

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



اندازه گیری ضریب شکست و ضخامت لایه نازک MgF₂ 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 MgF₂ بـر روی بسـتر 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 MgF₂ توسط برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب تعیین گردیده است. نتایج به دست آمده با نتایج واقعـی تطـابق خوبی نشان می دهد

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

Measurement of refractive index and thickness of MgF₂ 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

مقدمه

بیضی سنجی روشی نوری برای مطالعه ویژگیهای دی الکتریک و لایه نازک است. در این روش با بررسی خصوصیات انتقال و بازتاب پس از برخورد نور با برخی مواد به مطالعه ویژگیهای اپتیکی آن مواد پرداخته می شود. میدان الکتریکی نوری که به عنوان مثال از لیزر ساطع می شود را می توان به دو قطبش ۶ و p تقسیم کرد. زمانی که پرتو نور به ماده ی شفافی برخورد می کند قسمتی از آن، بازتاب می شود؛ اما قسمت دیگری از آن ابتدا به داخل ماده نفوذ می کند و اگر مرز دیگری وجود داشته باشد دوباره بازتاب می شود. هنگام تابش نور روی یک نمونه قطبش های ۶ و p تغییرات مختلف را در دامنه و فاز نشان می دهند. با اندازه گیری این تغییرات می توان

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 MgF₂ بر بستر BK7 محاسبه و نتایج حاصل با مقادیر واقعی مقایسه خواهد شد و محدوده خطا بهدست خواهد آمد.

مبانی نظری بیضی سنج نول

بیضی سنج نول ازنظر تاریخی اولین بیضی سنجی بود که در اواخر قرن نوزدهم ساخته شد. اصلی که این نوع بیضی سنجی بر آن استوار است، به حداقل رساندن شدت نور در آشکار ساز است. با تنظیم زاویه سمتی قطبش گر (P) و جبران کننده (C) می توان نور را پس از انعکاس در مرز سطح به صورت 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 آشکار ساز به حداقل می رسد یا صفر می شود [۵].

همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده 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 به صورت زیر تعریف می شود [۱–۵].

$$\rho = \tan \Psi e^{j\Delta} \tag{1}$$

این معادله یک رابطه بنیادی در بیضی سنجی است که tan Ψ تغییرات در نسبت دامنه ا برای دو قطبش s و Φ مربوط به نور منعکس شده و Δ جابجایی اختلاف فاز بین نور ورودی و خروجی را نشان می دهد. با استفاده از معادله ۱ و با داشتن زاویه تابش، ϕ_1 می توان ضریب شکست مختلط لایه نازک، \tilde{N}_2 ، را حساب کرد [4].

$$\tilde{N}_{2} = \sin \phi_{\rm l} \left[1 + \tan^{2} \phi_{\rm l} \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(7)

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

$$r_{ij}^{P} = \frac{\tilde{N}_{j}\cos\phi_{i} - \tilde{N}_{i}\cos\phi_{j}}{\tilde{N}_{j}\cos\phi_{i} + \tilde{N}_{i}\cos\phi_{j}}$$
(٣)

$$r_{ij}^{s} = \frac{\tilde{N}_{i}\cos\phi_{i} - \tilde{N}_{j}\cos\phi_{2}}{\tilde{N}_{i}\cos\phi_{i} + \tilde{N}_{j}\cos\phi_{j}}$$
(*)

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]:

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

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

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

در اینجا
$$eta$$
 برابر باضخامت فازی لایه است و برابر است با:

$$eta=2\pi(rac{d}{\lambda}) ilde{N}_2\cos\phi_2$$
 (۷)
که eta طول موج نور فرودی و d ضخامت لایه است.

چیدمان آزمایشگاهی بیضیسنج نول

در روش بیضی سنجی نول مطابق شکل ۲ ابتدا تیغه چارک موجی نسبت به صفحه تابش در زاویه ۴۵+ یا ۴۵- درجه قرار می گیرد. سپس با تغییر زاویه قطبش گر و آنالیزور کاری می کنیم که نور بازتابی از سطح نمونه به صورت خطی قطبیده گردد و پس از عبور از آنالیزور شدت نور در آشکارساز به حداقل یا صفر برسد. به این تر تیب با اندازه-گیری زاویه قطبش گر و آنالیزوری می توان پارامترهای بیضی سنجی را محاسبه کرد.



شکل ۲: تصویر از چیدمان آزمایشگاهی بیضیسنجی نول

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

 $-45^{\circ} < P_1 < 135^{\circ}$ ، $0^{\circ} < A_1 < 90^{\circ}$ ، $C = 45^{\circ}$: ناحيه ۲: -135° < $P_2 < 45^{\circ}$, $-90^{\circ} < A_2 < 0^{\circ}$, $C = 45^{\circ}$: ناحيه ۲: ناحيه ۲: ناحيه ۲: -135°

ارتباط بین
$$\Psi$$
و Δ و زاویه آنالیزور و قطبش گر در این دو
ناحیه بهصورت زیر است [۶]:

$$Ψ_1 = A_1 \cdot Δ_1 = 270^\circ - 2P_1$$
 μ $Δ_1 = -90^\circ - 2P_1$ (A)

$$\Psi_2 = -A_2 \cdot \Delta_2 = 90^\circ - 2P_2$$
 (9)

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 $\Psi e \Delta$ با زاویه آنالیزور و قطبش گر در این حالت مطابق روابط ۸ و ۹ است؛ بنابراین چهار مجموعه Pو A با شدت صفر بهدست میآوریم. با این چهار دسته جواب میتوان چهار دسته $\Psi e \Delta$ بهدست آورد و از این چهار دسته میتوان با استفاده از روابط ۱ تا ۶ و نوشتن نخامت بهدست آورد؛ بنابراین برای هر زاویه تابش 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 متوسط گیری کرد.

نتایج اندازه گیری

در بیضی سنجی نول، همان طور که در بخش بالا ذکر شد، جبران کننده در ۴۵ درجه یا ۴۵ – درجه نگه داشته می شود و برای به دست آوردن حداقل شدت برای هر زاویه فرودی، زاویه آنالیزور و قطبش گر را باید تغییر داد. نمونه ای که در این آزمایش اندازه گیری می شود، یک لایه انزک MgF₂ به ضخامت ۱۱۰nm بر روی شیشه BK7 است، جدول های ۱ تا ۳ نتایج اندازه گیری در زاویه های تابش ۴۵، ۵۰ و ۵۵ را نشان می دهد.

جدول ۱: نتایج اندارهگیری برای زاویه تابش ۴۵ درجه.

P (درجه)	A (درجه)	C (درجه)	, ديف
۵۶	18	۴۵ منطقه اول	1
-٣۴	-18	۴۵ منطقه دوم	٢
۳۵	18	۴۵- منطقه اول	٣

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

1,787.	-•,٣٨٩•	1,2015	-•,7۶۸۵	1,7888	-•, 7779	متوسط	۵
--------	---------	--------	---------	--------	----------	-------	---

جه)		جدول ۵: ضخامت نم	مونه در زاویه	های فرود مختلف	ف.		
	نم		ضخامت (nm)				
-	ردي	ل (درجه)	θ= ۴۵	$\theta = \Delta \cdot$	θ=۵۵		
	١	۴۵ ناحیه ۱	1.8,41	110,19	119,78		
	٢	۴۵ ناحیه ۲	1.8,41	114,11	1.9,89		
	٣	۴۵- ناحیه ۱	1.7,90	118,16	119,78		
	۴	۴۵- ناحیه ۲	114,70	118,88	171,17		
1	۵	متوسط	1.7,49	118,08	۱۱۷,۵۸		

جمع بندى

با توجه به نتایج بهدست آمده مقدار ضریب شکست n=1,79±۰,۰۱ و ضخامت لایه d=۱۱۳±۴nm بهدست می آید. مقدار اسمی ضریب شکست MgF2 در طول موج ليزر هليوم نئون (۶۳۲,۸nm) ۱٫۳۷ و ضخامت لايه مورد استفاده ۱۱۰nm بوده است که مشاهده می گردد 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 می توان عدم همراستایی قطعات ایتیکی و مناسب نبودن قطبنده ها و تيغه ربع موج بيان كرد.

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 ($\lambda = 633$ 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.

$-\Delta\Delta$	-10	۴۵- منطقه دوم	۴

جدول ۲۰: نتایج انداره گیری برای زاویه تابش ۵۰ درجه.

P (درجه)	A (درجه)	C (درجه)	رديف
٧٠	١٣	۴۵ منطقه اول	١
-T •	-17	۴۵ منطقه دوم	٢
۲۳	١.	۴۵- منطقه دوم	٣
-87	-λ	۴۵- منطقه اول	۴

ول الصابي المارة خيري براي راوية كابس ها كارجه.	۵۵ درجه.	تابش	زاويه	براى	ہ گیری	اندار	نتايج	ل ۳	ندو
---	----------	------	-------	------	--------	-------	-------	-----	-----

P (درجه)	A (درجه)	C (درجه)	رديف
٩١	٩	۴۵ منطقه اول	١
-۲	_٩	۴۵ منطقه دوم	٢
٩١	٩	۴۵- منطقه اول	٣
٢	-٨,۵	۴۵– منطقه دوم	۴

جهت محاسبه ضریب شکست و ضخامت لایه برنامهای به زبان متلب نوشتهشده است که در این برنامه زاویه فرودی ، زاویه قطبش گر P و زاویه آنالیزور A وارد می گردد و heta، ρ در نتیجه اجرای برنامه Ψ ، Λ ، ضریب نسبی بازتاب ضریب شکست مختلط لایه نازک و ضخامت آن محاسبه می شود، نتایج بهدست آمده از اجرای این برنامه در جدولهای ۴ و ۵ ارائه شده است

جدول ۴: ضریب شکست نمونه در زاویههای فرود مختلف.

	لط	ىت مخت	يب شكس		q		
θ=	۵۵	$\theta = \Delta \cdot \qquad \theta =$		40	$(4 \sim 1)$	ني. دي	
n_2	k_2	n_2	k_2	n_2	k_{2}	رورجت	C
١,٣	-	١,٣	- · , r	١,٣	-٠,٢	۴۵	``
130	१ १ •	58Y	3 P Q'	575	۳۷۹	ناحيه ۱	1
١,٣	-•,٣	١,٣	-• , ۲	١,٣	-۰,۲	40	Ŧ
۷۵۵	. 40	۴۸۲	311.	373	۳۷۹	ناحيه ۲	ì
٣, ١	-•,٢	١,٣	- , , ۲	١,٣	-•,٢	-40	٣
130	۹. ۱	620	ド・イ	171	٣٧٩	ناحیه ۱	ì
۲, ۱	- •	1,1	- • •	1,1	- .	-40	
1040	77.1	7977	1011	~ 497	1901	ناحيه ۲	۴
	~	-	~		-1		

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

با سلام و احترام ضمن تشکر از زحمات داور ان محترم تصحیحات لازم به شرح زیر انجام گردید. ۲- مبانی نظری بیضی سنجی نول باز نویسی شد ۲- کلیه پار امتر ها 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 ار انه داده خواهد شد.