

آشنایی با لیتوگرافی و ارائه روشی کاربردی برای بهینه‌سازی آن

سید رضا حسینی و ارشید نهال*

آزمایشگاه پژوهشی مواد فوتونیک، دانشکده فیزیک، پردیس علوم، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: nahal@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۷/۱۷)

چکیده

از آنجایی که برای انجام درست هرکاری ابتدا باید دانش و شناخت کافی از آن موضوع پیدا کنیم، ما در بخش نخست این مقاله ابتدا به مرور بر روش‌های مهم و اصلی لیتوگرافی نوری و طبقه‌بندی آنها می‌پردازیم. سپس به معرفی راه‌های بهبود تصاویر ایجاد شده روی فتورزیست که بستری اصلی لیتوگرافی است پرداخته و لیتوگرافی با ذرات پرانرژی و لیتوگرافی نرم را بررسی می‌کنیم. در بخش دوم مقاله روش فتولیتوگرافی تماسی و فرایند بهبود آن که در آزمایشگاه ما انجام شده است، با جزئیات معرفی و شرح داده می‌شود. از این روش برای لیتوگرافی جهت ساخت قطعات اپتیکی پراشی روی یک بستر شیشه‌ای آلاینده شده به نانوذرات نقره توسط یک باریکه یون هلیوم استفاده کردیم. جهت کاهش اثر پراش، ما روش تماسی را برای کار خود سازگار و بهینه‌سازی کردیم. راهکار ما که در این مقاله ارائه شده است برای سایر پژوهشگران در ایران عملی و در دسترس است.

واژه‌های کلیدی: لیتوگرافی، مواد حساس به نور، فتورزیست

۱. مقدمه

لیتوگرافی نوعی روش چاپی دقیق است که می‌توان با آن الگوهای مورد نظر را برای ساخت قطعات الکترونیکی و اپتیکی مینیاتوری در ابعاد خیلی کوچک در مقیاس چند میکرونی و حتی چند ده نانومتری روی سطوح ایجاد کرد. به همین خاطر تکنیک لیتوگرافی در ساخت ریزپردازنده‌ها کاربرد فراوانی پیدا کرده است. با توجه به اهمیت تجاری و علمی ساخت تراشه‌ها و تلاش روزافزون برای بهبود و کوچک‌تر ساختن

ترانزیستورهای جا داده شده در این قطعات الکترونیکی، لیتوگرافی با روش‌های گوناگون به سرعت توسعه یافته و هر روز شاهد ارائه روش‌های جدید و متنوع در این راستا هستیم. برای لیتوگرافی با نور، دو عامل مواد حساس به نور یا فتورزیست^۱ و فوتون‌ها یا ذرات پرانرژی نور اثر گذار بر ماده حساس به نور اهمیت بسیار دارند. در عین حال برای انجام لیتوگرافی با کیفیت مطلوب به اتاق تمیز و روش‌های استاندارد تمیز کردن زیر لایه‌ها برای کاهش اثر مخرب گرد و غبار و

۱. Photoresist

قیمت نسبتاً مناسب و برهمکنش با طول موج‌های نسبتاً بلند رنگ آبی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در حالی که پلیمر پلی متیل متاکریلات^۳ (PMMA) توانایی آن را دارد که با فوتون‌ها و ذرات بسیار پر انرژی‌تر مانند باریکه‌الکترونی واکنش دهد و طرح‌هایی با ابعادی از مرتبه چند نانومتر روی آن نقش ببندد [۱۱]. در مورد فوتورزیست‌ها توجه به این نکته مهم است که هر فوتورزیستی به حداقل مقدار خاصی انرژی جذب شده نیاز دارد تا در یک محلول ظهور به طور کامل بتواند حل شود (برای فوتورزیست‌های مثبت) و یا برعکس کاملاً نامحلول شود (برای فوتورزیست‌های منفی). نوردهی یا تابش کمتر از مقدار لازم نمایانی و اختلاف سیاهی و سفیدی تصویر^۴ را کاهش می‌دهد که به نوبه خود باعث کاهش محصول نهایی می‌شود. از طرفی، تابش بیش از اندازه باعث هدر رفتن وقت و انرژی شده [۱۲] و تأثیر چندانی در کیفیت کار ندارد و حتی در مواردی باعث تخریب ماده حساس به نور می‌شود.

۲.۲. ماسک

ماسک یک صفحه طرح‌دار است که شامل الگویی است که باید به روی سطح فوتورزیست منتقل شود. جنس بستر ماسک‌ها بیشتر از پلاستیک شفاف و یا شیشه کوارتز بوده و با کمک جوهر (چاپ) و لایه‌نشانی فلزات طرح الگوی مورد نظر روی بستر ایجاد می‌شود. کار ماسک جلوگیری از عبور نور فرابنفش یا باریکه یونی و یا الکترونی و برخورد با ماده حساس به نور و یا تابش در مناطق تعیین شده بر اساس الگو است. استفاده از ماسک این امکان را به کاربر می‌دهد تا یک الگوی خاص را بارها بدون تغییر بر روی نمونه‌ها ایجاد کند که این موضوع در صنعت برای انبوه‌سازی و افزایش سرعت تولید بسیار مورد توجه است [۱۳]. البته برخی روش‌های لیتوگرافی مانند لیتوگرافی باریکه‌الکترونی و پرتو یونی وجود دارند که به ماسک احتیاجی ندارند. در این روش‌ها برای ایجاد طرح خاص

هرگونه آلاینده‌ایی نیاز است [۱].

بر این اساس روش‌های لیتوگرافی به انواع زیر تقسیم‌بندی می‌شوند: فتولیتوگرافی [۲]، لیتوگرافی باریکه‌الکترونی [۳]، لیتوگرافی پرتو یونی [۴]، لیتوگرافی چاپی در ابعاد نانو [۵] و لیتوگرافی با پرتو X [۶].

۲. روش‌ها، مواد و پارامترهای اصلی و مهم در

لیتوگرافی

۲.۱. مواد حساس به نور "فتورزیست"

اولین تلاش‌ها برای لیتوگرافی به قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی برمی‌گردد. افرادی مانند نیسه‌فور نیپس^۱ فرانسوی روی موادی همچون قیر سوریه^۲ که در برابر نور خورشید سخت‌تر می‌شد آزمایش‌هایی برای عکاسی انجام دادند. فتورزیست‌های امروزی که عمدتاً بر پایه پلیمر ساخته می‌شوند بعد از جنگ جهانی دوم و برای کاربردهای الکترونیکی به بازار معرفی شدند [۱].

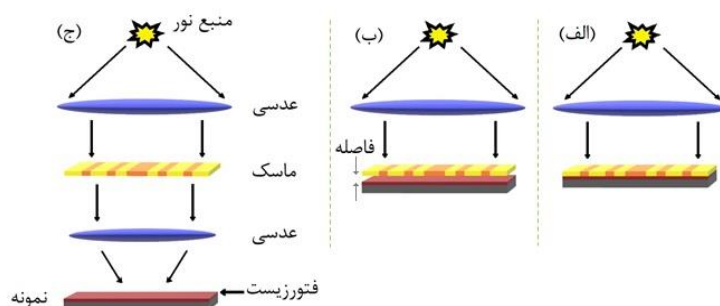
فتورزیست‌ها مواد حساس به نور با طول موج کوتاه هستند که پس از تابش نور، در آنها واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد. سپس در یک محلول که به‌عنوان محلول ظهور شناخته می‌شود قرار داده می‌شوند. میزان حل شونده‌ی فتورزیست در این محلول بسته به نوع پلیمر و مواد آلی به کار رفته کمتر و یا بیشتر از زمانی می‌شود که در معرض پرتوهای پر انرژی قرار نگرفته باشد [۷]. از این رو به فتورزیست‌هایی نظیر رزیست‌های سری S1800 که در محلول ظهور بعد از پرتودهی تجزیه شده و بیشتر قابلیت حل شدن دارند [۸]، فتورزیست مثبت و به فتورزیست‌هایی مانند SU-8 که پیوندهای جانبی در هنگام پرتودهی بین رشته‌های پلیمری برقرار می‌کنند و نامحلول می‌شوند [۹]، فتورزیست منفی می‌گویند [۱۰]. هر نوع از فوتورزیست‌ها ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. به عنوان مثال امروزه فتورزیست‌های S1800 در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به خاطر

۳. Polymethyl methacrylate

۴. Contrast

۱. Nicephore Niepce

۲. Bitumen of Judea or Syrian asphalt



شکل ۱. (الف) فتولیتوگرافی تماسی، (ب) فتولیتوگرافی مجاورتی و (ج) فتولیتوگرافی تصویری.

روی لایه رزیست (لایه‌ایی که با باریکه برهمکنش کرده و الگو در آن شکل می‌گیرد) از انحراف ذرات پراکنش با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌کنند که این امر انتقال الگو به سطح را بسیار کند و گران می‌کند و فقط برای کارهای ویژه کاربرد دارد [۱۴]. اگر بخواهیم از طول موج‌های کوتاه‌تر برای لیتوگرافی استفاده کنیم با مشکل جذب نور توسط مواد مواجه می‌شویم. تقریباً تمام مواد برای طول موج‌های بسیار کوتاه کدر و مات هستند. برای گریز از این مشکلات طرح روی آینه‌های چند لایه ساخته می‌شود. تداخل‌های سازنده و ویرانگر بین لایه‌ها را می‌توان طوری طراحی کرد که هنگام بازتاب نور فرابنفش از این نوع آینه، نور منعکس شده از مناطق تداخل‌های سازنده همان شکل الگوی مورد نظر باشد [۱۵].

دارد [۱ و ۱۷]:

$$R = \frac{k \lambda}{n \sin \theta / 2}, \quad (1)$$

۲.۴. روش‌های بهبود وضوح و کیفیت لبه‌های الگو در

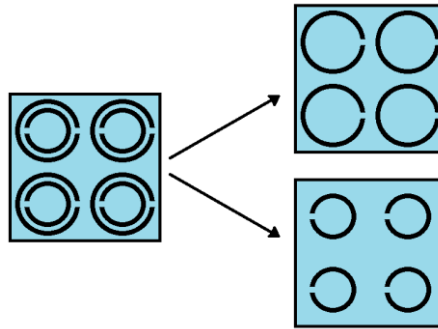
فتولیتوگرافی

کوچک‌سازی تصاویر با حفظ وضوح قابل قبول برای ساخت ریزپردازنده‌ها و همین‌طور قطعات اپتیکی در مقیاس کوچک امری ضروری است، اما پراش از لبه‌های ماسک الگوها و محو شدن مرز بین قسمت پرتو خورده و سایه روی فتورزیست، کیفیت لیتوگرافی را کاهش می‌دهد. محققان تلاش بسیاری به

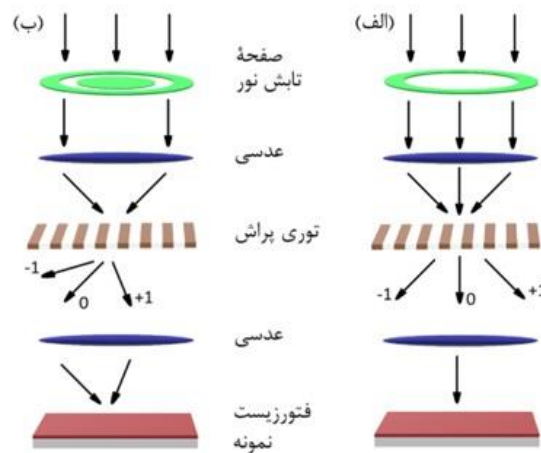
۲.۳. فتولیتوگرافی

ساده‌ترین و البته پرکاربردترین روش لیتوگرافی، فتولیتوگرافی است که در آن از نور آبی، فرابنفش نزدیک و فرابنفش دور برای تحت تأثیر قرار دادن فتورزیست و چاپ طرح استفاده می‌شود. برای این کار، نور پس از عبور از انواع فیلترها و عدسی‌ها به طور یکنواخت (جبهه موج تخت) روی ماسک تابیده می‌شود [۱۶].

مطابق شکل ۱ در چاپ تماسی و مجاورتی نور پس از عبور از ماسک روی فتورزیست می‌افتد و چنانچه در قسمت مربوط به فتورزیست گفته شد، تصویر الگو روی رزیست ایجاد می‌شود. فرق بین لیتوگرافی تماسی و مجاورتی در این است که برای اجتناب از آلودگی و خراش سطح فتورزیست به خاطر



شکل ۲. طرحواره‌ای از ماسک با تقسیم نقش‌های فشرده به دو قسمت مجزا روی دو ماسک مختلف.



شکل ۳. لیتوگرافی در (الف) روی محور نورپردازی و (ب) خارج از محور نورپردازی. بازنگاری از مرجع [۲۲].

کار برده‌اند تا مشکلات ناشی از پراش را به حداقل رسانده و گام‌هایی برای هرچه کوچک‌تر کردن طرح‌ها بردارند [۱۸]. روش‌های اصلی کاهش اثر پراش در لیتوگرافی عبارتند از:

۱- الگودهی چندگانه

مطابق شکل ۲ اگر اجزای طرح‌های روی ماسک بسیار نزدیک به هم باشد، پراش از لبه‌های نزدیک به هم وضوح تصاویر را از بین می‌برد. بنابراین یک طرح متراکم و پیچیده را به دو یا چند طرح جداگانه تقسیم کرده و برای هر یک ماسکی جدا ساخته می‌شود. این افزایش فاصله با وجود آن که کیفیت تصاویر را بهتر می‌کند ولی با دو یا چند برابر شدن تعداد ماسک‌ها و ایجاد هم‌ترازی دقیق بین آنها هزینه را افزایش داده و اجرای آن را سخت‌تر می‌کند [۱۹].

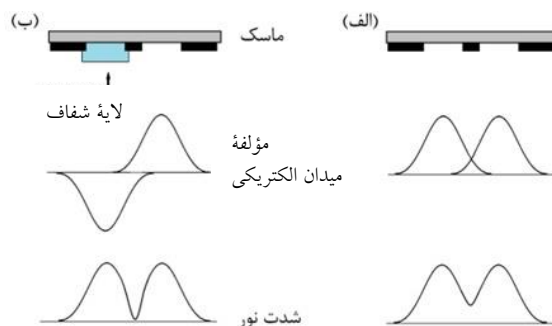
۲- تصحیح همجواری نوری^۱

در فتولیتوگرافی الگوی ساخته شده روی ماسک با تصویر ایجاد شده روی فتورزیست به صورت کامل مطابقت ندارد و پراش مخصوصاً از گوشه‌های تیز طرح‌ها سبب می‌شوند طرح مورد نظر با کیفیت بالا نقش نبندد. برای گریز از این مسئله، شکل الگوی روی ماسک را با پهن یا نازک کردن و یا با بلند و کوتاه کردن، و یا کشیدن چند ضلعی‌ها به‌خصوص در گوشه‌ها تغییر می‌دهند تا تصویر الگو کمترین خدشه را از پراش‌های ناخواسته به‌خود ببیند [۲۰ و ۲۱]:

۳- نورپردازی خارج از محور

مطابق شکل ۳ هنگامی که نور به صورت مستقیم روی یک

۱. Optical Proximity Correction



شکل ۴. (الف) ماسک معمولی و (ب) ماسک جابه‌جایی فازی. بازنگاری از مرجع [۲۴].

می‌شود. یعنی شدت نور تابیده شده به فتورزیست در محل بین تصویر دو شکاف، که با توان دوم میدان الکتریکی متناسب است، کاهش یافته و کمتر فتورزیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت با توجه به این که تفکیک پذیری در الگوهای ایجاد شده بهتر می‌شود، برای ساخت ماسک‌های لیتوگرافی دقیق‌تر، از این روش استفاده می‌کنند [۲۴].

۵- لیتوگرافی غوطه‌وری^۱

همانگونه که می‌دانیم وضوح تصویر با ضریب شکست بین عدسی و فتورزیست رابطه مستقیم دارد. به همین دلیل برای کاهش ابعاد تصاویر شکل گرفته روی نمونه به جای هوا، لیتوگرافی را در یک محیط با ضریب شکست بیشتر مانند آب خالص انجام می‌دهند. این روش به لیتوگرافی غوطه‌وری معروف است [۲۵].

۶- استفاده از طول موج کوتاه‌تر

در ابتدا، برای فتولیتوگرافی از نور فرابنفش لامپ جیوه استفاده می‌شد. با توسعه لیزرهای فرابنفش اگزایمر^۲ همچون KrF ($\lambda_{Kr} = 248\text{nm}$) و ArF ($\lambda_{Ar} = 193\text{nm}$) روند کوچک‌سازی تصاویر بهبود یافت. به علت این که طول موج‌های نور کمتر از 200nm توسط هوا شروع به جذب شدن می‌کنند باید از محیط خلأ استفاده کرد، بنابراین برای فتولیتوگرافی با ابعاد کوچک‌تر هزینه انجام کار افزایش پیدا می‌کند [۱]. پراش به

الگوی منظم مانند توری می‌افتد به‌خاطر طرح پراش ایجاد شده نمی‌توان با عدسی پرتوهای عبور کرده از ماسک را متمرکز کرد و تصویری کوچک‌سازی شده روی فتورزیست تولید نمی‌شود. یکی از راه‌حل‌های غلبه بر این مشکل کج کردن جهت زاویه نور فرودی روی ماسک است. با این کار به جای این که مرتبه صفرم طرح پراش روی نمونه بیفتد، مراتب بالاتر طرح پراش برای افزایش تفکیک پذیری به کار برده می‌شود. می‌توان با قرار دادن یک صفحه که نقش حلقوی، دو قطبی و یا چهار قطبی دارد کج کردن زاویه تابش بین منبع نور و ماسک را امکان پذیر کرد [۱۶، ۲۲ و ۲۳].

۴- ماسک جابه‌جایی فازی

اگر در یک ماسک نوری معمولی اجزای طرح، مانند دو شکافی، بسیار نزدیک به هم باشند، آنگاه مؤلفه الکتریکی دو پرتو عبوری مطابق با شکل ۴. الف از این دو شکاف با هم به گونه‌ای تداخل می‌کنند که شدت نور در مناطقی از سطح نمونه که نباید پرتو به آنجا بتابد، به اندازه محسوسی افزایش پیدا کرده و تصویر ایجاد شده روی سطح فتورزیست کیفیت خود را از دست می‌دهد. برای حل این مشکل مطابق شکل ۴. ب روی یکی از شکاف‌ها یک لایه شفاف گذاشته می‌شود به طوری که یک اختلاف فاز به اندازه 2π بین دو پرتو حاصل شود. با وجود این که شدت نور عبوری از دو شکاف تغییر چندانی نمی‌کند ولی مؤلفه الکتریکی نور عبوری از این دو شکاف دچار اختلاف فاز شده و تداخل ویرانگر ایجاد می‌کنند و شدت نور کمینه

۱. Immersion Lithography

۲. Excimer Lasers

استحکام کافی برای محافظت از زیر لایه در برابر عملیات بعدی مثل کاشت یون و یا زدایش را ندارند. بنابراین محققین به دنبال ساخت فتورزیست‌هایی بر پایه فلزات و ترکیبات معدنی پایدارتری هستند [۷، ۲۹، ۳۰ و ۳۱]. یکی از این نوع فتورزیست‌های ساخته شده، ترکیبی از نانو ذرات اکسید هافنیم (HfO_2) با مواد آلی است که در مقابل زدایش پلاسمایی چندین برابر مقاومت بیشتری نسبت به پلیمرها دارد [۳۲]. با توجه به رویکرد صنعت لیتوگرافی به هرچه کوچک‌تر کردن ابعاد طرح‌ها و جنبه‌های اقتصادی کار، پژوهش روی ساخت فتورزیست‌های جدید [۳۳ و ۳۴] همچنان ادامه دارد.

شاید تصور بر این باشد که با استفاده از طول موج‌های بسیار کوتاه‌تر پرتو X (طول موج‌های کمتر از یک نانومتر) به راحتی بتوان با غلبه بر محدودیت‌های فیزیکی ناشی از پراش، طرح‌هایی بسیار کوچک را ایجاد کرد. ولی مسئله اصلی محدودیت فیزیکی ابزار مورد استفاده است. در لیتوگرافی با پرتو X اغلب به کمک دستگاه سینکروترون [۳۵] امواج الکترومغناطیسی با طول موج‌های مختلف تولید و سپس طول موج خاص مورد نظر از بقیه طیف تفکیک می‌شود. سپس با تابش این پرتو X به ماسکی که به صورت مجاورتی روی فتورزیست قرار داده شده طرح‌های مورد نظر روی سطح نمونه شکل می‌گیرند. مشکل اصلی یکی ساخت ماسک با ابعاد نانومتری است که بسیار پرهزینه، سخت و گاهی دست نیافتنی است. مشکل دوم یونش فتورزیست بر اثر برخورد فوتون‌هایی با این انرژی زیاد است که موجب تولید الکترون‌هایی می‌شود که می‌توانند فتورزیست را در نواحی اطراف محل تابش پرتو X تحت تأثیر قرار دهند [۳۶-۳۸].

۷- لیتوگرافی تداخلی

اساس کار فتولیتوگرافی ایجاد نقش‌هایی با سایه و روشن نور روی فتورزیست است. برای طرح‌هایی منظم مانند توری پراش می‌توان به جای استفاده از ماسک از راهکارهای دیگری مانند تداخل نور استفاده کرد. ابتدا امواج الکترومغناطیس مخصوصاً نورهای با همدوسی زیاد مانند لیزر را به دو یا چند پرتو تقسیم

طور مؤثری با طول موج به کار رفته رابطه دارد و استفاده از طول موج‌های کوتاه مزیتی است که قابل صرف نظر کردن نیست و روش‌هایی که پیشتر گفته شد بیشتر روش‌های مکملی برای استفاده از طول موج کوتاه‌تر برای افزایش وضوح و کاهش ابعاد طرح‌ها هستند.

امروزه برای ساخت طرح‌هایی در ابعاد نانومقیاس (مانند ساخت ترانزیستورهای MOSFT به کار گرفته شده در تراشه‌های کامپیوتر) از نور فرابنفش بسیار دور^۱ با طول موج $13/5 \text{ nm}$ که توسط پلاسمای فلز قلع تولید می‌شود، بهره می‌گیرند. جذب نور توسط مواد برای چنین طول موج‌های کوتاهی استفاده از قطعات اپتیکی متعارف مانند عدسی را غیر ممکن کرده و در نتیجه آینه‌ها و فیلترهای نوری بلورهای فوتونیک جایگزین آنها شده‌اند [۲۶ و ۲۷]. همچنین طول موج‌های کوتاه‌تر در حدود 6 nm نیز با توجه به امکانات و ابزار موجود برای بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۸]. هم‌زمان با افزایش انرژی فوتون‌های مورد استفاده و کاهش بازده دستگاه‌های تولید کننده نور برای چنین طول موج‌هایی، توسعه فتورزیست‌ها و چند برابر کردن بهره‌وری آنها ضروری به نظر می‌رسد. در ابتدا رزیست‌های تقویت شده شیمیایی^۲ ساخته شدند. اساس عملکرد آنها بدین گونه است که در اثر برهمکنش نور با یک مولکول ناپایدار مانند تری فنیل سولفونیوم هگزا فلئوئورو آنتیمونات^۳ و سپس بازپخت فتورزیست، اسیدی به صورت کاتالیست (اسید فلئوئورو آنتیمونیک^۴) آزاد می‌شود که این اسید در مرحله بعدی باعث تجزیه نوعی پلیمر همانند پلی(ترت- بوتوکسی کربونیل اکسی استایرین)^۵ موجود در فتورزیست شده که نتیجه آن نیز افزایش مقدار آب‌دوستی و انحلال مکان‌های پرتو خورده فتورزیست در محلول‌های قطبی است. با این وجود، فتورزیست‌های ساخته شده بر پایه پلیمر مخصوصاً با طرح‌هایی در ابعاد بسیار کوچک،

۱. Extreme ultraviolet lithography

۲. Chemically amplified resists (CAR)

۳. Triphenylsulfonium hexafluoroantimonate

۴. Fluoroantimonic acid (HSbF₆)

۵. Poly(tert- butoxycarbonyl oxy styrene)

الکترونی و یونی با توجه به طول موج دوبروی بسیار کوچک آنها مشکل پراش نور را از بین می‌برد و می‌توان خطوطی حتی با اندازه‌هایی کوچک‌تر از 10° نانومتر در رزیت ایجاد کرد. این باریکه‌ها با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی کنترل شده و روی سطح رزیت فرود می‌آیند. علیرغم این که می‌توان با این ذرات پرانرژی طرح‌های نانومتری الگودهی کرد ولی برخورد این باریکه‌ها به سطح، الکترون‌های ثانویه و طول موج‌های کوتاه نور تولید می‌کند که خود این محصولات برهمکنش، توانایی اثر گذاری در محوطه اطراف محل برخورد باریکه روی رزیت را دارند. بنابراین نمی‌توان کوچک‌سازی را به صورت نامحدود ادامه داد. از مشکلات دیگر این روش‌ها، الگودهی با سرعت پایین آنها است که موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود [۱۲، ۴۵ و ۴۶].

از طرفی به خاطر برخی مزایای استفاده از باریکه‌های یونی و الکترونی در زمینه نانو تکنولوژی [۴۷ و ۴۸] و نیز به کارگیری آنها در زمینه‌های مرتبط دیگر با لیتوگرافی مانند تصویر برداری از ساختارهای ریز [۴۹ و ۵۰]، کاشت یون [۵۱] و ... همواره لیتوگرافی با ذرات پر انرژی مد نظر محققین بوده است [۵۲]. اما چالش اصلی بیشتر روی ساخت دستگاه‌های دقیق‌تر و نحوه کنترل بهتر این باریکه‌ها است. روش‌های مختلفی برای این کار ابداع شده است. به عنوان مثال یکی از روش‌های ساخت دستگاه لیتوگرافی با باریکه الکترونی، تغییر سیستم میکروسکوپ‌های الکترونی است تا به جای تصویر برداری از سطح با الکترون‌ها از آنها برای بمباران هدفمند سطح ماده رزیت استفاده شود [۵۳]. تقریباً به همین روش، یا از یون‌های سبک با انرژی زیاد (مانند پروتون‌ها) برای پوشش و بمباران نقطه‌ای رزیت و ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی در آن استفاده کرده‌اند و یا از یون‌های سنگین برای کندوپاش موضعی سطح بهره برده‌اند. حتی می‌توان مانند فتولیتوگرافی تصویری، محل برخورد یون‌ها روی سطح را بعد از عبور از یک ماسک الگودهی کرد [۵۴].

روش دیگری که به ذرات پرانرژی نیاز ندارد لیتوگرافی نانو- چاپ هست. در این روش یک قالب که رویش الگوهای

کرده و سپس روی فتورزستی که در مکان مناسب قرار داده شده انداخته و این پرتوها را دوباره ترکیب می‌کنند. با این روش می‌توان با کمک چند پرتو و تغییر جهت نور پردازی الگوهای منظم متنوعی را ساخت. از مزایای این روش ساخت نقش‌هایی در اندازه‌های طول موج نور (چند صد نانومتری) با قطعات اپتیکی رایج در آزمایشگاه‌های اپتیکی و بدون استفاده از ماسک است که این امر موجب شده هزینه لیتوگرافی در این روش با توجه به ابعاد طرح‌های تهیه شده بسیار کمتر باشد [۳۹]. در واقع توری‌های پراش عبوری که گفته می‌شود از طریق تمام نگاری^۱ ساخته می‌شوند به نوعی از طریق لیتوگرافی تداخلی به دست آمده‌اند.

روش‌های گوناگونی برای تقسیم پرتوهای نور لیزر به منظور ساخت طرح‌های تداخلی حتی تا اندازه‌هایی برابر با نصف طول موج وجود دارند [۴۰]. استفاده از آینه لوید که با تابش هم زمان نور به سطح فتورزیت و نیز یک آینه که با انعکاس نور از آن بر سطح فتورزیت نقش تداخلی روی سطح آن ایجاد می‌شود [۴۱]، به کار بردن منشورهای چند وجهی برای شکست نور لیزر فرودی و تداخل آنها [۴۲] و یا برهم نهی پرتوهای پراشیده شده (مرتبه اول و حتی مراتب بالاتر) از دو توری پراش با هم [۴۳] از جمله روش‌های متعارف جهت تداخل نور در سطح فتورزیت هستند. در صورتی که سطح نمونه نسبت به نور فرودی بازتاب کننده باشد باید قبل از لایه نشانی فتورزیت یک ماده ضد بازتاب بر سطح نمونه لایه نشانی شود تا از تداخل‌های نامطلوب نورهای بازتابیده از سطح با نورهای فرودی و کاهش کیفیت طرح‌ها جلوگیری شود [۴۴].

۸- دیگر روش‌های لیتوگرافی

با وجود آن که از مزایای لیتوگرافی نوری مانند تولید انبوه و توان عملیاتی زیاد با دقت مناسب نمی‌توان گذشت، ولی مشکل پراش نور محدودیت بزرگی است که مانع از کوچک‌سازی طرح‌ها در ابعاد نانومتری می‌شود. استفاده از باریکه‌های

طرح‌هایی روی سطح دو بعدی رزیست‌ها نیست و با لیتوگرافی سه بعدی می‌توان روی یک زیر لایه ساخته شده از فتورزیست‌های ضخیم، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS)^۶ ساخت [۶۴]. از روش‌های رایج برای لیتوگرافی سه بعدی، لیتوگرافی در مقیاس خاکستری است. در این روش آن مناطقی از فتورزیست مطابق با طرح سه بعدی دلخواه که باید بیشتر در محلول ظهور حل شوند، باید نوردهی بیشتری بشوند. برای این کار ماسک را به صورت موضعی نیمه شفاف طراحی می‌کنند. یعنی معادل با آن مناطقی از فتورزیست که باید کمتر در محلول ظهور حل شود، روی ماسک نیز آن منطقه تیره‌تر یا به اصطلاح خاکستری‌تر از بقیه نواحی ماسک ساخته می‌شود تا نور کمتری از آن قسمت عبور کند. بنابراین با الگودهی به مقدار شدت نور عبوری از طریق ماسک، شکل سه بعدی با پستی و بلندی‌های مورد نظر در فتورزیست ایجاد می‌شود [۶۵]. یکی دیگر از راه‌های رسیدن به این منظور و ساخت اشکال سه بعدی با ابعاد زیر میکرون، بهره‌گیری از روش لیتوگرافی لیزری مستقیم است. این روش اغلب بر پایه فرایند جذب چند فوتونی توسط فتورزیست استوار است. برای این کار از یک لیزر تپی با طول موج بلند استفاده می‌شود که توسط رزیست جذب نمی‌شود. تمرکز نور لیزر در یک نقطه داخل فتورزیست سبب جذب چند فوتون در یک زمان واحد توسط آن ناحیه کوچک از فتورزیست شده و فعل و انفعالات شیمیایی موضعی رخ می‌دهد که با تغییر مکان محل تمرکز نور لیزر درون فتورزیست (بعد از قرار دادن آن در محلول ظهور) طرح‌های سه بعدی کوچک الگودهی شده پدیدار می‌شوند [۶۶ و ۶۷].

از دهه ۶۰ میلادی به طور پیوسته فناوری لیتوگرافی گسترش و بهبود یافته و در زمینه ساخت ریز پردازنده‌های کوچک و ترانزیستورهایی با ابعاد کوچک‌تر روی تراشه‌ها تلاش‌های زیادی شده است. بر اساس قانون مشهور مور^۷ که نخستین بار گوردون مور، از بنیانگذاران شرکت اینتل، در سال

دلخواه حتی در ابعاد نانومتری نقش بسته مانند مهر روی رزیست فشرده می‌شود. این نوع رزیست‌ها یا ترموپلاستیک هستند و با حرارت نرم می‌شوند و بعد از این که قالب رویشان قرار گرفت و سرد شد، قالب جدا شده و طرح روی رزیست نقش می‌بندد. در روشی دیگر ماده لیتوگرافی پلیمری حساس به نور فرابنفش است که پس از گذاشتن قالب شفاف روی آن و تابش نور UV، پلیمر نور خورده سفت شده و الگو ساخته می‌شود [۵، ۵۵ و ۵۶].

در لیتوگرافی نرم نیز همانند روش قبلی عمل می‌کنند، ولی به جای این که از قالب سخت استفاده شود، ابتدا الاستومرهایی^۱ مثل پلی دی متیل سیلوکسان^۲ را برای شکل‌گیری روی قالب اصلی می‌ریزند و بعد از سفت شدن این ماده با کمک حرارت، از این قالب نرم برای انجام مراحل بعدی استفاده می‌کنند [۵۷].

لیتوگرافی تکنیک‌های گسترده‌ای را تحت پوشش قرار می‌دهد و محدود به چند روش نیست و می‌توان به لیتوگرافی مغناطیسی [۵۸]، لیتوگرافی پروب روبشی^۳ [۵۹ و ۶۰]، لیتوگرافی با کمک نانو گره‌های کلونیدی خود سامان‌دهی شده [۶۱] و غیره اشاره کرد. همچنین امروزه در کارهای جدید پژوهشی سعی می‌شود از فراسطح‌ها^۴ به عنوان لنز برای انتقال طرح‌ها در ابعاد نانومتری [۶۲] و نیز از ویژگی پلاریتون-پلاسمون سطحی^۵ برای الگودهی به فتورزیست [۶۳] استفاده شود. اکثر این روش‌ها به دلیل مشکلاتی مخصوصاً به خاطر توان انبوه‌سازی کم با وجود برخی مزایای ویژه، تنها کاربردهایی خاصی دارند و یا در آزمایشگاه‌های پژوهشی برای بهبود و کاهش مشکلات در مرحله تحقیق و پژوهش هستند.

۹- لیتوگرافی سه بعدی

لازم به یادآوری است که لیتوگرافی منحصر به ساخت

۱. Elastomer

۲. Polydimethylsiloxane

۳. Scanning probe lithography

۴. Meta-Surface

۵. Surface plasmon polariton

۶. Micro-Electro-Mechanical Systems

۷. Moore's Law

نانوذرات یونی نقره بود [۷۶ و ۷۵]. تمیزکاری سطح نمونه را می‌توان با یکی از روش‌های متداول موجود مانند استفاده از محلول‌های شیمیایی همچون اسیدها، سود سوزآور، الکل، استون و آب مقطر به همراه به کارگیری دستگاه تمیزکاری سطوح با کمک فراصوت انجام داد. در برخی موارد برای بهتر چسبیدن فوتورزیست به زیر لایه اقدامات بیشتری مانند استفاده از مواد شیمیایی خاص باید مورد توجه قرار گیرند [۴۵].

در مرحله دوم روی سطح تمیز شده یک لایه نازک از نیکل یا کروم با روش کندوپاش لایه‌نشانی کردیم. روش کندوپاش به دلیل این که پیوند محکمی بین اتم‌های لایه و زیرلایه برقرار می‌کند به روش تبخیر حرارتی و روش‌های شیمیایی لایه نشانی ارجحیت دارد [۷۷]. ما برای لیتوگرافی ابتدا روی نمونه‌ای که روی دستگاه لایه‌نشانی با چرخش چسبانده شده بود یک قطره فوتورزیست مثبت S1813 ریخته و سپس به مدت ۳۰ ثانیه با دور حدود ۱۵۰۰ rpm تا ۳۰۰۰ rpm چرخاندیم تا یک لایه نازک یکنواخت از فوتورزیست روی نمونه ایجاد شود. زمان، سرعت چرخش و دمای محیط روی ضخامت لایه نازک تأثیر مستقیم دارند. برای کارهای با دقت نانومتری ضخامت فوتورزیست باید کم باشد تا دقت ساخت الگوها افزایش یابد. برای هر فوتورزیست که توسط کارخانه ساخته شده است جدول‌های داده مبنی بر رابطه بین سرعت چرخاندن نمونه با ضخامت لایه مورد نظر توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود. برای کار ما، ضخامت چند میکرونی فوتورزیست کافی بود [۱۶].

برای خشک شدن فوتورزیست، نمونه‌ها باید به مدت حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه در درون کوره الکتريکی با دمای ۱۱۰°C تا ۱۱۵°C قرار بگیرند. این کار باعث می‌شود حلال فوتورزیست تبخیر شود. البته روش استفاده از صفحه داغ به خاطر صرفه‌جویی در زمان و کنترل بهتر گرادیان دما نیز می‌تواند به کار رود. استفاده از اتاق تمیز و نیز پوشاندن نمونه برای جلوگیری از تابش نور قبل از مرحله پرتودهی کمک بسیاری در نگهداری کیفیت مطلوب سطح فوتورزیست تا مرحله نهایی کار می‌کند. مطابق شکل ۵ ماسک ساخته شده روی لایه فوتورزیست

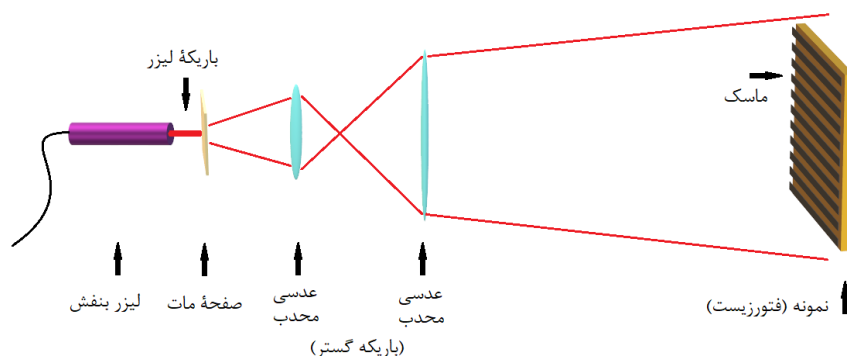
۱۹۶۵ آن را ارائه کرد، تعداد ترانزیستورهای روی یک تراشه با مساحت ثابت، هر ۲ سال به طور تقریبی دو برابر می‌شود [۶۸]. لیتوگرافی یکی از روش‌های اصلی ساخت این پردازنده‌های مینیاتوری است. امروزه برای تولید انبوه مدارهای مجتمع الکتريکی فرایند فتولیتوگرافی به‌ویژه با طول موج بسیار کوتاه ۱۳/۵ nm اصلی‌ترین روش محسوب می‌شود. با این روش طرح‌هایی با ابعادی کمتر از ۱۰ nm را می‌توان ساخت [۶۹]. از فتولیتوگرافی تداخلی علاوه بر ساخت توری‌های پراش [۷۰] برای ساخت سطوح ضد بازتاب [۷۱] استفاده می‌کنند. از لیتوگرافی با باریکه الکترونی برای ساخت اتصالات بسیار کوچک تونل‌زنی مورد استفاده در ترانزیستورهای تونل‌زنی تک الکترونی بهره می‌برند [۷۲]. الگودهی روی گرافن توسط لیتوگرافی با باریکه یونی جهت تولید حسگرهای نانومتری [۷۳] انجام می‌شود و برای ساخت آنتن‌هایی با اندازه‌های مینیاتوری از لیتوگرافی پرتو X [۷۴] کمک گرفته می‌شود.

۳. بهینه‌سازی فتولیتوگرافی روی یک بستر شیشه‌ای

در این بخش از مقاله به معرفی روشی که برای بهینه‌سازی ساخت ماسک لیتوگرافی مورد استفاده در ساخت المان‌های فازی اپتیکی در شیشه‌های تبادل یون شده با کمک باریکه یون هلیوم می‌پردازیم که در آزمایشگاه پژوهشی مواد فوتونیک و آزمایشگاه پژوهشی شتاب دهنده باریکه یونی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران انجام شده است. جزئیات ارائه شده در این بخش می‌تواند راهنمای خوبی برای کسانی باشد که می‌خواهند برای کار پژوهشی‌شان در آزمایشگاه خود لیتوگرافی کرده و تجربه کمی در این خصوص دارند.

مهم‌ترین و اولین کاری که باید در لیتوگرافی با دقت و حساسیت بالا انجام شود تمیز کردن زیر لایه‌ها و تمام وسایلی است که قرار است در این فرایند مورد استفاده قرار گیرند. باید دقت کنیم تا سطح نمونه‌ها از هر نوع آلودگی مانند روغن و گرد و غبار کاملاً پاک شود.

در این آزمایش، نمونه ما یک شیشه سودا-لایم آلایده به



شکل ۵. طرحواره‌ای از چیدمان مورد استفاده برای فتولیتوگرافی مجاورتی به کار گرفته شده.

مولار سود سوزآور (۰/۶ گرم پودر NaOH در ۱۰۰ میلی‌گرم آب مقطر) بود (البته استفاده از یک محلول قلیایی رقیق که حاوی یون‌های فلزی نباشد مانند هیدروکسید تترامیل آمونیوم^۱ در برخی از کاربردها نتیجه بهتری می‌دهد [۱۷۸]). نمونه باید خیلی سریع در داخل محلول ظهور قرار داده شود و پس از بیرون کشیدن از آن به طور کامل با آب مقطر شسته شود. این کار را باید دو تا سه بار انجام داد. اگر هنوز آثار فتورزیست در محل‌هایی که پرتو نور به آنها خورده باقی مانده باشد باید از محلول ظهور رقیق‌تر (۰/۳ گرم NaOH در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) استفاده کرد. در این حالت نیز باید نمونه را سریع در محلول فرو برد و سپس با آب مقطر شستشو داد. استفاده از محلول ظهور رقیق‌تر برای افزایش دقت لیتوگرافی بهتر است زیرا سرعت حل شدن فتورزیست کمتر است و بدین ترتیب می‌توان در زمان مناسب که الگو به خوبی قابل رویت شد آن را از محلول بیرون آورد، اما ترکیب غلیظ‌تر تمام فتورزیست را به یکباره حل می‌کند.

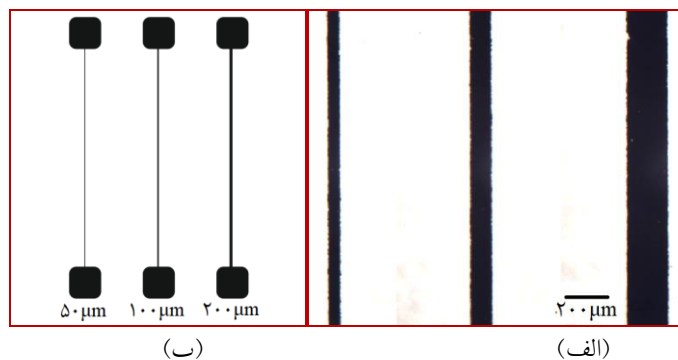
بعد از خشک کردن نمونه برای پخت مجدد، آن را به مدت ۱۰ دقیقه در کوره با دمای ۱۱۵ °C تا ۱۲۰ °C نگهداری کردیم تا نقش روی فتورزیست تثبیت شود. خشک شدن کامل فتورزیست باعث به وجود آمدن ترک‌هایی روی سطح می‌شود که این ترک‌ها و ناهمواری‌ها برای یک لیتوگرافی خوب ناخواسته است و باید روند خشک شدن را تا جای ممکن با دقت انجام داد تا ترک‌ها کاهش پیدا کنند. همچنین افزایش دما

قرار داده شد و سپس نور لیزر بنفش با طول موج ۴۰۵ nm و توان 100 mW به آن تابانده شد. این نوع از فتورزیست‌ها (S1813) علاوه بر نور فرابنفش به نورهای با طول موج‌های بلندتر (نور آبی) نیز حساس هستند. بنابراین می‌توان از لیزرهای دیودی با طول موج کوتاه (مانند لیزر آبی - بنفش با طول موج ۴۰۵ nm) استفاده کرد. البته به کاربردن لامپ‌هایی با نور آبی و یا فرابنفش و اغلب به همراه موازی‌ساز پرتوها امری رایج است. اما برای موازی‌سازی نور فرابنفش باید از عدسی‌های کوارتز که در ناحیه طیفی با طول موج فرابنفش جذب ندارند استفاده کرد که البته هزینه کار را بالا می‌برد و برای ما نیز در دسترس نبود.

برای ایجاد یک توزیع یکنواخت تابش نور لیزر روی نمونه، یک صفحه مات در مقابل لیزر می‌گذاریم تا یک چشمه گسترده ایجاد شود. سپس با کمک دو عدسی همگرا (شکل ۵) پهنای باریکه لیزر را افزایش می‌دهیم تا بتوان تمام سطح نمونه را پوشش داد (دایره‌ای به قطر ۳ تا ۳/۵ سانتی‌متر روی محل قرارگیری نمونه به مدت ۳ دقیقه - برای آزمایش ما). ما از روش لیتوگرافی تماسی استفاده کردیم. در روش فتولیتوگرافی تماسی موازی بودن پرتوها چندان اهمیت ندارد؛ زیرا ماسک روی فتورزیست قرار دارد و میزان پراکندگی نور قبل از رسیدن به سطح فتورزیست بسیار کم است. بعد از اتمام پرتو دهی نمونه که روکش فتورزیستی دارد آن را در محلول ظهور قرار دادیم.

محلول ظهور به کار رفته در این آزمایش حاوی ۰/۱۵

۱. Tetramethylammonium hydroxide



شکل ۶. (الف) الگوی ایجاد شده با نرم‌افزار corel و (ب) تصویر بزرگ شده ماسک لیتوگرافی شده از این سه خط با ضخامت‌های $50\ \mu\text{m}$ ، $100\ \mu\text{m}$ و $200\ \mu\text{m}$ روی شیشه با فلز کروم با میکروسکوپ.

حاصله در این کار بسیار مهم است تا سطح نمونه بیش از اندازه زدوده نشود. در غیر این صورت طرح از بین می‌رود. برای هر ماده‌ای یک یا چند حلال وجود دارد. به‌عنوان مثال محلول زدایش برای نیکل و کروم ترکیبی از یک اسید قوی با یک محلول نمکی است [۷۹]. در جدول ۱ مواد مورد استفاده در این آزمایش ارائه شده‌اند.

با تکرار آزمایش‌ها و سعی و خطایی که انجام دادیم متوجه شدیم که چسبندگی کروم به شیشه بسیار بهتر از نیکل است و بنابراین برای ساخت طرح‌های مورد نظر خود بر روی شیشه، به عنوان ماسک فلزی یک فیلم کروم با ضخامت $250\ \mu\text{m}$ میکرومتر لایه‌نشانی کردیم. به علت تشکیل یک لایه نازک از اکسید کروم روی سطح کروم، این فلز مقاومت بسیاری به اکسید شدن از خود نشان می‌دهد و به راحتی با اسیدها و بازها ترکیب نمی‌شود. این موضوع کار زدایش و پردازش نهایی ماسک فلزی را بسیار سخت می‌کند. به همین خاطر از یک اسید قوی مانند اسید نیتریک به علاوه یک اکسیدکننده قوی از ترکیبات سریم که تا حدود $40\ ^\circ\text{C}$ گرم شده بود برای زدایش استفاده کردیم. در مرحله آخر نمونه را در داخل استون قرار دادیم تا تمام فتورزیست باقیمانده از سطح پاک شود. پس از خشک شدن، نمونه آماده است.

در شکل ۶. ب تصویری از یک شیشه که روی آن لایه نازکی از فلز کروم مطابق با توضیحات داده به صورت ۳ خط با ضخامت‌های $50\ \mu\text{m}$ ، $100\ \mu\text{m}$ و $200\ \mu\text{m}$ الگودهی شده است

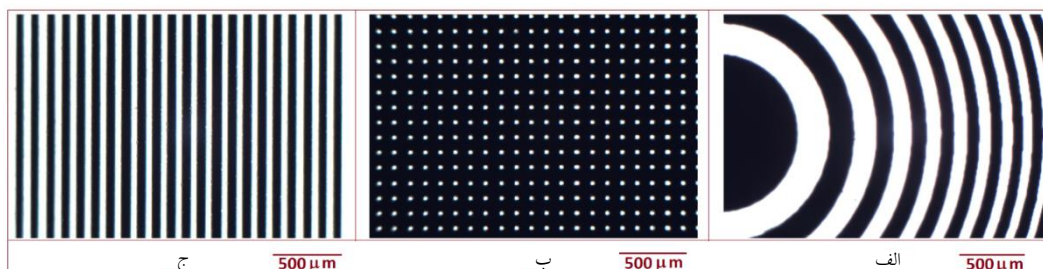
بیش از حد باعث تجزیه، ورقه ورقه شدن و چسبیدن فتورزیست به سطح نمونه شده (هم در قسمت پرتو خورده و هم در قسمتی که در سایه قرار داشته) که کار را برای جدا کردن فتورزیست از سطح و ایجاد یک الگوی مناسب با لبه‌های مشخص سخت می‌کند. از طرفی پخته شدن کم هم سبب می‌شود هنگام قرار دادن نمونه در محلول ظهور تمام فتورزیست حل شود.

ماسک مورد استفاده در کار ما یک لایه پلاستیکی شفاف بود که روی آن طرح‌های مورد نظر با چاپگر با کیفیت چاپ شده بودند (شکل ۶. الف). اندازه کوچک‌ترین طرح (پهنای یک خط) در نمونه ما $50\ \mu\text{m}$ میکرون بود. محدودیت عملکردی چاپگر مانع از آن شد که اندازه پهنای طرح‌ها کمتر از $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ میکرون شود. کاهش اندازه طرح‌ها باعث می‌شود کیفیت و صافی لبه‌های طرح کاهش پیدا کند.

بعد از این که الگو با فتورزیست روی لایه فلزی نقش بست، باید این طرح را روی لایه فلزی حکاکی کرد که به این کار در اصطلاح "زدایش" می‌گویند. این کار به دو روش زدایش خشک (با پلاسما) و مرطوب (با مواد شیمیایی) انجام پذیر است. در زدایش مرطوب از یک حلال معمولاً اسید برای زدودن زیرلایه استفاده می‌شود. نخست نمونه را در محلول زدایش مناسب، برای زدودن فلز، غوطه‌ور کردیم. سپس آن را از داخل محلول خارج و با آب مقطر شستیم. دقت و

جدول ۱. ترکیبات متداول برای حکاکی مرطوب لایه‌های نازک فلزات نیکل و کروم [۷۹].

نمونه	مواد حکاکی
نیکل	HCl, CuSO ₄ , H ₂ O
کروم	HNO ₃ , Ce(NH ₄) ₄ (NO ₃) ₆ , H ₂ O



شکل ۷. (الف) الگوی توری منطق فرنل، (ب) شبکه نقطه‌ای و (ج) توری رانکی 10 lines/mm.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله بدین وسیله از زحمات و مشورت‌های ارزشمند همکاران گرامی آقای دکتر مسعود مهجور شفیعی از آزمایشگاه پژوهشی شتاب‌دهنده باریکه‌های یونی، آقای دکتر یاسر عبدی از آزمایشگاه پژوهشی نانوفیزیک و دانشجویان آزمایشگاه‌های شتاب‌دهنده و لیتوگرافی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران نهایت سپاس‌گزاری و قدردانی را می‌کنند.

مشاهده می‌شود. الگوی ۳ خط ابتدا در نرم‌افزار Corel (مطابق با شکل ۶. الف) کشیده شده و سپس با چاپگر الگو روی ورق پلاستیکی به صورت ماسک فتولیتوگرافی ایجاد شده است. در شکل ۶. ج بزرگ‌نمایی از این سه خط با ضخامت‌های مختلف دیده می‌شود که زبری در حدود چند میکرون در لبه‌های طرح‌ها دارند.

در شکل ۷، ماسک‌های لیتوگرافی شده با روش شرح داده شده که برای ساخت المان‌های فازی اپتیکی به کار بردیم نمایش داده شده‌اند.

مراجع

1. M J Madou "Fundamentals of microfabrication and nanotechnology. Manufacturing techniques for microfabrication and nanotechnology". 3rd Edition, Vol. 2. CRC Press (2011).
2. K T Tran and T D Nguyen, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* **2**, 1 (2017) 1.
3. J Vinje, K S Beckwith, and P Sikorski, *Journal of Microelectromechanical Systems* **29**, 2 (2020) 160.
4. J E E Baglin, *Applied Surface Science* **258**, 9 (2012) 4103.
5. S Y Chou, P R Krauss, and P J Renstrom, *Science* **272**, 5258 (1996) 85.
6. M C Peckerar and J R Maldonado, *Proceedings of the IEEE* **81**, 9 (1993) 1249.
7. C Luo, et al., *RSC Advances* **10**, 14 (2020) 8385.
8. S Trivedi and H B Nemade, *Sensors and Actuators B: Chemical* **273** (2018) 288.
9. A Del campo and C Greiner **17**, 6 (2007) R81.
10. J M Shaw, et al., *IBM journal of Research and Development* **41**, 1-2 (1997) 81.
11. D J Carbaugh, et al., *Journal of Vacuum Science and Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena* **35**, 4 (2017) 041602.
12. S M Sze and M K Lee "Semiconductor devices: physics and technology", 3rd Edition. John Wiley and sons (2012).
13. D Qin, et al., *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **16**, 1 (1998) 98.
14. V Iberi, et al., *Scientific reports* **5**, 1 (2015) 1.
15. M Saedi, et al., *Applied Surface Science* **507** (2020) 144951.

16. C A Mack "Field guide to optical lithography", Vol 6 Bellingham, WA: SPIE Press (2006).
17. T Weichelt, *et al.*, *Optics Express* **22**, 13 (2014) 16310.
18. A N Boto, *et al.*, *Physical Review Letters* **85**,13 (2000) 2733.
19. A B Kahng, *et al.*, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* **29**, 6 (2010) 939.
20. P Yu, S X Shi, and D Z Pan, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* **6**, 3 (2007) 031004.
21. A Gu, and A Zakhor, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* **21**, 2 (2008) 263.
22. A D Beyer, *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **25**, 3 (2014) 1.
23. V Mico, Z Zalevsky, and J García, *Optics communications* **276**, 2 (2007) 209.
24. M D Levenson, N S Viswanathan, and R A Simpson, *IEEE Transactions on electron devices* **29**, 12 (1982) 1828.
25. K G Winkels, *et al.*, *The European Physical Journal Special Topics*, **192**(1) (2011) 195.
26. M Lysaght, *et al.*, *Physical Review A* **72**, 1 (2005) 014502.
27. J Suzuki, *et al.*, *Journal of Photopolymer Science and Technology* **30**, 6 (2017) 671.
28. N Mojarad, J Gobrecht, and Y Ekinici, *Scientific reports* **5**, 1 (2015) 1.
29. H Ito and C G Willson, *Polymer Engineering and Science* **23**, 18 (1983) 1012.
30. C T Lee, "Development and advanced characterization of novel chemically amplified resists for next-generation lithography", Thesis for the Ph.D. Degree, Georgia Institute of Technology, School of Chemical and Biomolecular Engineering (2008).
31. E Reichmanis, *et al.*, *Polymer International* **48**, 10 (1999) 1053.
32. M Krysak, *et al.*, *In Advances in Resist Materials and Processing Technology XXVIII* **7972** (2011) 79721C.
33. S Ghosh, *et al.*, *RSC advances* **6**, 78 (2016) 74462.
34. D De Simone, Y Vesters, and G Vandenberghe, *Advanced Optical Technologies* **6**, 3-4 (2017) 163
35. H Ghasem, F Saeidi, and E Ahmadi, *Journal of Instrumentation* **8**, 02 (2013) 02023.
36. A Heuberger, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena* **6**, 1 (1988) 107.
37. J M Park, *et al.*, *Materials* **12**, 13 (2019) 2056.
38. K Kise, *et al.*, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **22**, 1 (2004) 126.
39. M Farhoud, *et al.*, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **17**, 6 (1999) 3182.
40. Y Shimizu, *Nanomanufacturing and Metrology* **4** (2021) 3.
41. D Weber, *et al.*, *Applied Physics A* **125**, 5 (2019) 1.
42. R Sidharthan, F Chollet, and V M Murukeshan, *Laser Physics* **19**, 3 (2009) 505.
43. E Buitrago, *et al.*, *Microelectronic Engineering* **155** (2016) 44.
44. E M Park, *et al.*, *Thin Solid Films* **519**, 13 (2011) 4220.
45. A E Grigorescu and C W Hagen, *Nanotechnology* **20**, 29 (2009) 292001.
46. C Vieu, *et al.*, *Applied surface science* **164**, 1-4 (2000) 111.
47. S Reyntjens and R Puers, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **11**, 4 (2001) 287.
48. J Zhang, C Con, and B Cui, *ACS Nano* **8**, 4 (2014) 3483.
49. P R Munroe, *Materials Characterization* **60**, 1 (2009) 2.
50. C A Volkert, and A M Minor, *MRS Bulletin* **32**, 5 (2007) 389.
51. M I Current, *Materials Science in Semiconductor Processing* **62** (2017) 13.
52. M Horák, *et al.*, *Scientific Reports* **8**, 1 (2018) 1.
53. O Dial, C C Cheng, and A Scherer, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **16**, 6 (1998) 3887.
54. F Watt, *et al.*, *International Journal of Nanoscience* **4**, 03 (2005) 269.
55. S Chou, Y P R Krauss, and P J Renstrom, *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* **14**, 16 (1996) 4129.
56. U Plachetka, *et al.*, *Microelectronic Engineering* **73** (2004) 167.
57. Y Xia and G M Whitesides, *Annual Review of Materials Science* **28**, 1 (1998) 153.
58. T A Kumar, *et al.*, *Nano letters* **10**, 6 (2010) 2262.
59. S T Howell, *et al.*, *Microsystems and Nanoengineering* **6**, 1 (2020) 1.
60. Y K Ryu and R Garcia, *Nanotechnology* **28**(14) (2017) 142003
61. Y Wang, *et al.*, *Nano Today* **22** (2018) 36.
62. C Wang, *et al.*, *Micromachines* **7**, 7 (2016) 118.
63. X Niu, *et al.*, *Microelectronic engineering* **87**, 5-8 (2010) 1168.
64. Y K Yoon, J H Park, and M G Allen, *Journal of microelectromechanical systems* **15**, 5 (2006) 1121.
65. C M Waits, *et al.*, *Sensors and Actuators A: Physical* **119**, 1 (2005) 245.

66. I Bernardeschi, M Ilyas, and L Beccai, *Advanced Intelligent Systems* **3** (2021) 2100051.
67. G Seniutinas, *et al.*, *Microelectronic Engineering* **191** (2018) 25
68. R R Schaller, *IEEE Spectrum* **34**, 6 (1997) 52.
69. T S Kulmala, *et al.*, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* **14**, 3 (2015) 033507.
70. T Tamulevičius, *et al.*, *Experimental Techniques* **32**, 4 (2008) 23.
71. C J Ting, C F Chen, and C P Chou, *Optics Communications* **282**, 3 (2009) 434.
72. Y Chen, *Microelectronic Engineering* **135** (2015) 57.
73. A N Abbas, *et al.*, *ACS nano* **8**, 2 (2014) 1538.
74. A Rashidian, *et al.*, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **20**, 2 (2010) 025026.
75. A Nahal, M Mahjour-Shafiei, and S R Hosseini, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **31** (2020) 5499.
76. A Nahal, S R Hosseini, and M Mahjour-Shafiei, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **32**, 18 (2021) 23349.
77. D M Mattox, "Film Formation, Adhesion, Surface Preparation, and Contamination Control, Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing", 2nd Edition, Noyes Publications, Westwood, New Jersey, USA (1998).
78. V I Egorkin, *et al.*, *Russian Microelectronics* **46**, 4 (2017) 272.
79. P Walker and W H Tarn, (Eds.), "CRC Handbook of Metal Etchants", CRC Press (1990).