اندازه‌گیری نمایه لایه نازک با استفاده از تداخل‌سنجی

مهدی اشرف‌گنجویی، خسرو حسنی

آزمایشگاه پژوهشی اپتیک ۳، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران

چکیده – یکی از روش‌های متداول برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک استفاده از تداخل‌سنجی نوری است که به دلیل غیر مخرب بودن و عدم نیاز به کالیبراسیون بسیار مورد توجه می‌باشد. دقت اندازه‌گیری ضخامت لایه با این روش در بهترین حالت در حدود ۲۰ -۳۰*nm* بوده و تنها ضخامت میانگین لایه بدست می‌آید. در این مقاله ما با کمک یک میکروسکوپ تداخلی و با برازش طرح تداخلی از دو طرف پله به یک مدل نظری مناسب توانسته‌ایم دقت اندازه‌گیری را به کمتر از ۱۰*nm* برسانیم و علاوه بر آن نمایه تغییرات ضخامت لایه‌ها را نیز بدست آوریم.

کلید واژه – تداخل سنجی، لایه نازک، اندازه‌گیری ضخامت، میکروسکوپ تداخلی

Thin Film Profile Measurement Using Interferometry

Mehdi Ashrafganjoie, Khosrow Hassani

Optics Research Lab.۳, Department of Physics, University of Tehran

Abstract – One of the popular techniques for the measurement of the thickness of thin films is based on light interferometry, which has the advantage of being non-destructive and calibration-free. However, the uncertainty achieved by this method is not usually better than ۲۰-۳۰ nm, and it can only measure the average film thickness. In this work, by using an interference microscope and fitting the interference patterns to an appropriate model, we are able to improve the precision to less than ۱۰- nm, and also provide the film thickness profile.

Keywords- Interferometry, Thin Film, Thickness Measurement, Interference Microscope

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

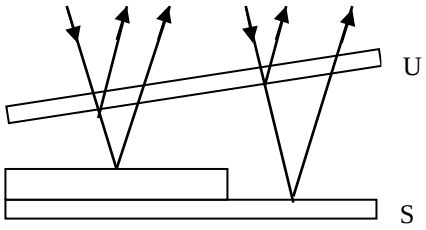
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www .opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی محصولات صنعتی مانند قطعات نیمه رسانا، دستگاه‌های اپتیکی، سلول‌های خورشیدی، پوشش‌های ضد خوردگی، حسگرها و نمونه-های زیستی به ضخامت لایه‌های نازک مواد به کار رفته در آن‌ها بستگی دارد و به همین دلیل اندازه‌گیری دقیق ضخامت لایه نازک بسیار مهم و مورد توجه است [۴-۱]. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضخامت لایه ابداع شده‌اند از جمله، نمایه سنجی استیلوس [۱]، بیضی سنجی [۵ و۶]، تداخل‌سنجی چند باریکه‌ای تولانسکی [۵ و۶]، AFM (میکروسکوپ نیروی اتمی) [۱]، طیف سنجی نوری [۲]، میکرو آنالیز پرتو X [۲] و پراش فرنل [۷]. در بین این روش‌ها روش‌های نوری به دلیل غیر-مخرب بودن و بی‌نیازی از درجه‌بندی مورد توجه ویژه قرار دارند. با این حال دقت اندازه‌گیری توسط روش‌های تداخل‌سنجی معمول در حدود ۳۰ nm انتظار می‌رود و تنها ضخامت میانگین لایه قابل اندازه‌گیری است. در این مقاله ما با استفاده از یک میکروسکوپ تداخلی، پردازش تصویر و برازش طرح تداخلی به یک مدل نظری مناسب توانسته‌ایم ضخامت لایه نازک را با دو طول موج مختلف با دقتی کمتر از ۱۰ nm بدست آوریم، که از اندازه‌گیری-های قبلی بهتر است.

۲- مبانی نظری اندازه‌گیری ضخامت لایه با روش تداخل‌سنجی

مانند آنچه در شکل (۱) نشان داده شده، لایه نازکی با ضخامت h را درنظر می‌گیریم که بخشی از زیر لایه S را پوشانده است. اگر تیغه شفاف و تخت U را بطور مایل نسبت به S نگه داشته و نور همدوس و تکفام با طول موج λ را بطور عمود بر S بتابانیم، نقش تداخلی موسوم به فریزهای هم ضخامت به شکل نوارهای موازی تاریک و روشن در نور بازتابی یا عبوری مشاهده خواهند شد. روشن یا تاریک بودن نوارها به اختلاف راه نوری بین دو موج ناشی از ضخامت گوه هوا در هر نقطه از آن سطح بستگی دارد. فاصله d نوارهای تداخلی نیز از روی طول‌موج نور و زاویه رأس گوه هوا به دست می‌آید. در محل پله به دلیل تغییر ناگهانی ضخامت گوه هوا، فریزهای تداخلی شکسته شده و دچار یک جابجایی عرض به اندازه δ می‌گردند.



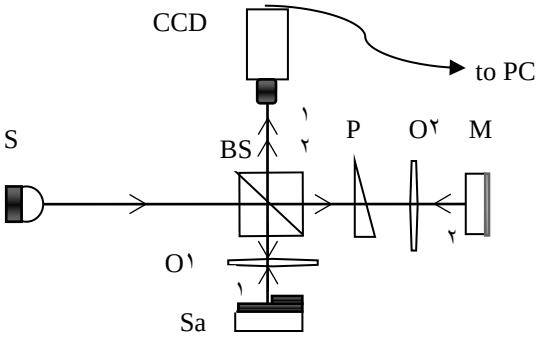
شکل ۱: فریزهای هم‌ضخامت در یک گوه هوای یکنواخت

با اندازه‌گیری این کمیت‌ها می‌توان ضخامت پله را به سادگی از رابطه (۱) بدست آورد [۵ و ۶]:

$$h = \frac{\lambda}{2}\frac{\delta}{d} \qquad (۱)$$

۳- آزمایش وکارهای تجربی

در این کار از یک میکروسکوپ تداخلی (LEITZ D_۶۳۳۰) استفاده کردیم که در واقع یک تداخل‌سنج مایکلسون با تفکیک فضایی می‌باشد. شمای کلی دستگاه در شکل (۲) نشان داده شده است. نور تکفام یا بس‌فام از چشمه S به باریکه شکن BS می‌رسد و به دو موج با دامنه برابر تقسیم می‌شود. موج ۱ پس از عبور از شیئی O۱ به نمونه مورد آزمایش Sa که در واقع نقش آیینه اول تداخل‌سنج را دارد، می‌رسد و از آن بازتابیده می‌شود. موج ۲ پس از عبور از باریکه شکن و عبور از شیئی O۲ بر یک آیینه تخت و مسطح M (آیینه دوم تداخل‌سنج) فرود آمده و از آن بازتابیده می‌شود. امواج بازتابیده از نمونه و آیینه M دوباره توسط باریکه‌شکن با هم ترکیب شده و تداخل می‌کنند. با کمی کج کردن آیینه M نسبت به نمونه یک گوه هوای نازک بین آن دو شکل می‌گیرد و



شکل ۲: طرح شماتیک نشان دهنده نحوه عملکرد میکروسکوپ تداخلی. S چشمه،BS باریکه شکن، O۱ و O۲ عدسی، M آیینه مرجع، Sa نمونه، P تیغه جبران کننده فاز

تداخلی هم‌ضخامت، مطابق آنچه در بخش قبل گفته شد،

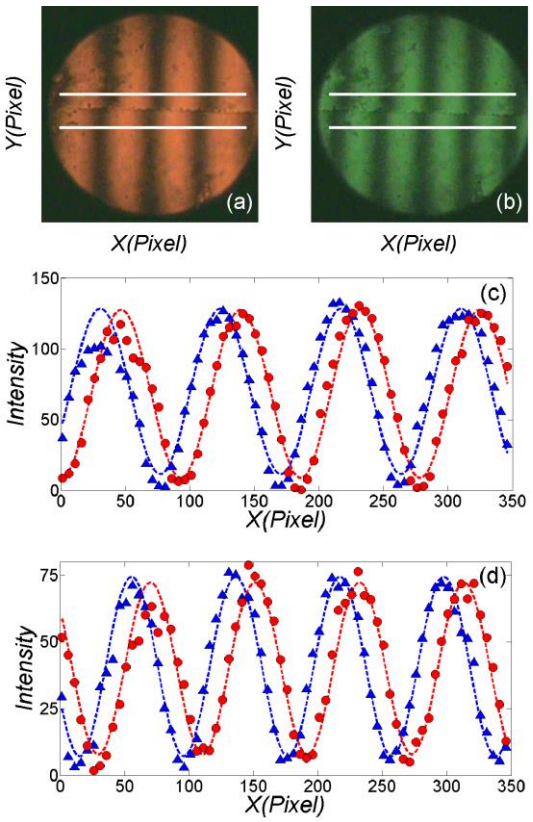
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

در چشمی میکروسکوپ قابل مشاهده خواهند بود. اگرنمونه شامل یک لایه نازک پله‌ای شکل باشد، شکستگی فریزهای تداخلی در دو سوی آن رخ خواهد داد که با کمک آنها و با استفاده از رابطه (۱) می‌توان ضخامت لایه را در نقطه مورد مشاهده بدست آورد. یک تیغه جبران کننده فاز P در بازوی ۲ نصب شده تا بتوان شرط همدوسی زمانی را در استفاده از چشمه‌های بس‌فام تأمین کرد.

نمونه‌های مورد استفاده با لایه نشانی آلومینیوم بر روی نیمی از یک زیرلایه شیشه‌ای (لام میکروسکوپ) و سپس لایه نشانی دوباره بر تمام سطح زیرلایه به روش تبخیر در خلأ تهیه شدند. به این ترتیب یک پله با ضخامت دلخواه و ضریب بازتاب یکسان در دو طرف آن بدست می‌آید. چشمه‌های استفاده شده لامپ تخلیه بخار سدیم با طول-موج ۵۸۹٫۳ nm و لامپ رشته‌ای (سفید) با یک فیلتر طیفی در جلوی آن بود. این فیلتر نور سبز با طول موج تقریبی ۵۴۶ nm (طیف سبز لامپ جیوه) را عبور می‌دهد. نقش‌های تداخلی برای سه نمونه مختلف و برای هر نمونه در سه نقطه از پله ثبت شدند . در شکل‌های (۳) و (۴) طرح فریزهای تداخلی برای هر طول موج، برای نمونه‌های اول و دوم نشان داده شده‌اند. شکستگی فریزها در محل پله به خوبی در این شکل‌ها دیده می‌شوند. برای بدست آوردن ضخامت لایه، همانطور که اشاره شد، لازم است فاصله فریزها و جابجایی نسبی آنها در دو سوی پله اندازه-گیری شود. برای این کار تغییرات شدت فریزها در دو سوی پله در راستای عمود بر فریزها (خطوط راست سفید رنگ) از روی داده‌ها استخراج شدند. برای این کار ابتدا نمایه نور فرودی بدون تشکیل فریز (با حذف آیینه M از چیدمان) بدست آمده و از عکس‌ها کم شد تا تنها تغییرات هموار شدت فریزها قابل مشاهده باشد. این تغییرات بر حسب مختصه x در راستای عمود بر فریزها به شکل مربع کسینوسی هستند، [رابطه (۲)]:

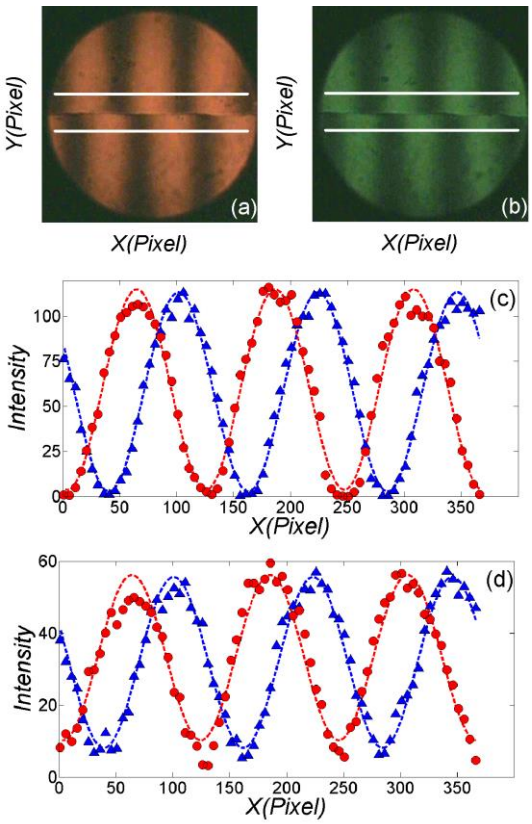
$$I = A\cos^2\left(\frac{\pi(x - x_0)}{d}\right) + I_0 \qquad (۲)$$

با برازش این رابطه به داده‌ها می‌توان گام d فریزها، مبدأ مختصات x_0، دامنه A و شدت زمینه I_0 را از پارامترهای برازش شده تعیین کرد. سپس مقدار جابجایی نسبی فریزها در دو سوی پله از تفاوت x_0 برای شدت‌های تداخلی در دو سوی آن بدست می‌آید. تغییرات شدت فریزها در دو سوی پله در راستای خط سفید رنگ (نقاط) و همچنین منحنی نظری برازش شده به آنها (خط‌چین‌ها) بر حسب شماره پیکسل در نمودارهای یک بعدی زیر عکس‌ها رسم شده‌اند. پس از برازش با استفاده از رابطه (۱) ضخامت لایه در سه نقطه مختلف از نمونه محاسبه و در جدول‌های (۱) و (۲) برای دو طول موج به کار رفته آورده شده‌اند.



شکل ۳: فریزهای تداخلی (a) لامپ سدیم، (b) نور سبز جیوه و نمودار شدت تجربی و منحنی‌های برازش شده (c) لامپ سدیم، (d) نور سبز جیوه بر داده‌های تجربی برای نمونه اول

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



شکل ۴: فریزهای تداخلی (a) لامپ سدیوم و (b) نور سبز جیوه و نمودار شدت و منحنی‌های برازش شده (c) لامپ سدیوم و (d) نور سبز جیوه برای نمونه دوم

جدول ۱: ارتفاع پله برای سه نقطه بر نمونه‌ها با استفاده از نور لامپ سدیم با طول موج ۵۸۹٫۳nm.

	h(nm) چپ	h(nm) وسط	h(nm) راست
نمونه اول	۴۶	۵۲	۵۰
نمونه دوم	۱۲۴	۱۰۷	۸۷
نمونه سوم	۱۵۰	۱۶۴	۱۷۰

جدول ۲: ارتفاع پله برای سه نقطه بر نمونه‌ها با استفاده از نور سبز جیوه با طول موج ۵۴۶nm.

	h(nm) چپ	h(nm) وسط	h(nm) راست
نمونه اول	۵۳	۴۹	۶۱
نمونه دوم	۱۲۶	۱۱۲	۸۵
نمونه سوم	۱۴۷	۱۶۱	۱۶۶

همانطور که مشاهده می‌شود، ضخامت لایه که با استفاده از دو طول‌موج مختلف بدست آمده‌اند در هر نقطه با اختلاف چندین نانومتر با یکدیگر همخوانی دارند. بیشترین خطای نسبی برای نازک‌ترین لایه (نمونه اول) به ۲۰ درصد هم می‌رسد، اما برای لایه‌های ضخیم‌تر بطور میانگین کمتر از ۵ درصد می‌باشد. همینطور، به دلیل تفکیک فضایی خوب میکروسکوپ می‌توان تغییرات ضخامت لایه در نقاط مختلف آن (نمایه لایه) را اندازه-گیری کرد.

۴- نتیجه گیری

ما در این آزمایش توانستیم ضخامت لایه نازک را با روش تداخل‌سنجی و با استفاده از میکروسکپ تداخلی و برازش نمودار توزیع شدت نظری بر داده‌های تجربی، برای دو طول‌موج مختلف بدست آوریم. تفاوت در اندازه‌ها بین دو طول‌موج کمتر از ۱۰ nm بود.

سپاسگزاری

نویسندگان از خانم یاسمن گنج‌خانی که نمونه خود را در اختیار ما قرار دادند سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[۱] Schmit J., Creath K., Wyant J. C., *Optical Shop Testing*, p. ٦٦٧-٧٧٥, John Wiley & Sons, ٢٠٠٧.

[۲] Piegari A., Masetti E., *Thin film thickness measurement: a comparison of various techniques*, **Thin Solid Films** ١٢٤ (١٩٨٥) ٢٤٩-٢٥٧.

[۳] Debnath S. K., You J., Kim S. W., *Determination of film thickness and surface profile using reflectometry and spectrally resolved phase shifting interferometry*, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing** ١٠ (٢٠٠٩): ٥-١٠.

[٤] Chopra K. L., *Thin Film Phenomena*, McGraw-Hill, ١٩٦٩.

[٥] Heavens O. S., *Physics of Thin Films*, p. ١٩٣-٢٣٨.

[٦] Bennett H. E., Bennett J. M., *Physics of Thin Films*, p. ٢١-٤٠, Academic Press, ١٩٦٧.

[٧] Tavassoly M. T., Moaddel Haghighi I., Hassani Kh., *Application of Fresnel diffraction from a phase step to the measurement of film thickness*, **Appl. Opt.** ٤٨ (٢٠٠٩) ٥٤٩٧-٥٥٠١.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]