

فصل: لیتوگرافی

بخش ۱: معرفی لیتوگرافی نوری و لیتوگرافی نرم

نویسنده: محمد فرهادپور

مقدمه

امروزه با رشد اکثر صنایع از جمله صنعت میکروالکترونیک، ابعاد اجزا در این سیستم‌ها و به خصوص در مدارهای میکروالکترونیک به طور مداوم در حال کوچک شدن است. از این رو صنعت، نیازمند استفاده از روش‌هایی جهت ساخت قطعات در ابعاد نانو است. امروزه تلاش‌های گسترده‌ای برای پیشرفت روش‌های ساخت نانو ساختارها صورت می‌گیرد. یکی از استراتژی‌های بالا به پایین در ساخت ابزار نانو، که از تکنیک لیتوگرافی (Lithography) متداول ایجاد شده است، به عنوان نانولیتوگرافی شناخته می‌شود. یادآوری می‌شود که روش ساخت بالا به پایین با کندن مولکول‌ها از سطح ماده صورت می‌گیرد و پایین به بالا با نشان دادن اتم‌ها و مولکول‌ها در کنار هم ساختار نانویی به وجود می‌آورد که روش لیتوگرافی همان طور که گفته شد جزو روش‌های بالا به پایین است.

۱- لیتوگرافی چیست؟

لیتوگرافی یک واژه یونانی است که از دو قسمت لیتوس (Lithos) به معنای سنگ و گرافی (Graphia) به معنای نوشتن و حکاکی کردن، تشکیل شده است. با ترجمه کلمه به کلمه، این واژه به صورت حکاکی بر روی سنگ معنی می‌شود. البته در صنایع الکترونیک به جای سنگ معمولاً یک صفحه سیلیکونی را تراش می‌دهند و به جای یک قطعه‌ی تیز برنده، از نور یا یک فرآیند مکانیکی برای حکاکی استفاده می‌شود. این روش شامل تشکیل یک طرح لیتوگرافی از یک الگو روی یک ماده الکترونیکی و انتقال آن طرح به ماده‌ای دیگر جهت تولید یک ابزار الکترونیکی یا نوری است.

۲- انواع روش‌های لیتوگرافی

روش‌های لیتوگرافی را می‌توان به شیوه‌های گوناگون دسته‌بندی کرد. البته در طول زمان با پیشرفت ابزارها و ظهور فناوری‌های جدید، این تکنیک به صورت روش‌های بسیار پیچیده و دقیق تحت عنوان نانولیتوگرافی، برای

معماری در ابعاد مولکولی و نانو توسعه داده شده‌اند؛ به طوری که در دهه‌های اخیر از این روش‌ها به طور وسیع برای ساخت مدارهای مجتمع، ابزارهای ذخیره اطلاعات، حسگرهای مینیاتوریزه شده، سیستم‌های میکروالکترومکانیک (MEMS) و نانوآلکترومکانیک (NEMS) تراشه‌های زیستی استفاده می‌شود.

روش‌های لیتوگرافی را به انواع مختلفی دسته‌بندی می‌کنند که چهار روش لیتوگرافی نوری، لیتوگرافی نرم، لیتوگرافی باریکه الکترونی و لیتوگرافی قلم آغشته بیشتر مورد استفاده هستند.

۱-۲- لیتوگرافی نوری:

لیتوگرافی نوری، فناوری‌ای است که امروزه برای ساخت پردازنده‌های رایانه و انواع مدارهای مجتمع به کار گرفته می‌شود. تولیدکنندگان مدارهای مجتمع در دنیا از این شیوه‌ی بسیار کارآمد برای تولید بیش از ۱۰ میلیارد ترانزیستور در هر ثانیه استفاده می‌کنند. ارزش تولیدات صنعتی با استفاده از تنها این یک فناوری، به بیش از ۱۴۰ میلیارد دلار در سال می‌رسد. این فناوری قابلیت ارتقا برای تولید ساختارهایی با ابعاد کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر را دارد. اما انجام این کار بسیار مشکل، گران و پردردسر است. برای پیدا کردن روش‌های جایگزین، محققان ساخت سیستم‌های نانومتری، در حال بررسی هزاران ایده و صدها روش هستند، تا شاید یکی از آنها جواب بدهد.

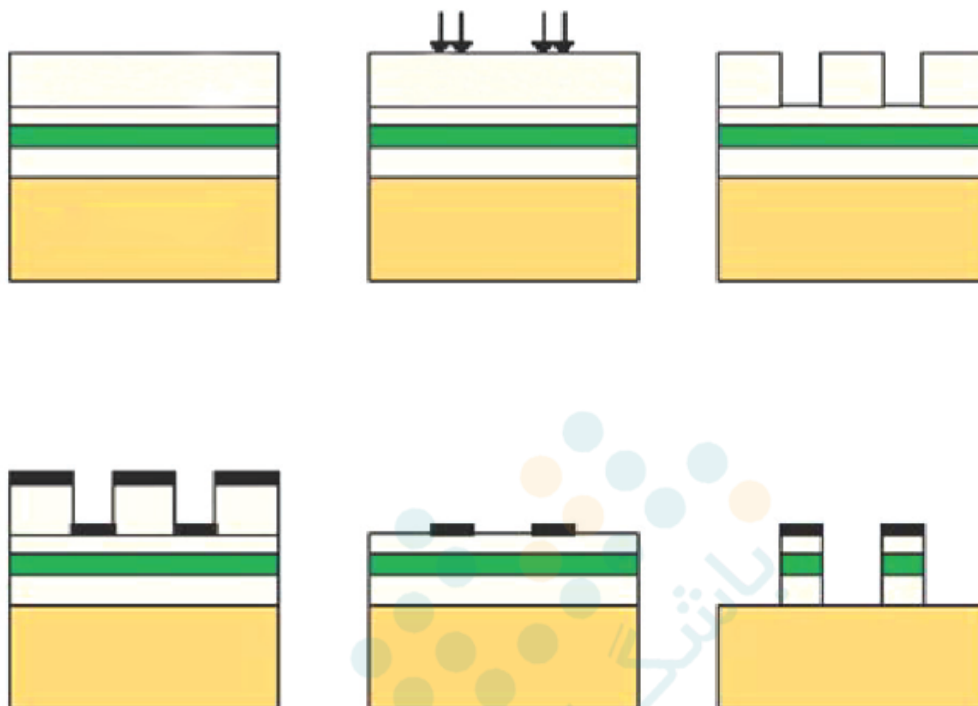
لیتوگرافی نوری در اصل تعمیم‌یافته‌ی عکاسی است. ابتدا چیزی شبیه نگاتیو عکاسی از شمای مدار مجتمع تهیه می‌شود. این نگاتیو که در اینجا «ماسک» نامیده می‌شود، برای تکثیر طرح روی یک ماده نیمه‌هادی‌ها به کار گرفته می‌شود. تهیه‌ی نگاتیو به سادگی عکاسی نیست، اما با داشتن آن می‌توان به راحتی هزاران نسخه تکثیر کرد.

روند کار به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: اول تهیه‌ی ماسک (که می‌تواند کند و هزینه‌بر باشد)، و دوم استفاده از ماسک برای تهیه‌ی نسخه‌های بعدی (که باید سریع و ارزان باشد).

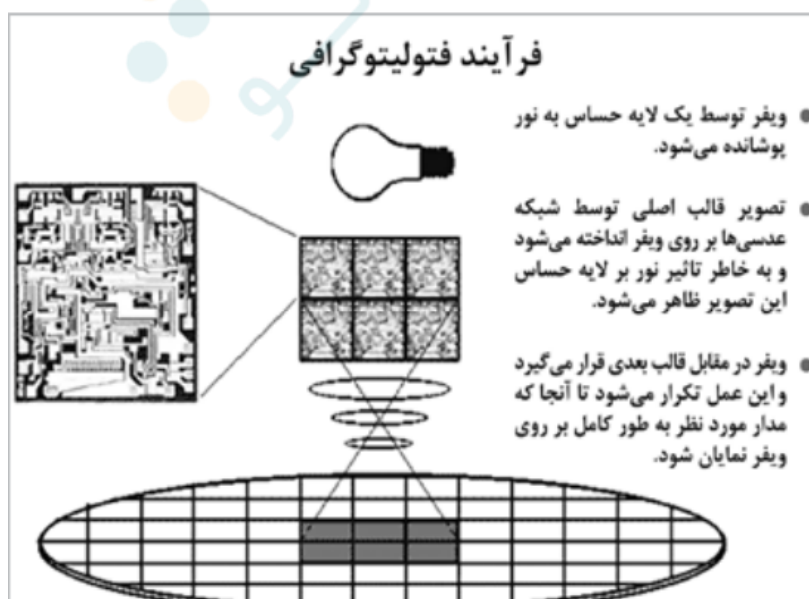
برای تولید ماسک یک قطعه‌ی رایانه‌ای، ابتدا شمای مدار در مقیاس به نسبت بزرگ طراحی می‌شود. سپس این طرح به صورت لایه‌ی نازکی از فلز (اغلب کروم) روی صفحه‌ی شفاف (اغلب شیشه یا سیلیکون) در می‌آید که در مجموع به آن «ویفر» گفته می‌شود.

سپس لیتوگرافی نوری، در فرآیندی شبیه آنچه در تاریکخانه‌ی عکاسی اتفاق می‌افتد، ابعاد طرح را کوچک می‌کند. برای این کار یک دسته پرتو نور (اغلب نور فرابنفش یک لامپ جیوه) از ماسک عبور می‌کند و با استفاده از یک عدسی، تصویری روی سطح سیلیکون تشکیل می‌دهد. روی سیلیکون با لایه‌ای از جنس پلیمرهای آلی

حساس به نور (فوتورزیست) پوشانده شده است. قسمت‌هایی که نور دیده‌اند در فرآیند تثبیت، حذف می‌شوند و طرحی معادل طرح اولیه روی سطح سیلیکون پدیدار می‌شود.



شکل ۱: مراحل فرآیند فتولیتوگرافی



شکل ۲: تصویر شماتیک از فرآیند فتولیتوگرافی

❖ محدودیت‌های لیتوگرافی نوری:

لیتوگرافی نوری یکی از روش‌های پرکاربرد در صنعت الکترونیک است، اما استفاده از این روش برای تولید نانوساختارها با محدودیت‌هایی همراه است. اول اینکه کوچک‌ترین طول موج فرابنفشی که در فرآیند تولید استفاده می‌شود ۲۵۰ نانومتر است. سعی در تهیه‌ی ساختارهای با ابعاد کم‌تر از این طول موج، مانند سعی در خواندن نوشته‌های بسیار ریز است. پدیده‌ی «پراش» باعث محو شدن نوشته‌ها می‌شود.

پدیده‌ی «پراش»:

اگر تا کنون پدیده‌ی پراش را ندیده‌اید کافی است از شکاف لابه‌لای انگشتان دستتان به یک لامپ مهتابی نگاه کنید. نوارهای تیره و روشنی که می‌بینید خاصیت موجی نور و پراشیده شدن آن را نشان می‌دهد. به طور کلی، در فیزیک به پخش شدن یا خم شدن موج یا ذرات هنگام مواجه شدن با یک مانع، پراش گفته می‌شود.

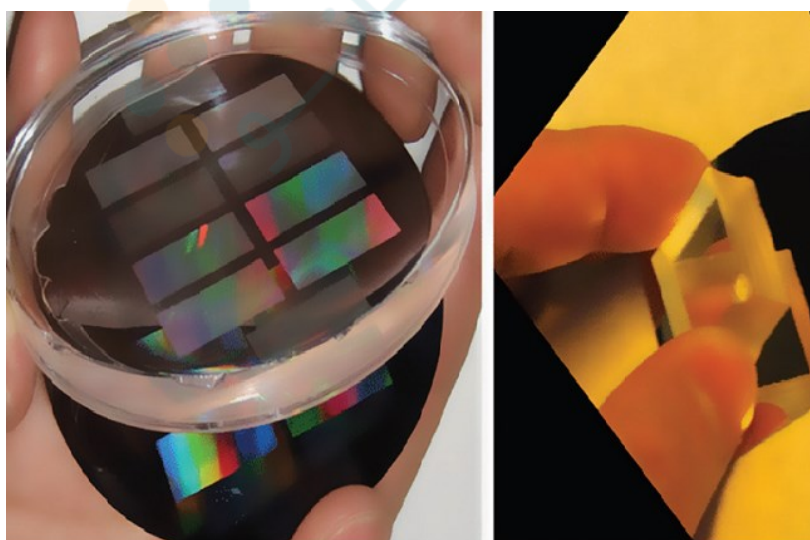
پیشرفت‌های تکنیکی مختلف، محدودیت‌های لیتوگرافی نوری را کمی عقب رانده‌اند. کوچک‌ترین ساختارهایی که تولید انبوه شده‌اند، ابعادی در حدود ۱۰۰ نانومتر دارند. با این حال، این ابعاد هنوز برای دستیابی به بسیاری خواص نانوساختارها به اندازه‌ی کافی کوچک نیستند.

محدودیت دوم هم پیامد محدودیت اول است. از آنجا که از نظر تکنیکی تولید این ساختارها با نور بسیار دشوار است، انجام این کار بسیار گران تمام می‌شود. ابزارهای لیتوگرافی که برای ساخت عناصری با ابعاد کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر به کار می‌روند هر کدام ۱۰ تا ۱۰۰ میلیون دلار – یعنی در حدود ۲۰ تا ۲۰۰ میلیارد تومان – قیمت دارند. صرف این هزینه شاید برای تولیدکنندگان منطقی نباشد، اما برای فیزیکدان‌ها، زیست‌شناسان، مهندسان مواد و شیمی‌دان‌ها که برای بررسی خواص سیستم‌های نانومتری به تولید ساختارهای با طراحی خودشان نیاز دارند، ضروری است.

در برخی موارد برای رفع این مشکل از پرتوی الکترونی یا اشعه‌ی ایکس با طول موج ۰/۱ تا ۱۰ نانومتر یا نور شدید فرابنفش با طول موج بین ۱۰ تا ۷۰ نانومتر استفاده می‌شود که بسیار پرهزینه و از نظر فنی دشوار است. بنابراین، دانشمندان برای ساخت نانوساختارها درصدد استفاده از روش‌های ساده‌تر و ارزان‌تر برآمدند. آنها به جای نور و الکترون از فرآیندهای مکانیکی مانند آنچه در زندگی روزمره با آنها سر و کار داریم مانند چاپ، مهر زدن، قالب‌سازی و شابلون استفاده کردند. این روش‌ها لیتوگرافی نرم نامیده می‌شوند.

این روش به دلیل استفاده از یک قالب پلیمری که طبیعتی نرم دارد و زود ذوب می‌شود، لیتوگرافی نرم خوانده می‌شود. برای تکثیر با لیتوگرافی نرم، ابتدا باید یک قالب یا مهر ایجاد کرد. معمول‌ترین روش برای این کار لیتوگرافی نوری روی یک سطح سیلیکونی است. این فرآیند یک الگوی اولیه با طرح‌های برجسته‌ی حساس به نور ایجاد می‌کند که از سطح سیلیکونی بیرون زده‌اند. سپس مایع پلیمری روی این سطح برجسته ریخته شده و به یک جامد نرم لاستیکی تبدیل می‌گردد. در نتیجه مهری پلیمری ساخته می‌شود که با الگوی اولیه برابری کامل دارد. شکل‌های روی مهر در حد چند نانومتر با الگوی اولیه اختلاف دارند. اگر چه ایجاد یک الگوی اولیه با نقوش ظریف برجسته پرهزینه است، با این حال تکثیر الگو روی مهرهای پلیمری ارزان و آسان است. مهر پلیمری می‌تواند برای ساخت نانو ساختارها مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از روش‌های لیتوگرافی نرم، روش چاپ با تماس میکرومتری است. مهر پلیمری به یک محلول موثر شامل مولکول‌های آلی به نام تیول (در نقش جوهر) آغشته می‌شود. سپس مهر به روی یک فیلم نازک طلا (در نقش کاغذ) که روی شیشه، سیلیکون یا صفحه پلیمری قرار گرفته، زده می‌شود. تیول با سطح طلا واکنش می‌دهد و فیلم کاملاً منظمی را ایجاد می‌کند که طرح مهر را دارد. به خاطر پخش شدن جوهر تیول بعد از تماس با سطح، دقت تک لایه نمی‌تواند به اندازه مهر پلیمری باشد. وقتی این روش به طور مستقیم استفاده شود می‌توان شکل‌هایی به کوچکی ۵۰ نانومتر ایجاد کرد.



شکل ۳: لیتوگرافی نرم

با روش‌های دیگری از لیتوگرافی نرم دانشمندان ساختارهای کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر را نیز تولید کرده‌اند. به طور کلی، روش‌های لیتوگرافی نرم نیاز به ابزار خاصی ندارند و در یک آزمایشگاه معمولی دستی نیز قابل انجام هستند. روش‌های لیتوگرافی نوری معمول باید در شرایط پاک در اتاق تمیز، عاری از گرد و غبار صورت گیرند. اگر تنها یک ذره‌ی کوچک روی الگوی اولیه بنشینند، یک نقطه‌ی ناخواسته روی تمامی طرح‌ها ایجاد می‌شود. در نتیجه ابزار ساخته شده و گاهی ابزارهای مرتبط با آن ممکن است از کار بیفتند. اما لیتوگرافی نرم این مشکل را ندارد، چون مهر پلیمری نرم است، اگر ذره‌ای غبار بین مهر و صفحه قرار گیرد، مهر روی ذره فشرده می‌شود و تماس کامل با سطح را حفظ می‌کند. بنابراین، غیر از مواردی که محتویات داخل قالب بمانند، طرح درست ایجاد خواهد شد.

در این بخش فرآیند لیتوگرافی و دو روش لیتوگرافی نوری و لیتوگرافی نرم توضیح داده شد، در بخش بعد لیتوگرافی لیتوگرافی پرتو الکترونی و اشعه ایکس (از انواع روش‌های لیتوگرافی نوری) و سپس لیتوگرافی باریکه الکترونی و در بخش ۳ لیتوگرافی قلم آغشته توضیح داده شده است.

منابع:

۱. کتاب مجموعه مقالات سایت باشگاه نانو
۲. کتاب نانو از نو
۳. کتاب مقدمه‌ای بر فناوری نانو ۱
۴. مقالات سایت آموزش ستاد نانو