

## تأثیر آلاینده سرب بر خواص نوری لایه‌های اکسید ایندیم لایه‌نشانی شده به روش انباشت الکتروشیمیایی

اصغر شکوه‌منش<sup>۱</sup>، فرید جمالی شینی<sup>۲\*</sup>، محسن چراغی‌زاده<sup>۳</sup> و رامین یوسفی<sup>۴</sup>

۱- گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانومواد، گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۴- گروه فیزیک، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجد سلیمان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۰۳/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۰۵/۱۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲

### چکیده

لایه‌های نانوساختار اکسید ایندیم ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) خالص و آلاینده با مقادیر مختلف از سرب، به روش انباشت الکتروشیمیایی لایه‌نشانی شدند. نتایج حاصل از آنالیز الگوی پراش، وجود فاز اکسید ایندیم را در دو فاز بلوری مکعبی و رومبهدرال تایید کردند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهند که مواد رشد داده دارای ابعاد نانومتری بوده و اندازه آنها در محدوده ۸۱-۴۵ nm می‌باشد. طیف نور تابناکی نیز باندهای گسیلی در محدوده طیف مرئی را نشان می‌دهد. طیف جذبی نانوساختارها وجود لبه جذب را در ناحیه فرابنفش نشان داد که با افزودن ناخالصی سرب یک کاهش در شدت جذب مشاهده شد. همچنین انرژی شکاف باند نوری مواد بدست آمده هنگام آرایش با سرب یک کاهش را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوساختارهای اکسید ایندیم، انباشت الکتروشیمیایی، ناخالصی سرب، خواص نوری.

### ۱- مقدمه

باند به‌طور کلی به تفاوت انرژی (با یکای eV) در جایی بین بالای نوار ظرفیت و پایین نوار رسانش در نیم‌رساناها، اشاره دارد (این نوار یا شکاف انرژی در رساناها وجود ندارد). این انرژی در حقیقت انرژی لازم برای آزاد کردن یک الکترون است که در خارجی‌ترین لایه الکترونی قرار دارد. در نیم‌رسانای با پهنای باند مستقیم، نقطه بیشینه نوار ظرفیت و نقطه کمینه نوار هدایت در عدد موج (k) یکسانی رخ می‌دهد، اما در نیم‌رسانای با پهنای باند غیرمستقیم عدد

اکسید ایندیم (Indium Oxide ( $\text{In}_2\text{O}_3$ )) یک ماده نیم‌رسانا با پهنای باند مستقیم ۳/۶ eV و غیرمستقیم ۲/۶ eV می‌باشد که تاکنون برای کاربرد در دیودهای گسیل‌کننده نور [۱]، سلول‌های خورشیدی [۲]، آشکارسازهای گاز [۳]، پوشش‌های ضد بازتاب [۴] و غیره استفاده شده است. در نمودار ساختار باند الکترونیکی جامدها (نظریه نواری)، پهنای

\* عهده‌دار مکاتبات: فرید جمالی شینی

نشانی: اهواز، بلوار گلستان، فلکه فرهنگ شهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، ساختمان علوم پایه ۲

تلفن: ۰۶۱-۳۳۳۴۳۵۶۲، دورنگار: ۰۶۱-۳۳۳۴۳۵۶۲، پست الکترونیکی: faridjamali@iauahvaz.ac.ir

پیک‌های گسیلی کاهش می‌یابد. اما با کاهش دما شدت پیک‌های گسیلی افزایش می‌یابد [۱۴]. لذا بر این اساس انگیزه تاثیر آلاینده سرب بر نانوساختارهای اکسید ایندیم در این کار بوجود آمد. از سوی دیگر نتایج این بررسی‌ها نمایان کرد که تاثیر آلایندگی بر خواص نوری اکسید ایندیم جدید و پر کاربرد می‌باشد. به همین منظور در این کار سعی می‌شود به این سوال پاسخ داده شود که چگونه می‌توان با استفاده از روش انباشت الکتروشیمیایی به ساخت لایه‌های اکسید ایندیم پرداخت و همچنین آرایش چه تاثیری بر خواص نوری آن دارد. لذا هدف بدست آوردن درک مناسبی از تاثیر مواد آلاینده بر خواص ریختی و نوری این لایه‌ها و مقایسه اطلاعات بدست آمده در این خصوص با نتایج دیگران می‌باشد. بر همین اساس در این تحقیق با استفاده از روش لایه‌نشانی انباشت الکتروشیمیایی اقدام به ساخت لایه‌های نانوساختار اکسید ایندیم نموده و با استفاده از آلاینده سرب به مهندسی پهنای باندهای انرژی آن که تاکنون با این روش صورت نگرفته است، پرداخته خواهد شد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- مواد اولیه و روش لایه‌نشانی

رشد لایه‌های اکسید ایندیم در یک سلول انباشت الکتروشیمیایی با سه الکتروود صورت گرفت. محلول الکترولیت شامل ترکیبی از کلرید ایندیم (g ۰/۳۵۳) در cc ۶۰ آب مقطر و آب اکسیژنه (cc ۰/۰۸) در cc ۲۰ آب مقطر حل شده، سپس این دو باهم ترکیب شده و نمونه خالص لایه‌نشانی شد. جهت لایه‌نشانی نمونه‌های آلاییده، کلرید سرب به عنوان منبع عنصر آلاینده با مقادیر g ۰/۰۷۴ یا ۲٪ و g ۰/۱۴۹ یا ۴٪ به صورت جداگانه در cc ۲۰ آب مقطر حل شده و به محلول مشابه شرایط نمونه خالص افزوده شده و لایه‌نشانی صورت گرفت. محلول الکترولیت در حین لایه‌نشانی همواره توسط هیتر استیرر (Stirrer heater) در حال هم خوردن و در دمای °C ۸۵ ثابت نگه داشته می‌شود. اسیدیته (pH) محلول

موج بیشینه نوار هدایت با عدد موج کمینه نوار هدایت تفاوت دارد [۵].

تاکنون روش‌های مختلفی جهت ساخت لایه‌های  $\text{In}_2\text{O}_3$  استفاده شده است که این روش‌ها عبارتند از تبخیر حرارتی [۶]، کندوپاش [۷]، سل-ژل [۸]، اسپری پیرولیز [۹]، انباشت الکتروشیمیایی [۱۰] و غیره. در میان این روش‌ها، روش انباشت الکتروشیمیایی مزایای فراوانی از قبیل، هزینه پایین تجهیزات و مواد اولیه، کنترل زیاد و آسان بر روی پارامترهای رشد و همچنین امکان رشد در ابعاد وسیعی در مقایسه با دیگر روش‌های رشد را ارائه می‌دهد. خواص فیزیکی نانوساختارهای نیم‌رساناها را می‌توان از طریق تغییر در پهنای باندها، تغییر داد. با استفاده از آلاینده‌های مناسب و به مقدار موثر می‌توان به پهنای باندهای مشخصی دست یافت. تاکنون مواد مختلفی با استفاده از روش‌های مختلف برای اکسید ایندیم به عنوان آلاینده استفاده شده است [۱۱-۱۳].

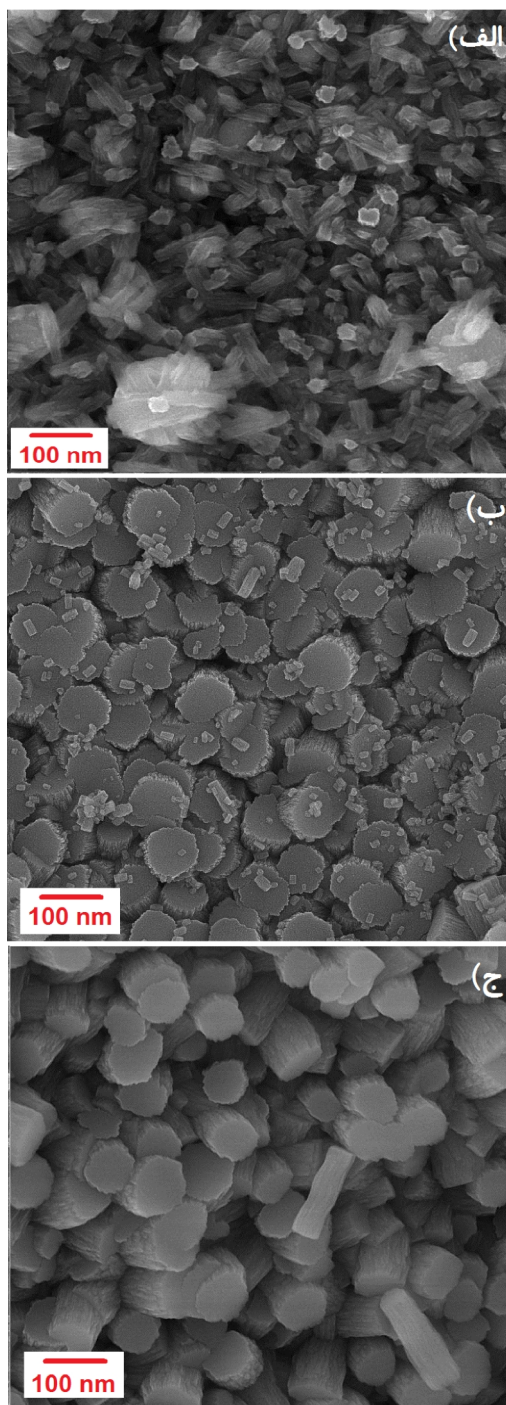
با بررسی از ادبیات تحقیق مشخص گردید که امکان تغییر خواص فیزیکی (ساختاری، ...) از طریق افزودن آلاینده وجود دارد. به‌طور مثال تاکنون دو گزارش از افزودن آلاینده سرب به نانوساختارهای اکسید ایندیم ارائه شده است. در گزارش اول نانوذرات اکسید ایندیم با استفاده از روش سونوشیمیایی توسط منظری و جمالی شینی جهت استفاده به عنوان حسگر گازی، رشد داده شدند [۳]. آنها مشاهده کردند که آلاینده سرب حساسیت و زمان بازیابی حسگر گازی ساخته شده را برای بخارات اتانول بهبود می‌دهد. همچنین نانوذرات از خود انتخاب‌گری مناسبی را نشان دادند. زرواس و همکارانش نانوساختارهای اکسید ایندیم را با استفاده از روش تبخیر حرارتی رشد داده و خواص نوری آن را بررسی کردند. اکسید ایندیم معمولاً گسیل نور تابناکی در محدوده امواج مادون قرمز ندارد، اما در این کار با استفاده از آلاینده سرب و عملیات حرارتی در محدوده °C ۴۰۰-۲۰۰ تحت جو گاز  $\text{H}_2\text{S}$  این پدیده مشاهده شد. همچنین طیف نور تابناکی در دمای اتاق و دماهای پایین‌تر (۱۰ K) نیز مورد بررسی قرار گرفت که مشاهده شد با افزودن درصد آلاینده سرب شدت

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی پراش لایه‌های اکسید ایندیم خالص و آلاییده با مقادیر مختلف از عنصر سرب را نشان می‌دهد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد پیک‌های پراشی حاصله کاملاً با موقعیت پیک‌های اکسید ایندیم توده‌ای (Bulk) و مکعبی (Cubic) (JCPDS Card No.01-074-1990) و رومبوهدرال (Rhombohedral) (JCPDS Card No.01-073-1809) مطابقت دارند و هیچ‌گونه فاز اضافی ناشی از ترکیبات سرب و اکسیژن در آن دیده نمی‌شود. نتایج حاصله نشان داد که ناخالصی سرب فاصله بین صفحات بلوری و شدت پیک‌های پراشی را افزایش و پهنای پیک در نصف شدت (Full width at half of maximum (FWHM)) را کاهش داده است. کاهش FWHM نشان دهنده بهبود کیفیت بلوری نانوساختارهای اکسید ایندیم در پی آلایش با عنصر سرب می‌باشد [۱۵]. اندازه دانه نیز با استفاده از رابطه شرر محاسبه شده است، که نشان دهنده افزایش اندازه دانه در پی آلایش با عنصر سرب است. این افزایش اندازه دانه در نانوساختارهای اکسید ایندیم هنگام آلایش با سرب قبلاً توسط منتظری و جمالی شینی نیز مشاهده و گزارش شده است [۳]. این آلایش همچنین موقعیت پیک‌های پراشی را به سمت زوایای کمتر جابجا کرده است.

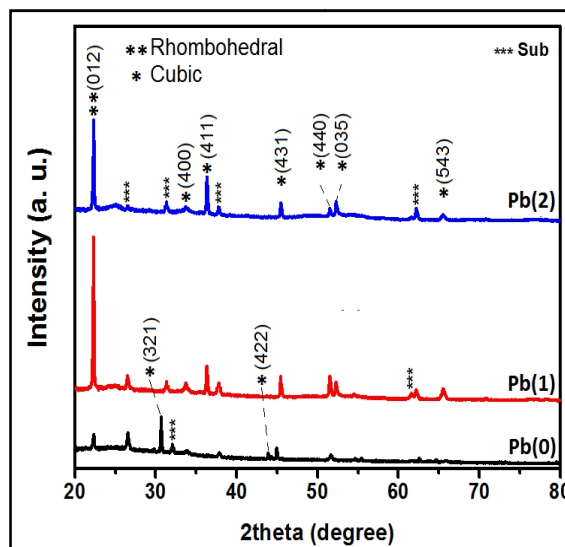
شکل ۲ تصاویر SEM لایه‌های اکسید ایندیم خالص و آلاییده را نشان می‌دهد. همانطور که این شکل نشان می‌دهد لایه خالص دارای ریخت میله با قطر میانگین حدود  $45 \pm 5$  nm می‌باشند. با افزودن ناخالصی سرب (۲٪) اشکالی شبیه تنه درخت (Pough) بریده شده ظاهر می‌شوند. این نوع خاص از ساختار اکسید ایندیم قبلاً نیز توسط چو و همکارانش گزارش شده است [۱۶]. قطر این تنه‌های درخت به طور میانگین حدود  $81 \pm 5$  nm می‌باشد. با افزودن مقدار ناخالصی سرب (۴٪) قطر این تنه‌های درخت به طور میانگین حدود  $67 \pm 5$  nm اندازه‌گیری شد. پس افزودن ناخالصی

الکترولیت نیز در مقدار ۳ نگه داشته شد. زیرلایه رسانا (Fluorine-doped tin oxide (FTO) coated glass) با مقاومت تقریبی  $8 \Omega/\text{cm}^2$  الکتروود پلاتین و الکتروود جیوه سفید (Saturated calomel electrode) به عنوان الکتروود کاری و الکتروود مرجع نیز به ترتیب مورد استفاده قرار گرفتند. زیرلایه‌ها و الکتروود پلاتین برای اطمینان از نبود آلودگی روی آنها، با استفاده از محلول‌های استون و اتانول درون همزن صوتی (Ultrasonic bath) هر کدام به مدت ۱۰ min به ترتیب مورد شستشو قرار گرفتند. یک سیستم آنالایزر الکتروشیمیایی کنترل شده توسط رایانه (Potentiostat, Autolab, A3ut71167, Netherlands) جهت ایجاد شرایط قطبیدگی کاتدی در ولتاژ ۱/۴ V با رعایت ترتیب SCE نیز مورد استفاده قرار گرفت. زمان لایه‌نشانی نیز ۳۰ min انجام شد. بعد از لایه‌نشانی و خارج کردن زیرلایه از محلول الکترولیت، نمونه‌ها به آرامی با آب مقطر شسته و سپس خشک شدند. جهت سهولت در بیان اسم، نمونه‌ها به ترتیب Pb0 (نمونه خالص)، Pb1 (نمونه آلاییده شده با ۲٪ سرب) و Pb2 (نمونه آلاییده شده با ۴٪ سرب) نامیده شدند. ساختار بلوری لایه‌های اکسید ایندیم حاصله توسط دستگاه آنالیز پراش سنج پرتو ایکس مدل (PANalytical X'Pert Pro MPD) که دارای آندی مسی و طول موج تحریک  $1.5406 \text{ \AA}$  بود، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. جهت بررسی ریختی لایه‌های اکسید ایندیم عکس‌برداری SEM توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA\TESCAN صورت گرفت. خواص نوری نانوساختارها نیز توسط آنالیزهای نور تابناکی (Photoluminescence (PL)) و اندازه‌گیری طیف جذبی (Absorbance spectra) صورت گرفت. آنالیز نور تابناکی در دمای اتاق با دستگاه Perkin-Elmer LS55 و طول موج تحریک ۲۷۵ nm در محدوده ۳۰۰-۸۰۰ nm و طیف جذبی نیز در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه UV-Vis CE-7500 ضبط شده است.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی لایه‌های اکسید ایندیم، الف) خالص، و آلاییده با ب) ۲٪ و ج) ۴٪ سرب.

رشد کرد و بنا به شرایط موجود به اشکال مختلفی در می‌آیند. از جمله این شرایط می‌توان به عواملی همچون اسیدیته محلول الکترولیت، درجه ابراشباعی (supersaturating degree)، نفوذ هسته‌های ناپایدار به درون

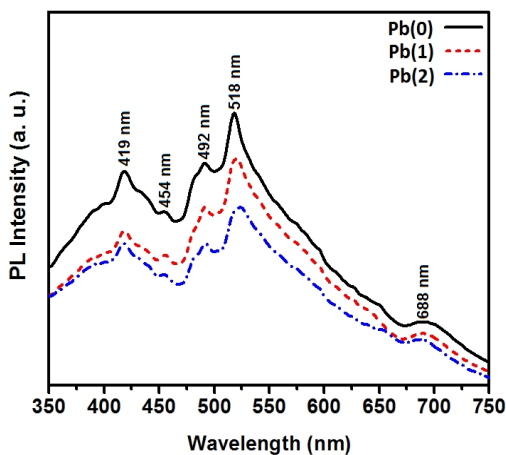


شکل ۱: الگوی پراش لایه‌های اکسید ایندیم خالص و آلاییده با مقادیر مختلف سرب.

سرب ریخت نانوساختارها را از میله به تنه درخت تغییر داده و اندازه آنها را افزایش می‌دهد، که این افزایش اندازه نانوساختارها در توافق با نتایج بدست آمده از آنالیز الگوی پراش (افزایش اندازه دانه با افزودن ناخالصی) می‌باشد. این نتایج به خوبی بیانگر افزایش قابل ملاحظه در نسبت سطح به حجم ساختارهای رشد داده اکسید ایندیم در این کار می‌باشند.

عموماً فرآیند رشد لایه‌های اکسید ایندیم در روش لایه‌نشانی انباشت الکتروشیمیایی را می‌توان در مراحل مختلف سطوح اتمی به این صورت شرح داد که در ابتدا هسته‌های پایداری روی زیرلایه شامل  $In^{3+}$  تشکیل می‌شوند که از درون محلول الکترولیت به سمت کاتد حرکت کرده‌اند. در مرحله بعد این هسته‌ها که تمایل زیادی به جذب الکترون دارند، شروع به جذب آنیون‌های موجود در محلول الکترولیت می‌کنند. طبیعی است که اعمال اختلاف پتانسیل در اینجا باعث دادن الکترون اضافی به اتم‌های اکسیژن توسط الکتروود آند می‌کند. بنابراین آنها تمایل زیادی برای حرکت به سمت الکتروود کاتد دارند، که در آنجا جذب کاتد شده و بلورهای کوچک اکسید ایندیم را که به لحاظ ترمودینامیکی پایدار هستند را تشکیل می‌دهند. با دادن زمان این بلورهای کوچک

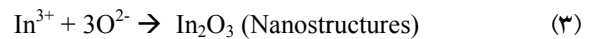
شدت کمتر و فاصله زیادتری از بقیه دارد در نقطه ۶۸۸ nm واقع شده است که در ناحیه قرمز از طیف امواج مرئی واقع می‌شود و جزء گسیل‌های سطوح عمیق (Deep level) می‌باشد. علت آن نیز وجود جاهای خالی اکسیژن در شبکه بلوری اکسید ایندیم دانسته شده است [۲۲]. بررسی‌های گان و همکارانش نشان داد که یکی از عوامل موثر در بهبود بازده نوری نانو ساختارهای اکسید ایندیم کنترل جاهای خالی اکسیژن می‌باشد [۲۳]. یکی از ابزار مفید تجزیه و تحلیل جاهای خالی اکسیژن طیف نور تابناکی می‌باشد و از این نظر نتایج بدست آمده از طیف نور تابناکی جهت استفاده از نانو ساختارهای اکسید ایندیم به عنوان افزاره نوری بسیار مناسب می‌باشد.



شکل ۳: طیف نور تابناکی لایه‌های اکسید ایندیم خالص و آلاییده با مقادیر مختلف سرب.

باند‌های گسیلی در نمونه‌های آلاییده شده با عنصر سرب نسبت به نمونه خالص یک جابجایی قرمز (Red shift) (به سمت طول موج‌های بزرگتر) را نشان می‌دهند، که این حاکی از کاهش انرژی شکاف باند گسیلی در پی آرایش با عنصر سرب است. علت این جابجایی را در این می‌توان جستجو کرد که هنگام آرایش، برخی از اتم‌های سرب جانشین برخی از اتم‌های ایندیم شده و ترکیب اکسید سرب را به وجود می‌آورند که این ترکیب دارای انرژی شکاف باند کمتری (۱٫۹۰ eV) [۲۴] نسبت به اکسید ایندیم می‌باشد.

سطح بلور پایدار و انرژی سطحی و بین سطحی اشاره کرد [۷]. فرآیند رشد در این کار را می‌توان بوسیله روابط زیر بیان کرد.



معروف است که اکسید ایندیم توده‌ای در دمای اتاق هیچ‌گونه گسیلی از خود بروز نمی‌دهد [۱۷]، ولی نانو ساختارهای آن این توانایی را در دمای اتاق دارا می‌باشند [۱۸] و از خود گسیل‌هایی در ناحیه مرئی و فرابنفش از طیف امواج الکترومغناطیسی بروز می‌دهند. این اتفاق به خاطر کاهش چشم‌گیر اندازه ساختارهای آن با ورود به ابعاد نانو و افزایش قابل مقایسه نسبت سطح به حجم می‌باشد. اگرچه تاکنون گزارش‌های زیادی در مورد نور تابناکی نانو ساختارهای اکسید ایندیم ارائه شده است ولی سازوکار و چگونگی آن هنوز به طور کامل مشخص نشده است [۱۹]. عیوب بلوری از جمله جاهای خالی اکسیژن نقش عمده‌ای در سازوکار نور تابناکی اکسید ایندیم دارند زیرا عیوب بلوری باعث تشکیل سطوح جدیدی از ترازهای انرژی در ساختار باند الکترونی نیم‌رساناها می‌شوند. شکل ۳ طیف نور تابناکی نانو ساختارهای اکسید ایندیم خالص و آلاییده با درصد‌های مختلف سرب را نشان می‌دهد.

طبق این شکل نانو ساختارهای اکسید ایندیم خالص دارای دو باند گسیلی در موقعیت‌های ۴۱۹ nm و ۴۵۴ nm هستند که این باندها هر دو در ناحیه بنفش از طیف نور مرئی واقع می‌شوند. این دو باند گسیلی جزء گسیل‌های لبه باند (Near band edge (NBE)) محسوب می‌شوند [۲۰]. دو باند گسیلی دیگر نیز در موقعیت‌های ۴۹۲ nm و ۵۱۸ nm دیده می‌شوند که در ناحیه سبز از طیف نور مرئی واقع می‌شوند. منشا آنها را عیوب بلوری دانسته‌اند که در اینجا بیشتر جاهای خالی اکسیژن مدنظر می‌باشد [۲۱]. باند دیگر که دارای

$$\sqrt{ah\nu} = B(h\nu - E_g) \quad (۴)$$

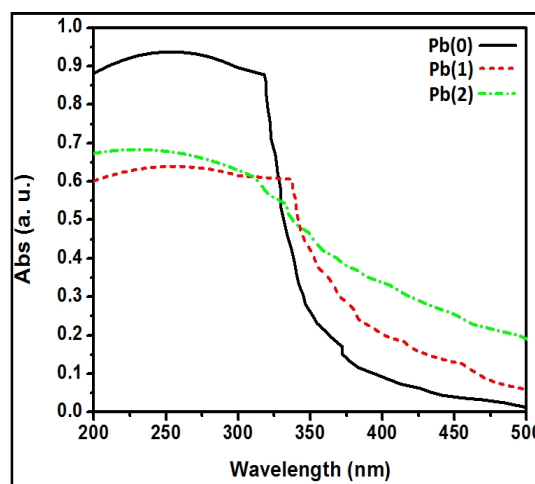
که در آن  $\alpha$  ضریب جذب،  $h$  ثابت پلانک،  $\nu$  فرکانس و  $B$  نیز یک ثابت است. با استفاده از این معادله، شکل ۵ که میزان انرژی  $(h\nu)$  را در مقابل  $(ah\nu)^2$  را نشان می‌دهد، رسم و انرژی شکاف باند نوری نانوساختارهای را با رسم خطی مماس بر نقطه عطف این نمودار، بدست می‌آید.

همانطور که این شکل نشان می‌دهد ناخالصی سرب انرژی شکاف باند نوری نانوساختارهای اکسید ایندیم را کاهش می‌دهد. علت آن همانطور که در قسمت مربوط به آنالیز نور تابناکی نیز گفته شد به وجود آمدن مقدار جزئی از ترکیب اکسید سرب در پی آرایش نانوساختارهای اکسید ایندیم با سرب می‌باشد. این مقادیر در مقایسه با انرژی شکاف باند اکسید ایندیم توده‌ای نیز یک جابجایی قرمز را نشان می‌دهند. برای این جابجایی نیز دو نظریه درست و اثبات شده وجود دارد. اول شکل و اندازه نانوساختارها و دوم وجود عیوب بلوری [۱۸]، که مورد برجسته آن در مورد اکسید ایندیم جاهای خالی اکسیژن می‌باشد. مورد اول اشاره به افزایش نسبت سطح به حجم دارد و مورد دوم نیز با توجه به نتایج آنالیز نور تابناکی بدیهی به نظر می‌رسد. لذا این نتیجه‌گیری نیز با نتایج بدست آمده از تصاویر SEM و آنالیز نور تابناکی همپوشانی دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نانوساختارهای خالص و آلاینده با سرب اکسید ایندیم به روش انباشت الکتروشیمیایی لایه‌نشانی شدند. افزودن ناخالصی سرب یک جا به جایی به سمت زوایای کمتر را در موقعیت پیک‌های الگوی پراش نانوساختارها نشان داد. اندازه نانوساختارهای اکسید ایندیم با افزودن ناخالصی سرب افزایش یافت. انرژی شکاف باند گسیلی و نوری نانوساختارها نیز با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل داده‌های طیف نور تابناکی و جذبی تخمین زده شد، که در هر دو مورد کاهش مشاهده شد.

شکل ۴ طیف جذبی نانوساختارهای اکسید ایندیم خالص و آلاینده با درصدهای مختلف سرب را نشان می‌دهد. برای همه نمونه‌ها لبه جذب در ناحیه فرابنفش قرار دارد و با میل به سمت طول موج‌های بزرگتر شدت جذب کاهش می‌یابد. نانوساختارهای خالص اکسید ایندیم دارای جذب حداکثری ۹۴٪ و نمونه‌های آلاینده با سرب نیز به ترتیب ۶۴٪ و ۶۸٪ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که درصد جذب با افزودن ناخالصی سرب کاهش یافته است. وجود لبه جذب در این ناحیه منجر به حاصل شدن انرژی شکاف باند بزرگتری نسبت به انرژی شکاف باند گسیلی نانوساختارهای می‌شود. زیرا انرژی شکاف باند به دست آمده از آنالیز طیف جذبی که انرژی شکاف باند نوری نیز خوانده می‌شود، معمولاً بزرگتر از انرژی شکاف باند گسیلی همان ماده می‌باشد. علت آن را می‌توان به گذارهای از باندهای بیرونی‌تر در فعل و انفعالات حامل‌ها هنگام جذب فوتون در مقایسه با گذارهای از باندهای درونی‌تر هنگام گسیل فوتون از ساختار باند الکترونی نیم‌رساناها دانست.



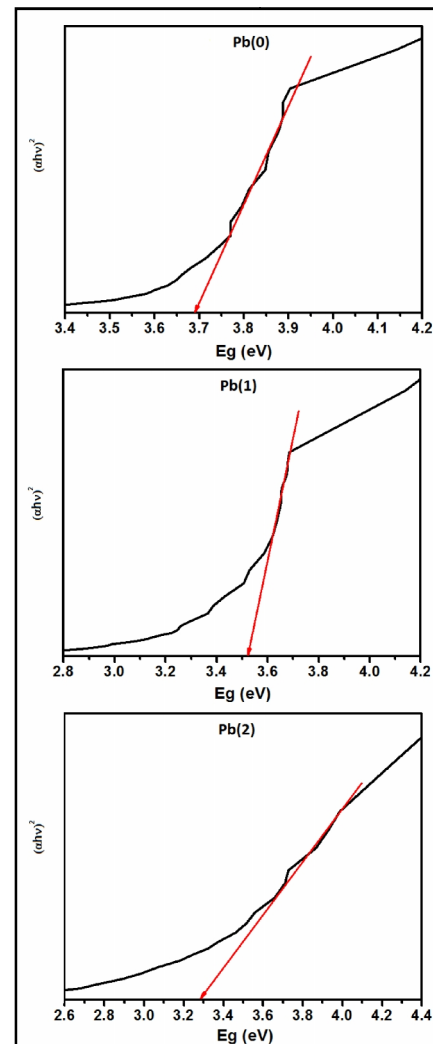
شکل ۴: طیف جذبی لایه‌های اکسید ایندیم خالص و آلاینده با مقادیر مختلف سرب.

جهت تخمین انرژی شکاف باند نوری نانوساختارها از روش ترسیمی نمودار تاک (Tauc) استفاده شده است. در این روش از رابطه زیر که معروف به رابطه مدل کوبلکا-مانک (Kubelka-Munk model) است، استفاده می‌شود [۲۵].

پیشرفته و نانومواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به جهت پشتیبانی فنی از این کار اعلام می‌دارند.

## مراجع

- [1] C. Lung-Chien, T. Ching-Ho, L. Wei-Chian, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **44**, 2011, 165101.
- [2] J. Keller, J. Lindahl, M. Edoff, L. Stolt, T. Torndahl, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **24**, 2016, 102.
- [3] A. Montazeri, F. Jamali-Sheini, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **242**, 2017, 778.
- [4] Z. Zhao, K.X. Wang, S. Fan, *Journal of Applied Physics*, **121**, 2017, 113109.
- [5] B.G. Streetman, S. Banerjee, "Solid State Electronic Devices", Prentice Hall, 2000.
- [6] D. Maestre, D. Haussler, A. Cremades, W. Jager, J. Piqueras, *The Journal of Physical Chemistry C*, **115**, 2011, 18083.
- [7] Y.C. Liang, H.Y. Lee, *Cryst. Eng. Comm.*, **12**, 2010, 3172.
- [8] T. Lin, X.Y. Ding, J. Xu, N. Wan, L. Xu, K.J. Chen, *Journal of Applied Physics*, **109**, 2011, 083512.
- [9] N.G. Pramod, S.N. Pandey, P.P. Sahay, *Journal of thermal spray technology*, **22**, 2013, 1035.
- [10] R. Henriquez, E. Munoz, E.A. Dalchiale, R.E. Marotti, F. Martin, D. Leinen, J.R. Ramos-Barrado, H. Gomez, *Physica status solidi (a)*, **210**, 2013, 297.
- [11] C. Sena, M.S. Costa, E.L. Munoz, G.A. Cabrera-Pasca, L.F.D. Pereira, J. Mestnik-Filho, A.W. Carbonari, J.A.H. Coaquira, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **387**, 2015, 165.
- [12] H. Yang, S. Wang, Y. Yang, *Cryst. Eng. Comm.*, **14**, 2012, 1135.
- [13] G.Z. Xing, J.B. Yi, F. Yan, T. Wu, S. Li, *Applied Physics Letters*, **104**, 2014, 202411.
- [14] M. Zervos, A. Othonos, V. Gianetta, A.G. Nassiopoulou, *Materials Letters*, **166**, 2016, 129.
- [15] A.K. Singh, G.S. Thool, S.R. Deo, R.S. Singh, A. Gupta, *Research on Chemical Intermediates*, **38**, 2012, 2041.
- [16] D. Chu, Y. Masuda, T. Ohji, K. Kato, *Langmuir*, **26**, 2010, 14814.
- [17] C.H. Liang, G.W. Meng, Y. Lei, F. Phillipp, L.D. Zhang, *Advanced Materials*, **13**, 2001, 1330.
- [18] J. Gan, X. Lu, T. Zhai, Y. Zhao, S. Xie, Y. Mao, Y. Zhang, Y. Yang, Y. Tong, *Journal of Materials Chemistry*, **21**, 2011, 14685.
- [19] M. Kumar, V.N. Singh, F. Singh, K.V. Lakshmi, B.R. Mehta, J.P. Singh, *Applied Physics Letters*, **92**, 2008, 171907.
- [20] S. Shanmugan, D. Mutharasu, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **43**, 2011, 6.
- [21] Z.P. Wei, D.L. Guo, B. Liu, R. Chen, L.M. Wong, W.F. Yang, S.J. Wang, H.D. Sun, T. Wu, *Applied Physics Letters*, **96**, 2010, 031902.
- [22] G. Wang, J. Park, D. Wexler, M.S. Park, J.H. Ahn, *Inorganic Chemistry*, **46**, 2007, 4778.
- [23] J. Gan, X. Lu, J. Wu, S. Xie, T. Zhai, M. Yu, Z. Zhang, Y. Mao, S.C.I. Wang, Y. Shen, *Scientific reports*, **3**, 2013, 1021.
- [24] R. Yousefi, F. Jamali-Sheini, M. Cheraghizade, A. Saaedi, *Latin American Applied Research*, **44**, 2014, 159.
- [25] M. Cheraghizade, R. Yousefi, F. Jamali-Sheini, A. Saaedi, N. Ming Huang, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **21**, 2014, 98.



شکل ۵: نمودار تاک لایه‌های اکسید ایندیم خالص و آلاییده با مقادیر مختلف سرب.

علت این کاهش به وجود آمدن مقدار جزئی از ترکیب اکسید سرب با انرژی شکاف باند کمتر از انرژی شکاف باند اکسید ایندیم می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده حاکی از ابعاد نانومتری مواد بدست آمده نیز می‌باشد.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آزمایشگاه لایه‌های نازک مرکز تحقیقات مهندسی سطح