بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

اندازه گیری ضریب شکست و ضخامت لایه نازک MgF_2 بر روی بستر BK7 به روش بیضی سنجی نول

مسعود کاوش تهرانی، آصف عبدالهادی، علی کیانی

مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

m_kavosh@mut-es.ac.ir, assefabdalhade@gmail.com, kiani2231@gmail.com

چکیده –در این تحقیق بااستفاده از چیدمان آزمایشگاهی بیضی سنجی نول ضریب شکست و ضخامت لایه MgF_2 بر روی بستر BK7 اندازه گیری شده است. در این چیدمان با تابش نور لیزر هلیوم نئون تحت زوایای ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه به نمونه ضریب شکست و ضخامت لایه MgF_2 توسط برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب تعیین گردیده است. نتایج به دست آمده با نتایج واقعی تطابق خوبی نشان می دهد

کلید واژه- بیضی سنجی نول، ضریب شکست، لایه نازک

Measurement of refractive index and thickness of MgF_2 thin film on BK7 substrate by null ellipsometry

Masoud Kavosh Tehrani, Assef Abdalhade, Ali kiani

Faculty of applied science, Malek ashtar University of Technology

m_kavosh@mut-es.ac.ir, assefabdalhade@gmail.com, kiani2231@gmail.com

Abstract- In this paper, the refractive index and thickness of MgF_2 thin film on BK7 substrate have been measured using the null ellipsometry. In this arrangement, helium neon laser light irradiation at angles of 45, 50 and 55 degrees to the sample. The refractive index and thickness of the MgF_2 layer is determined by the program written in MATLAB software. The results show a good agreement with the real results.

Keywords: null ellipsometry, refractive index, thin film

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-26]

مقدمه

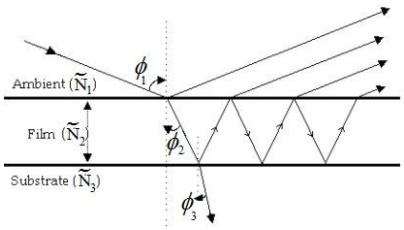
بیضی‌سنجی روشی نوری برای مطالعه ویژگی‌های دی‌الکتریک و لایه‌نازک است. در این روش با بررسی خصوصیات انتقال و بازتاب پس از برخورد نور با برخی مواد به مطالعه ویژگی‌های اپتیکی آن مواد پرداخته می‌شود. میدان الکتریکی نوری که به‌عنوان‌مثال از لیزر ساطع می‌شود را می‌توان به دو قطبش s و p تقسیم کرد. زمانی که پرتو نور به ماده‌ی شفافی برخورد می‌کند قسمتی از آن، بازتاب می‌شود؛ اما قسمت دیگری از آن ابتدا به داخل ماده نفوذ می‌کند و اگر مرز دیگری وجود داشته باشد دوباره بازتاب می‌شود. هنگام تابش نور روی یک نمونه قطبش‌های s و p تغییرات مختلف را در دامنه و فاز نشان می‌دهند. با اندازه‌گیری این تغییرات می‌توان ضریب شکست و ضخامت لایه را تعیین کرد [۱-۵].

در این مقاله با چیدمان آزمایشگاهی یک بیضی‌سنج تک‌فام نول به‌عنوان روشی نسبتاً ساده و کم‌هزینه نسبت به سایر روش‌های متداول، ضریب شکست، ضریب خاموشی و ضخامت لایه‌نازک MgF_2 بر بستر BK7 محاسبه و نتایج حاصل با مقادیر واقعی مقایسه خواهد شد و محدوده خطا به‌دست خواهد آمد.

مبانی نظری بیضی‌سنج نول

بیضی‌سنج نول ازنظر تاریخی اولین بیضی‌سنجی بود که در اواخر قرن نوزدهم ساخته شد. اصلی که این نوع بیضی‌سنجی بر آن استوار است، به حداقل رساندن شدت نور در آشکارساز است. با تنظیم زاویه سمتی قطبش‌گر (P) و جبران‌کننده (C) می‌توان نور را پس از انعکاس در مرز سطح به‌صورت خطی قطبی کرد. با تنظیم زاویه سمتی آنالیزور (A) با زاویه تابش پرتو به سطح نمونه جهت دستیابی به جهت عمود نسبت به موج قطبیده خطی، شدت نور در آشکارساز به حداقل می‌رسد یا صفر می‌شود [۵].

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده‌شده است، نتیجه بازتاب نور از سطح مشترک از محیط اول برابر است با جمع تمام عبورهای نور از سطح دو به سطح یک.



شکل ۱: بازتاب و انتقال از چندلایه‌ای [۱].

کمیت مختلط ρ، تغییرات حاصل در قطبش پس از بازتاب است و ضریب نسبی بازتاب نامیده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱-۵].

$$\rho = \tan\Psi e^{j\Delta} \qquad (۱)$$

این معادله یک رابطه بنیادی در بیضی‌سنجی است که $\tan\Psi$ تغییرات در نسبت دامنه‌ها برای دو قطبش s و p مربوط به نور منعکس‌شده و Δ جابجایی اختلاف‌فاز بین نور ورودی و خروجی را نشان می‌دهد. با استفاده از معادله ۱ و با داشتن زاویه تابش، ϕ_1 می‌توان ضریب شکست مختلط لایه نازک، $\tilde{N}_2$، را حساب کرد [۴].

$$\tilde{N}_2 = \sin\phi_1\left[1+\tan^2\phi_1\left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۲)$$

ضرایب بازتاب فرنل r که برابر با مقدار دامنه نور بازتاب شده به نور فرودی است عبارت است از[۱،۴]:

$$r_{ij}^{p} = \frac{\tilde{N}_j\cos\phi_i - \tilde{N}_i\cos\phi_j}{\tilde{N}_j\cos\phi_i + \tilde{N}_i\cos\phi_j} \qquad (۳)$$

$$r_{ij}^{s} = \frac{\tilde{N}_i\cos\phi_i - \tilde{N}_j\cos\phi_2}{\tilde{N}_i\cos\phi_i + \tilde{N}_j\cos\phi_j} \qquad (۴)$$

در اینجا بالانویس مربوط به نوع قطبش و زیرنویس مربوط به محیط i و j است. از طرفی ضریب بازتاب که معرف میزان شدت بازتابی برای یک سطح است برابر است با [۱]:

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-26]

$$r^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(-i2\beta)} \quad (۵)$$

$$r^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}^p r_{23}^p \exp(-i2\beta)} \quad (۶)$$

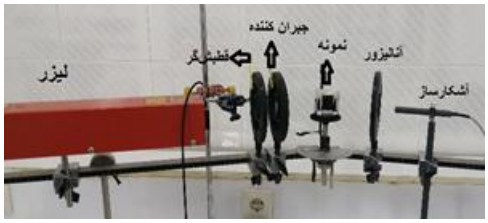
در اینجا β برابر باضخامت فازی لایه است و برابر است با:

$$\beta = 2\pi(\frac{d}{\lambda})\tilde{N}_2 \cos\phi_2 \quad (۷)$$

که λ طول‌موج نور فرودی و d ضخامت لایه است.

چیدمان آزمایشگاهی بیضی‌سنج نول

در روش بیضی‌سنجی نول مطابق شکل ۲ ابتدا تیغه چارک موجی نسبت به صفحه تابش در زاویه ۴۵+ یا ۴۵- درجه قرار می‌گیرد. سپس با تغییر زاویه قطبش‌گر و آنالیزور کاری می‌کنیم که نور بازتابی از سطح نمونه به‌صورت خطی قطبیده گردد و پس از عبور از آنالیزور شدت نور در آشکارساز به حداقل یا صفر برسد. به‌این‌ترتیب با اندازه-گیری زاویه قطبش‌گر و آنالیزوری می‌توان پارامترهای بیضی‌سنجی را محاسبه کرد.



شکل ۲: تصویر از چیدمان آزمایشگاهی بیضی‌سنجی نول

با استفاده از قطبش‌گر و آنالیزور می‌توان چند مجموعه جواب را که به‌شدت صفر می‌رسد، تشکیل داد. با قرار دادن زاویه تیغه چارک موجی (C_i) در ۴۵ درجه نسبت به صفحه تابش و محدود کردن زاویه قطبش‌گر (P_i) و آنالیزور (A_i)، مجموعه شرایط را می‌توان به دو مجموعه مطابق زیر محدود کرد.

ناحیه۱: $C = 45^\circ$ ، $0^\circ < A_1 < 90^\circ$ ، $-45^\circ < P_1 < 135^\circ$

ناحیه۲: $C = 45^\circ$ ، $-90^\circ < A_2 < 0^\circ$ ، $-135^\circ < P_2 < 45^\circ$

ارتباط بین Ψ و Δ و زاویه آنالیزور و قطبش‌گر در این دو ناحیه به‌صورت زیر است [۶]:

$$\Psi_1 = A_1 \text{ ، } \Delta_1 = 270^\circ - 2P_1 \text{ یا } \Delta_1 = -90^\circ - 2P_1 \quad (۸)$$

$$\Psi_2 = -A_2 \text{ ، } \Delta_2 = 90^\circ - 2P_2 \quad (۹)$$

در اینجا اندیسهای ۱ و ۲ مربوط به ناحیه ۱ و ۲ است. به همین ترتیب دو راه حل دیگر برای تیغه چارک موجی در زاویه ۴۵- درجه نسبت به صفحه تابش خواهیم داشت، ارتباط بین Ψ و Δ با زاویه آنالیزور و قطبش‌گر در این حالت مطابق روابط ۸ و ۹ است؛ بنابراین چهار مجموعه P و A با شدت صفر به‌دست می‌آوریم. با این چهار دسته جواب می‌توان چهار دسته Ψ و Δ به‌دست آورد و از این چهار دسته می‌توان با استفاده از روابط ۱ تا ۶ و نوشتن یک برنامه محاسباتی چهار ضریب شکست و چهار ضخامت به‌دست آورد؛ بنابراین برای هر زاویه تابش چهار ضریب شکست و چهار ضخامت به‌دست می‌آید. با تغییر زاویه تابش می‌توان جواب‌های بیشتری به‌دست آورد و در نهایت جهت کاهش خطا متوسط‌گیری کرد.

نتایج اندازه گیری

در بیضی‌سنجی نول، همان‌طور که در بخش بالا ذکر شد، جبران‌کننده در ۴۵ درجه یا ۴۵- درجه نگه داشته می شود و برای به‌دست آوردن حداقل شدت برای هر زاویه فرودی، زاویه آنالیزور و قطبش‌گر را باید تغییر داد. نمونه‌ای که در این آزمایش اندازه‌گیری می‌شود، یک لایه نازک MgF_2 به ضخامت ۱۱۰nm بر روی شیشه BK7 است، جدول‌های ۱ تا ۳ نتایج اندازه‌گیری در زاویه‌های تابش ۴۵، ۵۰ و ۵۵ را نشان می‌دهد.

جدول ۱: نتایج اندازه‌گیری برای زاویه تابش ۴۵ درجه.

ردیف	C (درجه)	A (درجه)	P (درجه)
۱	۴۵ منطقه اول	۱۶	۵۶
۲	۴۵ منطقه دوم	-۱۶	-۳۴
۳	۴۵- منطقه اول	۱۶	۳۵

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-26]

۴	۴۵- منطقه دوم	-۱۵	-۵۵

جدول ۲۰: نتایج اندازه‌گیری برای زاویه تابش ۵۰ درجه.

ردیف	C (درجه)	A (درجه)	P (درجه)
۱	۴۵ منطقه اول	۱۳	۷۰
۲	۴۵ منطقه دوم	-۱۲	-۲۰
۳	۴۵- منطقه دوم	۱۰	۲۳
۴	۴۵- منطقه اول	-۸	-۶۲

جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری برای زاویه تابش ۵۵ درجه.

ردیف	C (درجه)	A (درجه)	P (درجه)
۱	۴۵ منطقه اول	۹	۹۱
۲	۴۵ منطقه دوم	-۹	-۲
۳	۴۵- منطقه اول	۹	۹۱
۴	۴۵- منطقه دوم	-۸,۵	۲

جهت محاسبه ضریب شکست و ضخامت لایه برنامه‌ای بـه زبـان متلب نوشته‌شده است که در این برنامه زاویه فرودی θ، زاویه قطبش‌گر P و زاویه آنالیزور A وارد می‌گردد و در نتیجه اجرای برنامه Δ، Ψ، ضریب نسبی بازتاب ρ، ضریب شکست مختلط لایه نازک و ضخامت آن محاسبه می‌شود، نتایج به‌دست آمده از اجرای این برنامه در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه‌شده است

جدول ۴: ضریب شکست نمونه در زاویه‌های فرود مختلف.

ردیف	C (درجه)	ضریب شکست مختلط					
		θ=۴۵		θ=۵۰		θ=۵۵	
		k_2	n_2	k_2	n_2	k_2	n_2
۱	۴۵ ناحیه ۱	-۰,۲۳۷۹	۱,۳۶۷۶	-۰,۳۵۹۶	۱,۳۵۶۲	-۰,۲۹۰	۱,۳۵۶۱
۲	۴۵ ناحیه ۲	-۰,۲۳۷۹	۱,۳۶۷۶	-۰,۳۲۲۶	۱,۳۴۸۲	-۰,۳۰۲۵	۱,۳۸۵۵
۳	-۴۵ ناحیه ۱	-۰,۲۳۷۹	۱,۳۸۲۱	-۰,۲۴۰۲	۱,۳۶۲۵	-۰,۲۹۰۱	۱,۳۵۶۱
۴	-۴۵ ناحیه ۲	-۰,۱۹۵۳	۱,۳۴۹۲	-۰,۱۵۱۷	۱,۳۶۷۷	-۰,۲۷۰۷	۱,۳۵۴۵
۵	متوسط	-۰,۲۲۲۹	۱,۳۶۶۶	-۰,۲۶۸۵	۱,۳۵۸۶	-۰,۲۸۹۰	۱,۳۶۳۰

جدول ۵: ضخامت نمونه در زاویه‌های فرود مختلف.

ردیف	C (درجه)	ضخامت (nm)		
		θ= ۴۵	θ=۵۰	θ=۵۵
۱	۴۵ ناحیه ۱	۱۰۶,۴۱	۱۱۰,۱۹	۱۱۹,۷۸
۲	۴۵ ناحیه ۲	۱۰۶,۴۱	۱۱۴,۱۱	۱۰۹,۶۹
۳	۴۵- ناحیه ۱	۱۰۲,۹۵	۱۱۳,۱۴	۱۱۹,۷۸
۴	۴۵- ناحیه ۲	۱۱۴,۲۰	۱۱۶,۶۸	۱۲۱,۱۷
۵	متوسط	۱۰۷,۴۹	۱۱۳,۵۲	۱۱۷,۵۸

جمع بندی

با توجه به نتایج به‌دست آمده مقدار ضریب شکست n=۱,۳۶±۰,۰۱ و ضخامت لایه d=۱۱۳±۴nm به‌دست می‌آید. مقدار اسمی ضریب شکست MgF2 در طول موج لیزر هلیوم نئون (۶۳۲,۸nm) ۱,۳۷ و ضخامت لایه مورد استفاده ۱۱۰nm بوده است که مشاهده می‌گردد نتایج در محدوده خطا بوده است. در ضمن قسمت موهومی ضریب شکست ماده در طول موج مورد استفاده صفر است که با مقادیر به‌دست آمده از محاسبات هم خوانی ندارد. علت این امر را می‌توان عدم همراستایی قطعات اپتیکی و مناسب نبودن قطبنده ها و تیغه ربع موج بیان کرد.

مرجع ها

[1] D. Goncalves, A. Irene, "**Fundamentals and Applications of Spectroscopic Ellipsometry**", Quim. Nova, Vol. 25, No. 5, (2002) 794-800

[2] R. V. A. Azzam and N. M. Bashara, "**Ellipsometry and Polarized Light**", ch. 4, North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, (1977).

[3] R. Todorov,1 J. Tasseva,1 V. Lozanova,1 A. Lalova,1 Tz. Iliev,2 and A. Paneva3, "**Ellipsometric characterization of thin films from multicomponent chalcogenide glasses for application in modern optical devices**", Advances in Condensed Matter Physics, Volume 2013, Article ID 308258

[4] L Z Maulana et. Al., "Inexpensive home-made single wavelength ellipsometer (λ = 633 nm) for measuring the optical constant of nanostructured materials" IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 202 012031, 2017

[5] Harland G. Tompkins and Eugene A. Irene, "**Handbook of ellipsometry**", 2005 by William Andrew, Inc.

[6] H. Fujiwara, "spectroscopy ellipsometry: principles and applications", John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-26]

با سلام و احترام
ضمن تشکر از زحمات داوران محترم تصحیحات لازم به شرح زیر انجام گردید.
۱- مبانی نظری بیضی سنجی نول باز نویسی شد
۲- کلیه پارامترها در معادلات در متن تعریف شد و یکسان گردید
۳- مرجع ٦ به مقاله اضافه گردید.
٤- در خصوص خروجی نتایج و برنامه نویسی متلب جهت پیداکردن نتایج باید گفت که در این صفحات محدود بیشتر از این مقدور نبود. انشاالله توضیحات کامل در زمان ارائه داده خواهد شد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-26]