۰۴۱-۳۷۷۸۰۲۰۴،

دورنگار: ۰۴۱-۳۷۷۸۰۲۰۵

پیام نگار: [ttohidi@aeoi.org.ir](mailto:ttohidi@aeoi.org.ir)

Please cite this article as: Tohidi, T., "Comparison of optical and electrical properties of  $\text{TeO}_2$  nanostructure thin films before and after gamma radiation", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 2, (2021), 71-82. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.254430.1137>).



gap decreased. The electrical current of samples was increased with increasing of films thickness, gamma dose and also after annealing.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.254430.1137>

URL: [https://www.jamt.ir/article\\_126403.html](https://www.jamt.ir/article_126403.html)

## ۱- مقدمه

باتوجه به پیشرفت روزافزون علوم هسته‌ای و پرتودهی در سال‌های اخیر و نیز کاربرد چشمگیر این سیستم‌ها در انواع زمینه‌های علمی و صنعتی در جهان، رعایت اصول ایمنی و حفاظت در برابر پرتو، امری ضروری و حیاتی است. از جمله این پرتوهای بسیار مفید و درعین حال خطرناک برای انسان، پرتو گاما است. امروزه، پرتودهی گاما، در حوزه‌های مختلف، مانند صنعت، پزشکی، نظامی و پژوهشی، کاربرد چشمگیری پیدا کرده است. یکی از روش‌های آشکارسازی پرتو گاما، آشکارسازی به وسیله حسگرهاست. از این رو، مهم است که حسگرهایی ساخته شوند که بتوانند با آشکارسازی آنی، در مواقع وجود پرتو گاما در محیط، به سرعت و فوری علامت هشدار تولید کنند. در حال حاضر، گونه‌های مختلفی از تابش سنج‌های پرتوی وجود دارند که در اصول فیزیکی آشکارسازی و مواد مورد استفاده، با یکدیگر تفاوت دارند و معمولاً هر کدام برای کاربرد خاصی طراحی شده‌اند.

یکی از این موارد، فناوری لایه‌های نازک و ضخیم است که علاوه بر کاربردهای مختلفی نظیر ساخت انواع قطعات الکترونیک، حافظه‌های خواندنی-نوشتنی، کاربردهای نظامی، سلول‌های خورشیدی، ارتباطات و پزشکی [۱ و ۲]، برای توسعه حسگرهای تابشی نیز استفاده شده است [۳ و ۴]. توجه بیشتر به رفتار مواد دوبعدی، مثل لایه‌های نازک و مفید بودن ویژگی‌های آن‌ها، باعث شده از نظر علمی و نیز فناوری، به لایه‌های نازک توجه ویژه‌ای شود. از جمله لایه‌های نازک، اکسیدهای فلزی هستند که در کاربردهای تخصصی مختلف، نظیر پوشش‌دهی به عنوان کاتالیست<sup>۲</sup>، الکتروشیمی با هدف بهبود عملکرد الکتروشیمیایی مواد مورد استفاده در باتری‌های لیتیومی، فیبرهای نوری و حسگرها استفاده می‌شوند. از مهم‌ترین اکسیدهای فلزی می‌توان به  $\text{TeO}_2$  و  $\text{SnO}_2$  اشاره کرد. اکسیدهای فلزی، باتوجه به خواص مختلفشان و برحسب

حساسیتشان به تابش گاما و ناحیه دُز<sup>۳</sup> کاری، برای کنترل دُز تابش استفاده می‌شوند [۵].

ویژگی‌های اکسیدهای فلزی، مستقیم و غیرمستقیم، با حضور نقص‌ها، به‌ویژه تپی‌جاهای اکسیژن<sup>۴</sup>، ارتباط دارد. این نقایص، ویژگی‌های اپتیکی، الکترونیکی و تراپدی مواد را تعیین کرده و معمولاً بر خواص شیمیایی سطح آن غلبه می‌کند. تپی‌جاهای اکسیژن، به‌طور طبیعی، در هر اکسیدی، در قالب نقایص فرنکل<sup>۵</sup> یا شاتکی<sup>۶</sup> ظاهر می‌شوند و غلظت آن‌ها می‌تواند به روش‌های مختلف افزایش یا کاهش یابد [۴]. تپی‌جاهای اکسیژن، به مراکز رنگی یا مراکز F (برگرفته از Farbe، کلمه آلمانی به معنی رنگ) نیز معروف‌اند. اگر تپی‌جا در سطح، جای‌گزیده باشد، زیرنویس s اضافه و به صورت  $F_s$  نوشته می‌شود.

عقیده بر این است که تابش یون‌ساز، نقایص ساختاری ایجاد کرده و چگالی آن در معرض پرتوهای گاما تغییر می‌کند [۶]. انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک الکترون-حفره، نسبتاً کم است (مثلاً ۱۸ الکترون‌ولت برای  $\text{SiO}_2$ ). در مدل ارائه شده، برای مرکز رنگی، فرض می‌شود که میزان آسیب تابشی، به دلیل بازیابی آسیب، باید به آهنگ دُز وابسته باشد. زمانی که مراکز رنگی تحت پرتودهی ایجاد می‌شوند، ممکن است حتی در دمای اتاق نیز از بین بروند. در حین پرتودهی، خلق و فنای هم‌زمان وجود دارد. چگالی مرکز رنگی، در میزانی معین که به آهنگ دُز اعمالی وابسته است، به حالت تعادل خواهد رسید. ثابت‌های خلق و فنا را می‌توان، با به‌کارگیری داده‌های تجربی حاصل از آهنگ دُز معین، تعیین کرد و سپس، برای پیش‌بینی رفتار همان نمونه، تحت آهنگ‌های دُز مختلف به‌کار برد [۷].

دی‌اکسید تلوریم ( $\text{TeO}_2$ )، یک اکسید فلزی چندمنظوره با شکاف انرژی عریض، در حدود ۳/۵ الکترون‌ولت و یکی از مواد مهم صوتی-اپتیکی و الکترواپتیکی با انواع ویژگی‌های مطلوب شامل رفتار کشسانی، ضریب شکست بالا و کیفیت

<sup>3</sup> Dose

<sup>4</sup> Oxygen Vacancies

<sup>5</sup> Frenkel Defect

<sup>6</sup> Schottky Defect

<sup>1</sup> Dosimeter

<sup>2</sup> Catalyst

و ۲۱].

در این کار، لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$ ، به روش تبخیر حرارتی، در سه ضخامت مختلف، تهیه شدند و تأثیر پرتو گاما و بازپخت حرارتی بر خواص الکتریکی و اپتیکی آن‌ها مطالعه شد. همچنین، برای اولین بار، تأثیر پرتو گاما بر لایه‌ها، بعد از بازپخت، بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

پودر خالص  $\text{TeO}_2$  با خلوص ۹۹/۹۹۹۵ درصد، ساخت شرکت آلدریج<sup>۷</sup>، به‌عنوان ماده اصلی شیمیایی در ساخت لایه‌های نازک دی‌اکسید تلوریم ( $\text{TeO}_2$ ) استفاده شد. موادی مانند اسید نیتریک (۶۵ درصد)، آب مقطر دو بار تقطیر و استون، در تمیزکردن زیرلایه‌های شیشه‌ای، استفاده شدند.

### ۲-۲- آماده‌سازی زیرلایه‌ها

در این کار، از زیرلایه‌های شیشه‌ای نوع لام‌های تجاری، در ابعاد  $۷۵ \times ۲۵ \times ۱$  میلی‌متر مربع استفاده شد. تمیزی زیرلایه‌ها از موارد بسیار مهم در بهبود کیفیت لایه نازک است؛ زیرا اگر لکه‌ای روی زیرلایه باشد، هسته‌بندی ایجاد نمی‌شود و لایه‌ای تشکیل نخواهد شد. ابتدا، زیرلایه‌ها با مایع ظرف‌شویی، چرب‌زدایی، با آب مقطر، شست‌وشو، به‌مدت ۲۴ ساعت در اسید نیتریک رقیق، غوطه‌ور و در نهایت، با آب مقطر، آب‌کشی شدند و در ظرف حاوی استون به‌مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه تمیزکننده فراصوت<sup>۸</sup> قرار داده و در آخر، با هوای داغ، خشک شدند. پس از خشک شدن، در جعبه نگهداری شیشه‌های لام قرار داده شد و در خشکانه<sup>۹</sup>، برای استفاده‌های بعدی نگهداری شدند. در تمامی مراحل تمیزکاری، از دستکش بدون پرز استفاده شد.

### ۲-۳- روش کار

برای لایه‌نشانی لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$ ، از دستگاه

اپتیکی مناسب است [۸]. باتوجه به اهمیت و کاربردهای مختلف ماده  $\text{TeO}_2$ ، خواص مختلف لایه‌های نازک آن توسط پژوهشگران بررسی شده است. لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$ ، توسط سیسیلیانو<sup>۱</sup> و همکاران [۹]، به روش کندوپاش رادیوفرکانسی<sup>۲</sup>، روی زیرلایه‌های کوارتزی، به‌منظور بررسی خواص حسگری آن در مقایسه با گاز آمونیاک، لایه‌نشانی شد. این گروه، اثر زمان بازپخت حرارتی بر خواص اپتیکی و ساختاری لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$  را نیز بررسی کردند [۱۰] و مشاهده کردند که بعد از ۵ دقیقه زمان بازپخت، لایه نازک  $\text{TeO}_2$ ، ساختار بلوری پیدا کرد. همچنین، بعد از بازپخت، ضریب شکست و گاف انرژی<sup>۳</sup> کاهش یافت.

اثر تابش گاما بر لایه‌های نازک مختلف از جمله  $\text{In}_2\text{O}_3$ ،  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{SnO}_2$ ،  $\text{NiO}$  و  $\text{CeO}_2$  بررسی شده است [۱۱-۱۸]. اخیراً، به ماده  $\text{TeO}_2$ ، هنگام ترکیب با مواد دیگر، به‌عنوان حفاظ پرتو گاما، بسیار توجه شده است [۱۹ و ۲۰]. همچنین، اثر تابش گاما بر خواص مختلف لایه نازک اکسید فلزی  $\text{TeO}_2$ ، به‌صورت کاربرد تابش‌سنج، به‌منظور رسیدن به شرایط مناسب، بررسی شده است. میتی<sup>۴</sup> و همکاران [۲۱]، لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$  را به روش تبخیر حرارتی، در ضخامت‌های ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ نانومتر، تهیه کردند و در محدوده دز ۱۰۰ تا ۴۰۰ گری<sup>۵</sup> ( $\text{Gy}$ )، تحت تابش گاما قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش دز، جریان نیز افزایش می‌یابد. مشخص شد که خواص اپتیکی لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$  تهیه‌شده به روش تبخیر حرارتی با ضخامت ۵۰ نانومتر، حساسیت بالایی به پرتو گاما دارد و مقاومت لایه‌ها با افزایش دز، کاهش می‌یابد [۲۲ و ۲۳]. سودا<sup>۶</sup> و همکاران [۲۴]، لایه نازک  $\text{TeO}_2$  را به روش تبخیر حرارتی در خلأ، با ضخامت ۱۵۰۰ نانومتر تهیه و تحت تابش گاما، خواص اپتیکی آن‌ها، شامل ضریب شکست و ضریب خاموشی را با استفاده از طیف عبوری بررسی کردند. حدود دزهایی که می‌توان با لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$  سنجید، باتوجه به شرایط تهیه لایه‌ها، متفاوت است و در مراجع مختلف از ۱۰ Gy تا ۵۰۰ Gy تغییر می‌کند [۴، ۱۷

<sup>1</sup> Siciliano

<sup>2</sup> Radio Frequency Sputtering

<sup>3</sup> Band Gap

<sup>4</sup> Maity

<sup>5</sup> Gray

<sup>6</sup> Sudha

<sup>7</sup> Aldrich

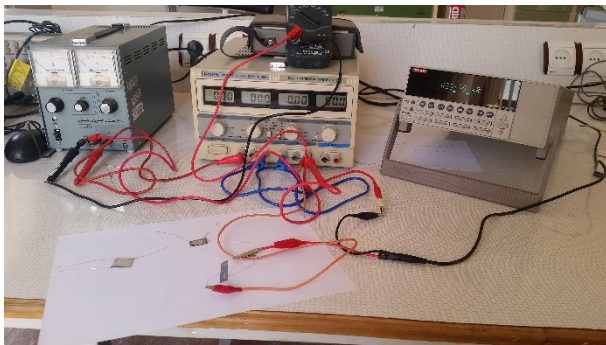
<sup>8</sup> Ultrasonic

<sup>9</sup> Desiccator

الکتریکی اندازه‌گیری شد. ولتاژ مناسب، توسط منابع تغذیه تأمین و جریان، توسط پیکوآمپر متر قرائت شد (قبل از قرائت و برای از بین بردن اثر نور، سطح لایه پوشانده شد). شکل ۲، مدار مربوطه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصویر نمونه‌های  $\text{TeO}_2$  لایه‌نشانی شده روی زیرلایه‌های شیشه‌ای با ضخامت‌های مختلف و اتصال الکتریکی انجام شده



شکل ۲. تصویر مدار اندازه‌گیری جریان الکتریکی نمونه‌های  $\text{TeO}_2$

## ۲-۴- دستگاه‌ها

برای تمیزکاری زیرلایه‌ها و در طول مراحل مختلف کار، از دستگاه تمیزکننده فراصوت استفاده شد. به منظور بازپخت کردن و خشک کردن نمونه‌ها، از کوره مافل و خشک‌کن الکتریکی<sup>۲</sup> استفاده شد. برای مطالعه سطح لایه‌ها و تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup> (SEM)، از دستگاه SEM مدل Tescan- MIRA3 FEG ساخت کشور چک و مدل EVD18-Ziess ساخت آلمان مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۴</sup> (EDX)، استفاده شد. برای مطالعات جذبی و عبوری، از طیف‌نورسنج<sup>۵</sup> مدل Perkin

لایه‌نشانی آزمایشگاهی موجود در مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور، ساخت جهاد دانشگاهی شریف، استفاده شده است. این دستگاه، شامل سیستم‌های لایه‌نشانی با پرتو الکترونی، کندوپاش DC و بوته مقاومتی است که در این کار، از تبخیر حرارتی با بوته مقاومتی برای لایه‌نشانی استفاده شد.

زیرلایه‌های تمیز، در جایگاه مخصوص نگه‌دارنده زیرلایه در دستگاه لایه‌نشانی و پودر  $\text{TeO}_2$ ، در بوته تنگستنی قرار داده شد. با عبور جریان برق از بوته، پودر گرم شد و شروع به تبخیر کرد و لایه‌نشانی انجام شد. با تغییر زمان لایه‌نشانی، سه نوع نمونه در ضخامت‌های مختلف به دست آمد. با جریان عبوری ۵۰-۴۵ آمپر از بوته، ولتاژ اعمالی ۲۰-۱۵ ولت، نرخ لایه‌نشانی ۰/۵ انگستروم در ثانیه و در زمان‌های مختلف، لایه‌نشانی روی زیرلایه‌های شیشه‌ای که در فاصله ۳۷ سانتی‌متری از بوته قرار داشتند انجام گرفت و نمونه‌هایی با ضخامت‌هایی حدود ۹۰، ۱۴۰ و ۲۳۰ نانومتر ساخته شد. ضخامت نمونه‌ها با ضخامت‌سنج کوارتزی که روی دستگاه لایه‌نشانی وجود دارد، تعیین شد. فاصله بوته تا ضخامت‌سنج کوارتزی، در هر سه حالت، حدود ۱۸/۵ سانتی‌متر، دمای زیرلایه، ۱۰۰ درجه سلسیوس و خلأ دستگاه لایه‌نشانی، حین لایه‌نشانی، حدود  $10^{-5} \times 5$  میلی‌بار بود.

تعدادی از نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در کوره مافل<sup>۱</sup> بازپخت شدند. نمونه‌های قبل و بعد از بازپخت، در دُز معین، در سیستم سامانه پرتوهی چندمنظوره مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور، در معرض تابش پرتو گاما قرار گرفتند. نمونه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر قبل از بازپخت، علاوه بر تابش با دُز ۲۰ گری، در معرض تابش گاما با دزهای ۱۰، ۳۰ و ۴۰ گری نیز قرار گرفت.

به منظور اندازه‌گیری خواص الکتریکی، دو لایه مستطیل‌شکل از آلومینیوم با ضخامت حدود ۱۷۰ نانومتر و با فاصله جدایی ۳ میلی‌متر، توسط دستگاه لایه‌نشانی با روش پرتو الکترونی روی لایه نازک  $\text{TeO}_2$ ، به عنوان اتصال الکتریکی، لایه‌نشانی شدند و سیم نازک مسی، توسط چسب نقره، روی لایه آلومینیومی در دو طرف چسبانده شد (شکل ۱).

ویژگی جریان-ولتاژ، با قراردادن نمونه‌ها در یک مدار

<sup>۲</sup> Electric Oven

<sup>۳</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

<sup>۴</sup> Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

<sup>۵</sup> Spectrophotometer

<sup>۱</sup> Muffle Furnace

### ۳-۲- XRD

از متداول‌ترین روش‌های مطالعه ساختار نمونه‌ها، روش XRD است. اندازه دانه‌های بلوری را نیز می‌توان با استفاده از داده‌های طیف XRD و از فرمول شرر<sup>۲</sup> تخمین زد.

$$D = 0.9\lambda / \beta_{2\theta} \cos\theta \quad (1)$$

در این فرمول،  $\lambda$  طول موج پرتو X مورد استفاده و  $\beta_{2\theta}$  پهنای پیک در نصف بیشینه شدت قله پراش بر حسب رادیان است.

شکل ۴ (الف)، XRD لایه نازک نانوساختاری  $\text{TeO}_2$  به ضخامت ۲۳۰ نانومتر را بلافاصله پس از لایه‌نشانی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل بی‌شکل بودن لایه نازک  $\text{TeO}_2$  قبل از بازیخت، هیچ‌گونه قله مشخصی در XRD وجود ندارد. شکل ۴ (ب)، XRD لایه نازک نانوساختاری  $\text{TeO}_2$  به ضخامت ۲۳۰ نانومتر را بعد از بازیخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت نشان می‌دهد. باتوجه به شکل، مشاهده می‌شود که تعداد زیادی قله، بعد از بازیخت، تشکیل شده‌اند که نشان‌دهنده بلوری شدن ساختار لایه نازک  $\text{TeO}_2$  بعد از بازیخت است. قله‌های مربوط به ساختار بلوری چهارگوشه‌ای<sup>۳</sup>  $\text{TeO}_2$ ، براساس کارت استاندارد شماره ۴۲-۱۳۶۵ و قله‌های مربوط به ساختار بلوری راست‌لوزی<sup>۴</sup>  $\text{TeO}_2$ ، مطابق کارت استاندارد شماره ۰۹-۰۴۳۳ هستند [۲۵]. در اینجا، فاز چهارگوشه‌ای، در مقایسه با فاز راست‌لوزی، فاز غالب است. با استفاده از رابطه شرر، اندازه دانه‌های این لایه، برای صفحه (۱۰۲)، حدود ۵۰ نانومتر محاسبه شد. البته، برای تعیین ساختار بلوری ماده با روش XRD، اندازه معینی از دانه‌های بلوری مورد نیاز است.

### ۳-۳- SEM

شکل ۵، تصویر SEM سطح مقطع<sup>۵</sup> نمونه  $\text{TeO}_2$  را نشان می‌دهد. تشکیل لایه‌ای با ضخامت تقریبی ۲۳۴/۴ نانومتر، روی زیرلایه، در این تصویر مشهود است که با مقدار

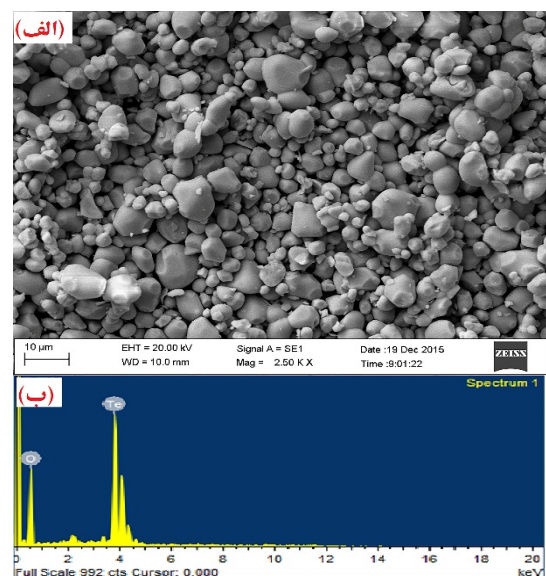
Elmer-Lambda 45 استفاده شد که مجهز به لامپ تنگستن و دوتریم برای ناحیه‌های مرئی و فرابنفش بود و در محدوده طول موج ۱۱۰۰-۱۹۰ نانومتر، جذب را ثبت می‌کرد. الگوی پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD)، توسط پراش سنج پرتو ایکس مدل STADI-MP-STOE، با منبع تابش  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ) تولید شده در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۵ میلی‌آمپر ثبت شد. نمونه‌ها، در محدوده ۸۰-۱۰ درجه، با سرعت رویش ۵ درجه در دقیقه، رویش شدند.

از سامانه پرتودهی چندمنظوره مجتمع پژوهشی شمال‌غرب کشور با چشمه کبالت ۶۰، برای پرتودهی نمونه‌ها در دُرهای تعیین شده، استفاده شد. برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی از پیکوآمپر متر (KEITHLEY 6485 Pico Ammeter) استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریخت‌شناسی و خلوص پودر $\text{TeO}_2$

شکل ۳ (الف)، تصویر SEM پودر  $\text{TeO}_2$  مورد استفاده را نشان می‌دهد که دارای دانه‌هایی بی‌شکل در محدوده اندازه ۲ تا ۵ میکرومتر است. آنالیز EDX این پودر در شکل ۳ (ب)، نشان می‌دهد که عناصر تشکیل‌دهنده آن فقط عناصر تلوریم و اکسیژن هستند و بنا بر مشخصات اولیه ۹۹/۹۹۹۵ درصد خلوص ماده، خالص بودن پودر  $\text{TeO}_2$  کاملاً مشهود است.



شکل ۳. (الف) تصویر SEM پودر  $\text{TeO}_2$  و (ب) آنالیز EDX پودر  $\text{TeO}_2$

<sup>2</sup> Scherer

<sup>3</sup> Tetragonal

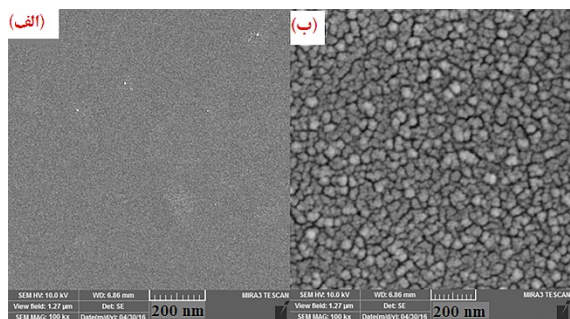
<sup>4</sup> Orthorhombic

<sup>5</sup> Cross Section

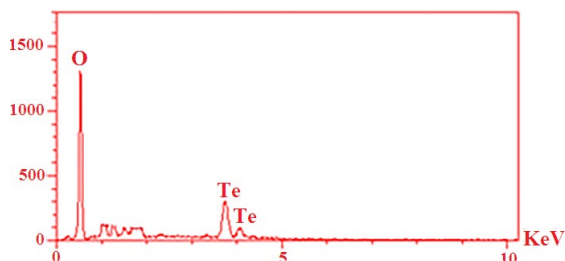
<sup>1</sup> X-Ray Diffraction (XRD)

هم این موضوع را به خوبی تأیید می‌کند. به عبارت دقیق‌تر، با گرمایش طی فرایند بازپخت، هسته‌بندی شکل می‌گیرد و دانه‌ها شروع به رشد می‌کنند و تغییر فاز لایه نازک، از حالت بی‌شکل به حالت بلوری، اتفاق می‌افتد [۱۰].

شکل ۷، آنالیز EDX نمونه‌ای از لایه نازک  $\text{TeO}_2$  با ضخامت ۲۳۰ نانومتر را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود لایه  $\text{TeO}_2$ ، از عناصر Te و O، بدون وجود ناخالصی‌های دیگر، تشکیل یافته است. درصد وزنی و اتمی عناصر Te و O، به ترتیب، ۵۶/۱۱، ۱۳/۸۲ و ۴۳/۸۹، ۸۶/۱۸ است.



شکل ۶. تصویر دید از بالای سطح لایه نازک  $\text{TeO}_2$  (الف) قبل از بازپخت و (ب) بعد از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس



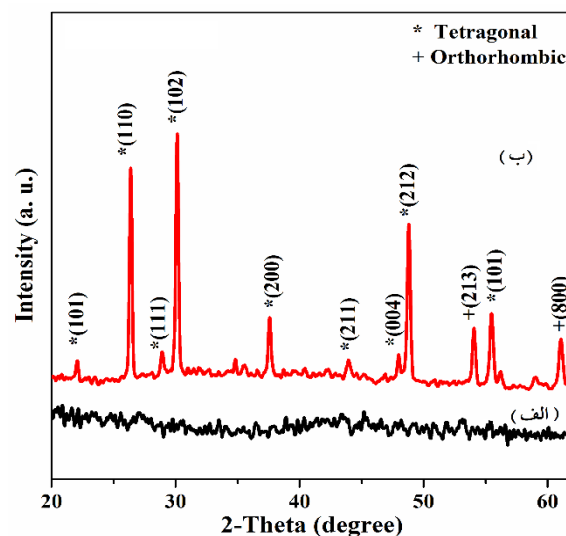
شکل ۷. آنالیز EDX لایه نازک  $\text{TeO}_2$  به ضخامت ۲۳۰ نانومتر

### ۳-۴- خواص اپتیکی

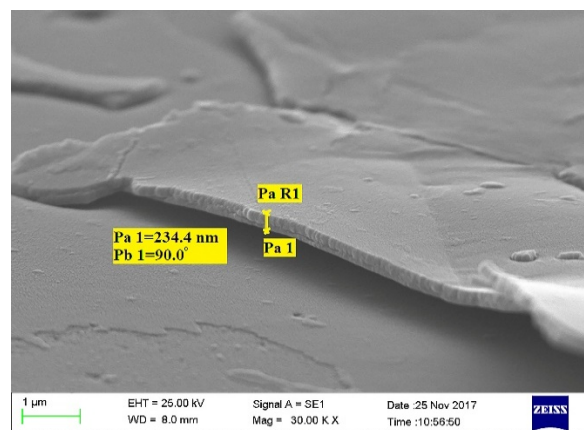
#### ۳-۴-۱- جذب نوری

شکل ۸، جذب نوری لایه نازک  $\text{TeO}_2$  به ضخامت‌های مختلف را قبل از بازپخت و بعد از تابش در دُز ۲۰ گری، در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. میزان جذب در ناحیه طول موج‌های بالا، کم است؛ ولی هرچه به سمت طول موج‌های کوتاه می‌رویم، مقدار آن به آرامی افزایش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود شدت جذب، با افزایش ضخامت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت، اندازه

اندازه‌گیری شده، به وسیله ضخامت‌سنج دستگاه لایه‌نشانی، اختلاف کمی دارد.



شکل ۴. طیف XRD لایه نازک  $\text{TeO}_2$  (الف) قبل از بازپخت و (ب) بعد از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت

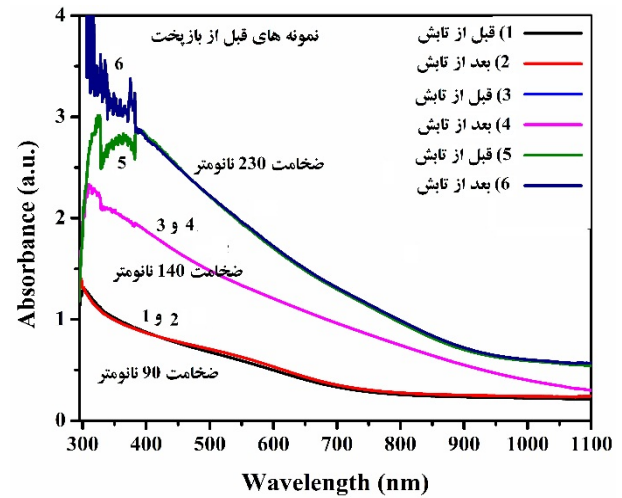


شکل ۵. تصویر سطح مقطع لایه نازک  $\text{TeO}_2$

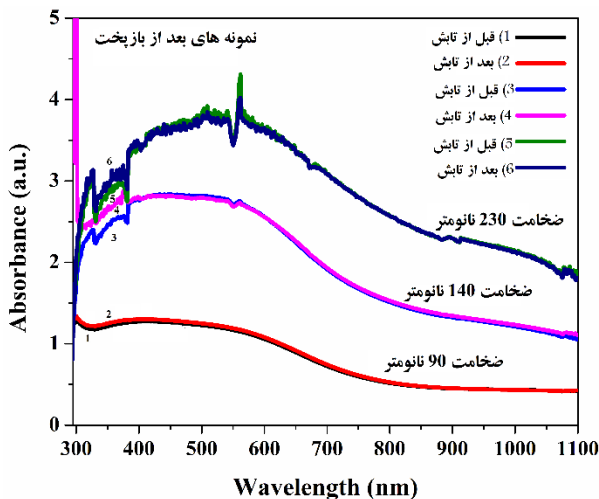
شکل ۶، تصویر SEM دید از بالای سطح لایه نازک  $\text{TeO}_2$  به ضخامت ۲۳۰ نانومتر را در دو حالت قبل و بعد از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود لایه  $\text{TeO}_2$  قبل از بازپخت (شکل ۶ (الف))، ریخت‌شناسی پیوسته، صاف، بی‌شکل و بدون دانه‌های بلوری دارد. ولی سطح لایه  $\text{TeO}_2$  بعد از بازپخت، به دلیل رشد دانه‌های بلوری در نمونه، دارای مرز بین‌دانه‌ای می‌شود (شکل ۶ (ب)). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بعد از بازپخت، لایه  $\text{TeO}_2$ ، ساختار بلوری پیدا می‌کند. البته، طیف XRD (شکل ۴)

که بعد از بازپخت نمونه‌ها نیز، شدت جذب، به‌طور پیوسته، با افزایش ضخامت، افزایش می‌یابد. در این حالت نیز، بعد از تابش، مقدار جذب تغییر می‌کند که این تغییر، در مقایسه با حالت قبل از بازپخت و به‌دلیل تغییرات ساختاری چشمگیر بعد از بازپخت، بسیار ناچیز است. بنابراین، تابش گاما نمی‌تواند تغییرات محسوسی در ساختار ایجاد کند. با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده می‌شود که بعد از بازپخت، به‌دلیل بلوری شدن لایه‌ها و ایجاد دانه‌های بلوری، میزان جذب افزایش می‌یابد. بعد از بازپخت، در ضخامت‌های بیشتر، رفتاری غیرعادی در طیف جذبی در طول موج ۵۵۰ نانومتر مشاهده می‌شود که به احتمال قوی با نقایص سطحی به‌وجودآمده و تغییر فاز بلوری بعد از بازپخت و همچنین افزایش ناهمواری سطحی با افزایش ضخامت، ارتباط دارد [۳]، ۱۰ و ۲۵].

دانه‌ها بزرگ می‌شود و تعداد حامل‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸. طیف جذب لایه‌های نازک TeO<sub>2</sub> قبل از بازپخت و بعد از تابش در دز ۲۰ گری



شکل ۹. طیف جذب لایه نازک TeO<sub>2</sub> بعد از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و بعد از تابش در دز ۲۰ گری

### ۳-۲-۴- گاف نواری

در حالت بلوری، به‌دلیل تقارن گذار، به‌راحتی می‌توان ساختار نواری و چگالی حالت‌ها را پیدا کرده و گاف نواری را تعریف کرد. اما، در حالت بی‌شکل، تقارن گذاری نداریم و بنابراین، نمی‌توان ساختار نواری و چگالی حالت‌ها و بالطبع گاف انرژی را به‌راحتی محاسبه کرد. در نیمه‌رساناهای بی‌شکل، برای محاسبه گاف انرژی، لبه‌های نواری که در نزدیکی نوار ظرفیت و رسانش جای‌گزیده شده‌اند، مد نظر قرار می‌گیرند.

البته، باتوجه به رابطه ضریب جذب:

$$\alpha = \frac{2.303 A}{d} \quad (2)$$

می‌توان گفت که میزان جذب، (A) با ضخامت لایه (d) رابطه مستقیم دارد. یعنی، با افزایش ضخامت، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که براساس قانون بیر<sup>۱</sup>، میزان جذب (A) به‌صورت:

$$A = \text{Log} \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (3)$$

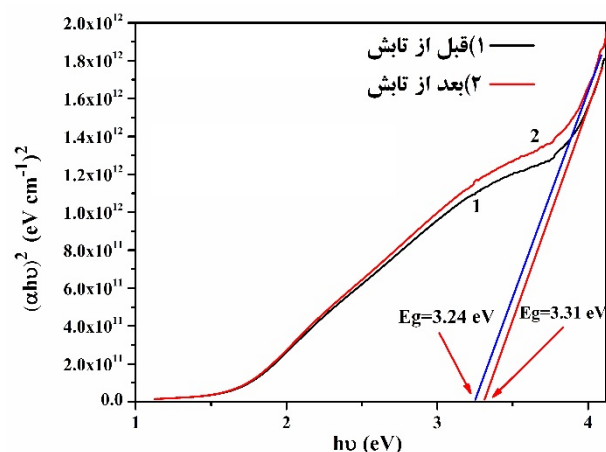
تعریف می‌شود که I<sub>0</sub> شدت نور فرودی و I، شدت نور عبوری است. بعد از تابش با پرتو گاما، مقدار جذب در ناحیه طول موج ۳۵۰-۳۰۰ نانومتر، به‌ویژه برای نمونه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، افزایش می‌یابد و این تغییر در مقدار جذب را می‌توان به تغییر در نوارهای انرژی لایه نازک، بعد از تابش پرتو گاما، مربوط دانست [۱۷].

شکل ۹، جذب نوری لایه نازک TeO<sub>2</sub> با ضخامت‌های مختلف را بعد از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به‌مدت یک ساعت و بعد از تابش در دز ۲۰ گری، در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود

<sup>1</sup> Beer's Law

در شکل ۱۱، گاف انرژی لایه نازک  $\text{TeO}_2$  با ضخامت ۲۳۰ نانومتر که به مدت یک ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس بازیخت شده، قبل از تابش و بعد از تابش در دز ۲۰ گری که با استفاده از طیف جذبی شکل ۹ محاسبه شده، ارائه شده است. گاف انرژی نمونه، قبل از تابش، ۳/۳۱ الکترون‌ولت و بعد از تابش، ۳/۲۴ الکترون‌ولت است. مشاهده می‌شود که در این حالت نیز، گاف انرژی، بعد از تابش، کاهش می‌یابد. همچنین، در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که گاف انرژی نمونه بعد از بازیخت، در مقایسه با نمونه قبل از بازیخت، به دلیل تغییر استوکیومتری و ترکیب شیمیایی فیلم بعد از بلوری شدن، کاهش می‌یابد [۱۰ و ۲۵]. به عبارت دقیق‌تر، بعد از بازیخت، نسبت فلز تلوریم، از اکسیژن بیشتر شده و فاز بلوری، در مقایسه با فاز بی‌شکل، غالب می‌شود [۱۰]. توضیحات بیشتر درباره خواص اپتیکی، در پژوهش قبلی ما ارائه شده است [۲۸].

در مقالات، داده‌های گزارش شده فراوانی در خصوص گاف انرژی لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$  ارائه شده است که به احتمال قوی، با استوکیومتری لایه‌ها ارتباط دارد و خود این امر نیز، به ماده اولیه و سازوکار رشد در روش‌های گوناگون لایه‌نشانی وابسته است [۲۹].



شکل ۱۱. گاف انرژی لایه نازک  $\text{TeO}_2$  با ضخامت ۲۳۰ نانومتر بعد از بازیخت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس (الف) قبل از تابش و (ب) بعد از تابش در دز ۲۰ گری

### ۳-۵- خواص الکتریکی

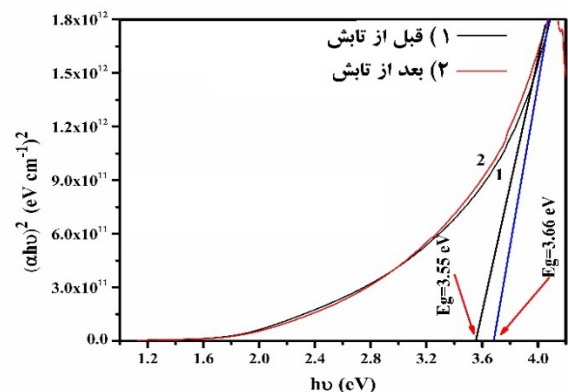
شکل ۱۲، منحنی جریان-ولتاژ لایه نازک  $\text{TeO}_2$  با ضخامت ۹۰ نانومتر را قبل و بعد از تابش در دز ۲۰ گری

با استفاده از رابطه (۲)، می‌توان ضریب جذب را باتوجه به داده‌های تجربی میزان جذب محاسبه کرد که  $d$  ضخامت فیلم و  $A$ ، میزان جذب را نشان می‌دهند. براساس تئوری موت و داویس<sup>۱</sup> [۲۶] یا مدل تاک<sup>۲</sup> [۲۷]، ضریب جذب را می‌توان با کمک رابطه زیر

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^n \text{ cm}^{-1} \quad (4)$$

نیز محاسبه کرد که  $n = \frac{1}{2}$ ، گذارهای مستقیم،  $B$ ، ثابت  $E_g$ ، گاف انرژی را نشان می‌دهند. با رسم  $(\alpha h\nu)^2$  بر حسب  $(h\nu)$  و قراردادن  $\alpha = 0$ ، گاف انرژی نمونه‌ها محاسبه شد. شایان ذکر است که برای گذارهای غیرمستقیم،  $n = 2$  قرار داده می‌شود. البته، رابطه فوق برای هرکدام از حالت‌های گذار مستقیم یا غیر مستقیم خطی باشد آن گذار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹].

در شکل ۱۰، گاف انرژی لایه نازک  $\text{TeO}_2$  با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، قبل از بازیخت و قبل و بعد از تابش در دز ۲۰ گری که با استفاده از طیف جذبی شکل ۸ محاسبه شده، ارائه شده است. گاف انرژی نمونه، قبل از تابش، ۳/۶۶ الکترون‌ولت و بعد از تابش، ۳/۵۵ الکترون‌ولت است. مشاهده می‌شود که گاف انرژی، بعد از تابش، کاهش می‌یابد که می‌توان این کاهش را براساس مدل ساده انتقال بار توضیح داد؛ بر این اساس، ترازهای فرمی، در نمونه‌های بعد از تابش، در مقایسه با نمونه‌های قبل از تابش، بالا می‌آیند و این امر، به کاهش گاف انرژی نوری منجر می‌شود [۵].



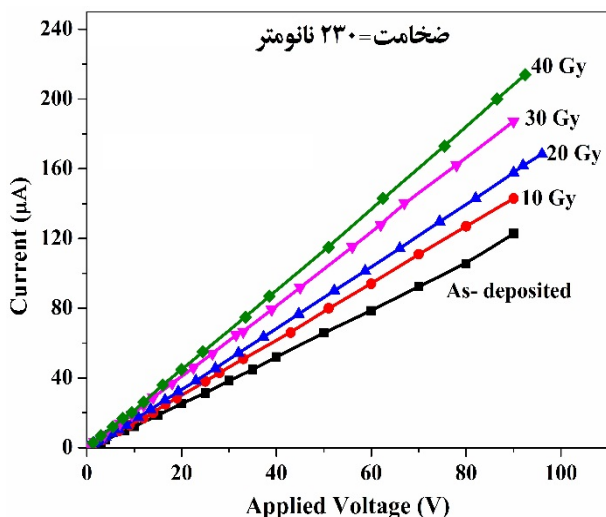
شکل ۱۰. گاف انرژی لایه نازک  $\text{TeO}_2$  با ضخامت ۲۳۰ نانومتر قبل از بازیخت (الف) قبل از تابش و (ب) بعد از تابش در دز ۲۰ گری

<sup>1</sup> Mott and Davis Theory

<sup>2</sup> Tauc Model



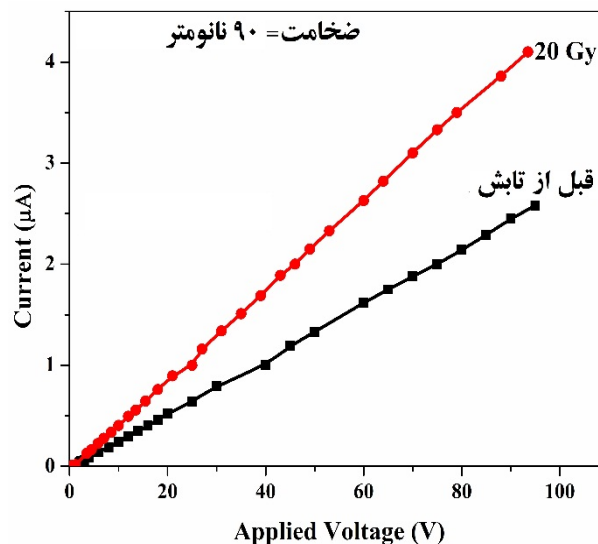
در شکل ۱۴، منحنی ولتاژ-جریان لایه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، قبل و بعد از تابش در دُزهای مختلف، رسم شده است. با مقایسه منحنی‌ها، مشاهده می‌شود که با افزایش دُز تابشی از ۱۰ گری تا ۴۰ گری، جریان نمونه‌ها افزایش می‌یابد. البته، با افزایش ضخامت نیز، جریان افزایش می‌یابد که می‌توان آن را به کاهش مقاومت در اثر افزایش ضخامت نسبت داد. افزایش ضخامت، موجب بزرگ‌شدن اندازه دانه‌ها و اندازه دانه‌ها، باعث افزایش تعداد حامل‌های بار و کاهش مرز دانه‌ها شده و در نتیجه، به افزایش رسانایی و کاهش مقاومت منجر می‌شود. میتی و همکاران [۲۱]، در پژوهش خود، تأیید کردند که افزایش ضخامت لایه نازک  $\text{TeO}_2$  موجب افزایش جریان می‌شود.



شکل ۱۴. منحنی ولتاژ-جریان لایه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، قبل و بعد از تابش در دُزهای مختلف و قبل از بازپخت

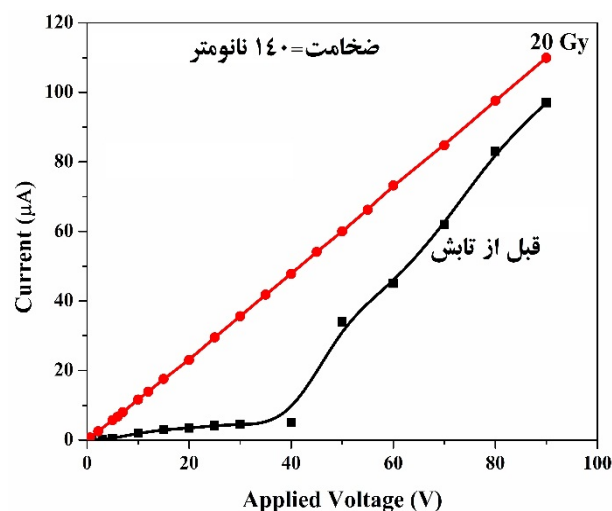
خواص اکسیدهای فلزی، مستقیم یا غیرمستقیم، به حضور نقص‌ها و به‌خصوص تهی‌جاها اکسیژن بستگی دارد. تهی‌جاها اکسیژن، به‌طور طبیعی، در همه اکسیدها، به شکل نقص‌های شاتکی یا فرنکل حضور دارند و تعداد آن‌ها با روش‌های مختلف می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. این باور وجود دارد که تابش‌های یوننده<sup>۱</sup> یا یون‌ساز باعث به‌وجود آمدن نقص‌های ساختاری می‌شود (اثر ترمیمی)<sup>۲</sup> و با قرار گرفتن در معرض تابش گاما، حتی چگالی آن‌ها نیز تغییر می‌کند [۵ و ۳۰].

نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی‌ها، مشاهده می‌شود که دُز تابشی در جریان نمونه‌ها تأثیر دارد و با اعمال تابش، جریان به‌صورت خطی افزایش یافته است.



شکل ۱۲. منحنی ولتاژ-جریان لایه قبل از بازپخت با ضخامت ۹۰ نانومتر قبل و بعد از تابش در دُز ۲۰ گری

در شکل ۱۳، منحنی ولتاژ-جریان لایه با ضخامت ۱۴۰ نانومتر، قبل و بعد از تابش در دُز ۲۰ گری، رسم شده است. با مقایسه منحنی‌ها مشاهده می‌شود که تابش گاما در جریان نمونه‌ها تأثیر دارد و با اعمال تابش، جریان افزایش می‌یابد. همچنین، با مقایسه دو شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه از ۹۰ به ۱۴۰ نانومتر، مقدار جریان افزایش می‌یابد و پس از ۴۰ ولت، نمودار خطی می‌شود.

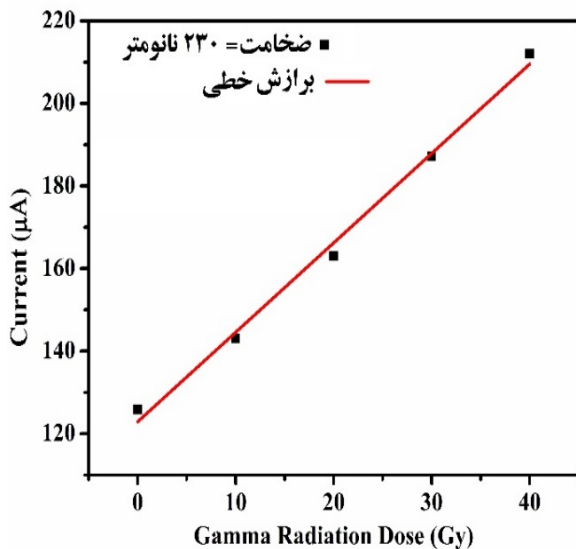


شکل ۱۳. منحنی ولتاژ-جریان لایه قبل از بازپخت با ضخامت ۱۴۰ نانومتر قبل و بعد از تابش در دُز ۲۰ گری

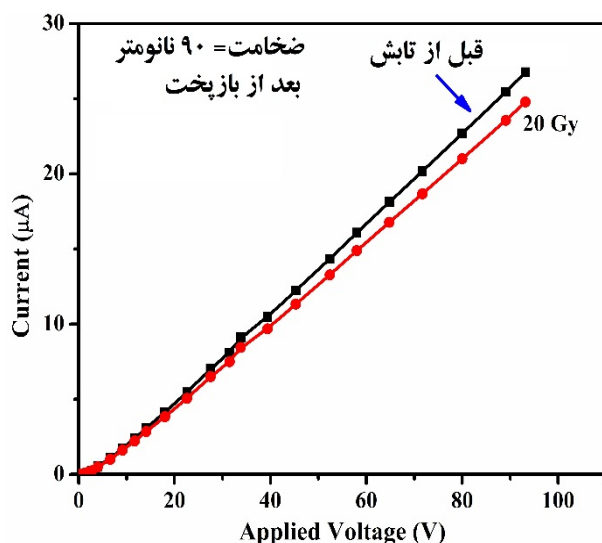
<sup>1</sup> Ionizing Radiation

<sup>2</sup> Healing Effect

مقداری کاهش هم نشان می‌دهد. دلیل این مسئله این است که بعد از بازپخت، تغییر ساختار و مورفولوژی لایه نازک  $\text{TeO}_2$  نسبت به حالتی که در معرض تابش گاما قرار می‌گیرد، زیاد است. بنابراین، بعد از بازپخت، تابش گاما با دز کم، تأثیر چندانی در خواص لایه نخواهد داشت و برای تغییر در خواص لایه نازک بعد از بازپخت، باید از تابش با دز بالا استفاده کرد که می‌تواند به‌عنوان دزیمتر در دزهای بالا مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۵. منحنی جریان بر حسب دز پرتو گاما لایه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر در ولتاژ ثابت ۹۰ ولت



شکل ۱۶. منحنی ولتاژ-جریان لایه بازپخت شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، با ضخامت ۹۰ نانومتر، قبل و بعد از تابش در دز ۲۰ گری

طی لایه‌نشانی فیلم، بعضی از نقص‌های بلوری ذاتی پدید می‌آیند. برهم‌کنش<sup>۱</sup> تابش گاما با فیلم، باعث ایجاد نقص شده و در نتیجه، در ریزساختار فیلم تغییر به وجود می‌آید. در دزهای پایین، فیلم دارای ساختار دانه‌ای یکنواخت، بدون تخلخل بزرگ بوده و تعداد نقص‌ها بعد از تابش (القا شده به علاوه ذاتی باقی مانده)، به دلیل بازترکیب نقص‌ها، کمتر از تعداد نقص‌های ذاتی اولیه است. بازترکیب نقص‌ها، مقاومت فیلم را کاهش می‌دهد و باعث افزایش جریان می‌شود. با افزایش دز تا حد معین، بسته به ضخامت فیلم، مقاومت، کاهش و جریان افزایش می‌یابد [۱۳ و ۲۱].

در شکل ۱۵، منحنی جریان بر حسب دزهای مختلف پرتو گاما، در ولتاژ ثابت ۹۰ ولت، برای نمونه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، به همراه برازش منحنی نشان داده شده است. معادله خط راست با خطای  $0.13552$  به صورت زیر است:

$$I = 2.166 D + 122.88 \quad (5)$$

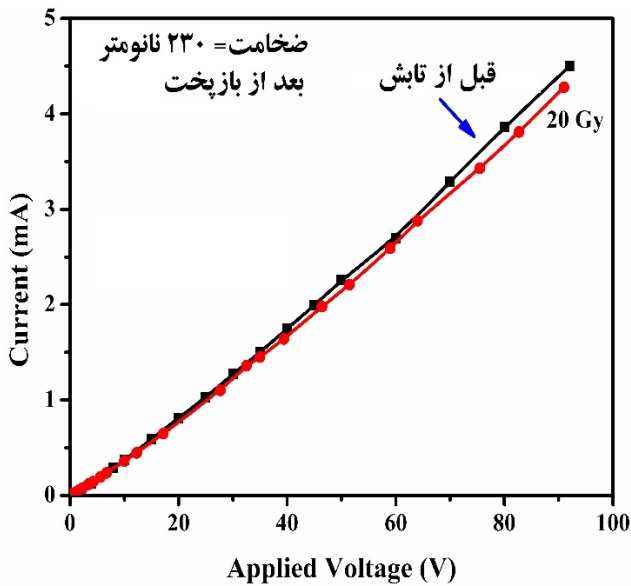
در این رابطه،  $I$ ، جریان بر حسب میکرو آمپر متر و  $D$ ، دز بر حسب گری است. با توجه به این معادله، حساسیت برابر رابطه زیر است که مقدار قابل قبولی است.

$$S = \frac{\partial I}{\partial D} = 2.166 \left( \frac{\mu A}{Gy} \right) \quad (6)$$

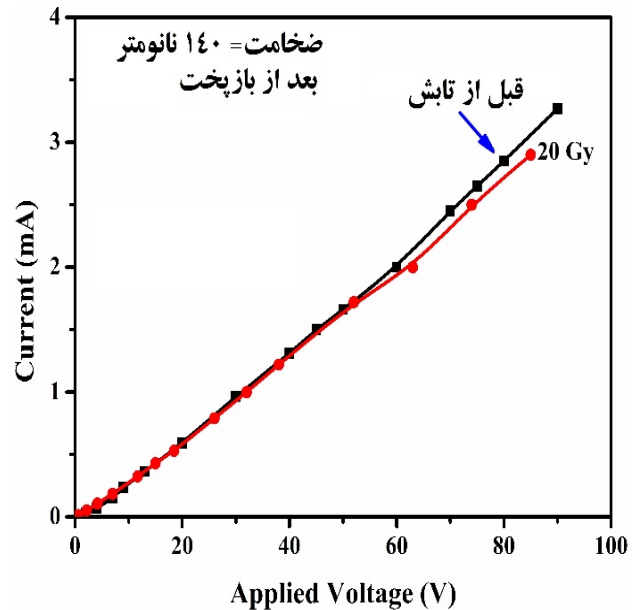
بنابراین، نمونه، با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، مناسب محدوده دز ۱۰ تا ۴۰ گری است.

در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸، منحنی ولتاژ-جریان لایه‌های با ضخامت‌های مختلف، قبل از تابش و بعد از تابش، در دز ۲۰ گری نشان داده شده است؛ البته، این نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، به مدت یک ساعت، در کوره مافل، بازپخت شده‌اند. با مقایسه جریان این نمونه‌ها با نمونه‌های قبل از بازپخت (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴)، مشاهده می‌شود که با بازپخت نمونه‌ها، جریان به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است به طوری که در نمونه‌های با ضخامت‌های ۱۴۰ و ۲۳۰ نانومتر، به حد میلی آمپر رسیده است. در این حالت، با تابش پرتو گاما، تغییر قابل توجهی در جریان مشاهده نمی‌شود و حتی

<sup>1</sup> Interaction



شکل ۱۸. منحنی ولتاژ-جریان لایه بازپخت شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، قبل و بعد از تابش، در دز ۲۰ گری



شکل ۱۷. منحنی ولتاژ-جریان لایه بازپخت شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، با ضخامت ۱۴۰ نانومتر، قبل و بعد از تابش در دز ۲۰ گری

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، لایه‌های نازک  $\text{TeO}_2$ ، به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی در خلأ، با موفقیت تهیه و پس از تابش گاما بررسی شدند. آنالیز EDX لایه  $\text{TeO}_2$ ، عناصر Te و O را بدون وجود ناخالصی‌های دیگر نشان داد. نتایج XRD نشان داد لایه‌های بدون بازپخت، ساختاری بی‌شکل دارند که پس از بازپخت، ساختاری بلوری می‌یابند. ریخت‌شناسی سطح فیلم قبل از بازپخت، صاف، بدون وجود دانه‌های بلوری و بی‌شکل بود؛ اما در نمونه بعد از بازپخت، ساختار بلوری و وجود مرز دانه‌های ناشی از رشد دانه‌های بلوری، آشکار بود. بعد از بازپخت و بعد از تابش پرتو گاما، شدت جذب به‌طور پیوسته، افزایش و گاف انرژی، کاهش یافت. با مقایسه منحنی‌های ولتاژ-جریان، مشاهده شد که افزایش ضخامت لایه‌ها، افزایش دز (در نمونه‌های قبل از بازپخت) و فرایند بازپخت، جریان نمونه‌ها را افزایش داد که این پایه و اساس تابش‌سنجی برای تابش گاما با لایه‌های نازک اکسیدی است. منحنی تغییرات دز نسبت به جریان در نمونه با ضخامت ۲۳۰ نانومتر، خطی بود. از این‌رو، حساسیت دیود، عددی ثابت به‌دست آمد که نشانگر مناسب بودن تابش‌سنجی در محدوده ۱۰ تا ۴۰ گری بود.

#### ۵- سپاسگزاری

نویسنده لازم می‌داند از جناب آقای دکتر یگانه، رئیس محترم مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور که امکانات لازم برای انجام این پژوهش را فراهم کردند و نیز از جناب آقای مهندس مهدی تقوی، مسئول محترم دستگاه لایه‌نشانی که همکاری مفیدی در لایه‌نشانی نمونه‌ها انجام دادند، تقدیر و تشکر کند.

#### مراجع

- Rashidi, M., Tamizifar, M., Boutorabi, S. M. A., "Characterization of nanostructure coatings of Ti-Al-C-N system deposited using plasma assisted chemical vapor deposition", *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 9, No. 1, (2020), 19-31. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2020.106192>
- Nourmohammadi, A., "Synthesis of lead zirconate titanate nanostructured thin films using polyols", *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 8, No. 2, (2019), 69-76. (In Farsi). <https://doi.org/10.30501/jamt.2019.94187>
- Arshak, K., Korostynska, O., *Advanced Materials and Techniques for Radiation Dosimetry*, Artech House, London, (2006). <https://uk.artechhouse.com/Advanced-Materials-and-Techniques-for-Radiation-Dosimetry-P910.aspx>
- Arshak, K., Korostynska, O., "Thin- and thick-film real-time gamma radiation detectors", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 5, No. 4, (2005), 574-580. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.850992>
- Arshak, K., Korostynska, O., "Response of metal oxide thin film structures to radiation", *Materials Science and Engineering B*, Vol. 133, No. 1-3, (2006), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.06.012>
- Phillips, G. W., Readshaw, A. K., Brown, G. O., Weiss, R. G., Guardala, N. A., Price, J. L., Mueller, S. C., Moscovitch, M.,

19. Almatari, M., "Gamma radiation shielding properties of glasses within the TeO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-ZnO system", *Radiochimica Acta*, Vol. 107, No. 6, (2019) 517-522. <https://doi.org/10.1515/ract-2018-3058>
20. Sayyed, M. I., Qashou, S. I., Khattari, Z. Y., "Radiation shielding competence of newly developed TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub> glasses", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 696, (2017), 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.160>
21. Maity, T. K., Sharma, S. L., Chourasiy, G., "The real-time gamma radiation dosimetry with TeO<sub>2</sub> thin films", *Radiation Measurements*, Vol. 47, No. 2, (2012), 145-148. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.11.008>
22. Arshak, K., Korostynska, O., "Effect of gamma radiation onto the properties of TeO<sub>2</sub> thin films", *Microelectronics International*, Vol. 19, No. 3, (2002), 30-34. <https://doi.org/10.1108/13565360210445023>
23. Arshak, K., Korostynska, O., "Gamma radiation-induced changes in the electrical and optical properties of tellurium dioxide thin films", *IEEE Sensors*, Vol. 3, No. 6, (2003), 717-721. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2003.820327>
24. Sudha, A., Maity, T. K., Sharma, S. L., Gupta, A. N., "Gamma irradiation effect on the optical properties of tellurium dioxide films", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 461, (2019), 171-174. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.09.050>
25. Kumar, S., Mansingh, A., "Fabrication and characterization of tetragonal and orthorhombic TeO<sub>2</sub> films", *Proceedings of IEEE 7<sup>th</sup> international symposium on Applications of ferroelectrics*, USA, (6-8 June, 1990), 717-719. <https://doi.org/10.1109/ISAF.1990.200356>
26. Mott, N. F., Davis, E. A., *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, 2<sup>nd</sup> ed., Oxford University Press, New York, (1979). <https://global.oup.com/academic/product/electronic-processes-in-non-crystalline-materials-9780199645336?cc=ro&lang=en&#>
27. Tauc, J., *Amorphous and liquid semiconductors*, Plenum, London and New York, (1974). <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-8705-7>
28. Tohidi, T., "Investigation of gamma irradiation effect on optical properties of TeO<sub>2</sub> films", *Proceeding of Annual Physics Conference of Iran*, Tabriz University, (2019), 441-417. (In Farsi). <https://www.psi.ir/farsi.asp?page=physics98>
29. Dewan, N., Sreenivas, K., Gupta, V., "Comparative study on TeO<sub>2</sub> and TeO<sub>3</sub> thin films for  $\gamma$ -ray sensor application", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147, No. 1, (2008), 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.011>
30. Zhu, R. Y., "Radiation damage in scintillating crystals", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 413, No. 2-3, (1998), 297-311. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00498-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00498-7)
- "Observation of radiation effects on three-dimensional optical random-access-memory materials for use in radiation dosimetry", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 50, No. 5 (1999), 875-881. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(98\)00139-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(98)00139-0)
7. Shpotyuk, O. I., "Amorphous chalcogenide semiconductors for dosimetry of high-energy ionizing radiation", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 46, No. 4-6, (1995), 1279-1282. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(95\)00369-9](https://doi.org/10.1016/0969-806X(95)00369-9)
8. Uchida, N., Ohmachi, Y., "Elastic and photoelastic properties of TeO<sub>2</sub> single crystal", *Journal of Applied Physics*, Vol. 40, No. 12, (1969), 4692-4695. <https://doi.org/10.1063/1.1657275>
9. Siciliano, T., Di Giulio, M., Tepore, M., Filippo, E., Micocci, G., Tepore, A., "Ammonia sensitivity of rf sputtered tellurium oxide thin film", *Sensors and Actuators B*, Vol. 138, No. 2, (2009), 550-555. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.02.068>
10. Siciliano, T., Di Giulio, M., Tepore, M., Filippo, E., Micocci, G., Tepore, A., "Effect of thermal annealing time on optical and structural properties of TeO<sub>2</sub> thin films", *Vacuum*, Vol. 84, No. 7, (2010), 935-939. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.12.017>
11. Mivolil, D. S., Chee, F. P., Rasmidi, R., Alias, A., Salleh, S., Mohd Salleh, K. A., Jalal Bayar, A. M., "Gamma ray and neutron radiation effects on the electrical and structural properties of n-ZnO/p-CuGaO<sub>2</sub> Schottky diode", *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, Vol. 9, No. 4, (2020), 045019. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ab8f19>
12. Akay, D., Karadeniz, S., Birkan Selçuk, A., Bilge Ocak, S., "Effect of gamma-ray irradiation on the electrical characteristics of Al/C<sub>2</sub>H<sub>12</sub>/p-Si nano-structure", *Physica Scripta*, Vol. 93, (2018), 095301. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aad2a7>
13. Sharma, S. L. and Maity, T. K., "Effect of gamma radiation on electrical and optical properties of (TeO<sub>2</sub>)<sub>0.9</sub>(InO<sub>3</sub>)<sub>0.1</sub> thin films", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 34, No. 1, (2011), 61-69. <https://www.ias.ac.in/describe/article/boms/034/01/0061-0069>
14. Abhirami, K. M., Sathyamoorthy, R., Asokan, K., "Structural, optical and electrical properties of gamma irradiated SnO thin films", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 91, (2013), 35-39. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.05.030>
15. Mucka, V., Podlaha, J., Silber, R., "NiO-ThO<sub>2</sub> mixed catalysts in hydrogen peroxide decomposition and influence of ionizing radiation", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 59, No. 5-6 (2000), 467-475. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(00\)00307-8](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(00)00307-8)
16. Arshak, K., Korostynska, O., Fahim, F., "Various structures based on nickel oxide thick films as gamma radiation sensors", *Sensors*, Vol. 3, No. 6, (2003), 176-186. <https://doi.org/10.3390/s30600176>
17. Arshak, K., Korostynska, O., "Gamma radiation dosimetry using tellurium dioxide thin film structures", *Sensors*, Vol. 2, No. 8, (2002), 347-355. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2002.1037155>
18. Arshak, K., Korostynska, O., Molloy, J., Harris, J., "Optical radiation sensing properties of MnO/TeO<sub>2</sub> thin films", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 6, No. 3, (2006), 656-660. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.874016>