

طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی پله‌های فازی شیشه‌ای برای کاربرد در تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز

علی محمودی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم

پست الکترونیکی: a.mahmoudi@qom.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹)

چکیده

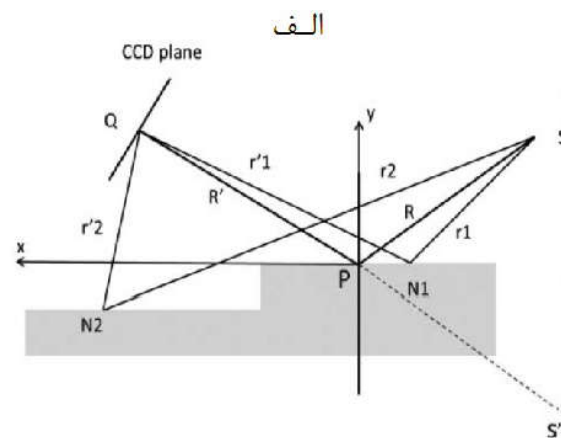
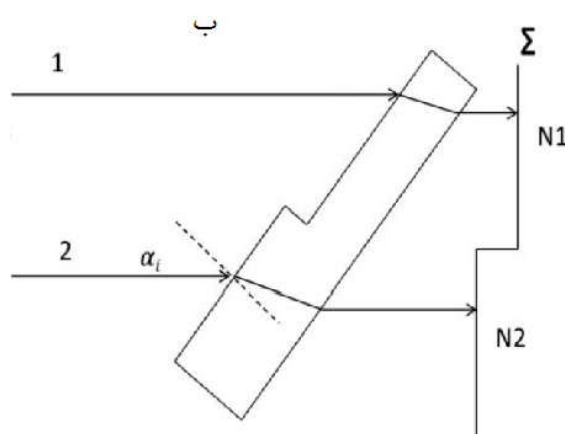
در این مقاله گزارشی از ساخت پله‌های فازی به کمک خوردگی شیشه با اسید هیدروفلوریک داده می‌شود. از این پله‌های فازی می‌توان به عنوان جایگزینی برای جابه‌جاگرهای پیزوالکتریک در تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز بهره برد. ابتدا به کمک پراش فرنل عبوری سرعت خوردگی شیشه توسط محلول اسید هیدروفلوریک رقیق شده با دقت بالا تعیین می‌شود. با کاربرد نقاب مناسب و با قرار دادن شیشه در اسید به مدت لازم، پله فازی دلخواه ساخته می‌شود. سپس برای تعیین دقیق ارتفاع پله از پراش فرنل عبوری استفاده می‌کنیم. روش به کار رفته بسیار دقیق، ساده و بسیار ارزان است و به لرزش و نوفه اپتیکی حساس نیست. این روش را می‌توان در حالت بی‌درنگ نیز به کار برد و تغییرات ضخامت را به صورت لحظه‌ای مشاهده کرد. سرعت خوردگی برای غلظت‌های کم از مرتبه چند نانومتر بر ثانیه بوده و تابع غلظت محلول، دما و جنس شیشه است. یک جابه‌جا کننده فاز برای تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز چهار پله‌ای ساخته شده است.

واژه‌های کلیدی: اپتیک، پراش، اندازه‌گیری اپتیکی، تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز

۱. مقدمه

شیشه، سبب تغییر ناگهانی فاز پرتو تابیده می‌شود. اثر این تغییر فاز ناگهانی بر روی شدت نور اولین بار توسط رامان [۱] بررسی شده است. مسئله پراش نور از یک صفحه نیمه شفاف با استفاده از ماریپچ کورنو نیز مطالعه شده است [۲]. در سال‌های اخیر پراش فرنل از اجسام فازی یک و دو بعدی توسط توسلی و همکاران [۳-۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها پراش فرنل از اجسام فازی را در حالت‌های عبوری و بازتابی محاسبه کردند و نشان دادند نمایانی فریزهای پراش به زاویه فرود نور، طول موج

معمولاً پراش فرنل زمانی رخ می‌دهد که یک مانع در بخشی از مسیر نور قرار گیرد. پراش در لبه اشیا یا روزنه‌ها (شکاف‌ها) بر اثر تغییر ناگهانی دامنه موج اتفاق می‌افتد و نقش پراش بر روی پرده‌ای مشاهده می‌شود. از سوی دیگر پراش فرنل می‌تواند در اثر تغییر ناگهانی در فاز جبهه موج نیز رخ دهد. اگر این تغییر ناگهانی زیاد باشد، پراش فرنل به خوبی مشاهده می‌شود. به طور مثال تغییر تند ضریب شکست در مرز یک تیغه شفاف مانند



شکل ۱. پراش فرنل از پله یک بعدی. (الف) بازتابی و (ب) عبوری.

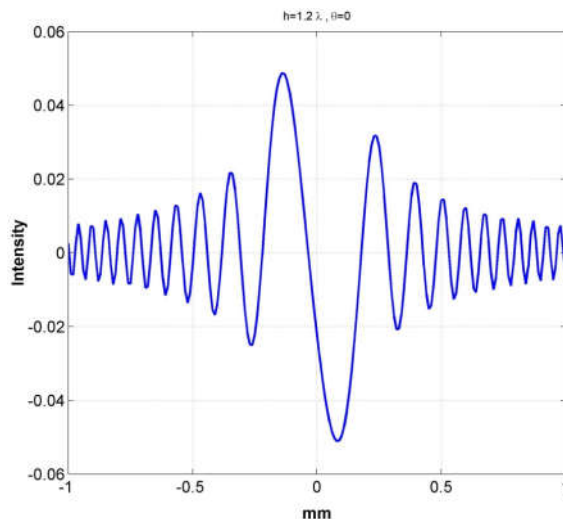
فریزهای پراش، می‌توان سرعت تغییر ضخامت را به صورت دقیق اندازه‌گیری کرد. یادآوری می‌کنیم که در پدیده خوردگی، عواملی همچون شرایط محیط، ترکیب و ساختار ماده و همچنین غلظت محلول دخیل هستند. یکی از کاربردهای جالب این روش، ساخت پله‌های فازی ارزان برای کاربرد در تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز و تمام‌نگاری دیجیتال جابه‌جایی فاز است. تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز [۱۹] یکی از روش‌های قدرتمند برای اندازه‌گیری سطوح است. در این روش معمولاً از جابه‌جاگرهای پیزوالکتریک برای ایجاد تغییر فازهای مناسب در یک بازوی تداخل‌سنج استفاده می‌شود. جابه‌جاگرهای پیزوالکتریک ابزارهایی گران‌قیمت هستند و در آزمایشگاه‌های دانشگاه‌های ما به ندرت یافت می‌شوند. پله‌های فازی شیشه‌ای ساخته شده بسیار ارزان‌تر و با کیفیت قابل قبول برای اهداف پژوهشی و آموزشی هستند.

۲. بخش نظری

۲.۱. پراش فرنل از جسم فازی یک بعدی در بازتاب و عبور
در شکل ۱ تیغه‌ای مسطح که بر روی آن یک پله یک بعدی به ارتفاع h قرار دارد به وسیله یک جبهه موج تخت با طول موج λ روشن شده‌است. صفحه مشاهده عمود بر پرتو بازتابیده (یا عبوری) است. با توجه به شکل ۱ آشفتگی نوری در نقطه P روی صفحه مشاهده در تقریب فرنل به صورت زیر نوشته می‌شود [۳]:

نور، ارتفاع پله فازی، ضریب شکست جسم (در مد عبوری) و ضریب شکست محیط اطراف بستگی دارد. یک نتیجه جالب توجه از کار آنها این است که نمایانی یک تابع دوره‌ای از اختلاف راه نوری پرتوهای بازتابیده از (یا گذر کرده از) اشیا فازی است. به بیان دیگر تغییر پیوسته ارتفاع پله، زاویه فرود نور، ضریب شکست محیط اطراف، و یا طول موج منجر به تغییر دوره‌ای در نمایانی فریزهای پراشی می‌شود. این نتیجه جالب، کاربردهای بسیار جالبی یافته است. افراد مختلف پراش فرنل از پله‌های فازی و اشیا فازی را در اندازه‌گیری دقیق ضریب شکست [۶-۹]، اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های نازک [۱۰]، پراش‌سنجی اپتیکی [۱۱]، مدرج‌سازی انتقال دهنده‌های فازی [۱۲]، مطالعه کشش سطحی شماره‌ها [۱۳]، اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نانومتری و زیرنانومتری [۱۴، ۱۵]، اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی [۱۶]، اندازه‌گیری سرعت خوردگی مواد شفاف [۱۷] و اندازه‌گیری فاصله کانونی عدسی [۱۸] به‌کاربرده‌اند. در اینجا برپایه روشی که پیش از این در [۱۷] به کار برده‌ایم با اندازه‌گیری سرعت خوردگی شیشه توسط محلول مناسب، پله‌های فازی مناسب برای کاربرد در تداخل‌سنجی را ساخته و با استفاده از روش پراش‌سنجی بازتابی مشخصه‌یابی می‌کنیم.

همان‌طور که گفته شد در طی فرایند خوردگی، ضخامت یک تیغه به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد و این تغییر سبب تغییر دوره‌ای فریزهای پراش می‌شود. از تغییر دوره‌ای نمایانی



شکل ۲. (رنجی در نسخه الکترونیکی) توزیع شدت برای پراش فرنل از پله ای به ارتفاع $1/2\lambda$ و فرود عمودی.

می‌دهد و پله قابل مشاهده نخواهد بود. در این حالت نمایانی فریزها صفر است. از سوی دیگر اگر $h \cos \theta = (2m+1)\lambda/2$ باشد، ضریب نمایی پشت انتگرال دوم برابر ۱- خواهد شد و فریز مرکزی تاریک خواهد شد. در نتیجه با تغییر پیوسته h یا θ انتظار می‌رود که فریز مرکزی به صورت دوره‌ای تاریک و روشن شود. از دوره‌ای این تغییرات می‌توان سرعت تغییر ضخامت و مقدار تغییر کل ضخامت را به دست آورد.

به همین ترتیب در حالت عبوری اگر $h(\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 \theta} - n' \cos \theta) = m\lambda$ باشد فریز مرکزی روشن و نمایانی صفر است و اگر $h(\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 \theta} - n' \cos \theta) = (2m+1)\lambda/2$ باشد فریز مرکزی تیره و نمایانی ۱ است و در بقیه حالت‌ها نمایانی بین صفر و یک خواهد بود. در نتیجه در حالت عبوری هم با تغییر پیوسته ارتفاع پله، نمایانی به صورت دوره‌ای تغییر می‌کند و با اندازه‌گیری دوره تناوب تغییرات آن، می‌توان سرعت تغییر ضخامت و کل تغییر ضخامت را اندازه گرفت. در حالت عبوری اگر نور به طور عمودی بر پله بتابد، انجام آزمایش ساده‌تر می‌شود، در این حالت داریم:

$$\varphi = kh(n-n') = \frac{2\pi}{\lambda}(n-n'), \quad (2)$$

اگر λ ، n و n' ثابت نگه داشته شوند، نمایانی به صورت

$$U(Q) = C_1 \int_{-\infty}^{x_0} \exp\left[\frac{-ikx^2}{2}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)\right] dx + C_2 \exp(-i\varphi) \int_{x_0}^{\infty} \exp\left[\frac{-ikx^2}{2}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)\right] dx, \quad (1)$$

در اینجا θ زاویه فرود نسبت به عمود بر سطح، h ارتفاع پله و $k = 2\pi/\lambda$ است. C_1 و C_2 ثوابتی وابسته به ضرایب بازتاب و عبور هستند. R (برابر با PS در شکل ۱) و R' (QP در شکل ۱) و در نهایت x_0 موقعیت لبه پله است. کمیت φ اختلاف فاز پرتور در اثر بازتاب یا عبور است. به سادگی می‌توان نشان داد که برای حالت بازتابی $\varphi = 2kh \cos \theta$ و برای حالت عبوری $\varphi = kh(\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 \theta} - n' \cos \theta)$ است. در حالت عبوری n و n' ضریب شکست ماده و محیط اطراف هستند. توزیع شدت برای هر نقطه روی صفحه مشاهده با استفاده از $I = UU^*$ به دست می‌آید. در شکل ۲ برای فرود عمودی و $h = 1/2\lambda$ توزیع شدت رسم شده است. عدم تقارن شدت در دو سوی پله به وضوح دیده می‌شود.

معادله (۱) تعبیر پرکاربردی دارد. اگر در حالت بازتابی $h \cos \theta = m\lambda/2$ و m عددی طبیعی باشد ($m = 1, 2, 3, \dots$) آنگاه ضریب نمایی پشت انتگرال دوم برابر ۱ خواهد بود و معادله (۱) پراش فرنل از یک سطح یکنواخت (تخت) را نشان

الگوی تداخلی دچار بی‌نظمی‌هایی می‌شود که تابع تغییرات ارتفاع سطح در نقاط مختلف است و آن را با $\varphi(x,y)$ نمایش می‌دهیم. به دست آوردن این تابع دوبعدی معادل با استخراج هندسه سطح مورد نظر است. روش جابه‌جایی فاز الگوریتم‌های مختلفی دارد که ما خلاصه‌ای از روش جابه‌جایی فاز چهار پله‌ای را یادآوری می‌کنیم. در این شیوه، چهار الگوی شدت تداخلی به صورت متوالی ثبت می‌شود. هر الگوی شدتی با الگوی بعدی به اندازه $\frac{\pi}{4}$ اختلاف فاز دارد که این اختلاف فازها با جابه‌جایی آینه تداخل‌سنج تأمین می‌شوند. برای جابه‌جا کردن آینه از جابه‌جاگرهای پیزوالکتریک استفاده می‌شود. پس از هر مرحله جابه‌جایی طرح تداخلی بر روی دوربین CCD ثبت می‌شود. تصاویر تهیه شده را می‌توان با معادله‌های زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= I_0(x,y) + A(x,y) \cos\left(\varphi(x,y) - \frac{3\pi}{4}\right), \\ I_2(x,y) &= I_0(x,y) + A(x,y) \cos\left(\varphi(x,y) - \frac{\pi}{4}\right), \\ I_3(x,y) &= I_0(x,y) + A(x,y) \cos\left(\varphi(x,y) + \frac{\pi}{4}\right), \\ I_4(x,y) &= I_0(x,y) + A(x,y) \cos\left(\varphi(x,y) + \frac{3\pi}{4}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه‌های بالا، $I_1(x,y)$ ، $I_2(x,y)$ ، $I_3(x,y)$ و $I_4(x,y)$ شدت‌های ثبت شده در چهار مرحله مد نظر هستند، $I_0(x,y)$ شدت زمینه است و $A(x,y)$ دامنه و $\varphi(x,y)$ فاز مورد جستجو است. در عمل، چهار طرح تداخلی $I_1(x,y)$ ، $I_2(x,y)$ ، $I_3(x,y)$ و $I_4(x,y)$ با یک دوربین CCD ثبت و ذخیره می‌شوند. در این حالت، چهار ماتریس $N \times M$ داریم که M و N تعداد پیکسل‌های دوربین در راستاهای x و y هستند. با حل دستگاه (۱) می‌توان جمله فازی را بدین صورت نوشت:

$$\varphi = \text{Arctan}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right), \quad (5)$$

این جمله فازی نیز ماتریسی با همان ابعاد است و اطلاعات مربوط به پستی و بلندی سطح را در خود دارد. اختلاف فازهای لازم در معادله (۴) را می‌توان با قرار دادن شیشه با ضخامت مناسب در یکی از بازوهای تداخل‌سنج ایجاد کرد. شکل (۳)

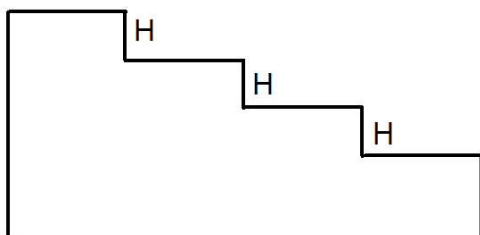
دوره‌ای با h تغییر می‌کند. سرعت تغییر ضخامت را می‌توان مستقیماً از دوره تناوب نوسانات اندازه‌گیری کرد. بنابراین برای اندازه‌گیری سرعت تغییر ضخامت فقط کافی است دوره تناوب تغییرات نمایانی بر حسب زمان را به دست آوریم. سپس برای ساخت پله‌ای با ارتفاع دلخواه، مدت زمان لازم از روی ارتفاع و سرعت تغییر ضخامت به دست می‌آید. یادآوری می‌کنیم که وقتی سطح ناصاف باشد، (چنانچه فرض کنیم صفحه در راستای یک خط بریده شود و لبه‌اش صاف و هموار باشد) یک جمله فاز تصادفی در انتگرال‌های معادله (۱) ظاهر می‌شود. به‌خاطر این جمله فاز شدت فریز مرکزی در راستای لبه به صورت تصادفی تغییر می‌کند، فریز تاریک مرکزی از بین می‌رود و روش ارائه شده دیگر جواب نمی‌دهد. نمایانی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$v = \frac{I_{Rmax} + I_{Lmax} - I_{Cmin}}{I_{Rmax} + I_{Lmax} + I_{Cmin}}, \quad (3)$$

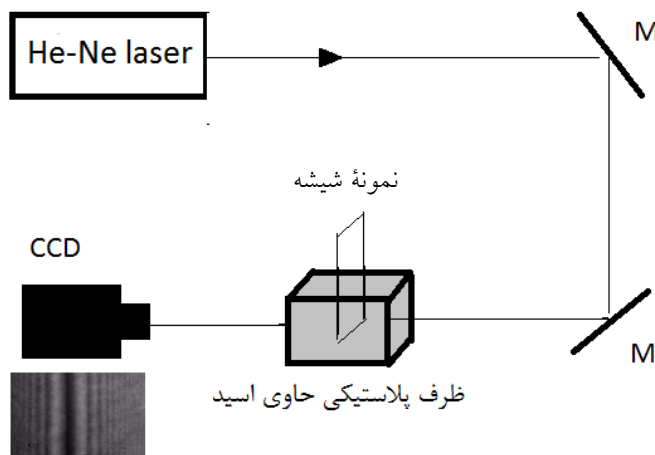
که I_{Rmax} و I_{Lmax} بیشینه شدت اولین فریزهای نوری هستند که در طرف راست و چپ لبه پله ظاهر می‌شوند و I_{Cmin} کمینه شدت فریز مرکزی است. این فریز تاریک لبه پله فازی (مرز شیشه - مایع) را مشخص می‌کند.

۲.۲. تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز

یکی از روش‌های زیرمجموعه تداخل‌سنجی، روش تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز است که در اندازه‌گیری‌های دقیق هندسه سطوح کاربرد دارد. در این شیوه، به جای یکی از آینه‌های تداخل‌سنج مایکلسون یا ماخ-زندر جسم تحت مطالعه را قرار می‌دهیم. هدف، سنجش پستی و بلندی سطح جسم با دقت بالا می‌باشد. اطلاعات مربوط به سطح جسم و افت و خیزهای سطح جسم به صورت فازی وابسته به مکان بر روی الگوی تداخلی سوار می‌شوند. با استخراج این فاز، ارتفاع سطح نسبت به یک صفحه مرجع به دست می‌آید. اگر سطح جسم کاملاً تخت باشد نوارهای تداخلی خطی مشخص سطح تخت خواهیم دید. اما اگر جسم دارای سطح تخت نباشد، فاز



شکل ۳. ساختار پله‌ای لازم در شیشه برای ایجاد اختلاف فازهای مناسب در تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز چهار پله‌ای.



شکل ۴. چیدمان مربوط به اندازه‌گیری سرعت خوردگی شیشه به کمک پراش فرنل.

یک پرتو لیزر موازی ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) را روی لبه شیشه تابانده و تصویر فریزهای پراش، توسط یک دوربین CCD به صورت فیلم ثبت می‌شود. سرعت تصویرگیری ثابت و قابل تنظیم است. سپس ویدئوهای ثبت شده به فریم‌های مجزا تبدیل و نمایانی در هر فریم، محاسبه و بر حسب شماره فریم یا زمان رسم می‌شود. همچنین در صورت نیاز به محاسبه بی‌درنگ، می‌توان مستقیماً ویدئو را تحلیل کرد.

از روی نمودار نمایانی بر حسب زمان و دستیابی به فاصله زمانی بین بیشینه‌ها و کمینه‌های متوالی در این نمودار، دوره تناوب خوردگی به دست می‌آید. به عنوان مثال در شکل ۴ نمودار نمایانی بر حسب زمان برای خوردگی شیشه در محلول ۱ cc اسید HF در ۱۰ cc آب مقطر نشان داده شده است.

برای به دست آوردن سرعت متوسط تغییر ضخامت یا به بیان دیگر سرعت خوردگی، پس از به دست آوردن دوره تناوب در نمودار نمایانی، با توجه به رابطه (۴) و این که ضمن فرایند

طرحی از ساختار پله‌ای لازم را نشان می‌دهد. با تعیین H و ایجاد این پله‌ها در شیشه، می‌توان با قرار دادن آن در یک بازوی تداخل‌سنج و عبور دادن نور از ضخامت مناسب، چهار طرح تداخلی لازم در معادله (۴) را ایجاد کرد.

۳. آزمایش

۳.۱. ساخت پله‌های فازی با ارتفاع مناسب

در اولین قدم باید خوردگی شیشه اندازه‌گیری شود. سرعت خوردگی تابع غلظت و دمای محلول و همچنین جنس شیشه است. بنابراین برای هر شیشه باید در دمای ثابت و غلظت مشخص سرعت خوردگی اندازه‌گیری شود. برای اندازه‌گیری سرعت تغییر ضخامت در هنگام خوردگی شیشه توسط اسید هیدروفلوریک رقیق، یک لام میکروسکوپ استاندارد را در یک ظرف پلاستیکی شفاف حاوی محلول خورنده رقیق مناسب، وارد می‌کنیم. چیدمان آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر اندازه‌گیری شده برای سرعت خوردگی شیشه توسط اسید هیدروفلوریک در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس.

غلظت محلول (مقدار اسید غلیظ در ۱۰ cc آب)	
۲ cc	۱ cc
۱,۳۲۹۴	۱,۳۳۱۴
ضریب شکست در $\lambda = 633 \text{ nm}$	
۳۲۵s	۴۵۰s
دوره تناوب در نمودار نمایانی	
۳۳۹۲	۳۲۴۹
مقدار میانگین تغییر ضخامت در یک دوره بر حسب nm بر اساس رابطه (۶)	
۱۰,۴	۷,۶
سرعت میانگین خوردگی بر حسب nm/s	

$$\phi = \frac{\pi}{\gamma} = kH(n - n'), \quad (7)$$

به این ترتیب با کمک مقادیر ضریب شکست های محلول و شیشه و طول موج لیزر، $H = 307 \text{ nm}$ می‌شود. با داشتن سرعت خوردگی، مدت زمان لازم برای ساخت این پله از تقسیم کردن ارتفاع بر سرعت خوردگی، برابر 83 s به دست می‌آید. با ذوب کردن پارافین و انجماد مجدد آن بر روی شیشه یک مرز خطی ایجاد می‌شود. سپس با غوطه‌ور کردن شیشه به مدت ۸۳ ثانیه در اسید، پله یک بعدی ساخته می‌شود. با شستشوی پارافین باقیمانده، کار به اتمام می‌رسد و پله خطی ایجاد شده با چشم کاملاً قابل دیدن است.

برای اندازه‌گیری مستقل ارتفاع پله ایجاد شده می‌توان از میکروسکوپ نیروی اتمی یا تداخل‌سنجی استفاده کرد. روش دیگر استفاده از پراش فرنل در حالت بازتابی است. بر اساس این روش [۲۰] ارتفاع پله‌های یک بعدی با دقت بالا و قابل مقایسه با میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری می‌شود. ما از دستگاهی که بر مبنای این روش توسط شرکت فناوری خلأ کهربا به نام ضخامت سنج لایه‌های نازک ساخته شده بهره برده‌ایم. ارتفاع پله ساخته شده برابر ۳۱۷ نانومتر به دست آمد. میزان اختلاف فاز ایجاد شده توسط این پله در عبور عمودی، برابر ۹۳ درجه یا 0.52π است. بنابراین در تداخل‌سنج مایکلسون میزان اختلاف فاز برابر ۱۸۳ درجه خواهد بود یعنی در مرز پله فریزها یک شکستگی به اندازه یک فریز خواهند داشت. برای ارزیابی این پیش بینی، از تداخل‌سنج مایکلسون با نور لیزر هلیوم-نئون 633 nm و بدون هیچ گونه صافی فضایی و پهن کردن پرتو استفاده کردیم.

شکل ۵، فریزهای مرکزی طرح تداخلی را با و بدون حضور

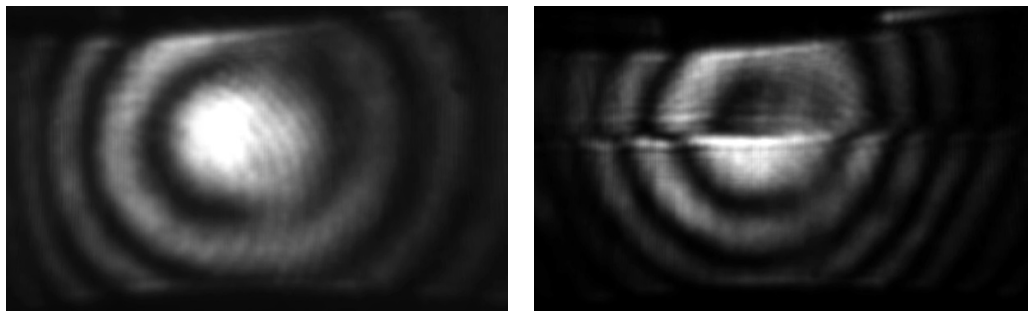
خوردگی تغییر فاز در یک دوره تناوب کامل برابر با 2π می‌باشد، مقدار تغییر ضخامت در یک دوره تناوب (ΔT) برابر خواهد بود با:

$$\Delta h = \frac{\lambda}{n - n'}, \quad (6)$$

طول موج نور لیزر هلیوم-نئون برابر با 632.8 nm است. اگر چه ضریب شکست HF بی‌آب 1.1574 است، ضریب شکست محلول خورنده رقیق شده، باید خیلی نزدیک به ضریب شکست آب باشد. ضریب شکست محلول خورنده را به روش کمینه انحراف (بیناب‌سنج - گونیومتر مدل ۱۸۳۶) اندازه‌گیری کرده‌ایم. ضریب شکست شیشه نیز به روش تداخل‌سنجی به دست آمده است و همچنین با داده‌های مرجع مقایسه شده است. در نهایت با تقسیم Δh بر ΔT سرعت تغییر ضخامت به دست می‌آید.

در جدول ۱، نتایج اندازه‌گیری سرعت خوردگی شیشه برای دو محلول با غلظت متفاوت آمده است. لازم به ذکر است که اعداد مربوط به سرعت خوردگی میانگین هستند و به دلیل چیدمان آزمایش باید نصف شوند؛ چون محلول خورنده در هر دو سوی شیشه حضور داشته و خوردگی در دو طرف شیشه رخ داده است.

به این ترتیب سرعت خوردگی شیشه در دمای ثابت ۲۵ درجه، توسط محلول ۱ cc اسید غلیظ در ۱۰ cc آب مقطر برابر $3/8$ نانومتر بر ثانیه است. برای ساختن یک پله فازی یک بعدی که در طول موج 633 nm اختلاف فازی برابر $\frac{\pi}{4}$ بین پرتوهای گذرنده از دو سطح پله ایجاد شود، ارتفاع پله H را از معادله زیر به دست می‌آوریم:



شکل ۵. فریزهای دایره‌ای تداخل‌سنج مایکلسون. (چپ) بدون حضور پله فازی شیشه‌ای. (راست) با حضور پله فازی. ارتفاع پله ۳۱۷ نانومتر و طول موج لیزر ۶۳۳ نانومتر است.

پیزوالکتریک ارائه کرده‌ایم. بدین منظور با خوردگی شیشه توسط اسید هیدروفلوریک پله‌هایی با ارتفاع مناسب در شیشه ایجاد کرده‌ایم. اندازه‌گیری سرعت خوردگی شیشه با روش پراش فرنل عبوری و اندازه‌گیری ارتفاع پله‌های ساخته شده با روش پراش فرنل بازتابی انجام شده است. هر دو روش دقت بسیار بالایی دارند. سادگی روش و مقاوم بودن آن در برابر لرزش و نوفه نوری از مزایای روش به کار رفته برای ساخت و مشخصه‌یابی جابه‌جاگر فاز است. هزینه ساخت این جابه‌جاگر فاز حدود ۱۰۰ هزار تومان است.

از این روش برای ساخت پله‌هایی با اختلاف فاز مناسب برای آموزش تداخل‌سنجی نیز می‌توان بهره برد.

پله ۳۱۷ نانومتری نشان می‌دهد. به خوبی دیده می‌شود که جابه‌جایی به اندازه یک فریز رخ داده است. مرز افقی در مرکز طرح تداخلی، لبه پله را مشخص می‌کند.

با تکرار فرایند بالا، ساختار پله‌ای مناسب شکل ۳ برای کاربرد در تداخل‌سنجی جابه‌جایی فاز ساخته می‌شود. هزینه ساخت چنین ساختاری در حد ۱۰۰ هزار تومان است. نمونه‌های جابه‌جاگرهای خطی برپایه پیزوالکتریک دست کم ۱۰ میلیون تومان قیمت دارند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله گزارشی از طراحی و ساخت یک جابه‌جاگر فاز بسیار ارزان قیمت شیشه‌ای برای کاربرد به جای جابه‌جاگرهای

مراجع

1. C V Raman and I R Rao, *Proc. Phys. Soc. London* **39**, (1926) 453.
2. M Parker Givens and W L Goffe, *Am. J. Phys.* **34** (1966) 248.
3. M T Tavassoly, A Darudi, H R Khalesifard, and M R Sadat Hossaini, *Proc. SPIE* **4399** (2001) 98.
4. M Amiri and M T Tavassoly, *Opt. Commun.* **272** (2007) 349.
5. R Aalipour and M T Tavassoly, *Opt. Commun.* **294** (2013) 13.
6. M T Tavassoly and A Saber, *Opt. Lett.* **35** (2010) 3679.
7. M T Tavassoly, S R Hosseini, A M Fard, and R R Naraghi, *Appl. Opt.* **51** (2012) 7170.
8. M T Tavassoly, R R Naraghi, A Nahal, and K Hassani, *Opt. Lett.* **37** (2012) 1493.
9. A Sabatyan and M T Tavassoly, *Opt. Eng.* **46** (2007) 128001.
10. M T Tavassoly, I M Haghghi, and K Hassani, *Appl. Opt.* **48** (2009) 5497.
11. M T Tavassoly, M Amiri, A Darudi, R Aalipour, A Saber, and A-R Moradi, *J. Opt. Soc. Am. A* **26** (2009) 540.
12. R Aalipour and M Aminjafari, *J. Opt.* **14** (2012) 125706.
13. M Zargham, A-R Moradi, and A Najafi, *Proc. SPIE* **8785** (2013) 8785DN.
14. A A Khorshad, K Hassani, and M T Tavassoly, *Appl. Opt.* **51** (2012) 5066.
15. Q Lu, C Wang, J Bai, K Wang, W Lian, S Lou, X Jiao, and G Yang, *Appl. Opt.* **54** (2015) 4188.
16. M G Beygi, R Karimzadeh, and M Dashtdar, *Opt. Laser Technol.* **66** (2015) 151.
17. A Mahmoudi, *Appl. Opt.* **54** (2015) 7993.

- Topography, *Springer, chapter 8* (2011).
20. S R Hosseini and M T Tavassoly, *Journal of Optics*, **17** 3 (2015).
18. M Dashtdar and S Mohammad-Ali Hosseini-Saber, *Applied Optics* **55** 26 (2016) 7434.
19. P de Groot, Optical Measurement of Surface