بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی خواص نوری لایه‌های نازک اکسید ایندیوم آلاییده با قلع با استفاده از روش کرامرز-کرونیگ

رئوفی، داود؛ جمشیدی، علی
گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا همدان، خیابان مهدیه، همدان

چکیده-اندازه‌گیری ضرایب اپتیکی (ضرایب شکست و خاموشی) از جمله مباحث مهم لایه‌های نازک است. روش‌های متعددی وجود دارند که می‌توان بوسیله آنها ضرایب اپتیکی را اندازه‌گیری کرد. از جمله این روش‌ها می‌توان روش کرامرز-کرونیگ را نام برد. در این مقاله با استفاده از این روش ضرایب اپتیکی لایه‌های نازک اکسید ایندیم آلاییده با قلع که در ضخامت‌های ۱۳۴، ۱۴۵ و ۲۹۰ نانومتر به روش تبخیر با پرتو الکترونی بر روی زیر لایه شیشه‌ای و در شرایط یکسان تهیه شده‌اند را بررسی می-کنیم.

کلید واژه:کرامرز-کرونیک, ضرایب اپتیکی, اکسید ایندیم

Opticalproperties ofIndium Tin Oxidethin filmsusing aKramers-Kronigmethod

Raoufi,Davood;Jamshidi,Ali

PhysicsDepartment, Faculty ofScience,Bu-AliSinaUniversity, Hamedan,Iran

Abstract- The measurement of optical constants(indices of refraction and extinction) of thin films is an important issue. There are several methods that can be measured by their optical coefficients.Kramers-Kronig method including these techniques can be named. In this paper, using this method,optical constants of Indium Tin Oxide (ITO) thin films with thicknesses of 134,145and 290 nm which prepared by electron-beam evaporation method on glasssubstrate with same conditions were investigated.

Keywords: Kramers-Kronig,Optical constants,Indium Tin Oxide

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

تکنولوژی لایه‌های نازک یکی از قدیمی‌ترین هنرها و در عین حال یکی از جدیدترین علوم به‌شمار می‌رود. تاریخچه استفاده از لایه‌های نازک به‌خصوص لایه‌های نازک فلزی به عهد باستان و در حدود ۳۴۰۰ سال پیش برمی‌گردد. این روند تا امروز ادامه داشته است. امّا احتمالاً اولین لایه‌های نازک مدرن و امروزی در سال ۱۸۳۸ میلادی و به‌روش الکترولیز به‌دست آمده است، بونسن(Bunsen) و گروو(Grove) توانستند لایه‌های نازک فلزی را به‌ترتیب با روش واکنش شیمیایی و پراکنش تخلیه نورانی(Glow Discharge Sputtering) به‌دست آورند.لایه‌های نازک اکسید ایندیم آلاییده با قلع دارای ساختار بلوری مکعبی هستند. این لایه‌های نازک به دلیل داشتن شفافیت نوری مناسب در ناحیه مرئی و مقاومت الکتریکی بسیار پایین همزمان در ساخت انواع صفحه‌های نمایشگرهای تخت و افزاره‌های فتوولتایی مورد استفاده گسترده‌ای دارند. خواص لایه‌های نازک ITO به‌شدت متاثر از شرایط لایه نشانی هستند، مانند ضخامت لایه که بر خواص اپتیکی تاثیر دارد[۱]. در این مقاله تاثیر ضخامت لایه بر روی خواص اپتیکی لایه‌های نازک ITOبه روش کرامرز-کرونیگ بررسی می‌شود. طیف‌های بازتاب و عبورلایه‌ها(با ضخامت‌های نامی) تحت زاویه تابش۷۰ درجه در بازه طول موج۴۰۰تا۱۰۰۰نانومتر با دستگاه Senproبه‌دست آوردیم و سپس با استفاده از روش کرامرز-کرونیگ ضرایب اپتیکی نمونه‌ها محاسبه شدند.

۲- روابط کرامرز-کرونیگ

یکی از مهمترین روش‌های تعیین ثابت‌های اپتیکی، روش کرامرز-کرونیگ می‌باشد. این روش اولین بار توسط کرامرز در سال ۱۹۲۹معرفی و سپس توسط کرونیگ در سال۱۹۳۱اثبات شد. این روش‌ما را قادر می‌سازد که ثابت‌های اپتیکی را در هر بسامدی از بازه صفر تا مقادیر خیلی زیاد و به‌طور نظری تا بینهایت محاسبه کنیم. توابع اپتیکی قابل استفاده در محاسبات به این روش می‌توانند: بازتاب، عبور، جذب، تغییر فاز روی بازتاب و عبور و یا هر تابع اپتیکی که به‌صورت تابعی از فرکانس است، باشند. روابط کرامرز-کرونیگ در واقع دو رابطه انتگرالی بصورت زیر می‌باشند[۲و۳]:

$$R_r = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' R_i(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (۱)$$

$$R_i = -\frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{R_r(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (۲)$$

در روابط بالا R_r و R_i به‌ترتیب قسمت حقیقی و موهومی همه‌ی توابع اپتیکی ذکر شده می‌توانند باشند، ω بسامد و ω' متغیر انتگرال‌گیری و P هم نشان دهنده مقدار اصلی کوشی می‌باشد.

۲-۱- محاسبه ثابت‌های اپتیکی

روش‌های مختلف عددی برای حل انتگرال‌های بالا که به‌صورت زیر برای ضریب شکست و ضریب خاموشی در می‌آیند وجود دارد:

$$n(\nu_i) = \frac{2}{\pi} P \int_{\nu_1}^{\nu_m} \frac{\nu k(\nu)}{\nu^2 - \nu_i^2} d\nu_i \quad (۳)$$

در رابطه بالا P مقدار اصلی کوشی، ν فرکانس n و k هم به‌ترتیب ضریب شکست و ضریب جذب(خاموشی) نامیده می‌شوند. فرض می‌کنیم که همه‌ی مقادیر K در خارج از بازه(ν_1 ,ν_m)صفر باشند. در این صورت از معادله(۳) که انتگرال آنالوگ کرامرز-کرونیگ نامیده می‌شود، می‌توان ضریب شکست را از ضریب جذب محاسبه کرد. در این روش مقادیر طیف k به‌صورت گسسته به m قسمت تقسیم می‌شوند و همچنین بسامد هم همین‌طور به‌شکل زیر می‌باشد:

$$\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_j, \dots, \nu_{m-1}, \nu_m \quad (۴)$$

$$k_1, k_2, k_3, \dots, k_j, \dots, k_{m-1}, k_m \quad (۵)$$

بازه h را هم به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$h = \nu_{j+1} - \nu_j \qquad (j = 1,2, \dots, m-1) \quad (۶)$$

برای حل معادله(۳) از فرمول بسط مکلورن استفاده می‌کنیم که به صورت زیر می‌باشد:

$$n_i = \frac{2}{\pi} \times 2h \times \{\sum_j f_j\} \quad (۷)$$

که

$$f_j = \frac{\nu_j k_j}{\nu_j^2 - \nu_i^2} = \frac{1}{2}\{\frac{k_j}{\nu_j - \nu_i} + \frac{k_j}{\nu_j + \nu_i}\} \quad (۸)$$

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

برای حذف نقطه تکینگی i=j ، i را به دو قسمت زوج و فرد تقسیم می‌کنیم به صورت زیر اگر i فرد باشد:

$$j = 2,4,6 \dots, i-1, i+1, \dots \quad (۹)$$

و در صورتی که i زوج باشد خواهیم داشت:

$$j = 1,3,5, \dots, i-1, i+1, \dots (۱۰)$$

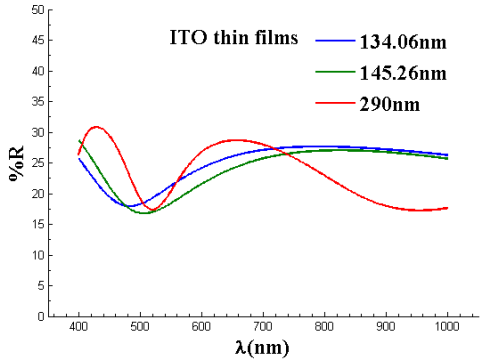
با این روش بدون در نظر گرفتن رفتار i=j انتگرال مربوط به رابطه کرامرز-کرونیگ را می‌توان حل کرد. به‌دلیل پیچیدگی روابط و فرمول‌ها آنها را با کمک نرم افزار محاسباتی متلب انجام دادیم[۴].

ابتدا با استفاده از روابط زیر k را بدست آوردیم و با استفاده از مطالب و روابط ذکر شده ضریب شکست را محاسبه کردیم:

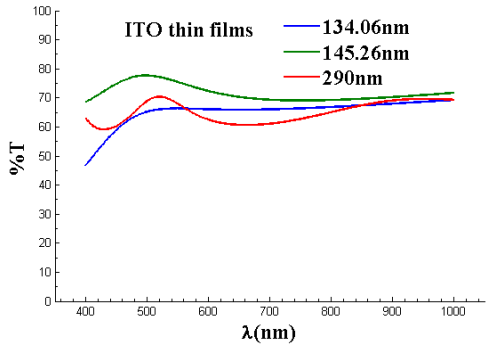
$$k = 2.303 * \frac{A\lambda}{4\pi} (۱۱)$$

$$A = 1 - R - T (۱۲)$$

که در رابطه(۱۱) Rضریب بازتابندگی، Tضریب عبور و Aهم ضریب جذب می‌باشند[۵]. در شکل۱ و۲ به ترتیب، درصد بازتابندگی و عبور لایه‌ها در سه ضخامت مختلف را که با زاویه تابش۷۰ درجه در بازه طول موج۴۰۰تا۱۰۰۰نانومتر با دستگاه Senproبه‌دست آورده بودیم، نشان داده شده‌اند.

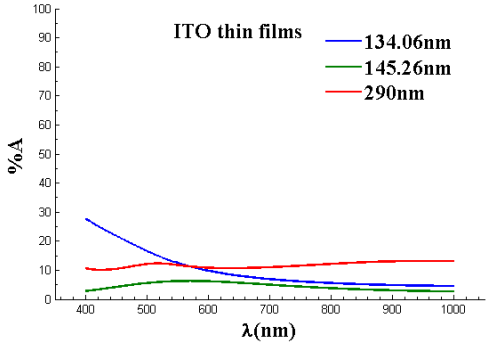


شکل(۱):درصد بازتابندگی از لایه‌نازک حاصل از اندازه‌گیری



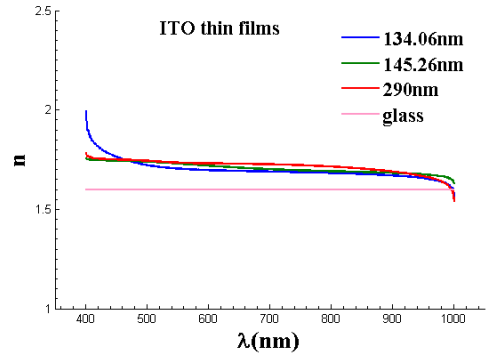
شکل(۲):درصد عبور از لایه‌نازک حاصل از اندازه‌گیری

در شکل۳ درصد جذب را که با استفاده از رابطه(۱۲) محاسبه شده، نشان داده شده است.



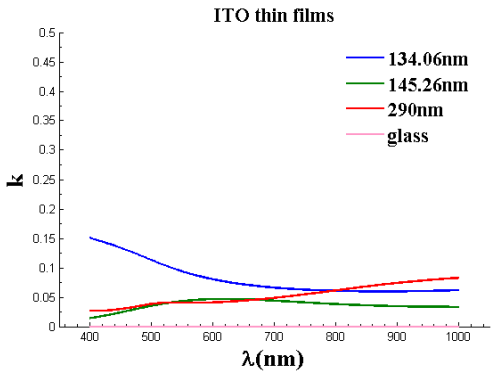
شکل(۳):درصد جذب لایه‌ها حاصل از اندازه‌گیری

و در شکل۴ و۵ ضرایب شکست و خاموشی در سه ضخامت مختلف نشان داده شده است.



شکل(۴):ضریب شکست لایه‌ها و زیرلایه به‌صورت تئوری به‌دست آمده

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل(۵):ضریب خاموشی لایه‌ها و زیر لایه که به‌صورت تئوری به‌دست آمده

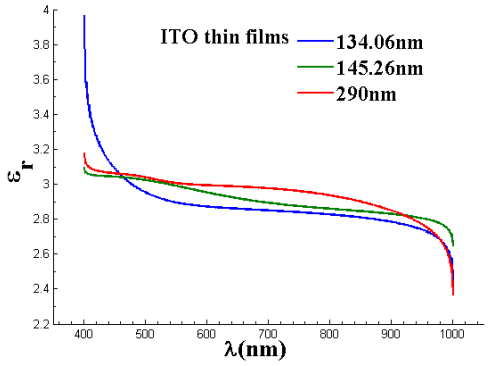
در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که ضریب شکست لایه نازک در مقایسه با زیرلایه افزایش پیدا کرده ولی در طول موج‌های بالاتر کاهش را نشان می‌دهد. و ضریب خاموشی لایه‌ها نیز اختلاف چندانی با ضریب خاموشی شیشه در طول موج‌های بالاتر ندارد و تقریبا در حدود چند صدم می‌باشد. همچنین از روابط زیر ضریب دی‌الکتریک لایه‌ها را هم محاسبه نمودیم:

$$(n+ik)^2 = \epsilon_{real} + \epsilon_{imag} \quad (۱۳)$$

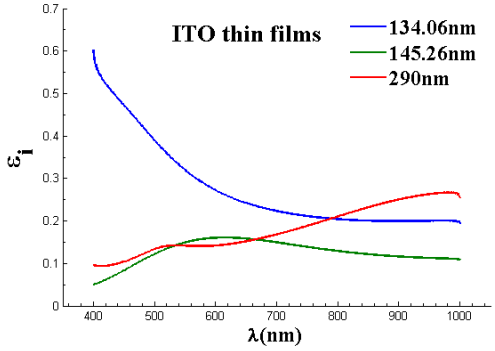
$$\epsilon_{real} = n^2 - k^2 \quad (۱۴)$$

$$\epsilon_{imag} = 2nk \quad (۱۵)$$

که به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی ضریب دی‌الکتریک در معادله(۱۴) و(۱۵) مشخص شده است[۵]. در شکل‌های ۶ و۷ این ضرایب را نشان داده‌ایم:



شکل(۶):ضریب دی‌الکتریک قسمت حقیقی لایه‌ها که به‌صورت تئوری به‌دست آمده



شکل(۷):قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک لایه‌ها که به‌صورت تئوری به‌دست آمده

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص اپتیکی لایه‌های ITO در ضخامت‌های مختلف بررسی شد و از روش کرامرز-کرونیگ و با استفاده از نرم افزار متلب توانستیم این ویژگی‌ها را محاسبه کنیم. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، همانطور که از شکل‌ها مشخص می‌شود، ضریب شکست در ضخامت‌های متفاوت در این بازه از طول موج(۴۰۰-۱۰۰۰) تفاوت چندانی باهم ندارند و در مقایسه با شیشه افزایش ضریب شکست را نشان می‌دهند که با نتایج تجربی تطابق دارد. ولی در ضرایب خاموشی اختلاف محسوسی مشاهده شد که نشان دهنده موثر بودن ضخامت لایه در خواص نوری آن می‌باشد.

مراجع

[1] J. Eite and A. G. Spencer, *Indium Tin Oxide for transparent EMC shielding and Anti-static application, 2004.*

[2] L. Ward, *The Optical Constants of Bulk Materials and Films, Iop Publishing co, 1998.*

[3] JohnR.Reitz,FrederickJ.milford,RobertW.christy,*Foundations of Electromagnetic Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, 1960.

[4] Elizabeth A. Costner, The Refractive Index and Absorbance of Aqueous and Organic Fluids for Immersion Lithography, p.256, 2009.

[۵] رازقی، علیرضا، *فیزیک لایه‌های نازک*، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۹۰.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]