

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۱۲/۱۷؛ پذیرش: ۱۳۸۹/۹/۲)

که در آن I شدت برآیند دو دسته باریکه I_1 و I_2 شدت باریکه‌های تداخلی و $\theta = \kappa \cdot \rho$ (که ρ اختلاف راه باریکه‌های تداخلی می‌باشد) است. با کاهش بسیار ناچیز در اختلاف راه نوری، با تغییر شدت روبرو می‌شویم. به بیان دیگر با اندازه‌گیری این تغییر شدت می‌توان به تغییر در اختلاف راه نوری پی برد. نشان می‌دهیم با استفاده از نمودار شدت فریزهای تداخلی ایجاد شده در دو طرف پله، می‌توان ضخامت لایه‌های نازک را با دقت بیشتری اندازه‌گیری کرد. این کار پیش‌تر، از طریق اندازه‌گیری مستقیم جابه‌جایی فریزهای تداخلی گزارش گردیده است [۶].

پیشرفت در ساخت تجهیزات الکترونیکی با ابعاد نانومتر و میکرومتر نیازمند استفاده از روش‌ها و دستگاه‌های جدید برای کنترل و پردازش ویژگی‌های آنها است. یکی از عوامل موثر در

اولین بار، تولانسکی^۱ روش ضخامت سنجی لایه‌های نازک را با استفاده از تداخل باریکه‌های نوری مطرح نمود [۱]. هیونس^۲ با استفاده از نظریه تولانسکی ضخامت تعدادی از لایه‌های نازک را به دست آورد [۲]. در روش پیشنهادی تولانسکی از تداخل دو دسته باریکه نوری استفاده می‌شود که با هم اختلاف راه دارند. اختلاف راه نوری به همراه اختلاف فاز باعث ایجاد طرح تداخلی برای نورهای هم‌دوس می‌شود. با توجه به رابطه (۱) می‌توان به حساسیت این روش به تغییر راه نوری پی برد [۳-۵]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta, \quad (1)$$

۱. Tolansky

۲. Heavens

پردازش شدت فریزها و ورود آشکارسازهای دقیق این مشکلات را برطرف کرد. جمع‌آوری امواج الکترومغناطیسی پراکنده شده از سطح نمونه و پردازش تصویر با زدودن اختلالات مختلف و نسبت دادن تابع‌های وزنی برحسب حساسیت به رنگ‌های مختلف و تکرار آزمایش در زوایای مختلف برای اندازه‌گیری ناهمواری سطوح از دیگر روش‌های اندازه‌گیری زبری است [۲۳-۲۸]. البته این روش برای اندازه‌گیری ناهمواری‌های از مرتبه میکرومتر مفید است. استفاده از تبدیل فوریه برای پردازش تصویر به خصوص در روش‌هایی که اساس آن تداخل‌سنجی است نیز با دقت بالایی ناهمواری سطوح را به دست می‌دهد [۲۹].

ما با استفاده از روش تداخل‌سنجی که برای اندازه‌گیری ضخامت لایه بسیار نازک استفاده کردیم ناهمواری سطح نمونه را اندازه می‌گیریم. در این روش هر پستی و بلندی نسبت به سطح میانگین باعث جابه‌جایی فریزها می‌شود. با اندازه‌گیری این تغییرات، زبری سطح به دست آمده و سپس با نتایج حاصل از AFM^۶ مقایسه خواهد شد.

لایه‌های نازک CdS با روش تبخیر حرارتی با دستگاه Edward روی زیرلایه شیشه (لام آزمایشگاهی) لایه نشانی شدند. جهت ایجاد پله به منظور ضخامت‌سنجی از ماسک آلومینیومی استفاده شد. برای از بین بردن آلودگی محیطی شیشه تخت مورب روی لایه، مانند چربی، از محلول NH_3 ، H_2O_2 و آب بدون یون به نسبت ۱:۱:۵ استفاده کردیم. در برخی موارد لایه چربی روی لام، به دلیل داشتن ضریب شکست بالاتر از هوا باعث اختلاف راه اضافی می‌شود و همچنین به دلیل غیر یکنواخت بودن، وضوح تصویر را پایین می‌آورد. به علاوه، شیشه تخت مورب روی لایه بایستی زبری به حد کافی کم داشته باشد تا باعث پراکندگی نور نشود. در اندازه‌گیری ضخامت لایه نازک برای تشکیل تصویر فریزهای تداخلی از لامپ جیوه با توان ۱۲۰ وات استفاده کردیم. برای استفاده از یک طول موج لامپ جیوه

خاصیت فیزیکی این وسایل، ناهمواری سطح (زبری^۱) است که در ادوات نوری و آینه‌های اشعه X و... بسیار مهم است. اهمیت این عامل باعث شده است روش‌های زیادی برای استخراج این کمیت ابداع و به کار گرفته شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها، روش تماسی با نوک تیز (Stylus Probe Technique) است. این روش دقت بالایی دارد ولی در برخی موارد نوک تیز (Tip) سطح را خراش می‌دهد. از طرفی قطر نوک تیز نمی‌تواند به طور کامل وارد فرورفتگی‌هایی شود که سطح مقطع آن از سطح مقطع نوک تیز کوچکتر است و به همین خاطر عمق واقعی فرورفتگی گزارش نمی‌شود [۷-۱۰]. ضعف‌های یادشده در روش بالا باعث شده است تا عده‌ای به دنبال روش‌های نوری بروند. روش تداخل‌سنجی از مرسوم‌ترین این روش‌ها است. استفاده از فریزها برای اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطوح مختلف اولین بار توسط رو^۲ و ولفرد^۳ [۱۱] ارائه شد. سپس ویندکر^۴ و همکارانش [۱۲] با روش تصویرگری فریزها (Fringes Projection) ناهمواری سطح را به دست آوردند. در این روش نقش فریزهای اولیه بعد از عبور از نمونه دستخوش تغییر می‌شود [۱۱-۱۳]. در روش‌های نوری، تکنیک‌های متفاوتی بر اساس کاربرد وسایل مورد استفاده مانند فیبر نوری، لیزر، نور سفید، فوتودیود و... استفاده شده است. از مزایای این روش‌ها این است که مانند روش مکانیکی نیازمند حرکت خط به خط در سطح نمونه نیستند، خراشی در سطح نمونه ایجاد نمی‌کنند و دقت بالایی دارند [۱۴-۲۰]. روش ماره^۵ از دیگر روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطوح است [۲۱-۲۲]. تعیین مرتبه فریزها و در نتیجه پردازش فریزها و عدم استفاده از تغییر رنگ فریز ماره مشکلات زیادی را در استفاده از این روش به وجود آورده بود که ورود روش‌های جدید مانند فرآیند جابه‌جایی فاز (phase-shifting procedure)،

۱. Roughness

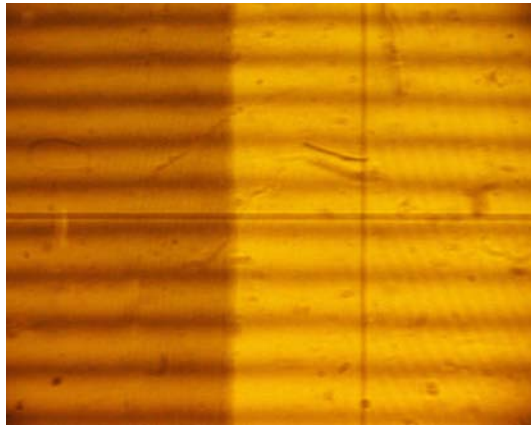
۲. Row

۳. Welford Row

۴. Windecker

۵. Moiré

۶. Atomic Force Microscopy



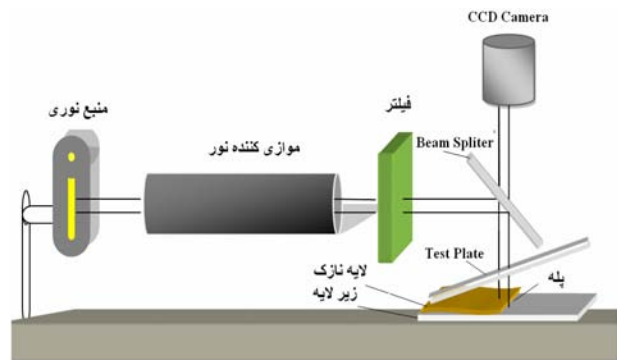
شکل ۲. جابه‌جایی فریزهای تداخلی غیرقابل تشخیص توسط چشم آزمایشگر به دلیل ضخامت کم لایه. علامت + تصویر رتیکول است.

دستگاه CCD ثبت و به کامپیوتر منتقل گردید (شکل ۲). طبق رابطه (۲) ضخامت لایه نازک بر حسب جابه‌جایی فریزها و ضخامت فریزها به دست می‌آید [۲]:

$$d = \frac{\Delta x \lambda}{x^2}, \quad (2)$$

که در آن Δx جابه‌جایی فریزها، x پهنای فریزها و λ طول موج نور تابشی است. در روش متعارف برای اندازه‌گیری جابه‌جایی فریزها، رتیکول میکروسکوپ در مرکز یکی از فریزها قرار می‌گیرد و با حرکت در جهت جابه‌جایی فریزها، رتیکول در انتهای جابه‌جایی خود در مرکز فریزی که جابه‌جا شده فریز قبلی است، قرار می‌گیرد و مقدار جابه‌جایی که میکرومتر نشان می‌دهد به عنوان میزان جابه‌جایی فریزها ثبت می‌شود. برای اندازه‌گیری ضخامت فریزها، می‌توان تعداد زیادی فریز را در یک طرف پله انتخاب کرد و با گذاشتن رتیکول میکروسکوپ در مرکز فریز اولی و آخری عمل قبلی را تکرار و خطا را کم کرد [۶]. نتایج جدول ۱ و رابطه (۳) نشان می‌دهند خطای سیستماتیک یک دستگاه با میکرومتری با دقت ۰/۰۱ سانتیمتر ۱۴ نانومتر است. بدیهی است اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک‌تر از ۵۰ نانومتر با این روش نادقیق خواهد بود.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta d}{d} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0/001}{0/011}\right)^2 + \left(\frac{0/001}{0/027}\right)^2} + 0 = 0/097, \\ \Delta D &= D \times 0/097 = 111 \times 0/097 = 11 \text{ nm}, \end{aligned} \quad (3)$$



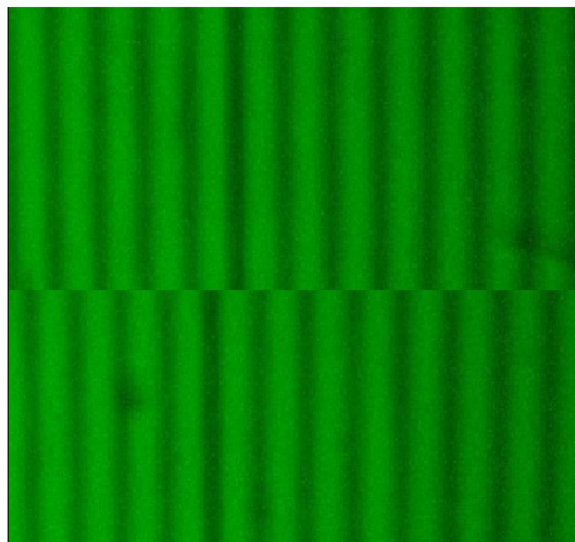
شکل ۱. چیدمان آزمایش ضخامت سنجی.

از فیلتر بسیار دقیق سبز استفاده شد. جهت مشاهده فریزهای تداخلی و اندازه‌گیری ضخامت به روش متعارف از میکروسکوپ متحرکی با بزرگنمایی چنده برابر و ریزسنجی (میکرومتر) با دقت ۰/۰۱ cm استفاده شد. به منظور تصویربرداری از طرح‌های تداخلی، از یک Canon CCD Camera با توان تفکیک ۵/۵ M.pix استفاده شد. تصاویر فریزهای تداخلی با نرم افزار MATLAB شدت سنجی شدند. سنجش مستقیم ضخامت توسط Sloan, DekTak³ ST Surface profilometer با دقت یک نانومتر انجام شده است. برای اندازه‌گیری ناهمواری سطح از لامپ سدیم با توان ۶۰ وات استفاده کردیم. میکروسکوپ نیروی اتمی AFM شرکت MDT در مد نیمه تماسی با جارویگر ۱۰۰ μm جهت تصویربرداری از سطح استفاده شد. سنجش مستقیم زبری سطح (به عنوان محک نتایج روش تداخلی) با استفاده از نرم افزار NOVA انجام شد.

رابطه (۱) با فرض تخت بودن امواج به دست آمده است. با استفاده از یک سیستم موازی کننده، نور لامپ جیوه را موازی کردیم. برای کار کردن با یک طول موج، با استفاده از یک تک‌رنگ‌کننده از طول موج سبز آن، چنانچه در شکل ۱ مشخص است استفاده کردیم. در مرحله بعدی یعنی ایجاد پله، باید دقت شود که پله ایجاد شده نسبتاً نرم باشد تا ردیابی فریزهای جابه‌جا شده ممکن باشد. برای تشکیل فریزهای هم ضخامت باید فصل مشترک لام تخت و لایه نازک که یک خط راست است عمود بر پله ایجاد شده باشد. سپس نقش فریزها توسط

جدول ۱. نتایج حاصل از یک آزمایش در اندازه‌گیری ضخامت یک نمونه لایه نازک با روش متعارف تداخل سنجی.

Δx (cm)	x (cm)	λ (nm)	دقت میکروسکوپ (cm)	d (nm)
۰/۱۱	۰/۲۷	۵۴۶	۰/۰۱	۱۱۱



شکل ۳. تصویر فریزهای تداخلی و جابه‌جایی آنها به علت وجود پله در نمونه لایه نازک CdS روی زیرلایه شیشه.

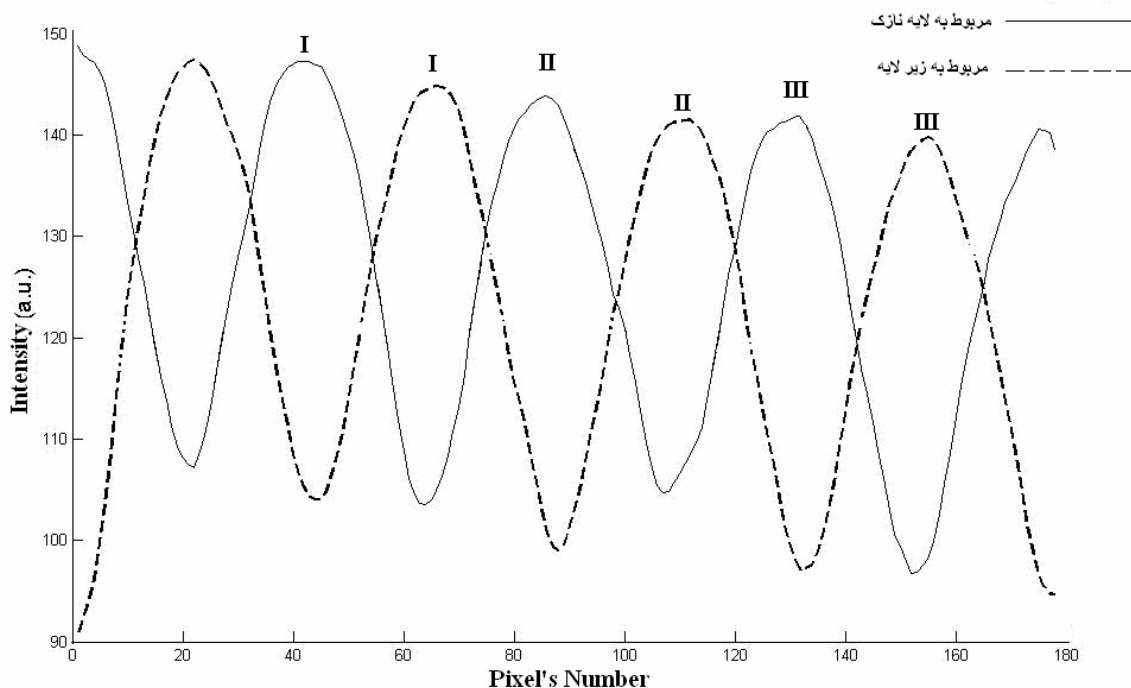
خطاهای کاتوره‌ای است. با افزایش تعداد دفعات انجام آزمایش و تعیین انحراف از معیار ضخامت‌های به دست آمده می‌توان این خطا را محاسبه و در گزارش عدد ضخامت لحاظ کرد. همچنین به عنوان مثال، در تصویر شکل ۲، جابه‌جایی فریزها به دلیل ضخامت کم لایه با چشم قابل رویت نیست، در نتیجه آزمایشگر عملاً قادر به اندازه‌گیری ضخامت لایه نخواهد بود. بنابراین جهت رفع مشکلات گفته شده به ارائه یک راه حل موثر جهت اندازه‌گیری دقیق‌تر ضخامت لایه‌های نازک می‌پردازیم.

برای از بین بردن خطاهای ذکر شده در تعیین مرکز فریز، از نمودار شدت فریزهای تداخلی کمک می‌گیریم. برای محاسبه ضخامت لایه نازک با استفاده از روش جابه‌جایی نمودار شدت، جابه‌جایی قله‌های نمودار شدت در راستای افقی را اندازه‌گیری می‌کنیم. در شکل ۳ فریزهای تداخلی که به دلیل وجود پله جابه‌جا شده‌اند نمایش داده شده‌اند. در شکل ۴ نمودارهای

رتیکول‌هایی (شکل ۲) که در میکروسکوپ‌های مختلف برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و ضخامت فریزها به کار می‌روند، خود دارای ضخامت‌های متفاوتی از مرتبه میکرون هستند. از طرفی میکروسکوپ باعث بزرگتر شدن تصویر رتیکول در چشم آزمایشگر می‌شود، در نتیجه خطای آزمایش افزایش می‌یابد. در این روش اندازه‌گیری علاوه بر خطای میکرومتر، خطاهای دیگری نیز وجود دارند. تعیین مرکز فریز توسط آزمایشگر نادقیق بوده و به میزان مهارت وی بستگی دارد. برای برآورد این خطا، نتیجه یکی از آزمایش‌ها را می‌آوریم. حداقل خطای آزمایشگر در تعیین مرکز فریز به اندازه کوچکترین واحد میکرومتر (۰/۰۱cm) است. با توجه به نیاز به قرائت مرکز دو فریز جهت گزارش Δx و با داده‌های نوعی جدول ۱، مطابق رابطه زیر، آزمایشگر به جای گزارش عدد ۱۱۱ nm برای ضخامت لایه، عددی بین ۸۴ nm و ۱۴۱ nm نانومتر گزارش می‌دهد؛

$$D = \frac{\Delta x \pm 0.002}{x \pm 0.002} \lambda / 2 \leftarrow \rightarrow 84 \leq D \leq 142 \quad (4)$$

خطای تعیین مرکز فریز که آزمایشگر مرتکب می‌شود جزء



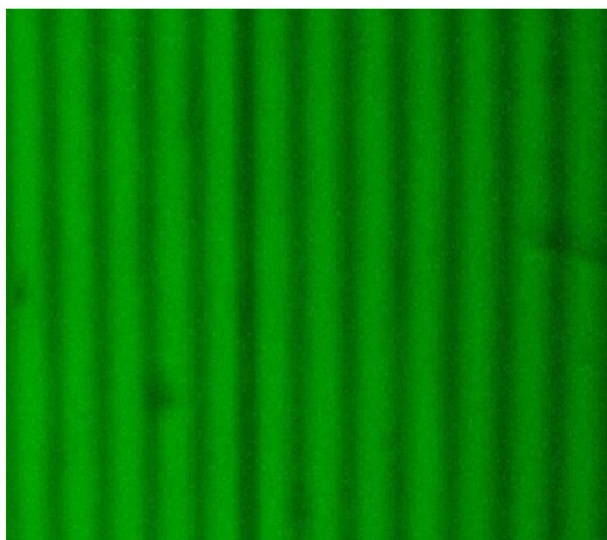
شکل ۴. نمودارهای شدت فریزهای تداخلی در طرفین پله در شکل ۳. خط توپر مربوط به سمت بالای شکل (یعنی لایه نازک) و خط چین مربوط به سمت پایین شکل (یعنی زیرلایه) است. I، II و III سه قله انتخابی هستند. جابه‌جایی نمودار شدت فریزها در اثر وجود پله واضح است.

جدول ۲. مکان قله‌های نمودار شدت فریزهای تداخلی در طرفین پله و نیز جابه‌جایی آنها در شکل ۴. خطای گزارش شده خطای سیستماتیک است.

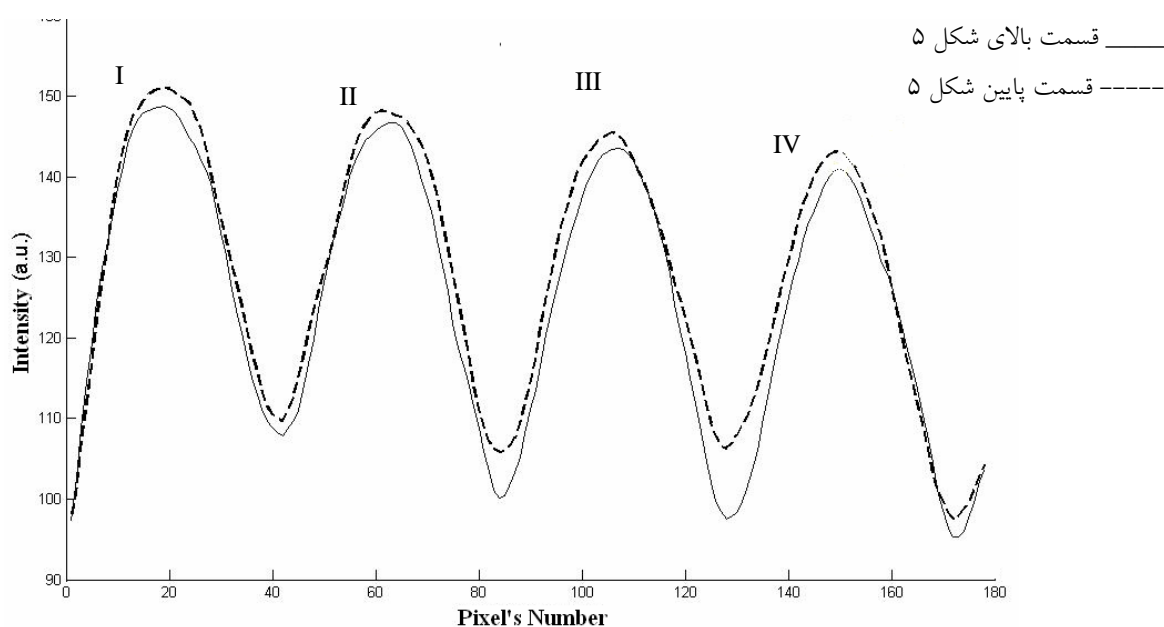
	قله انتخابی I	قله انتخابی II	قله انتخابی III
مکان قله در یک طرف پله (پیکسل)	۴۲	۸۶	۱۳۲
مکان قله در طرف دیگر پله (پیکسل)	۱۹	۶۶	۱۱۲
جابه‌جایی قله‌ها (پیکسل)	۲۳	۲۰	۲۰
Δx میانگین (پیکسل)	۲۱		
x میانگین (پیکسل)	۴۶		
λ (nm)	۵۴۶		
ضخامت لایه (nm) d	125 ± 6		

پله، قبل از ایجاد پله چقدر بوده است (شکل‌های ۵ و ۶). به دلیل اینکه ضخامت لایه نازک در تمام سطح آن یکسان نیست این نایکنواختی ضخامت در سطح لایه نازک باعث می‌شود که قبل از مرحله ایجاد پله، در طرفین پله (شکل ۵)، انتظار جابه‌جایی قله‌های نمودار شدت را داشته باشیم (شکل ۶) که باید گزارش شود. نتایج به دست آمده از این مرحله (جدول ۳) نشان می‌دهد که قبل از ایجاد پله، ۳ یا ۴ پیکسل جابه‌جایی در

شدت مرتبط با دو قسمت طرفین پله آورده شده‌اند. با استفاده از نتایج به دست آمده از نمودارهای شکل ۴ (در جدول ۲) ضخامت لایه نازک طبق رابطه ۲، 125nm به دست می‌آید. دلیل مساوی نبودن جابه‌جایی قله‌ها و نیز فاصله بین قله‌ها، به دلیل غیریکنواختی سطح لایه و یا زیرلایه است. باید یادآوری نمود که قبل از تحلیل نمودار شدت فریزها، باید مشخص شود که جابه‌جایی نمودارهای شدت فریزهای مرتبط با نواحی طرفین



شکل ۵. تصویر فریزهای تداخلی به دلیل تداخل دو دسته باریکه از سطح نمونه و سطح زیرین لام مورب روی نمونه قبل از ایجاد پله.



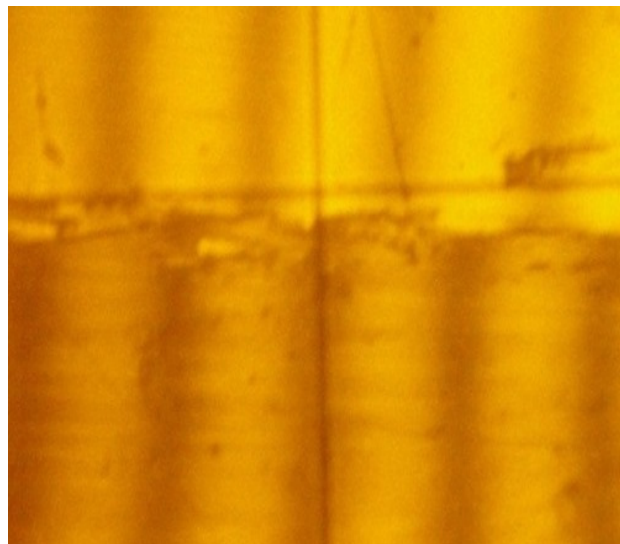
شکل ۶. نمودارهای شدت فریزهای تداخلی در شکل ۵. جابه‌جایی نمودار شدت فریزها در اثر وجود نایکناختی سطح در قله II واضح است.

شده است. چنانچه واضح است نتایج روش ارائه شده به نتایج روش مستقیم نزدیکتر است که تأییدی بر صحت و دقت روش ارائه شده است. همچنین ضخامت لایه مربوط به طرح تداخلی شکل ۲ (که با روش متعارف، قابل اندازه‌گیری نیست) با روش ارائه شده (جدول ۵) ۶ نانومتر به دست آمده است.

قله‌های نمودار شدت داریم (شکل ۶) که ناشی از نایکناختی سطح لایه و یا زیرلایه است. برای بالا بردن دقت در به دست آوردن ضخامت لایه نازک، پله باید در چند ناحیه متفاوت سطح لایه نازک ایجاد شود و از ضخامت‌های به دست آمده میانگین‌گیری شود.

نتایج به دست آمده از این روش و روش متعارف برای طرح تداخلی نمونه Cd/Te-Cu/glass (شکل ۷) با نتایج به دست آمده از ضخامت سنجی مستقیم در جدول ۴ مقایسه

در شکل ۸ فریزهای تداخلی به دست آمده از سطح یک نمونه



شکل ۷. تصویر فریزهای تداخلی و جابه‌جایی آنها به علت وجود پله برای نمونه Cd/Te-Cu/glass. شکل ۸. بخشی از تصویر فریزهای تداخلی مربوط به دو دسته باریکه در مساحت بازتابی $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ از سطح یک نمونه لام آزمایشگاهی، با استفاده از نور زرد سدیم.

جدول ۴. نتایج ضخامت سنجی یک لایه با سه روش. خطای گزارش شده روش متعارف، خطای سیستماتیک ناشی از خطای میکرومتر است (خطای ناشی از ضخامت رتیگول لحاظ نشده است). خطای روش نمودار شدت و روش مستقیم نیز خطای سیستماتیک هستند.

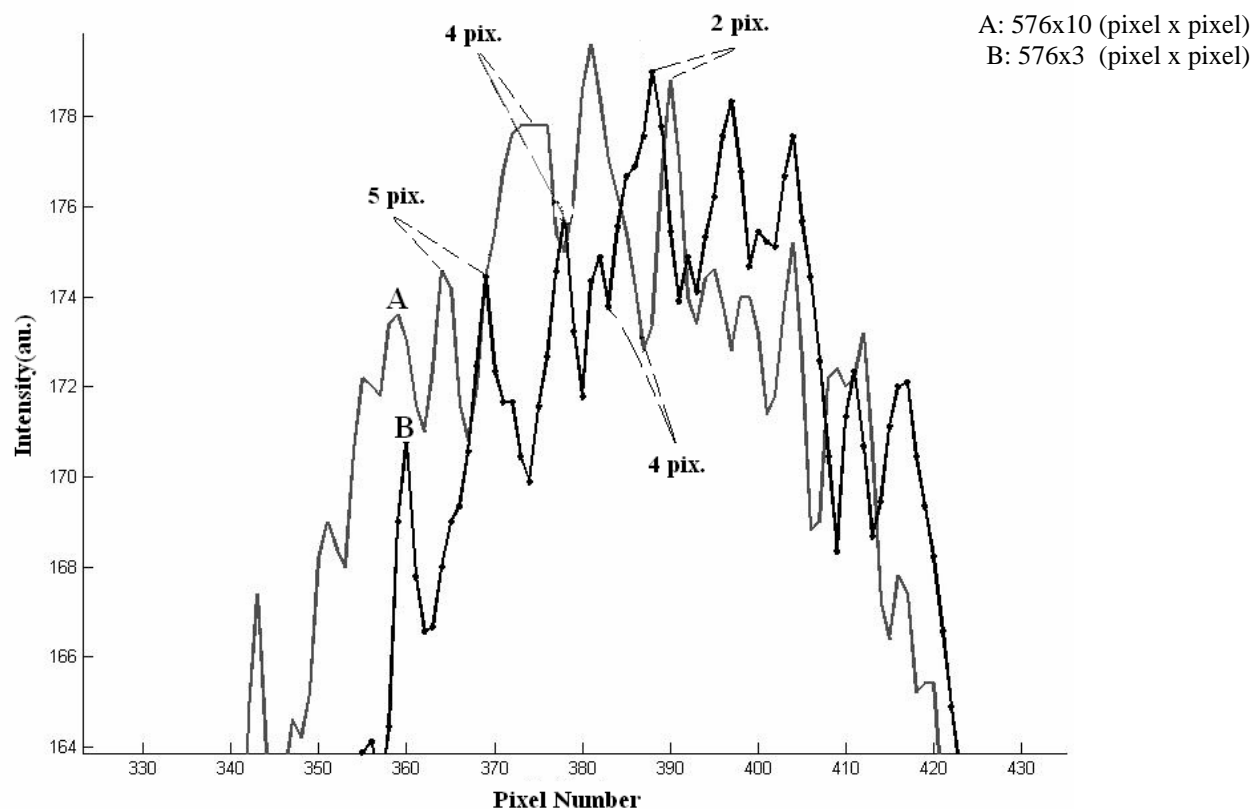
ضخامت (نانومتر)	روش
158 ± 16	متعارف
170 ± 2	جابه‌جایی نمودار شدت
172 ± 1	مستقیم

جدول ۵. مکان قله‌های نمودار شدت فریزهای تداخلی قبل و بعد از ایجاد پله و میزان جابه‌جایی آنها برای طرح تداخلی شکل ۲، خطای گزارش شده خطای سیستماتیک ناشی از جابه‌جایی نمودار شدت به دلیل زبری سطح است.

	قله انتخابی I	قله انتخابی II	قله انتخابی III
مکان قله در یک طرف پله (پیکسل)	۷۰	۲۱۶	۳۶۱
مکان قله در طرف دیگر پله (پیکسل)	۷۱	۲۱۳	۳۵۴
جابه‌جایی قله‌ها (پیکسل)	۱	۳	۷
Δx میانگین (پیکسل)	۴		
x میانگین (پیکسل)	۱۴۴		
λ (nm)	۵۸۹		
ضخامت لایه d (nm)	8 ± 2		

صورت تغییر شدت در فریزها ظاهر شود. وجود لکه‌های تاریک در فریزهای روشن یا لکه‌های روشن در فریزهای تاریک را می‌توان با وجود ناهمواری در سطح نمونه توضیح

شفاف (لام آزمایشگاهی) با استفاده از نور زرد سدیم در همان چیدمان قبلی نشان داده شده است. اگر فریزها به طور کیفی بررسی شوند انتظار می‌رود ناهمواری‌های سطح نمونه به

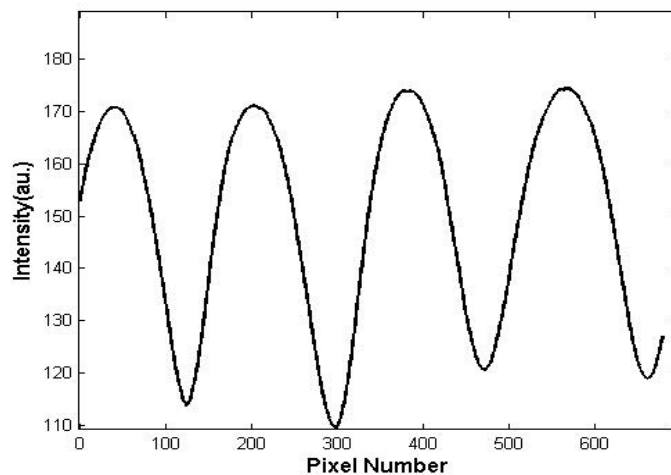


شکل ۹. نمودار A میانگین شدت‌های ثبت شده در پیکسل‌های نواری با ابعاد 576×10 (Pixel x Pixel) که بخشی از تصویر شکل ۸ با ابعاد 576×3 (pixel x pixel) است. نمودار B: یکی از نمودارهای میانگین شدت‌های ثبت شده پیکسل‌های نواری با ابعاد 576×3 (Pixel x Pixel) درون نوار بزرگتر 576×10 (Pixel x Pixel) است. مقدار جابه‌جایی افقی نمودار شدت در چند نقطه متناظر نیز در شکل نشان داده شده است.

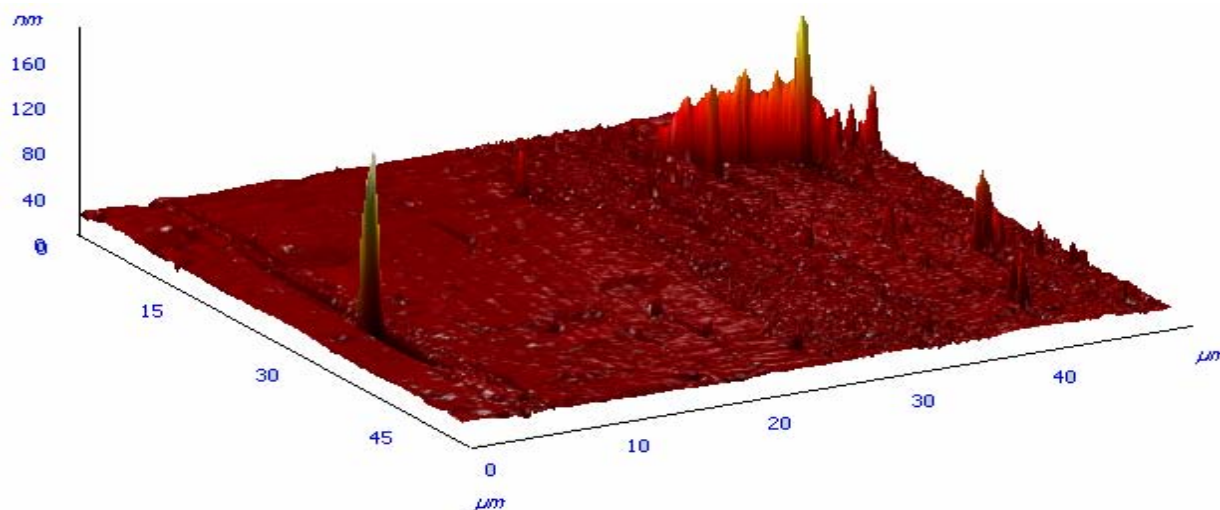
میانگین کل نوار، پستی و بلندی‌ها را نسبت به سطح میانگین به دست می‌آوریم.

در شکل ۹ نمودار A میانگین شدت‌های ثبت شده در پیکسل‌های نواری با ابعاد 576×10 (pixel x pixel) (بخشی از نوار جهت نمایش بهتر نشان داده شده است) و نمودار B یکی از نمودارهای میانگین شدت‌های ثبت شده پیکسل‌های نواری با ابعاد 576×3 (pixel x pixel) (بخشی از نوار جهت نمایش بهتر نشان داده شده است) درون نوار بزرگتر است. در شکل ۹ برای نمونه مقدار جابه‌جایی چهار بیشینه نسبی نمودار A آورده شده‌اند. مقدار جابه‌جایی‌های نمایش داده شده در شکل ۹، ۵ پیکسل، ۴ پیکسل، ۴ پیکسل و ۲ پیکسل هستند که با توجه به رابطه ۲ و شکل ۱۰ (که مقدار X در رابطه (۲) را ۱۷۸ نانومتر گزارش می‌دهد) به ترتیب ناهمواری‌های ۸ نانومتر، ۷ نانومتر، ۷ نانومتر و ۳ نانومتر را گزارش می‌دهند.

داد. بعد از دریافت شدت‌های بازتابی و تشکیل تصویر در CCD، تعداد پیکسل‌هایی که به مساحت خاصی از سطح نمونه نسبت داده می‌شود باید مشخص شود. براساس این نسبت، ما تصویر شکل ۸ را که دارای ابعاد 576×286 (pixel x pixel) است را به تعداد ۳۸ نوار افقی به ابعاد 576×10 (pixel x pixel) ناحیه تقسیم کردیم. میانگین شدت در راستای عمودی در هر نوار استخراج می‌شود. نمودار شدت به دست آمده در هر نوار، نمودار شدت تداخلی بازتاب از سطح میانگین ناهمواری نمونه و سطح زیرین شیشه مورب است. هر نوار را دوباره به تعدادی نوار باریکتر (مثلاً 576×3 ، 476×3 و 576×4 پیکسل) تقسیم کرده و نمودار شدت میانگین به دست آمده از هر یک از این نوارهای کوچک را با نمودار شدت میانگین کل نوار (576×10 (pixel x pixel)) مقایسه کرده و از جابه‌جایی افقی نمودار شدت میانگین نوار کوچکتر، نسبت به نمودار شدت



شکل ۱۰. نمودار شدت میانگین تصویر شکل ۸



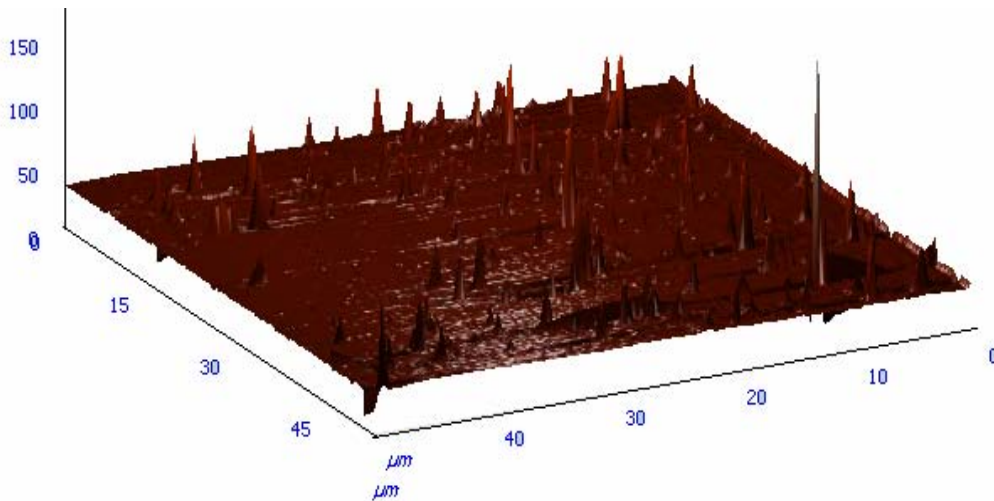
شکل ۱۱. یکی از تصاویر گرفته شده توسط دستگاه AFM از سطح نمونه مورد بررسی شکل ۸

جدول ۶. نتایج اندازه‌گیری زبری سطح نمونه شفاف با استفاده از روش جابه‌جایی نمودار شدت و اندازه‌گیری مستقیم توسط AFM.

	R_a (nm) زبری متوسط
روش جابه‌جایی نمودار شدت	4 ± 2
AFM	3 ± 1

تطابق مناسبی بین دو روش وجود دارد که تأییدی بر صحت روش ارائه شده است. نکته مهم در گزارش ناهمواری میانگین مربوط به ناحیه خاصی از سطح نمونه این است که باید سهم ناهمواری سطح Test Plate در مقدار جابه‌جایی بیشینه‌های

ما روش بالا را بر روی تمام نوارها اعمال کردیم و ناهمواری‌ها را به دست آوردیم. میانگین نتایج به دست آمده از این روش با نتایج به دست آمده از تصویربرداری مستقیم AFM (شکل ۱۱) در جدول ۶ مقایسه شده است. چنانچه واضح است



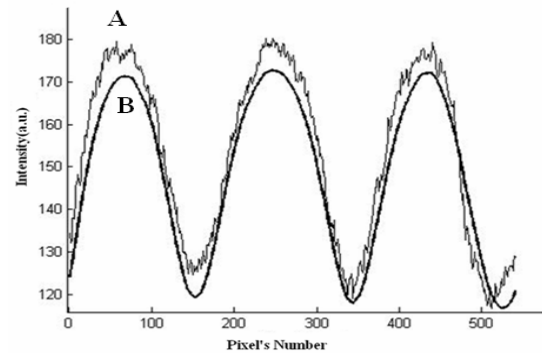
شکل ۱۲. یکی از تصاویر گرفته شده توسط دستگاه AFM از سطح Test Plate.

برای محاسبه ناهمواری‌ها باید مقدار دقیق x را به دست آوریم. به دست آوردن مقدار x به دلیل وجود ناهمواری در سطح نمونه نیازمند دقت در نکات زیر است. شکل ۱۳ نمودار شدت فریزهای تداخلی باریکه‌های بازتابی از سطح نمونه بوده که در دو مساحت متفاوت میانگین‌گیری شده است. چنانچه در شکل مشخص است در نمودار A نمی‌توان به راحتی بیشینه مطلق شدت را تعیین نمود. ولی در نمودار B بیشینه مطلق شدت کاملاً مشخص است. توضیح آنکه با توجه به شکل ۱۴ شرط تداخل کاملاً سازنده در نقطه P به صورت زیر است:

$$\Delta H + H = (2m + 1)\lambda / 4 \quad (4)$$

به دلیل زبری سطح (تغییر در H) این احتمال وجود دارد که به ازای هیچ مقدار صحیح m تساوی بالا برقرار نباشد. در نتیجه نمودار شدت به بیشینه مطلق خود نمی‌رسد. بنابراین اندازه‌گیری مقدار دقیق x امکان‌پذیر نخواهد شد. جهت رفع این مشکل کافی است بازه نوار انتخابی جهت میانگین‌گیری شدت فریزهای تداخلی به اندازه کافی بزرگ باشد (همانند نمودار B در شکل ۱۳).

در اندازه‌گیری ضخامت لایه نازک و زبری سطح، اگر قله نمودار شدت کمتر از یک پیکسل جابه‌جا شده باشد با این روش نمی‌توان جابه‌جایی آن را اندازه گرفت. بنا بر رابطه ۲ و با توجه به این که ضخامت فریز در شکل ۱۳، ۱۷۸ پیکسل است خطای این روش $\lambda / 356 \text{ nm}$ یعنی ۲ نانومتر خواهد بود. همچنین در



شکل ۱۳. A: نمودار شدت ناشی از فریزهای تداخلی ناهمواری‌های سطح نمونه، میانگین‌گیری شده در مساحت 170×40 (pixel \times pixel) در شکل ۸. B: نمودار شدت ناشی از فریزهای تداخلی ناهمواری‌های سطح نمونه، میانگین‌گیری شده در مساحت 170×300 (pixel \times pixel) در شکل ۸.

نسبی نمودار شدت فریزهای تداخلی در نظر گرفته شود. به دلیل این که در این روش جدا کردن سهم هر کدام از ناهمواری‌های سطح لایه نازک و Test Plate در مقدار جابه‌جایی بیشینه‌های نسبی نمودار شدت فریزهای تداخلی ساده نیست ما حداکثر خطایی که از این طریق وارد محاسبات می‌شود را به دست می‌آوریم. ناهمواری سطح Test Plate به کاررفته در این آزمایش با استفاده از AFM، ۲ نانومتر به دست آمد (شکل ۱۲). بنابراین خطای ما به خاطر وارد شدن ناهمواری‌های سطح Test Plate به کاررفته در این آزمایش، ۲ نانومتر خواهد بود.

با نتایج حاصل از ضخامت‌سنجی مستقیم تطابق بسیار خوبی دارد. با توجه به اینکه زبری سطح، باعث تغییر در راه نوری باریکه‌های تداخلی می‌شود، در نتیجه این تغییر به صورت تغییر در شدت فریزهای تداخلی نمایان شده و در نهایت به صورت اعوجاج در نمودار شدت ظاهر می‌شود. با اندازه‌گیری این تغییرات شدت، ناهمواری سطح نمونه را با دقت ۲ نانومتر به دست آوردیم که با نتایج حاصل از تصویربرداری مستقیم AFM تطابق خوبی دارد. ارزان بودن و دقت مناسب این روش حائز اهمیت است.

لازم است از کمک‌های دکتر محمدتقی توسلی، دکتر خسرو حسینی، دکتر ارشمید نهال، آقایان محسن قاسمی‌نژاد و کیهان گلپاری تشکر نماییم. بخشی از هزینه‌های انجام این پژوهش توسط معاونت پژوهشی دانشگاه تهران تامین شده است.



شکل ۱۴. نمای هندسی از گوه هوای ایجاد شده در آزمایش

زبری‌سنجی و ضخامت‌سنجی می‌توان به جای استفاده از بیشینه‌های نمودار شدت، همواره از کمینه‌های نمودار شدت نیز استفاده کرد.

با توجه به خطاهایی که در روش متعارف اندازه‌گیری ضخامت لایه نازک، تداخل‌سنجی، وجود دارد ما روش اندازه‌گیری ضخامت لایه نازک با استفاده از جابه‌جایی نمودار شدت فریزهای تداخلی را ارائه نموده‌ایم. این روش خطاهای روش متعارف تداخل‌سنجی را ندارد و دارای دقت ۲ نانومتر است که

1. Tolansky, *Nature*, **167** (1951) 815.
2. O S Heavens, *Proc. Phys. Soc. B* **64** (1951) 419.
3. F L Pedroti and L S Pedroti, "Introduction to Optics", 2nd Ed, Prentice Hall (1993).
4. A Zajac and E Hecht, "Optics", 3rd Ed, Addison-Wesley (1997).
5. C Weaver and P Benjamin, *Nature*, **182** (1958) 1149.
6. امیر رضا صدرالحسینی و ارشمید نهال، مقاله نامه دوازدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۱-۱۳ بهمن، دانشگاه شیراز (۱۳۸۴) ۲۸۳.
7. F Y Lenz and J Shamir, *J. Appl. Opt.* **21** (1982) 3200.
8. J M Bennett and J H Dancy, *Appl. Opt.* **20** (1981) 1785.
9. L Deck and P de Groot, *Appl. Opt.* **33** (1994) 7334.
10. K Nakayama, *Ann. CIRP* **31** (1982) 457.
11. S H Rowe and W T Welford, *Nature* (London) **216** (1967) 786.
12. R Windecker, S Franz, and H J Tiziani, *Appl. Opt.* **38** (1999) 2837.
13. R W Wygant, S P Almeida, and O D D Soares, *Appl. Opt.* **27** (1988) 4626.
14. M Li, C J Tay, *Opt. Laser Technol.* **40** (2008) 920.
15. H C Kandpal, D S Metha, J S Vaishya, *Opt. Lasers Eng.* **34** (2000) 139.
16. K A O'Donell, *J. Appl. Opt.* **25** (1993) 4922.
17. S Wang, C Quan, C J Tay, I Reading, and Z Fang, *Appl. Opt.* **43** (2004) 49.
18. P Sandoz and G Tribillon, *J. Mod. Opt.* **40** (1993) 1691.
19. B Dhanasekar and B Ramamoorthy, *Opt. Lasers Eng.* **46** (2008) 272.
20. P C Montgomery, A Benatmane, E Fogarassy, and J P Ponpon, *Mater. Sci. Eng. B* **91-92** (2002) 79.
21. C Hu and Y Qin, *Appl. Opt.* **36** (1997) 3682.
22. K Fujimoto, E Kuroki, T Matsunaka, H Nakaoka, and S Nakada, *J Japan Robot* **7** (1989) 46.
23. G S Spagnolo and Ambrosini, *Sens. Actuators A* **100** (2002) 180.
24. H Zhongxiang, Z Lei, T Jiayu, M Xuehong, and S Xiaojun, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **40** (2009) 342.
25. R Kumar, P Kulashekar, B Dhanasekar, and B Ramamoorthy, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **45** (2005) 228.
26. A M Hamed, H El-Ghandoor, F El-Diasty, and M Saady, *Opt. Laser Technol.* **36** (2004) 249.
27. S Wang, Y Tian, C J Tay, and C Quan, *Appl. Opt.* **42** (2003) 1318.
28. R Lu, G Tian, D Gledhill, and S Ward, *Appl. Opt.* **45** (2006) 8839.
29. C Tien, H Yang, and M Liu, *Thin Solid Films* **517** (2009) 110.