

Research Paper

Calculation of Optical Coefficients and Thickness of TiO₂ Thin Film Using the Single Wavelength Ellipsometry Method¹

Davood Raoufi²

Received: 2020.08.09

Revised: 2020.10.16

Accepted: 2020.11.30

Abstract

The optical coefficients and thickness of thin films are essential parameters in many branches of science and technology. Ellipsometry is a well-known and powerful technique for calculating the essential optical parameters of thin films, due to its accuracy and non-destructive capabilities. In this paper, a single wavelength (SW) ellipsometer which is relatively simple and inexpensive compared to other conventional ellipsometers have been designed. The light source used in this design was a He-Ne laser with wavelength of 633 nm. Rotating analyzer ellipsometry (RAE) technique at different incidence angles was used to measure the ellipsometry parameters (ψ , Δ). The efficiency and accuracy of this method were examined by calculating the optical coefficients and thickness of TiO₂ thin film (with known optical parameters). In order to increase accuracy of measurements, the ellipsometry parameters (ψ , Δ) were acquired from different regions of the film surface. Refractive index obtained for the substrate was 1.48 and refractive index, extinction coefficient and film thickness obtained for TiO₂ thin film, was 2.58, 0.04 and 49.60 nm, respectively. These results, extracted from the ellipsometry data curve fitting and employing the numerical inverse method, showed the efficiency and reliability of designed configuration.

Keywords: *Single Wavelength Ellipsometry, Rotating Analyzer Ellipsometer (RAE), Ellipsometry Parameters, Thin Film.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2020.32622.1170

² Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Bu Ali Sina, Hamedan, Iran. Email: d.raoufi@basu.ac.ir

محاسبه ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه نازک دی اکسید تیتانیم با استفاده از روش بیضی سنجی تکفام^۱

داود رئوفی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۰

چکیده

ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه‌های نازک در بسیاری از شاخه‌های علوم و فناوری پارامترهای اساسی محسوب می‌شوند. بیضی سنجی روش شناخته‌شده و قدرتمندی برای محاسبه پارامترهای اساسی لایه‌های نازک، به واسطه داشتن قابلیت‌های غیرتخریبی و دقت آن است. در این مقاله، یک بیضی سنج تکفام که در مقایسه با دیگر بیضی سنج‌های مرسوم نسبتاً ساده و ارزان است، طراحی کرده‌ایم. منبع نور به کاررفته در این طراحی یک لیزر هلیوم‌نئون با طول موج ۶۳۳ نانومتر است. برای اندازه‌گیری پارامترهای بیضی سنجی (Δ و ψ) از روش بیضی سنجی تحلیلگر چرخان در زوایای فرود مختلف استفاده شده است. کارایی و دقت این روش از طریق محاسبه ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه نازک دی اکسید تیتانیم (TiO_2)، با پارامترهای اپتیکی معلوم، آزموده شد. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، پارامترهای بیضی سنجی (Δ و ψ) از نواحی مختلف سطح لایه استخراج شد. ضریب شکست زیرلایه مقدار ۱/۴۸ و ضریب شکست لایه و ضریب خاموشی لایه و ضخامت لایه نازک به ترتیب، مقادیر ۲/۵۸ و ۰/۰۴

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2020.32622.1170

^۲ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. d.raoufi@basu.ac.ir

۶ / محاسبه ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه نازک دی اکسید تیتانیم با استفاده از روش بیضی سنجی تکفام

و ۴۹,۶۰ نانومتر به دست آمد. این نتایج، که از برازش منحنی داده‌های حاصل از بیضی سنجی و نیز اعمال روش وارونه‌سازی استخراج شده‌اند، صحت و کارایی چیدمان طراحی شده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: بیضی سنجی تکفام، بیضی سنج تحلیلگر چرخان، پارامترهای بیضی سنجی، لایه نازک.

۱. مقدمه

در چند دهه اخیر، مواد نانو ساختار به ویژه لایه‌های نازک توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. لایه‌های نانو ساختار TiO_2 (دی اکسید تیتانیم) به طور وسیعی به عنوان لایه‌های خود تمیز شونده [۱]، زیست سازگار [۲]، فتوکاتالیست [۳]، و غیره استفاده می‌شود. در این لایه‌های نازک شفاف دی الکتریک علاوه بر ضرایب اپتیکی، همچون ضریب شکست و ضریب خاموشی، یکی از مهم‌ترین عواملی که باعث بروز خواص متفاوت در لایه می‌شود، ضخامت آن است. از این رو، اندازه‌گیری دقیق و انتخاب روش مناسب اندازه‌گیری این ویژگی‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین منظور، روش‌های اندازه‌گیری اپتیکی مختلفی، از قبیل بیضی سنجی و بیناب سنجی عبوری (یا بازتابی) و غیره، معرفی و به کار برده می‌شوند [۴، ۵].

بیضی سنجی روشی غیر مخرب و غیر تماسی برای اندازه‌گیری ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه‌های نازک است. در بیضی سنجی دو کمیت زاویه‌ای (ψ و Δ) اندازه‌گیری می‌شود، که ψ نسبت دامنه و Δ اختلاف فاز بین مؤلفه‌های میدان الکتریکی نور با قطبش p و s (موازی و عمود بر صفحه فرود) می‌باشد. با توجه به این که قطبش نور بازتابیده از سطح نسبت به حالت قطبش نور فرودی تغییر می‌کند، این تغییر به ویژگی‌های اپتیکی سطح بازتابنده بستگی دارد. در بیضی سنجی با تحلیل تغییرات ایجاد شده در قطبش نور به واسطه بازتاب و مقایسه آن با قطبش نور فرودی، پارامترهای بیضی سنجی به دست می‌آید و سپس به کمک معادله اساسی بیضی سنجی، که ارتباط بین پارامترهای مذکور و خواص اپتیکی را بیان می‌کند، می‌توان ضرایب اپتیکی همچون ضریب شکست و ضخامت لایه نازک را به دست آورد.

به طور کلی، دو قید در اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی وجود دارد، اول این که چون در روش بیضی سنجی حالت قطبش نور از طریق اندازه‌گیری شدت نور به دست می‌آید، اگر اندازه ناهمواری سطح بیش از ۳۰٪ مقدار طول موج (λ) پرتو فرودی باشد پراکنندگی نور (به دلیل ناهمواری سطح) شدت نور بازتابی را شدیداً کاهش می‌دهد و لذا، اندازه‌گیری داده‌های

بیضی سنجی با مشکل روبه‌رو می‌شود. از این رو، ناهمواری سطوح نمونه‌ها باید نسبتاً کم باشد. دوم این که باید اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی در فرود مایل اجرا شود، زیرا در فرود عمود به واسطه این که نمی‌توان تمایزی بین قطبش‌های p و s قائل شد، اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی غیر ممکن می‌شود. البته، در این صورت، یک حالت استثنائی نیز برای مشخصه‌یابی مربوط به ناهمسانگردی نوری در صفحه وجود دارد، که در آن اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی اغلب در فرود عمودی برای محاسبه تغییر ثابت‌های نوری با چرخش نمونه صورت می‌گیرد. همچنین، در اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی زاویه فرود طوری انتخاب می‌شود که دقت اندازه‌گیری بیشینه باشد. در بیضی سنجی، نسبت ضرایب بازتاب r_p/r_s اندازه‌گیری می‌شود (r_p و r_s به ترتیب ضرایب بازتاب فرنل برای قطبش‌های p و s است) و لذا چون اختلاف بین ضرایب بازتاب فرنل تحت زاویه بروستر بیشینه است، دقت اندازه‌گیری تحت زاویه بروستر افزایش می‌یابد. بدین لحاظ، عموماً اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی در زاویه بروستر [۶، ۷] یا در حوالی آن اجرا می‌شود. در این زمینه، می‌توان به بیضی سنجی تکفام (نور لیزر هلیوم‌نئون با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر) و تحت زوایای فرود مختلف در گستره ۸۰-۶۵ درجه برای تعیین خواص اپتیکی لایه‌های نازک طلا [۴] اشاره کرد. همچنین، در زمینه نانوذرات، از بیضی سنجی تکفام (در طول موج ۵۳۲ نانومتر) تحت زوایای فرود مختلف برای اندازه‌گیری غیرمستقیم میزان ترشوندگی نانوذرات سیلیکا با بهره‌گیری از خواص بازتاب و شکست ذرات خیس شده (در فصل مشترک هوا-آب) استفاده شده است [۸]. این پژوهش کارآیی بیضی سنجی تکفام را بر روی لایه‌نازک TiO_2 تهیه‌شده به روش تبخیر با پرتو الکترونی (با ضرایب شکست و خاموشی ۲٫۶۰ و ۰٫۰۴ و ضخامت ۵۰ نانومتر بر روی زیرلایه شیشه به ضریب شکست ۱٫۵۲) که به عنوان مرجع انتخاب و از شرکت شریف سولار خریداری شده است، بررسی می‌کند.

۲. مبانی نظری

بیضی سنجی تکفام را می‌توان در چیدمان‌های مختلفی همچون چیدمان بیضی سنج تحلیلگر چرخان (RAE)، بیضی سنج قطبشگر چرخان (RPE) انجام داد. از طرفی، بیضی سنجی‌های فوق را می‌توان در حالت‌های بازتاب و تراگیل انجام داد. با استفاده از ماتریس جونز 2×2 معادل هر عنصر در پیکربندی RAE، میدان الکتریکی نور ثبت‌شده (نسبت میدان الکتریکی نور بازتابیده E_r به میدان الکتریکی نور فرودی E_i) را می‌توان به صورت ماتریسی زیر بیان کرد [۶]:

$$\begin{bmatrix} E_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \psi \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

۸ / محاسبه ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه نازک دی اکسید تیتانیوم با استفاده از روش بیضی سنجی تکفام

که در آن، A زاویه تحلیلگر، P زاویه قطبشگر، $E_A = E_r/E_i$ و ψ ، Δ پارامترهای بیضی سنجی است. از طرفی، Δ ، ψ از طریق رابطه زیر [۹] مربوط می شوند،

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) \exp(i\Delta) \quad (2)$$

که در آن، r_s و r_p یعنی دامنه بازتاب در راستاهای موازی و عمود بر صفحه فرود. همچنین، درخور توجه است که، ماتریس بالا به ترتیب شامل آشکارساز، تحلیلگر، نمونه، قطبشگر و منبع نور است.

رابطه (۱) دامنه میدان الکتریکی E_A را به زاویه تحلیلگر A و زاویه قطبشگر P و پارامترهای بیضی سنجی ψ و Δ مربوط می سازد. چون در بیضی سنجی با تحلیلگر چرخان شدت نور اندازه گیری می شود، اگر شدت نور $(I \sim |E_A|^2)$ را بر حسب زاویه تحلیلگر A بازنویسی کنیم [۱۰]، خواهیم داشت:

$$I = I_0[1 + \alpha \cos(2A) + \beta \sin(2A)] \quad (3)$$

که در آن

$$\alpha = \frac{\cos(2P) - \cos(2\psi)}{1 - \cos(2P)\cos(2\psi)} \quad (4)$$

و

$$\beta = \frac{\sin(2\psi) \cos(\Delta) \sin(2P)}{1 - \cos(2P)\cos(2\psi)} \quad (5)$$

بنابراین، با به دست آوردن دو ثابت α و β ، از طریق برازش منحنی داده های حاصل از بیضی سنج تحلیلگر چرخان با معادله (۳)، که در این پژوهش با نرم افزار متلب انجام شده است، پارامترهای بیضی سنجی ψ و Δ می توانند به صورت زیر نوشته شوند:

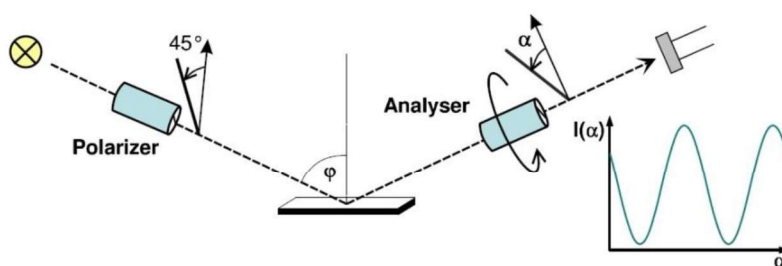
$$\tan \psi = \sqrt{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \times |\tan P|, \quad \cos \Delta = \frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \times \frac{\tan P}{|\tan P|} \quad (6)$$

۳. آماده سازی نمونه و چیدمان آزمایش

برخی عوامل مهم در اندازه گیری پارامترهای اپتیکی در روش بازتابی، نوع و ساختار و چگونگی تهیه سطح نمونه است. نواقصی از قبیل عدم یکنواختی و خراشیدگی و ناهمواری نه تنها به طور مستقیم در بازتاب و قطبیدگی آن تأثیر بسزایی دارند، بلکه بر اثر آلودگی، لایه ای نازک بر روی سطح ایجاد می شود که خواصی متفاوت با نمونه خواهد داشت و بدین لحاظ آماده سازی نمونه باید با کمال دقت صورت گیرد تا سطح آن به طور کاملاً یکنواخت، صاف و عاری از هر گونه آلودگی تهیه شود. بدین منظور، با روش های شیمیایی یا فیزیکی می توان به سطوحی عالی و مناسب برای اندازه گیری پارامترهای اپتیکی دست یافت.

بنابراین، قبل از قرار دادن نمونه (لایه نازک) در جایگاه خود در چیدمان آزمایش بیضی سنجی با تحلیلگر چرخان به منظور به دست آوردن داده‌های مورد نیاز، برخی نواقصی که می‌توان آن‌ها را برطرف کرد یا به حداقل کاهش داد (مثلاً گرد و غبار، آلودگی، چربی) و در عمل در اختیار ماست، مورد توجه قرار گرفت. لازم است ذکر کنیم که نواقصی همچون خراشیدگی و عدم یکنواختی و ناهمواری مربوط به تهیه نمونه است و در آزمایش‌های بیضی سنجی قابل رفع نیستند. از این رو، نمونه قبل از اندازه‌گیری داده‌های بیضی سنجی، به مدت ۱۰ دقیقه در حمام اسیدی و آب اکسیژنه غوطه‌ور شده و سپس در استون خالص به مدت ۳ دقیقه تمیز شد. پس از این فرایند، نمونه با آب مقطر (با درجه خلوص عالی) شسته و سپس خشک شد. همچنین، برای حصول اطمینان از نبود چربی احتمالی، نمونه توسط یک دستگاه ماوراء صوت (در حمامی از الکل اتیلیک) چربی زدایی شد.

در چیدمان بیضی سنجی تکفام از یک منبع نور تکفام که معمولاً یک لیزر در ناحیه نورهای مرئی، مثلاً لیزر He-Ne با طول موج ۶۳۳ نانومتر است، استفاده می‌شود. از این رو، به آن بیضی سنج لیزری نیز گفته می‌شود. مزایای بیضی سنجی تکفام، تمرکز باریکه نور لیزر روی ناحیه‌ای بسیار کوچک (تقریباً یک نقطه) است. همچنین قدرت توان نور لیزر نسبت به منابع نوری با طول موج‌های گسترده بسیار زیاد بوده و می‌توان از این چیدمان برای تصویربرداری نیز استفاده کرد. با وجود این، با این روش تنها یک دسته از مقادیر ψ و Δ در هر اندازه‌گیری به دست می‌آید. در شکل (۱)، اساس کار یک بیضی سنج با تحلیلگر چرخان نشان داده شده است.



شکل ۱ اساس کار یک بیضی سنج تحلیلگر چرخان.

عناصر چیدمان آزمایش، که در آزمایشگاه اپتیک کاربردی دانشگاه بوعلی سینا برپا شد، عبارتند از: یک منبع نور لیزر هلیوم-نئون با طول موج $633 \approx 632.8$ نانومتر، قطعه موازی‌ساز که از دو عدسی (در فاصله کانونی یکدیگر) تشکیل شده، قطبشگر یا پلاروید، ریل‌های اپتیکی، گونیومتر و

آشکارساز (فوتوالمنت، تقویت کننده، مولتی متر دیجیتال). پس از تنظیم و همخط کردن اپتیکی دستگاه به منظور انجام آزمایش بیضی‌سنجی، زاویه قطبشگر P را در زاویه ۴۵ درجه به ترتیب بعد از لیزر و موازی‌ساز تنظیم کرده سپس زاویه گونیومتر را که نمونه روی آن قرار دارد از ۵۰ تا ۸۰ درجه با گام‌های (فواصل) ۱۰ درجه تغییر می‌دهیم. به منظور داده‌گیری برای هر زاویه فرود، زاویه تحلیلگر را از ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام‌های ۵ درجه تغییر داده و شدت نور در آشکارساز (تقویت‌شده توسط مولتی متر دیجیتال) ثبت می‌شود. پس از تعیین زوایای تجربی بیضی‌سنجی برای هر زاویه فرودی، مدلی ساده شامل لایه‌ای با ضخامت کم و یک زیرلایه با ضخامت زیاد و ثابت‌های اپتیکی نامعلوم در نرم‌افزار متلب نوشته که برای برازش داده استفاده می‌شود.

۴. یافته‌ها و نتایج

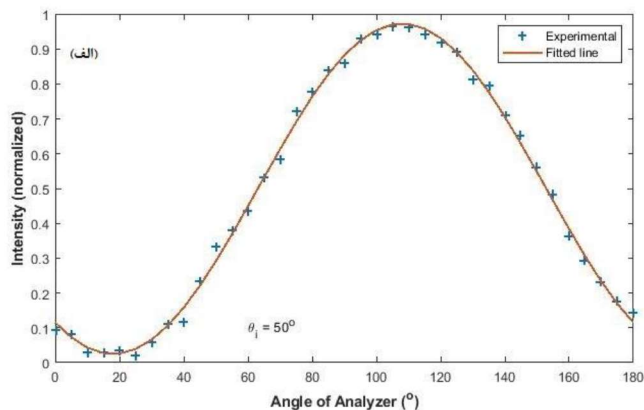
در آزمایش‌های قطبش‌سنجی، فرض بر آن است که منبع اصلی تابش نور فاقد هرگونه قطبشی است و آشکارساز نیز نسبت به پرتو فرودی قطبیده به آن غیرحساس است. از آنجا که، منابع تابش نور همواره تا اندازه‌ای قطبیده هستند، به سه روش زیر می‌توان قطبیدگی آن‌ها را حذف کرد:

۱. قطبیده کردن پرتو گسیل‌شده از منبع اصلی نور را پیش از فرود به سطح نمونه تحت زاویه ۴۵ درجه که در آن دامنه مؤلفه‌های p و s دارای مقادیری یکسان می‌باشد (در کارهای تجربی این پژوهش از این روش استفاده شد و لذا در تمامی محاسبات انجام‌شده بر داده‌ها $p=45$ درجه در نظر گرفته شده است).

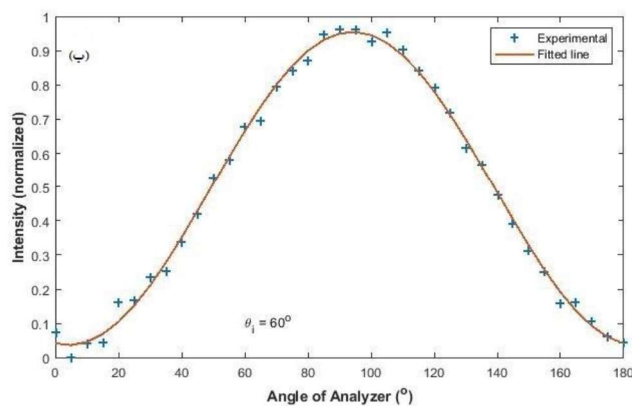
۲. در نظر گرفتن پارامتر قطبیدگی منبع تابش نور به عنوان متغیر سوم و سپس اقدام به اندازه‌گیری داده‌ها با سه اندازه‌گیری مستقل.

۳. استفاده از دو زاویه مختلف برای اندازه‌گیری بازتاب، به طوری که در هر مرحله، نمونه به اندازه ۹۰ درجه حول محور دوران چرخانده شود و سپس از دامنه‌های بازتابی اندازه‌گیری شده میانگین گرفته شود. این روش مناسب‌ترین روش حذف قطبیدگی منبع تابش را ارائه می‌دهد، به طوری که بدون استفاده از دیگر ابزار قطبیدگی امکان خطای ناشی از وجود قطبیدگی را حذف می‌کند.

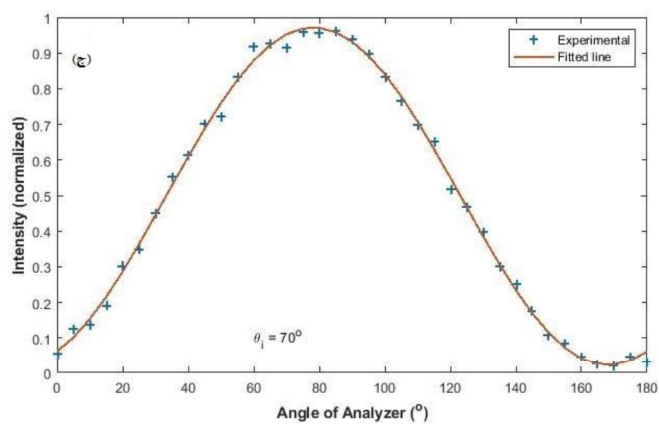
با برپایی چیدمان بیضی‌سنج تحلیلگر چرخان و استفاده از لیزر هلیم‌نئون با طول موج ۶۳۳ نانومتر داده‌های آزمایشگاهی مربوط به شدت اندازه‌گیری شدند. داده‌ها (شدت نور در آشکارساز) با چرخش زاویه تحلیلگر A از ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام‌های ۵ درجه‌ای تحت زوایای فرود مختلف ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه اندازه گرفته شد. همچنین، برای هر زاویه فرود، داده‌گیری در ۴ ناحیه مختلف نمونه تکرار و سپس میانگین گرفته شد.



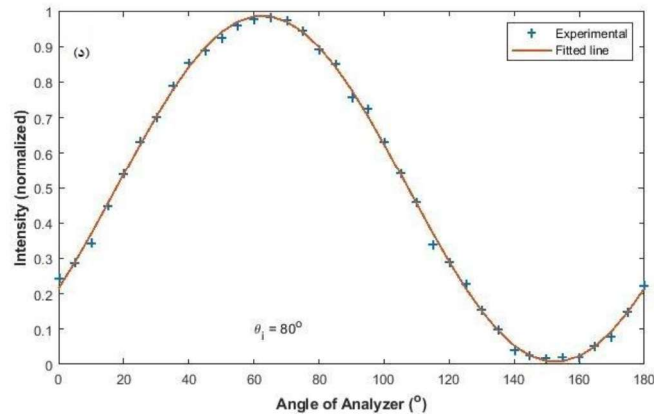
شکل ۲ الف): منحنی شدت نور بهنجار I بر حسب زاویه تحلیلگر A در زاویه فرود 50° درجه.



شکل ۲ ب): منحنی شدت نور بهنجار I بر حسب زاویه تحلیلگر A در زاویه فرود 60° درجه.

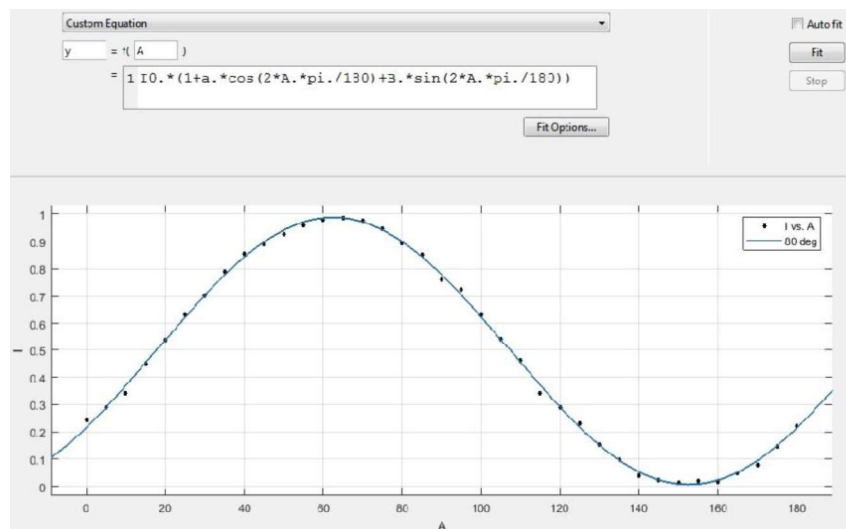


شکل ۲ ج): منحنی شدت نور بهنجار I بر حسب زاویه تحلیلگر A در زاویه فرود 70° درجه.



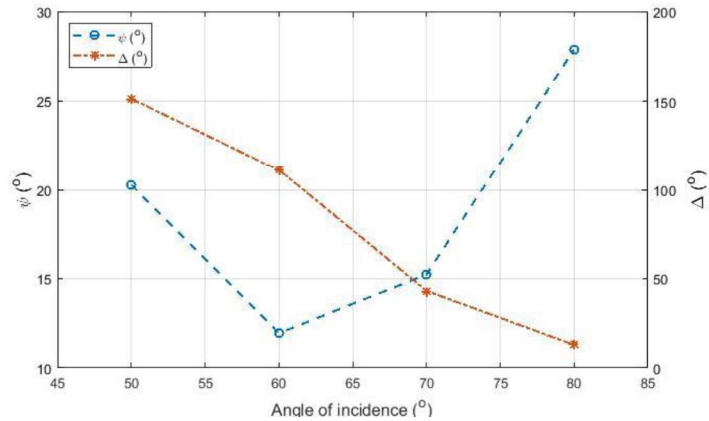
شکل ۲ د): منحنی شدت نور بهنجار I برحسب زاویه تحلیلگر A در زاویه فرود ۸۰ درجه.

شکل (۲) منحنی‌های تغییرات شدت نور در آشکارساز (بهنجار شده) را برحسب زاویه تحلیلگر A به ترتیب، در زاویه‌های فرود الف) (۵۰ درجه، ب) (۶۰ درجه، ج) (۷۰ درجه و د) (۸۰ درجه نشان می‌دهد. با برازش داده‌های به دست آمده، که با نماد (+) در شکل نشان داده شده است، با معادله (۳) ضرایب ثابت α و β (یعنی، روابط (۴) و (۵))، به دست می‌آیند. این ضرایب از طریق معادله (۶) به پارامترهای بیضی‌سنجی ψ و Δ مربوط می‌شوند. با به دست آوردن پارامترهای بیضی‌سنجی، اکنون می‌توان به رابطه اساسی بیضی‌سنجی (رابطه (۲)) دست یافت.

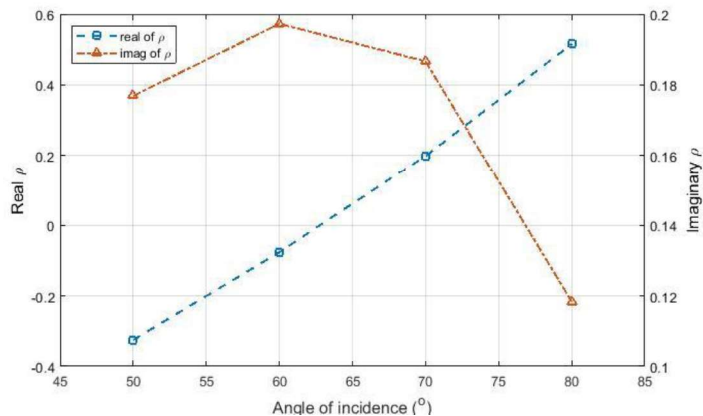


شکل ۳ منحنی شدت نور بهنجار I برحسب زاویه تحلیلگر A در زاویه فرود ۸۰ درجه (با نماد نقطه) و منحنی برازش شده (با نماد خط) در نرم‌افزار متلب.

همچنین، شکل (۳) روند برازش داده‌های آزمایشگاهی با معادله (۳) را در زاویه فرود ۸۰ درجه در نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که، منحنی برازش شده (خط پر) نزدیکی بسیار خوبی به داده‌های آزمایشگاهی (نقاط سیاه داده‌ها) دارد. این امر حاکی از دقت مطلوب در داده‌گیری است. پس از تعیین پارامترهای بیضی‌سنجی ψ و Δ آزمایشگاهی در هر زاویه فرود، اکنون می‌توان ρ_{exp} را با استفاده از رابطه (۲) و ρ_{cal} را از معادلات فرنل [۱۱] (با وارونه سازی عددی) به دست آورد. ψ و Δ در زوایای فرود مختلف ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه، در شکل (۴) و قسمت‌های حقیقی و موهومی ρ_{exp} در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.



شکل ۴ نمودار پارامترهای بیضی‌سنجی ψ و Δ در زوایای فرود ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه (مستخرج از رابطه (۶)).



شکل ۵ نمودار قسمت‌های حقیقی و موهومی ρ_{exp} در زوایای فرود ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه (مستخرج از رابطه (۲)).

۱۴ / محاسبه ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه نازک دی‌اکسید تیتانیوم با استفاده از روش بیضی‌سنجی تکفام

محاسبات در نرم‌افزار متلب و با اعمال این روش روی ρ_{cal} و ρ_{exp} انجام شده است، به طوری که با خطایی برابر ۰/۰۱ با هم برابر شوند. به منظور جمع‌بندی و درک بهتر، نتایج حاصل در جدول (۱) گردآوری شده است.

جدول ۱ نتایج تحلیل داده‌ها در زوایای فرود مختلف.

θ_i (°)	α	β	ψ (°)	Δ (°)	n زیر لایه	n لایه	k لایه	d (nm)
۵۰	-۰/۷۷	-۰/۵۶	۲۰/۲۷	۱۵۱/۳۹	۱/۵۰	۲/۵۹	۰/۰۴	۴۹/۷۶
۶۰	-۰/۹۲	-۰/۱۳	۱۱/۵۹	۱۱۱/۱۹	۱/۴۷	۲/۵۶	۰/۰۵	۴۹/۶۲
۷۰	-۰/۸۷	۰/۳۸	۱۵/۲۴	۴۳/۲۵	۱/۴۹	۲/۵۸	۰/۰۳	۴۹/۸۴
۸۰	-۰/۵۷	۰/۸۱	۲۷/۸۷	۱۲/۹۴	۱/۴۶	۲/۵۹	۰/۰۴	۴۹/۱۸

همانطور که مشاهده می‌شود، پارامترهای حاصل از تحلیل داده‌ها در زوایای فرود مختلف تا اندازه‌ای متفاوت هستند. با میانگین‌گیری نتایج در زوایای مختلف، برای ضریب شکست زیر لایه مقدار ۱/۴۸ و برای ضریب شکست و ضریب خاموشی و ضخامت لایه نازک به ترتیب، مقادیر ۲/۵۸ و ۰/۰۴ و ۴۹/۶۰ نانومتر به دست می‌آید که در مقایسه با گزارش‌های تجربی [۱۲، ۱۳] در این زمینه مقادیر مناسبی در طول موج ۶۳۳ نانومتر هستند. سرانجام، ضخامت لایه از طریق پروفیلومتری نیز اندازه‌گیری و مقدار ۴۸/۴۵ نانومتر به دست آمد که اختلاف نسبتاً کمی (۱/۱۵ نانومتر) با مقدار ضخامت محاسبه شده دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترهای بیضی‌سنجی (Δ ، ψ) مربوط به تک لایه نازک مفروض (لایه نازک دی‌اکسید تیتانیوم با مشخصات معلوم، به عنوان مرجع)، به روش بیضی‌سنجی تکفام از طریق برازش داده‌های تجربی در چیدمان بیضی‌سنج تحلیلگر چرخان (RAE) در زوایای فرود مختلف، با موفقیت تعیین شد. سپس، با به کارگیری یک مدل اپتیکی، با وارونه‌سازی عددی معادلات فرنل و ضرایب اپتیکی و ضخامت لایه محاسبه شد. نتایج به دست آمده تطابق خوبی را با مقادیر مربوط به لایه نازک مرجع نشان می‌دهد، که با تکرار داده‌گیری در زوایای فرود بیشتر و میانگین‌گیری می‌توان دقت اندازه‌گیری را از این هم مناسب‌تر کرد. به علاوه، مقادیر به دست آمده با نتایج تجربی گزارش شده نیز مطابقت دارد. همچنین، متوسط ضخامت محاسبه شده (۴۹/۶۰ نانومتر) اختلاف ۱/۱۵ نانومتر را با ضخامت اندازه‌گیری شده (۴۸/۴۵ نانومتر) به روش پروفالومتری دارد.

۶. تقدیر و تشکر

از حمایت‌های تحصیلات تکمیلی دانشکده علوم دانشگاه بوعلی سینا قدردانی می‌شود.

منابع

- [1] Bergamonti L., Predieri G., Paz Y., Fornasini L., Lottici P.P., and Bondioli F., Enhanced Self-Cleaning Properties of N-doped TiO₂ Coating for Cultural Heritage, *Microchemical Journal*, **133**, 1-12, 2017.
- [2] Rao X., Li J., Feng X., and Chu C., Bone-Like Apatite Growth on Controllable Macroporous Titanium Scaffolds Coated with Microporous Titania, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **77**, 225-233, 2018.
- [3] Baglov A.V., Denisov N.M., Borisenko V.E., Uglov V.V., and Malashevich A.A., Photocatalytic Activity of Nanostructured Titania Coatings on Aluminum Substrates, *Inorganic Materials*, **53**, 1180-1184, 2017.
- [4] Romanyuk V.R., Kondratenko O.S., Fursenko O.V., Lytvyn O.S., Zynyo S.A., Korchovyi A.A., and Dmitruk N.L., Thermally Induced Changes in Thin Gold Films Detected by Polaritonic Ellipsometry, *Materials Science and Engineering B*, **149**, 285-291, 2008.
- [5] Taherniya A., and Raoufi D., The Annealing Temperature Dependence of Anatase TiO₂ Thin Films Prepared by the Electron-Beam Evaporation Method, *Semiconductor Science and Technology*, **31**, 125012-9, 2016.
- [6] Azzam R.M.A., and Bashara N.M., *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1987.
- [7] Tompkins H.G., and Irene E.A. (Eds.), *Handbook of Ellipsometry*, Andrew, New York, 2005.
- [8] Hunter T.N., Jameson G.J., and Wanless E.J., Determination of Contact Angles of Nanosized Silica Particles by Multi-Angle Single-Wavelength Ellipsometry, *Australian Journal of Chemistry*, **60**, 651-655, 2007.
- [9] Liu Y., Qiu J., Liu L., and Cao B., Extracting Optical Constants of Solid Materials with Microrough Surfaces from Ellipsometry without using Effective Medium Approximation, *Optics express*, **27**, 17667-17680, 2019.
- [10] Maulana L.Z., Megasari K., Suharyadi E., Anugraha R., Abraha K., and Santoso I., Inexpensive Home-Made Single Wavelength Ellipsometer ($\lambda = 633$ nm) for Measuring the Optical Constant of Nanostructured Materials, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **202**, 012031, 2017.
- [11] Fowles Grant R., *Introduction to Modern Optics*, 2nd Ed. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1975.
- [12] Rao K.N., Influence of Deposition Parameters on Optical Properties of TiO₂ Films, *Optical Engineering*, **41**, 2357-2364, 2002.
- [13] Mosaddeq-ur-Rahman M., Yu G., Soga T., Jimbo T., Ebisu H., and Umeno M., Refractive Index and Degree of Inhomogeneity of Nanocrystalline TiO₂ Thin Films: Effects of Substrate and Annealing Temperature, *Journal of Applied Physics*, **88**, 4634-4641, 2000.