

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



تعیین ضریب شکست مواد با یک سطح ناصاف با استفاده از پراکندگی نور در محدوده فرنل

معصومه دشتدار، على محمدزاده و سيد محمد على حسيني صابر

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده – زمانی که باریکهی موازی نور همدوس، از توری پراش عبور می کند، در فواصل ثابتی که فاصله تالبوت نام دارد تصویر توری در فضا تشکیل میشود. اگر در مسیر نور عبوری از توری پراش، سطح ناصافی قرار دهیم، نور بازتابیده از سطح نیز در فواصل تالبوت تشکیل توری، با نمایانی کمتر، خواهد داد. این نمایانی، متناسب با ناصافی سطح کم میشود. در عبور نور از سطح ناصاف، نمایانی تصویر تالبوت، علاوه بر ناصافی سطح به ضریب شکست ماده نیز بستگی دارد. در این مقاله به صورت نظری و تجربی نشان داده میشود که می توان با اندازه گیری نمایانی نور بازتابیده و عبوری از سطح ناصاف در فواصل تالبوت، ضریب شکست مواد با یک سطح ناصاف را تعیین کرد.

كليد واژه- پراكندگى نور ، ضريب شكست مواد با يك سطح ناصاف، فاصله تالبوت

Determination of the refractive index of materials with a rough interface by light scattering in the Fresnel zone

Masoomeh Dashtdar, Ali Mohammadzadeh and S.Mohammad-Ali Hosseini-Saber

Department of Physics, Shahid Beheshti University

Abstract- When a coherent light passes through a diffraction grating, the image of the grating is formed at the Talbot distances. If we place a rough interface after a diffraction grating, the reflected light also forms the image of the grating at Talbot distances but with less contrast. This contrast decreases proportional to surface roughness. In transmitted light from a rough surface, the contrast of the Talbot images depends on the surface roughness and refractive index of material. In this article It is shown theoretically and examined experimentally that the refractive index of the material with a rough interface can be determine by measuring the contrast of the reflected and transmitted light form a rough surface at Talbot distances.

Keywords: Light Scattering, Refractive index of materials with a rough interface, Talbot-distance

۱– مقدمه

امروزه اهمیت تعیین ضریب شکست مواد بر کسی پوشیده نیست، از این رو تاکنون روشهای گوناگونی برای اندازه گیری ضریب شکست مواد ارائه شده است. اما اکثر روشهای اندازه گیری ارائه شده، برای موادی است که دارای سطوح صاف هستند. این در حالی است که میزان ناصافی سطح، بر اندازه گیری ضریب شکست ماده تاثیر قابل توجهی دارد[۱]. همچنین فیلمهای نازک و نانومواد با ناصافیهای مختلف، دارای ضریب شکستهای متفاوت هستند که به خاطر اهمیت خواص این مواد، عمدهی نانومواد بوده اند[۵–۲]. از این جهت معرفی روشی کارآمد و ساده برای اندازه گیری ضریب شکست مواد دارای سطح ناصافی، از اهمیت ویژهای برخوردار است.

در این مقاله روشی ساده و ارزان برای اندازه گیری ضریب شکست مواد گوناگون دارای یک سطح ناصاف (از جمله لایههای نازک و نانومواد) ارائه شده است که ویژگی هایی نظیر امکان اندازه گیری در لحظه را نیز دارا است.

در رهیافت نظری با قرار دادن سطح ناصاف در مسیر نور عبوری از توری پراش، و محاسبهی نمایانی حاصل از نور بازتابی از سطح در فواصل تالبوت، نشان داده میشود که اگر فاصلهی خطوط توری بزرگتر از طول همبستگی سطح باشد، نمایانی شدت نور بازتابی از سطح تنها به میزان ناصافی سطح وابسته است. با مقایسه این نمایانی، با نمایانی به دست آمده از رابطهی عبوری[۶] (که به ناصافی سطح و نیز ضریب شکست ماده بستگی دارد)، ناصافی سطح و نیز ضریب شکست ماده بستگی دارد)، با استفاده از توری پراشی که فاصلهی خطوط آن بزرگتر از طول همبستگی سطح است، ضریب شکست نمونه از طول همبستگی سطح است، ضریب شکست نمونه اندازه گیری میشود.

۲- رهیافت نظری

مطابق شکل ۱، باریکهی نور همدوس، تکفام و موازی پس از عبور از توری پراش رانکی که عمود به باریکه و در صفحه $\eta - \overline{z}$ قرار گرفته، از سطح ناصاف (صفحهی ' y - x) بازتاب و پراکنده شده و پس از آن انتشار مییابد و در نهایت در صفحهی y - xکه صفحهی مشاهده است، آشکارسازی میشود. راستای باریکه با خط

عمود بر سطح ناصاف زاویه ی θ می سازد و صفحه ی مشاهده یx - y عمود بر راستای بازتاب آیینهای نور از سطح ناصاف است.



شکل ۱: باریکهی نور موازی، همدوس و تکفام، که با سطح ناصاف زاویهی θ دارد، به توری پراش رانکی که عمود به باریکه در صفحه $\eta - \tilde{z}$ قرار گرفته است، میتابد و بعد از بازتاب از سطح ناصاف؛ y' - x به نقطهی (x, y) میرسد.

x-y و $\xi-\eta$ فاصلهی طولی بین مراکز دو صفحهی $\eta-\xi$ ، مطابق شکل برابر است با: $\left| \vec{R}_1 \right| + \left| \vec{R}_2 \right|$ مطابق شکل صفحهی فرضی "y = x را که معادل با بازتاب آینهای صفحهی x'-y' نسبت به صفحهی x-y (صفحهی سطح ناصاف) است، در نظر می گیریم ($|\vec{R}_3|$ فاصله صفحهی "y" از صفحهی سطح ناصاف و برابر با x "-y" (x, y) اندازهی $\left| \vec{R}_2 \right|$ است). پس هر نقطهی دلخواه مثل $\left| \vec{R}_2 \right|$ معادل با نقطهی (" x ", y)است، درنتیجه برای بدست آوردن دامنه نور در نقطهی (x,y)، در انتگرال فرنل، دامنه در صفحهی y' - y'، باید در اختلاف فاز بازتابی و نیز ضریب دامنهی بازتاب از سطح، ضرب شود. فاصلهی مراکز دو صفحهی $\eta = \xi - \eta$ برابر است با: در نتیجه با قرار دادن عبارت. $\left| \vec{R}_1 \right| + \left| \vec{R}_2 \right|$ انتگرال فرنل برای محاسبه دامنه در $|\vec{R}_1| + |\vec{R}_2| = z$ نقطهی (x,y) که می توان آن را به صورت معادل در نقطهی (" x ", y) فرض کرد، حل می شود. بسط فوریهی تابع عبور دامنهی نور از توری رانکی (مربعی) با ضریب عبور دامنه **C** برابر است با: $g\left(\xi,\eta\right) = \frac{1}{2} \left| 1 + c \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(\frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right) \cos\left(\frac{n2\pi\xi}{d}\right) \right) \right| (1)$ همچنین اختلاف فاز بازتابی و ضریب دامنهی باریکهی نوری که با زاویهی θ به سطح ناصاف می رسد، نسبت به

$$t(x', y') = A_0 \exp(ik 2\cos(\theta)h)$$
^(Y)

صفحهی مرجع، برابر می شود با:

که در آن (h = h(x', y') ارتفاع هر نقطهی سطح ناصاف از صفحهی مرجع و A_0 دامنهی نور بازتابی در واحد سطح صفحهی مرجع است. در نتیجه دامنه در نقطهی (x, y) برابر میشود با[Y]:

$$\psi(x,y) = \frac{1}{2i\lambda} \iint t(x',y')g(\xi,\eta)$$

$$\times \frac{exp(-ik/2z\left[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2\right]}{z}d\xi d\eta \qquad (\ref{eq:spin})$$

شدت متناظر با $\psi(x,y)$ برابر است با:

$$\langle I(x,y)\rangle = \langle \psi(x,y)^* \psi(x,y) \rangle$$
 (*)

که در آن <> نشان دهندهی میانگین گیری روی تمام سطح ناصاف است. در نتیجه:

$$\langle I(x,y) \rangle = \frac{A_0^2}{4(\lambda z)^2} \iiint T(x_2' - x_1', y_2' - y_1') \times \left\{ 1 + c \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n2\pi\xi}{d}\right) \right) \right\} \times \left\{ 1 + c \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{4}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{m2\pi\xi'}{d}\right) \right) \right\} \times$$

$$\exp(-ik/2z \left[(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 \right]) \times \exp(ik/2z \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta')^2 \right]) \times d\xi' d\eta' d\xi d\eta$$

که در آن:

 $T(x'_2 - x'_1, y'_2 - y'_1) =$ (۶) $< \exp[ik 2\cos(\theta)(h(x'_2, y'_2) - h(x'_1, y'_1))] > ,$ تنها به فاصلهی بین دو نقطه از سطح ناصاف و نیز تابع همبستگی ارتفاع دو نقطهی سطح وابسته است. برای سطحی با تابع توزیع ارتفاع گاوسی، با ریشهی میانگین مجذور ارتفاع σ ، خواهیم داشت[۸]:

$$T(x'_{2} - x'_{1}, y'_{2} - y'_{1}) =$$

$$< \exp[-4k^{2}\cos^{2}(\theta)\sigma^{2} \times (1 - C(x'_{2} - x'_{1}, y'_{2} - y'_{1}))] >$$
(Y)

که در ان ((y'_1,y'_2-y'_1) تابع همبستگی بین دو نقطه از سطح ناصاف است.

با توجه به شکل(۱) با استفاده از قوانین ساده هندسی میتوان روابط زیر را بدست آورد:

$$\begin{aligned} x'_{2} - x'_{1} &= \alpha (\xi - \xi') \\ y'_{2} - y'_{1} &= \beta (\eta - \eta') \end{aligned}$$
 (A)

$$\cdot eta \cong \frac{\left| \vec{R}_2 \right|}{\left(\left| \vec{R}_2 \right| + \left| \vec{R}_1 \right| \right)} \, \mathfrak{e} \, \alpha \cong \frac{\left| \vec{R}_2 \right|}{\left(\left| \vec{R}_2 \right| + \left| \vec{R}_1 \right| \right) \cos(\theta)} \, \mathfrak{cs}(\theta)$$
 که در آن

با استفاده از روابط (۲) و (۸)، و با استفاده از خواص انتگرالی تابع دلتای دیراک، حاصل انتگرال (۵) با انجام مقداری محاسبات، به دست می آید. مقدار این انتگرال برای فواصل تالبوت ($\frac{Nd^2}{\lambda} = \frac{z_{talbot}}{2}$) و با قرار دادن برای حاوی ای برابر می شود با:

$$\begin{split} \left\langle I\left(x,y\right)\right\rangle &= \frac{I_0}{4} [T\left(0,0\right) + \\ \frac{8c}{\pi} \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{1}{n} (-1)^{\left(\frac{n-1}{2}+N\right)} T\left(\alpha nNd,0\right) \cos\left(\frac{2n\pi x}{d}\right) + \\ \frac{8c^2}{\pi^2} \sum_{n,m=odd}^{\infty} \frac{1}{nm} (-1)^{\left(\frac{n+m}{2}-1\right)} \times \end{split}$$
(9)
$$(T\left(\alpha Nd\left(m-n\right),0\right) \cos\left(\frac{2\pi x\left(m-n\right)}{d}\right) + T\left(\alpha Nd\left(m+n\right),0\right) \cos\left(\frac{2\pi x\left(m+n\right)}{d}\right). \end{split}$$

 $(v_r = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min}))$ نمایانی توزیع شدت $Nd \, \alpha \square \lambda_0$ برابر می شود با در فواصل تالبوت با شرط $\lambda_0 \square \lambda_0$ برابر می شود با $v_r = \frac{2c \exp\left[-4k^2 \cos^2(\theta)\sigma^2\right]}{1+c^2}$ (۱۰)

همچنین در حالت عبور از سطح ناصاف نمایانی در فواصل تالبوت برابر است با[۶]:

$$v_{t} = \frac{2c \exp\left[-k^{2} (n-1)^{2} \sigma^{2}\right]}{1+c^{2}}$$
(11)

که در اینجا n ضریب شکست ماده نمونه است.

در نتیجه با معادل قرار دادن روابط (۱۰) و (۱۱) و حذف σ ، ضریب شکست به دست میآید:

$$n = 1 + 2\cos(\theta) \sqrt{\frac{\ln(2c) - \ln((1+c^2)v_t)}{\ln(2c) - \ln((1+c^2)v_r)}}.$$
 (17)

بنابر رابطهی (۱۲) با داشتن θ و c و اندازه گیری v_r و v_r ، نابر رابطهی (۱۲) با داشتن v_r ، نریب شکست به دست میآید.

۳- رهیافت تجربی

مطابق شکل۲ نور لیزر هلیوم نئون با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر، پس از گسترده شدن بوسیلهی عدسی اول و دوم، از توری پراش رانکی با دورهی تناوب ۰٫۲ میلی متر عبور میکند و با زاویهی فرود *θ* به سطح ناصاف میتابد. توزیع

CCD شدت در فواصل تالبوت ($z_1 + z_2 = \frac{Nd^2}{\lambda}$) توسط تالبوت ($z_1 + z_2 = \frac{Nd^2}{\lambda}$ ثبت و نمایانی در حالت بازتاب از سطح ناصاف بدست میآید.



شکل ۲- چیدمان آزمایش.

با انجام آزمایش مشابه، توزیع شدت و نمایانی حاصل را در حالت عبور از سطح ناصاف بدست می آوریم [۶]. ضریب عبور دامنه یتوری، c، از آزمایش عبوری، بدون سطح ناصاف بدست می آید. در این حالت نور عبوری از توری پراش، مستقیما به CCD می تابد. برای این مورد در رابطهی (۱۱) داریم $\sigma = 0$. بنابراین c از رابطهی $v_t = \frac{2c}{1+c^2}$ به دست می آید. برای توری پراش موجود در آزمایش، c = 0.64 به دست آمد.

نمونهی مورد استفاده در آزمایش، تیغهای شیشهای به قطر ۳٬۸۵ میلیمتر است. برای سنجش درستی نتیجهی آزمایش، ضریب شکست نمونه قبل از ناصاف کردن سطحش، با یکی از روش های اندازه گیری ضریب شکست مخصوص سطوح صاف[۹]، اندازه گیری شد و مقدار مخصوص سطوح صاف[۹]، اندازه گیری شد و مقدار آزمایش، یک سطح نمونه با پودر سایش با شماره مش آزمایش، یک سطح نمونه با پودر سایش با شماره مش



شکل ۳- تصویر میانگین توزیع شدت در راستای خطوط توری در فاصله تالبوت (الف) در بازتاب از سطح ناصاف، (ب) در عبور از سطح، (ج) بدون پراکندگی از سطح ناصاف.

شکل(۳-الف) تصویر توزیع شدت توری، که در راستای خطوط توری میانگین گیری شده است، در فاصلهی تالبوت در حالت بازتاب از سطح ناصاف و زاویهی $\theta = 80^{\circ}$ درجه و با نمایانی میانگین $\theta = 80^{\circ}$ درجه و با نمایانی میانگین $\theta = 80^{\circ}$ درجه در استان می دهد. شکل (۳-ب) تصویر میانگین توزیع شدت در راستای خطوط توری در فاصلهی تالبوت، در عبور از سطح ناصاف و زاویهی فرود

عمود با نمایانی میانگین $v_t = 0.2293 \pm 0.0007$ و $v_t = 0.2293 \pm 0.0007$ شکل(π -ج) تصویر میانگین توزیع شدت در راستای خطوط توری در فاصله تالبوت، بدون پراکندگی از سطح ناصاف و با نمایانی $v_t = 0.92$ است.

در نتیجه ضریب شکست، n، با استفاده از رابطهی (۱۲) به دست میآید که برای نمونهی مورد آزمایش، مقدار زیر به دست آمد:

$n = 1.528 \pm 0.005$

میزان خطا، از انحراف معیار دادههای اندازه گیری شده در زوایای مختلف و تکرار آزمایش بدست میآید. همچنین، ضریب شکست به دست آمده، با مقدار اندازه گیری شده، در شرایطی که دو سطح نمونه صاف بود، همخوانی دارد.

۴- نتیجهگیری

در این مقاله به طور نظری رابطهی نمایانی شدت در فواصل تالبوت برای بازتاب نور از سطوح ناصاف، با ناصافی و تابع همبستگی سطح محاسبه شد و نشان داده شد که اگر فاصلهی خطوط توری از طول همبستگی سطح بزرگتر باشد، نمایانی شدت تنها به ناصافی سطح وابسته است. سپس با تعیین نمایانی حالت بازتابی و عبوری، ضریب شکست نمونه محاسبه شد. نتایج به دست آمده از این روش با نتایج قبلی به خوبی مطابقت دارد.

مراجع

[1] Carl A. Fenstermaker, Frank L. McCrackin, "Errors arising from surface roughness in ellipsometric measurement of the refractive index of a surface", Surf.Sci.,16 (1969) 85-96.

[2] R Swanepoel, "Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films", J. Phys. E: Sci. Instrum. 17 (1984) 896.

[3] Phillip Manley, Guanchao Yin and Martina Schmid, "A method for calculating the complex refractive index of inhomogeneous thin films", J. Phys. D: Appl.f Phys, 2014.

[4] A.A. Hamza, M.A. Mabrouk, W.A. Ramadan, "*Refractive index and thickness determination of thin-films using Lloyd's interferometer*", Optics Communications, Vol.225, Issues 4–6 (2003) 341–348.

[5] Tie-Nan Ding, Elsa Garmire, "*Measuring refractive index and thickness of thin films: a new technique*", Applied Optics, Vol. 22, Issue 20 (1983) 3177-3181

[6] Masoomeh Dashtdar, S. Mohammad Ali Hosseini Saber, "Determination of the rough interface parameters using the selfimaging effect", J. Opt. Soc. Am. A / Vol. 30, No. 11 (November 2013) 2416-2421.

[7] M. Born and E. Wolf, (2002) *Principles of Optics*, Cambridge University.

[8] Yiping Zhao, Gwo-Ching Wang, Toh Ming Lu, (2001) Characterization of Amorphous and Crystalline Rough Surface: Principles and Applications, U.S., Academic Press.

[9] M.T Tavassoly, "A simple method for measuring the refractive index of a plate," Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, June 2001.

Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12