

بررسی خواص ساختاری و اپتیکی لایه‌های نازک اکسید ایندیم قلع

احسان پاریسیان‌پور، مجتبی روستائی، جهانگیر جعفری رحمان، بهرام سهرابی، فریدون سموات*

گروه فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

در این تحقیق، لایه‌های نازک اکسید ایندیم قلع (ITO) به روش تبخیر با پرتو الکترونی بر روی زیرلایه‌های شیشه‌ای با ضخامت‌های اسمی ۵۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۵۰ نانومتر، با نرخ انباشت ثابت ۰٫۱۰ نانومتر بر ثانیه لایه‌نشانی شده‌اند. دمای زیرلایه‌ها در خلال لایه‌نشانی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته شد. از تکنیک‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و بازتاب سنجی اشعه ایکس (XRR) برای آنالیز ساختاری لایه‌های نازک استفاده شده است. خواص اپتیکی لایه‌ها با استفاده از طیف سنجی فرابنفش-مرئی در محدوده (۸۰۰-۳۱۰ نانومتر) بررسی شد. همچنین آنالیز عنصری ماده با استفاده از دستگاه انرژی پراکندگی اشعه ایکس (EDS) انجام شد. برای آنالیز داده‌ها از نرم افزارهای GENX، MATLAB و XPOWDER استفاده شدند. سپس ضخامت واقعی (nm)، چگالی الکترونی متوسط ($e/\text{\AA}^3$) و ناهمواری (nm) لایه‌های نازک ITO به دست آمدند. مقادیر گاف انرژی برای ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۵۰ nm به ترتیب ۳٫۴۷، ۳٫۵۸، ۳٫۷۱ و ۳٫۸۷ eV به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌های نازک اندازه متوسط بلورک‌ها رشد کرده، تراگیسیل اپتیکی، جذب و گاف انرژی لایه‌های نازک به ترتیب کاهش، افزایش، افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: اکسید ایندیم قلع، لایه‌های نازک، بازتاب سنجی اشعه ایکس

لایه‌ها به‌عنوان گرم‌کن الکتریکی شفاف، شیشه پنجره هواپیما برای یخ‌زدایی در طی جنگ جهانی دوم بود. در بین مواد دارای ویژگی TCO اکسید ایندیوم با آلایش ناخالصی اتم‌های قلع بهترین ویژگی را دارد. این ترکیب نیم‌رسانای نوع n بوده و به اکسید ایندیوم آلاییده شده با قلع (In₂O₃ 90%, SnO₂ 10%) که به اختصار ITO نامیده می‌شود می‌باشد و از معروف‌ترین اکسیدهای شفاف است. مقاومت اندک آن به دلیل بالا بودن چگالی حامل‌های آزاد آن (۱۰^{۲۰} تا ۱۰^{۲۱} الکترون آزاد بر cm³) است، که از طریق دو سازوکار حاصل می‌شود:

مقدمه

بین فلزات و دی‌الکتریک‌ها رده‌ای از مواد در محدوده‌ای وجود دارند که رساناهای شفاف نامیده می‌شوند [۱]، که به دلیل آلایش بالا، دارای گاف انرژی بزرگتر از ۳ الکترون‌ولت می‌باشند. در عین حال این نیم‌رساناها مقاومت الکتریکی بسیار پائینی از خود نشان می‌دهند که رفتاری فلز گونه است. این مواد به اکسیدهای رسانای شفاف (TCO) معروف هستند. لایه‌های رسانای شفاف از لایه‌ای بسیار نازک فلز یا اکسیدهای نیم‌رسانا تشکیل می‌شود. کاربرد وسیع این

*نویسنده مسئول: fsamavat@yahoo.com

شیمیایی (CVD) و غیره به کار رفته است. در بررسی خواص اپتیکی لایه های نازک ITO برای تعیین ثابت های اپتیکی چندین روش وجود دارد. یکی از این روش ها، روش بیضی سنجی (ellipsometry)، می باشد [۵-۷].

ITO به طور گسترده ای به عنوان الکترودهای شفاف، مقاومت های حرارتی شفاف، الکترودهای پوششی در وسایل اپتوالکترونیک (نمایشگرهای صفحه مسطح)، وسایل الکترو لومینسانس، سلول های فتوولتایی، وسایل الکتروکرومیک، نمایشگرهای کریستال مایع، پنجره های انرژی، سلولهای خورشیدی، حسگرهای گازی، فتوکریستال ها، فتوالکتروکریستال ها و آینه های بازتاب کننده گرما استفاده شده اند [۸،۹]. بازتاب اشعه ایکس (XRR)، تکنیکی برای استخراج چگالی، ضخامت، ناهمواری سطح و فصل مشترک ساختارهای لایه نازک است. کامل بودن لایه های رشد داده شده بستگی به کیفیت سطوح مشترک دارد که این به نوبه خود به ویژگی هایی چون ساختار بلوری و وجود نقص ها در لایه نازک بستگی دارد. به عبارتی خاص تر ناهمواری سطوح مشترک از پارامترهای بسیار مهم در بسیاری از کاربردهای صنعتی محسوب می شود و مشخص شدن آن برآوردی از کیفیت سطوح مشترک است [۱۰-۱۳].

مواد و روش آزمایش ها

در این تحقیق، از ماده هدف (قرص جامد): SnO_2 In_2O_3 (تهیه شده از شرکت Merck آلمان) با نسبت های وزنی ۹۰٪ اکسید ایندیوم و ۱۰٪ اکسید قلع به عنوان چشمه تبخیر استفاده شد. قبل از قرار دادن زیرلایه های شیشه ای در محفظه خلأ آن ها را در یک

جای گزینی اتم قلع به جای اتم ایندیوم که باعث آزاد شدن یک الکترون می شود و همچنین تهی جاهای اکسیژن که دو الکترون آزاد به شبکه می بخشد. از دیگر ویژگی های ITO می توان تراگسیلی نوری بالاتر از ۹۰٪ در محدوده طول موج های مرئی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر، مقاومت الکتریکی کمتر از $10^{-4} \text{ cm} - \Omega$ ، بازتاب زیاد در محدوده مادون قرمز، هدایت الکتریکی زیاد، چسبندگی مناسب به سطح زیرلایه، سختی مناسب و همچنین پایداری شیمیایی آن را نام برد [۴-۲]. به منظور ایجاد مشخصه های بهینه، مانند شفافیت بالا و مقاومت پایین، پارامترهایی از قبیل ضخامت، نوع آرایش و میزان آرایش و دیگر شرایط انباشت باید بهینه شوند. همچنین مشخص شده است که خواص اپتیکی و الکتریکی اکسیدهای رسانا مانند In_2O_3 شدیداً به چگالی ناکاملی های ایجاد شده توسط آرایش بیرونی یا شرایط رشدشان بستگی دارد. برای آرایش بیرونی، اضافه شدن فلوئور و اتمهای قلع اساساً گزارش شده است.

در طی سال های اخیر علاوه بر ITO که دارای درجه تهبگنی بالا و گاف انرژی ۳/۷۵ الکترون ولت می باشد، مواد بسیار دیگری نیز مورد توجه قرار گرفته اند. مهم ترین این مواد اکسید قلع SnO_2 ، اکسید ایندیوم In_2O_3 ، اکسید روی و اکسید کادمیم CdO می باشد، که کاربردهای فراوانی در الکترونیک و الکترونیک نوری دارند. برای تولید لایه های نازک ITO روش های انباشت متفاوتی از جمله اسپری پیرولیز، فرآیند سل-ژل، کندوپاش مگنترونی غیر فعال جریان مستقیم (DC)، کندو پاش با باریکه یونی، تبخیر گرمایی غیر فعال، انباشت با پالس لیزر (PLD)، انباشت با بخار

حمام اسیدی و آب اکسیژنه به مدت ۲۰ دقیقه غوطه‌ور کردیم، در استون خالص به مدت ۵ دقیقه برای تمیز کردن قرار دادیم، با آب مقطر (با درجه خلوص بالا) شستشو داده و سپس خشک کردیم. برای اطمینان از عدم وجود چربی‌های احتمالی بر روی زیرلایه‌ها آن‌ها را در یک دستگاه آلتراسونیک با الکل اتیلیک چربی زدائی کردیم. پس از نصب زیرلایه‌ها در محفظه خلاء لایه‌نشانی، فشار اولیه به مقدار 1×10^{-6} میلی بار رسانده شد، با شارش گازی خنثی سطوح زیرلایه‌ها بمباران یونی شدند. این فرآیند تمیزکاری زیرلایه‌ها جهت ارتقاء چسبندگی لایه‌ها به زیرلایه بوده و باعث جلوگیری از نفوذ آلودگی به لایه (ITO) می‌باشد که از اهمیت زیادی برخوردارند. با کنترل آهنگ شارش گاز واکنش پذیر (اکسیژن) توسط اندازه‌گیر شار، فشار جزئی گاز اکسیژن (با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪) در مقدار پایای 6.2×10^{-5} میلی‌بار تنظیم شد. پمپ‌های این دستگاه دیفیوژن و رتاری مدل F615 به نام Hind High Vacuum ساخت کشور هندوستان در سال ۲۰۰۱ می‌باشند. فرآیند لایه‌نشانی با نرخ انباشت ۰/۱ نانومتر بر ثانیه و ثابت نگه داشتن دمای زیرلایه در ۴۰۰ درجه سانتیگراد انجام شد. ضخامت لایه توسط پیشگر بلور کوارتز دستگاه کنترل می‌شد، تا لایه‌هایی با ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۵۰ nm حاصل شوند. مشخصه‌یابی لایه‌های نازک تهیه شده توسط یک دستگاه بازتاب سنج پرتو ایکس (از نوع-XPRT PRO) واقع در شرکت کارآفرینی و فناوری ایران (کفا) و یک دستگاه پراش سنج پرتو-ایکس (از نوع D8

Advanced Bruker X-ray) در دمای اتاق انجام شدند. طیف‌های پراش پرتو ایکس با استفاده از تکفام‌کننده $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54\text{\AA}$)، در بازه $70 < 2\theta < 10$ درجه و با گام $(2\theta/s)$ ۰/۰۴، در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند. طیف‌های بازتاب پرتو ایکس با استفاده از تکفام‌کننده $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54\text{\AA}$)، در بازه $4 < 2\theta < 0$ درجه و با گام (θ/s) ۰/۰۲ برای لایه‌های با ضخامت‌های ۵۰ و ۱۰۰ نانومتر و گام (θ/s) ۰/۰۱ برای لایه‌های با ضخامت‌های ۱۷۰ و ۲۵۰ نانومتر، در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند. طیف سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)، در محدوده (۸۰۰-۳۱۰ نانومتر) با یک دستگاه اسپکتروفوتومتر-UV-NIR (Perkin-Elmer Lambda 45) انجام شد. اندازه‌گیری تراگیل نوری لایه‌ها به‌منظور آشکار سازی شفافیت آن‌ها، انجام شد.

یافته‌ها و بحث

طیف XRD لایه‌های نازک ITO

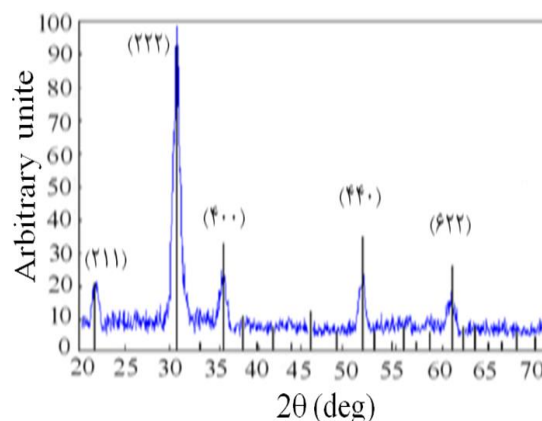
در شکل ۱ لایه‌ها بس‌بلوری بوده و دارای قله‌هایی متناظر با صفحات (۲۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۴۰) و (۶۲۲) می‌باشند. تمامی لایه‌ها دارای یک جهت‌گیری ترجیحی (۲۲۲) هستند. قله‌های پراش مشاهده شده با قله‌های پراش مرجع In_2O_3 (کارت شماره ۰۶-۰۴۱۶ JCPDS، که دارای شبکه مکعبی-مرکزدار bcc است) مطابقت خوبی دارند.

Powder در محدوده ۱۲,۷۰۶-۳۴,۲۸۲ نانومتر به دست آمدند [۱۴,۱۵].

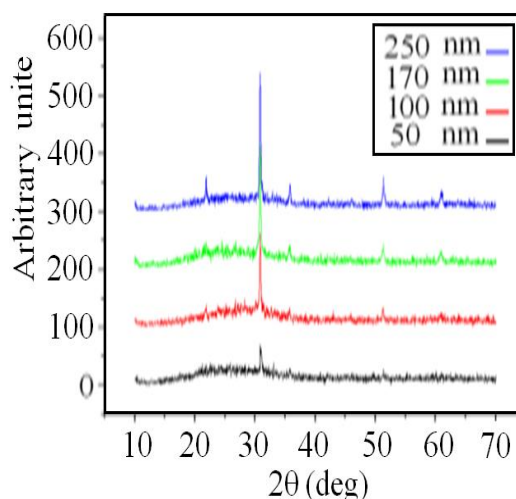
همچنین هیچ قله‌ای ناشی از ناخالصی و فاز آلائیده شده در لایه‌های نازک ITO دیده نمی‌شود. با بررسی تغییر شدت قله‌ها نسبت به ضخامت لایه‌ها در شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت با افزایش ضخامت لایه‌ها شدت قله‌ها افزایش یافته و پهنای آن‌ها در نیم‌شدت کاهش می‌یابد که حاکی از کاملتر شدن ساختار بلوری لایه‌ها است. در مواد بلوری این شدت‌ها به صورت قله تیز مشخص می‌شوند ولی در مواد آمورف قله‌ها پهن هستند [۱۲].

طیف XRR لایه‌های نازک ITO

فریزهای (فرانژ) کایزیک (Kiessig Fring) نتیجه تداخل سازنده و مخرب اشعه ایکس منعکس شده از دو فصل مشترک ناشی از تغییر فاز وابسته به زاویه می‌باشد و دوره تناوب آن‌ها توسط ضخامت لایه تعیین می‌شود. فاصله بین فریزهای تداخلی (کایزیک) تابع ضخامت لایه‌ها است که به‌طور معکوس متناسب با ضخامت لایه‌ها است [۱۶]. اولین نکته عدم وجود فریزهای تداخلی (کایزیک) در منحنی بازتاب لایه‌نازک ۲۵۰ نانومتر است. علت آن قدرت تفکیک دستگاه بازتاب‌سنج پرتو ایکس است، که برای لایه‌هایی با ضخامت بیشتر از ۲۰۰ نانومتر فریزهای کایزیک را به دست نمی‌دهد، چنانچه برای لایه نازک با ضخامت ۳۵۰ نانومتر نیز انجام شد که همان نتیجه یعنی عدم



شکل ۱. طیف XRD لایه‌نازک ITO با نرخ انباشت ۰,۰۱ و قله‌های In_2O_3 طیف



شکل ۲. طیف XRD لایه‌های نازک ITO با نرخ انباشت ثابت ۰,۱۰ با ضخامت های اسمی ۵۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۵۰ نانومتر در دمای ثابت ۴۰۰ درجه سانتیگراد زیرلایه.

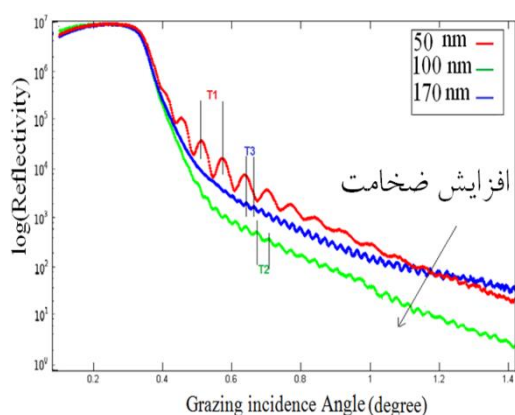
اندازه متوسط ذره‌ها به کمک فرمول دبی-شرر یعنی:

$$D = 0.9\lambda / B \cos\theta \quad ۱$$

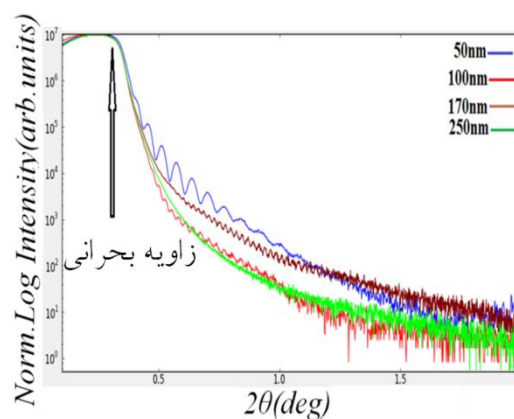
محاسبه می‌شود که در آن λ طول موج اشعه X (۱,۵۴ آنگستروم)، θ زاویه پراش و B پهنای پیک است. اندازه متوسط ذرات به کمک نرم افزار X-

وجود فریزها را نشان داد. بنابراین روش بازتاب‌سنجی اشعه ایکس لایه‌های نازک برای ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر مناسب می‌باشد و ترجیحاً برای لایه‌های فوق نازک (ضخامت کمتر از ۲۰ نانومتر) نتایج بسیار مناسبی را در پی خواهد داشت [۱۷]. نقطه مهم در شکل ۳ تطابق زاویه بحرانی لایه‌ها است. که نشان‌دهنده کیفیت یکسان در ساختار بلوری و شرایط لایه‌نشانی لایه‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر لایه‌ها دارای چگالی الکترونی نسبتاً یکسان هستند. همچنین در نگاه اولیه به منحنی‌ها، تفاوت در فریزهای کایزیک برای هر نمونه مشهود است. در واقع ضخامت لایه با اندازه‌گیری فاصله دو قله متوالی در منحنی به دست می‌آید که نسبت عکس با مقدار آن را دارد. به عبارت دیگر لایه ضخیم‌تر دارای فریزهای کوچک‌تر و لایه نازک‌تر دارای فریزهای بزرگ‌تر می‌باشد [۲۰-۱۸].

به دست آوردن ضخامت واقعی لایه‌ها (ضخامت درگیر در آزمایش) استفاده شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مراحل شبیه‌سازی^۳ و برازش^۴ داده‌های بازتابی اشعه ایکس انجام شد. پس از شبیه‌سازی و برازش داده بازتابی، منحنی بازتاب اشعه ایکس برای لایه‌های نازک ITO با ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۷۰ نانومتر نیز انجام شد. ضخامت‌های واقعی به دست آمده با توجه به فریزهای کایزیک برای لایه‌های نازک با ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۷۰ نانومتر به دست آمدند (شکل ۴). همچنین ناهمواری سطح و فصل مشترک لایه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است که متفاوت از دیگری می‌باشند (جدول ۱) [۱۳، ۱۱، ۱۰]. همان‌طور که در جدول ۱ هم مشاهده می‌شود، ضخامت واقعی برای لایه ۲۵۰ نانومتر به دست نیامد. مقادیر عددی به دست آمده با منحنی‌های رسم شده توافقی خوبی دارند. به خصوص برای ناهمواری لایه‌ها که نحوه افزایش آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. منحنی شبیه‌سازی شده طیف XRR لایه‌های نازک ITO برای ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۷۰ نانومتر که به ترتیب دارای ضخامت لایه T1، T2 و T3 می‌باشند.



شکل ۳. مقایسه طیف XRR لایه‌های نازک ITO با ضخامت‌های مختلف.

در این پژوهش از نرم‌افزار GENX که بر اساس تقریب موج واپیچیده بورن عمل می‌کند، برای تحلیل داده‌ها و

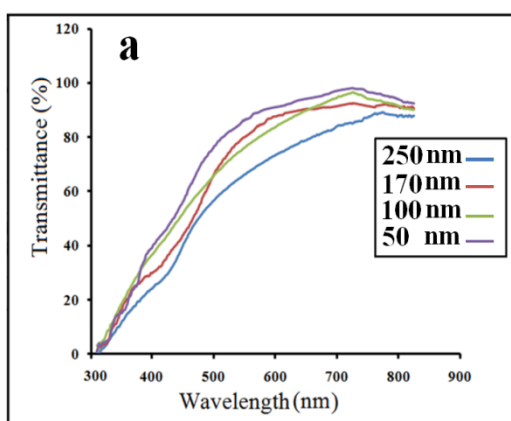
^۴Fitting

^۳Simulation

جدول ۱. پارامترهای ساختاری به دست آمده برای لایه‌های نازک ITO

ضخامت لایه‌ها (nm)	زاویه بحرانی (درجه)	ضخامت واقعی (نانومتر)	چگالی الکترونی ($e/\text{\AA}^3$)	ناهمواری سطح (nm)
۵۰	۰٫۳۳۸	۵۷	۵٫۱	۱۰٫۲
۱۰۰	۰٫۳۳۷	۱۲۰	۵٫۱	۱۰٫۷
۱۷۰	۰٫۳۲۸	۱۸۰	۴٫۸	۹٫۳
۲۵۰	۰٫۳۳۳	-	۴٫۹	۱۰٫۸

بررسی می‌شود که E_g گاف انرژی، $h\nu$ انرژی فوتون ورودی و B یک عدد ثابت است که به احتمال گذردهی وابسته است. n نیز به نوع گذردهی بستگی دارد. برای گذار غیر مستقیم $n=2$ و برای گذار مستقیم $n=0.5$ می‌باشد. می‌توان مقدار E_g را از طریق برون‌یابی بخش خطی منحنی $(\alpha h\nu)^{1/n}$ بر حسب $h\nu$ تا محور انرژی محاسبه کرد [۲۴]. مقادیر گاف انرژی لایه‌ها برای ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۵۰ نانومتر به ترتیب ۳٫۴۷، ۳٫۵۸، ۳٫۷۱ و ۳٫۸۷ الکترون‌ولت به دست آمدند. نتایج به دست آمده از این طیف با توجه به شکل ۵ این است که با افزایش ضخامت لایه‌ها تراگسیل اپتیکی، جذب و گاف انرژی لایه‌های نازک به ترتیب کاهش، افزایش، افزایش می‌یابد. نتیجه کاهش تراگسیل با نتایج پوکاپیست و همکارانش یکی است [۲۵]. این علت افزایش در کدری، ناشی از تخلیه اکسیژن [۲۶]، و ناهمواری سطح است [۲۷].



تحلیل داده XRR لایه‌های نازک ITO

ضریب شکست ماده برای اشعه X با طول موج λ داده می‌شود:

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad 2$$

که در اینجا $\delta \approx \rho \lambda^2 r_e / 2\pi$ ، r_e شعاع کلاسیکی الکترون (طول پراکندگی تامسون)، ρ چگالی الکترون مؤثر و $\beta \cong \lambda / 4\pi\mu$ که μ طول جذب اشعه X است. زاویه بحرانی θ_c به چگالی مؤثر الکترونی ρ بستگی دارد که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} = \lambda \sqrt{\rho \times r_e / \pi} \quad 3$$

برای محاسبه پارامترهای ساختاری لایه‌های نازک، مقدار شعاع کلاسیکی الکترون ($r_e = 2.82 \times 10^{-5} \text{\AA}$) و طول موج اشعه ایکس ($\lambda = 1.54 \text{\AA}$) است [۲۱-۲۳].

خواص اپتیکی لایه‌های نازک ITO

خواص اپتیکی لایه‌ها با رابطه داویس و موت^۰ یعنی:

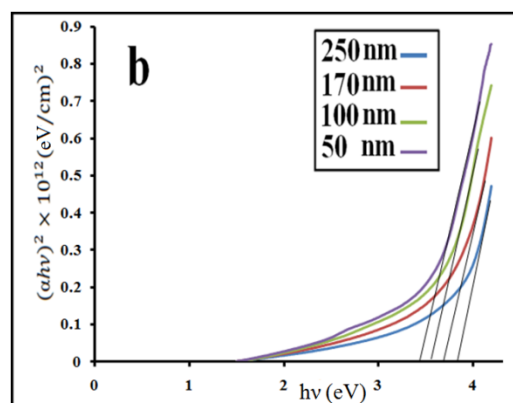
$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \quad 4$$

^۰Davis and Mott

انباشت ثابت (۰٫۱ نانومتر برثانیه) و دمای ثابت زیر لایه (۴۰۰ درجه سانتیگراد) مقادیر گاف انرژی به ترتیب ۳٫۴۷، ۳٫۵۸، ۳٫۷۱ و ۳٫۸۷ الکترون‌ولت می‌باشند که نشان دهنده افزایش گاف انرژی با افزایش ضخامت لایه‌های نازک است. همچنین اندازه متوسط بلورک‌ها، تراگیل اپتیکی و جذب لایه‌های نازک، با افزایش ضخامت لایه‌ها، به ترتیب افزایش، کاهش و افزایش می‌یابد.

مراجع

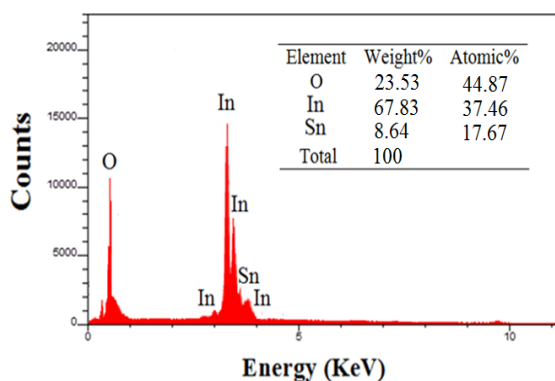
- [1] G. Hass, M.H. Francombe, R.W. Hoffman, In Physics of Thin Films, Ch: J.L. Vossen, Academic Press, New York, (1997).
- [2] S. Major, A. Banerjee, K.L. Chopra, Thickness-dependent properties of indium-doped ZnO films, *Thin Solid Films* 122 (1984) 31.
- [3] R.B.H. Tahar, T. Ban, Y. Ohya. Y. Takahashi, Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties, *Journal of Applied Physics*. 83 (1998) 2631.
- [4] J.H. Kim, B.D. Ahn, C.H. Lee, K.A. Jeon, H.S. Kang, G.H. Kim, S.Y. Lee, Enhancement in electrical and optical properties of indium tin oxide thin films grown using a pulsed laser deposition at room temperature by two-step process, *Thin Solid Films* 515 (2007) 3580-3583.
- [5] T. Gerfin, M. Gratzel, Optical properties of tin-doped indium oxide determined by spectroscopic ellipsometry, *Journal of Applied Physics* 79 (1996) 1722-1729.
- [6] R.A. Synowicki, Spectroscopic ellipsometry characterization of indium tin oxide film microstructure and optical constants, *Thin Solid Films* 313-314 (1998) 394-397.
- [7] Y.S. Jung, Spectroscopic ellipsometry studies on the optical constants of indium tin oxide films



شکل ۵. a: طیف‌های تراگیل لایه‌های نازک IT در ضخامت‌های متفاوت و b: منحنی‌های $(\alpha h\nu)^2$ برحسب $h\nu$ (eV) در دمای ۴۰۰ سانتیگراد زیر لایه برای ضخامت‌های متفاوت.

آنالیز عنصری

شکل ۶: طیف آنالیز پراکندگی انرژی اشعه ایکس (EDS) لایه نازک ۱۷۰ نانومتر را نشان می‌دهد که قله‌های عنصری ایندیوم، قلع و اکسیژن را تشکیل می‌دهد در صد ترکیبی In_2O_3 با SnO_2 با استفاده از آنالیز EDS مشخص شد.



شکل ۶: طیف EDS مربوط به لایه نازک ۱۷۰ نانومتر.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نتایج نشان می‌دهد که با تغییر ضخامت لایه‌های نازک از ۵۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۵۰ نانومتر، در نرخ

- {Article first published online: 14 MAR 2006
DOI: 10.1002/andp.19314020607 Copyright ©
1931 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Weinheim}.
- [17] S. Banerjee, S. Ferrari, D. Chateigner, A. Gibaud, Recent advances in characterization of ultra-thin films using specular X-ray reflectivity technique, *Thin Solid Films* 450 (2004) 23–28 .
- [18] F. Jiménez: ‘Basic Principles of X-ray Reflectivity in Thin Films’, University of Northeastern, (2011).
- [19] M. Nayak, G.S. Lodha, R.V. Nandedkar, X-ray reflectivity investigation of interlayer at interfaces of multilayer structures: application to Mo/Si multilayers, *Bulletin of Materials Science* 29 (2006) 693-700.
- [20] H. Raanaei, H. Lidbaum, A. Liebig, K. Leifer, B. Hjørvarsson, Structural coherence and layer perfection in Fe/MgO multilayers, *Journal of Physics Condensed Matter* 20 (2008) 12–16.
- [21] M. Tolan, X-Ray Scattering from Soft-Matter Thin Films, Springer Tracts in Modern Physics, Springer Heidelberg (1999).
- [22] V. Hol’ý, U. Pietsch, and T. Baumbach, High-resolution x-ray scattering from thin films and multilayers, Springer Tracts in Modern Physics, Springer, Berlin (1999).
- [23] Gh. Solookinejad, A.S.H. Rozatian, M.H. Habibi, ZnO thin film characterization by X-ray reflectivity optimization using genetic algorithm and Fourier transformation, *Applied Surface Science* 258 (2011) 260–264.
- [24] S. Varghese, M. Lype, E.J. Mathew, C.S. Menon, Determination of the energy band gap of thin films of cadmium sulphide, copper phthalocyanine and hybrid cadmium sulphide /copper phthalocyanine from its optical studies, *Materials Letters* 56 (2002) 1078-1083.
- [25] A. Pokaipist, M. Horprathum, P. Limsuwan, Effect of Films Thickness on the Properties of deposited under various sputtering conditions, *Thin Solid Films* 467 (2004) 36-42.
- [8] J. Lee, D. Lim, K. Yang, W. Choi, Influence of different plasma treatments on electrical and optical properties on sputtered AZO and ITO films, *Journal of Crystal Growth* 326 (2011) 50–57.
- [9] C. Jonda, A.B.R. Mayer, U. Stolz, A. Elschner, A. Karbach, Surface roughness effects and their influence on the degradation of organic light emitting devices, *Journal of Materials Science* 35 (2000) 5645–5651.
- [10] K.N. Stoev, K. Sakurai, Review on grazing incidence X-ray spectrometry and reflectometry, *Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy* 54 (1999) 41-82.
- [11] S. Dietrich, A. Haase, Scattering of X-rays and neutrons at interfaces, *Physics Reports* 260 (1995) 1-138.
- [12] I.K. Robinson, D.J. Tweet, Surface X-ray diffraction, *Reports on Progress in Physics* 55 (1992) 599.
- [13] H. Zabel, X-ray and neutron reflectivity analysis of thin films and superlattices, *Applied Physics A* 58(1994) 159-168.
- [14] J.A. Nielsen, D.M. Morrow: Elements of modern x-ray physics, University College London, (2011).
- [15] N.A. Shah, A. Nazir and etc: Physical properties and characterization of Ag doped CdS thin films, *Journal of Alloys Compounds* 512 (2012) 27-32.
- [16] H. Kiessig, Untersuchungen zur Totalreflexion von Röntgenstrahlen, *Annalen der Physik*, (2006).

به دلیل مشابهت های بسیار زیاد این مرجع جزئیات آن در زیر آورده شد.

[27] H.M. Ali, H.A. Mohamed, S.H. Mohamed, Enhancement of the optical and electrical properties of ITO thin films deposited by electron beam evaporation technique, *The European Physical Journal Applied Physics* 31 (2005) 87-93.

ITO Thin Films Prepared by Electron Beam Evaporation, *Kasetsart Journal Natural Science* 41 (2007) 255-261.

[26] C.H. Yang, S.C. Lee, T.C. Chen, Electrical and optical properties of indium tin oxide films prepared on plastic substrates by radio frequency magnetron sputtering, *Thin solid films* 516 (2008) 1984-1991.