



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 آلاینده با قلع با استفاده از روش کرامرز-کرونیک

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-کرونیک را نام برد. در این مقاله با استفاده از این روش ضرایب اپتیکی لایه‌های نازک اکسید ایندیوم آلاینده 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 می‌کنیم.

کلید واژه: کرامرز-کرونیک، ضرایب اپتیکی، اکسید ایندیوم

## Optical properties of Indium Tin Oxide thin films using a Kramers-Kronig method

Raoufi, Davood; Jamshidi, Ali

Physics Department, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, 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, 145 and 290 nm which prepared by electron-beam evaporation method on glass substrate with same conditions were investigated.

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

## 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. اما 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 آلاینده 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 متأثر از شرایط لایه نشانی هستند، مانند ضخامت لایه که بر خواص اپتیکی تأثیر دارد [۱]. در این مقاله تأثیر ضخامت لایه بر روی خواص اپتیکی لایه‌های نازک ITO به روش کرامرز-کرونیگ بررسی می‌شود. طیف‌های بازتاب و عبور لایه‌ها (با ضخامت‌های نامی) تحت زاویه تابش ۷۰ درجه در بازه طول موج ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با دستگاه Senpro به‌دست 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 ۱۹۲۹ معرفی و سپس توسط کرونیگ در سال ۱۹۳۱ اثبات شد. این روش‌ها 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 [۳ و ۲]:

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

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

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

## ۲-۱- محاسبه ثابت‌های اپتیکی

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

$$n(v_i) = \frac{2}{\pi} P \int_{v_1}^{v_m} \frac{v k(v)}{v^2 - v_i^2} dv_i \quad (۳)$$

در رابطه بالا  $P$  مقدار اصلی کوشی،  $v$  فرکانس  $n$  و  $k$  هم به‌ترتیب ضریب شکست و ضریب جذب (خاموشی) نامیده می‌شوند. فرض می‌کنیم که همه‌ی مقادیر  $K$  در خارج از بازه  $(v_1, v_m)$  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:

$$v_1, v_2, v_3, \dots, v_j, \dots, v_{m-1}, v_m \quad (۴)$$

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

بازه  $h$  را هم به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

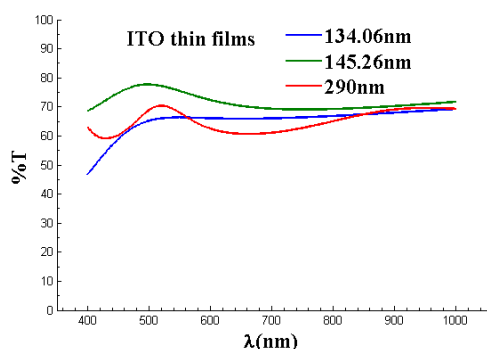
$$h = v_{j+1} - v_j \quad (j = 1, 2, \dots, m-1) \quad (۶)$$

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

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

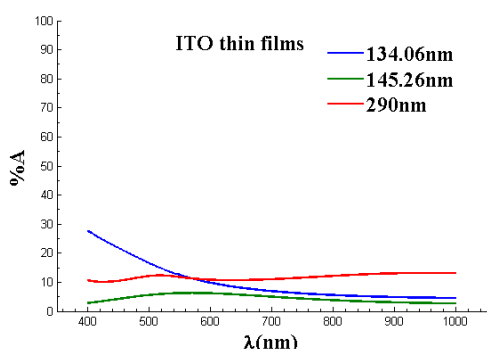
که

$$f_j = \frac{v_j k_j}{v_j^2 - v_i^2} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k_j}{v_j - v_i} + \frac{k_j}{v_j + v_i} \right\} \quad (۸)$$



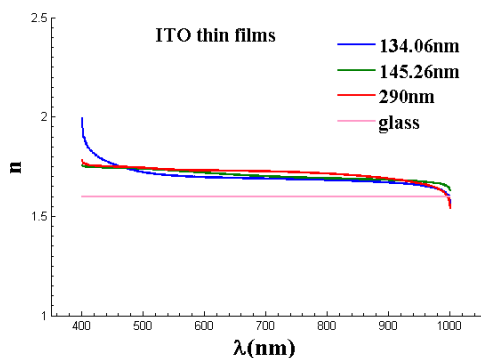
شکل (۲): درصد عبور از لایه نازک حاصل از اندازه گیری

در شکل ۳ درصد جذب را که با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه شده، نشان داده شده است.



شکل (۳): درصد جذب لایه ها حاصل از اندازه گیری

و در شکل ۴ و ۵ ضرایب شکست و خاموشی در سه ضخامت مختلف نشان داده شده است.



شکل (۴): ضرایب شکست لایه ها و زیرلایه به صورت تئوری به دست آمده

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

$$j = 2, 4, 6, \dots, i-1, i+1, \dots \quad (9)$$

و در صورتی که  $i$  زوج باشد خواهیم داشت:

$$j = 1, 3, 5, \dots, i-1, i+1, \dots \quad (10)$$

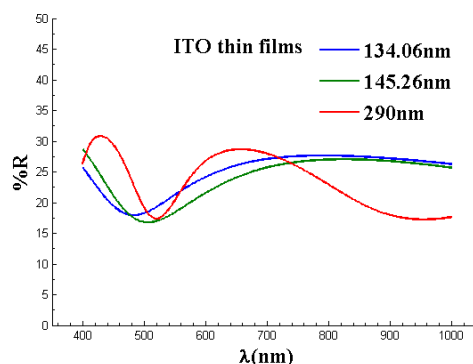
با این روش بدون در نظر گرفتن رفتار  $i=j$  انتگرال مربوط به رابطه کرامرز-کرونیگ را می توان حل کرد. به دلیل پیچیدگی روابط و فرمول ها آنها را با کمک نرم افزار محاسباتی متلب انجام دادیم [۴].

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

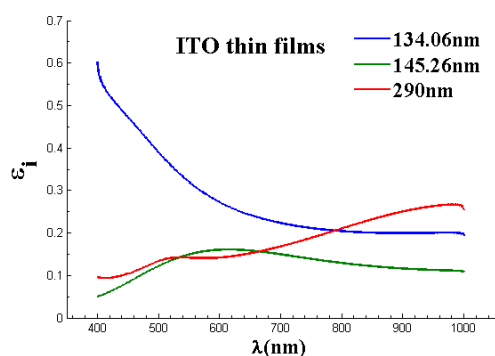
$$k = 2.303 * \frac{A\lambda}{4\pi} \quad (11)$$

$$A = 1 - R - T \quad (12)$$

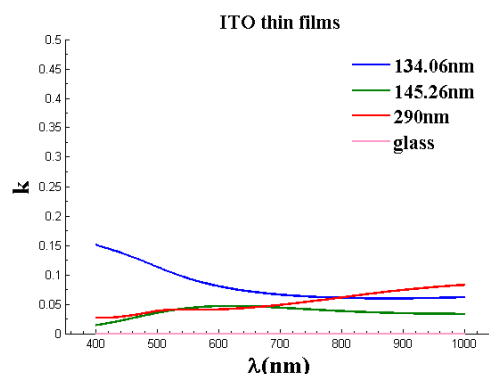
که در رابطه (۱۱)  $R$  ضریب بازتابندگی،  $T$  ضریب عبور و  $A$  هم ضریب جذب می باشند [۵]. در شکل ۱ و ۲ به ترتیب، درصد بازتابندگی و عبور لایه ها در سه ضخامت مختلف را که با زاویه تابش ۷۰ درجه در بازه طول موج ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با دستگاه Senpro به دست آورده بودیم، نشان داده شده اند.



شکل (۱): درصد بازتابندگی از لایه نازک حاصل از اندازه گیری



شکل (۷): قسمت موهومی ضریب دی الکتریک لایه‌ها که به صورت تئوری به دست آمده



شکل (۸): ضریب خاموشی لایه‌ها و زیر لایه که به صورت تئوری به دست 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 به دست 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] John R. Reitz, Frederick J. Milford, Robert W. 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.
- [5] رازقی، علیرضا، *فیزیک لایه‌های نازک*، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۹۰.

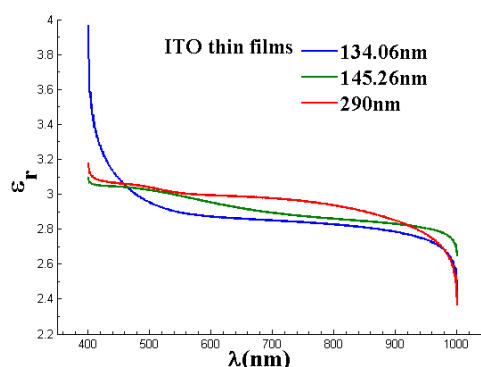
در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که ضریب شکست لایه نازک در مقایسه با زیر لایه افزایش پیدا کرده ولی در طول موج‌های بالاتر کاهش را نشان می‌دهد. و ضریب خاموشی لایه‌ها نیز اختلاف چندانی با ضریب خاموشی شیشه در طول موج‌های بالاتر ندارد و تقریباً در حدود چند صدم می‌باشد. همچنین از روابط زیر ضریب دی الکتریک لایه‌ها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

$$(n + ik)^2 = \epsilon_{real} + \epsilon_{imag} \quad (13)$$

$$\epsilon_{real} = n^2 - k^2 \quad (14)$$

$$\epsilon_{imag} = 2nk \quad (15)$$

که به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی ضریب دی الکتریک در معادله (۱۴) و (۱۵) مشخص شده است [۵]. در شکل‌های ۶ و ۷ این ضرایب را نشان داده‌ایم:



شکل (۹): ضریب دی الکتریک قسمت حقیقی لایه‌ها که به صورت تئوری به دست آمده