

نویسندگان

مریم خسروی^{۱*}مینا محبی مراد^۲غلامرضا دهقانی^۳

*m2012.khosravi@gmail.com



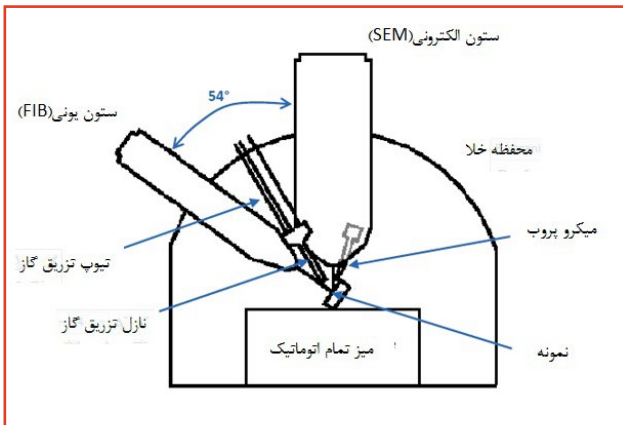
معرفی روش پرتو یونی متمرکز میکروسکوپ الکترونی روبشی

واژه‌های کلیدی

روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی، تفنگ الکترونی از منبع یون فلزی مایع، پرتو یونی، فرزکاری، رسوب‌گذاری، ماشین‌کاری.

چکیده

روش پرتو یونی متمرکز^۵، به‌عنوان یکی از قویترین تجهیزات، کاربردهای گسترده‌ای را در زمینه آماده‌سازی نمونه، بازرسی و پردازش تجهیزات و ماشین‌کاری در حوزه‌های مختلف نظیر نیمه هادی‌ها، فلزات، سرامیک، پلیمر و علوم زیستی داراست. از طرفی دیگر، میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از تجهیزات راهبردی به‌منظور پیشبرد، تحلیل و بررسی تحقیقات به خصوص در حوزه نانو است که با بررسی مورفولوژی، توپوگرافی، ساختارهای فازی و ترکیبات شیمیایی می‌تواند اطلاعات جامعی از انواع نمونه را ارائه دهد. امروزه به‌منظور بالا بردن کارایی، امکان بررسی سه بعدی ساختارها در مقیاس میکرو و نانو، امکان بررسی در محل نمونه^۶، امکان آماده‌سازی فیلم‌های متوالی و قابلیت ایجاد تصاویر و کنترل تمامی مراحل آماده‌سازی و ماشین‌کاری نمونه‌ها ترکیبی از این دو روش در تحقیقات به‌صورت روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی^۷ ارائه شده‌است. با توجه به گسترش پروژه‌های تحقیقاتی و صنعتی در زمینه نانو و نیاز روز افزون به استفاده از تجهیزاتی پیشرفته به‌منظور بررسی و تحلیل آنها، روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین دستگاه‌های تشخیص از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در این مقاله به بررسی ساختار، عملکرد و برخی از کاربردهای این روش پرداخته شده‌است.

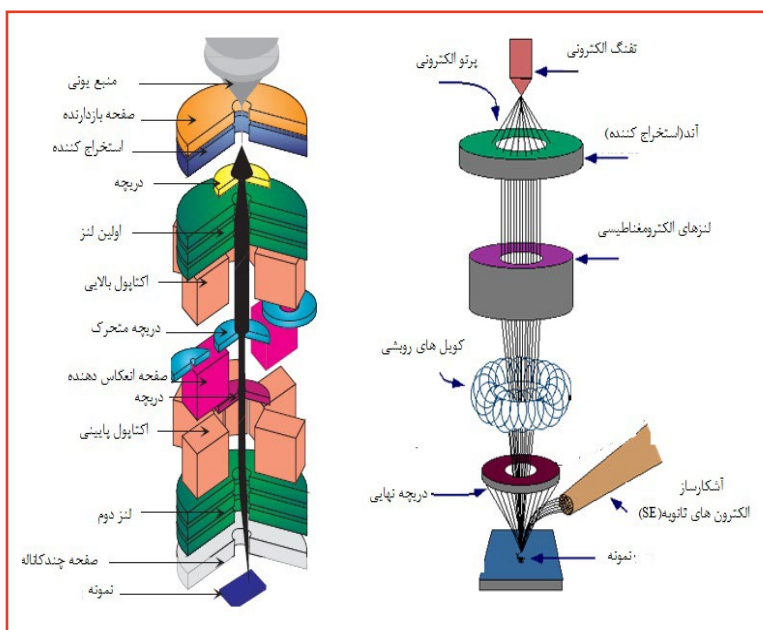


شکل (۱): ساختمان دستگاه پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی [۱].

دستگاه پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی از لحاظ ساختمان کاملاً شبیه به میکروسکوپ الکترونی روبشی بوده که شامل ستون الکترونی، آشکارسازهای الکترون‌های ثانویه^۸ و الکترون‌های برگشتی^۹ و همچنین طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^{۱۰} است، با این تفاوت که در این دستگاه علاوه بر ستون الکترونی، یک ستون یونی هم وجود دارد، این ستون به صورت مورب نسبت به ستون الکترونی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، برای انجام فرآیندهایی نظیر آماده‌سازی نمونه، بازرسی و پردازش تجهیزات و ماشین‌کاری و غیره از لوله‌های تزریق گاز^{۱۱} و میکروپروب هم استفاده می‌شود. (شکل (۱)) [۲۱].

همان‌گونه که می‌دانیم، در ستون الکترونی، پرتو الکترونی تولید شده در تفنگ الکترونی، با طی مسیری بسیار پیچیده از میان لنزهای متمرکز کننده، سیم‌پیچ روبشی اولیه، استیگماتور، سیم‌پیچ روبشی ثانویه و لنز نهایی آماده‌سازی می‌شود و با قطری مطلوب که از توزیع تراکم مناسبی برخوردار و حتی‌الامکان متقارن و دایره‌ای است، به سطح نمونه برخورد می‌کند [۳و۴].

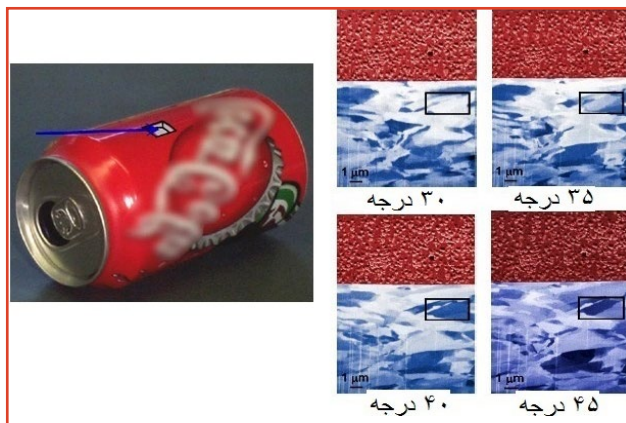
به‌طور کلی، ستون یونی نیز کاملاً شبیه ستون الکترونی است با این تفاوت اصلی که در آن پرتو یونی به جای پرتو الکترونی تولید و به جای تفنگ الکترونی از منبع یون فلزی مایع^{۱۲} استفاده می‌شود (شکل (۲)) [۴]. این منبع یونی به‌طور معمول از جنس گالیوم^{۱۳} است، گالیوم به دلیل نقطه ذوب بسیار پایینی که دارد، در دمای اتاق به‌صورت مایع بوده و قادر است در ابعاد بسیار کوچک با قطری در حدود ۱۰ نانومتر متمرکز شود، همچنین به دلیل داشتن طول عمر بلند و پایداری مناسب یکی از بهترین منابع محسوب می‌شود. این منبع یونی شامل یک منتشرکننده سوزنی با شعاع انتهایی در حدود ۱۰ میکرومتر است که جنس آن از تنگستن بوده و دارای کشش سطحی بالا و فشار بخار پایین است. اعمال یک میدان الکتریکی قوی به منتشرکننده موجب انتشار یون‌ها می‌شود، با اعمال ولتاژی در حدود ۷ کیلو ولت به صفحه استخراج کننده، یون‌های حاصل به داخل ستون رانده و از اولین دریچه وارد آن می‌شوند، با استفاده از اولین لنز مغناطیسی متمرکز شده و با اکتاپول بالا^{۱۴} استیگماتیسیم^{۱۵} آن برطرف می‌شود. در این مرحله، انرژی پرتو ۱۰ تا ۵۰ کیلو الکترون ولت و جریان آن معادل ۱ پیکوآمپر تا ۱۰ نانوآمپر بوده و مقدار جریان با استفاده



شکل (۲): تصویر ستون الکترونی (سمت راست) و ستون یونی (سمت چپ) [۵].

از دریچه متحرک قابل کنترل است (به‌منظور بررسی نمونه‌های حساس و برای ایجاد پرتو یونی باریک از جریان کم و برای انجام عملیاتی نظیر فرسکاری، پرتوهایی با مقدار بیشتر و قطر بزرگتر مورد استفاده قرار می‌گیرد). در نهایت، با استفاده از دریچه‌ها و لنزهای دیگر ستون، پرتو یونی در ستون اپتیکی تنظیم و با لنز آخر روی هدف متمرکز می‌شود. قابل ذکر است میزان خلاء کاری این ستون در حدود 1×10^{-7} با ولتاژ کاری ۵ تا ۵۰ کیلوولت است، به‌منظور فراهم نمودن خلاء مناسب در ستون، از یک یا دو پمپ خلاء یونی^{۱۶} استفاده می‌شود [۲و۵].

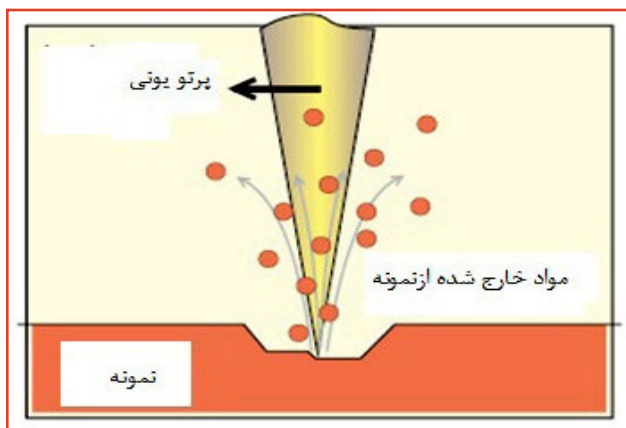
قابل ذکر است علاوه بر مشخص شدن دانه‌بندی‌های مختلف، برچسب پلیمری روی قوطی نیز قابل مشاهده است [۵و۶].



شکل (۴): تصاویر تهیه شده از سطح مقطع نوشابه در زوایای مختلف [۵].

فرزکاری

به‌منظور حذف و برداشتن مواد از روی سطح نمونه با روش فوق، از روش فرزکاری (کندوپاش^{۲۱} سطح) استفاده می‌شود که شامل دو روش کندوپاش فیزیکی و کندوپاش شیمیایی است. در هر دو روش با استفاده از یک پرتو یونی مناسب سراسر نمونه روبش و عملیات اچ کردن^{۲۲} و برداشتن و ایجاد طرح و شکل مناسب روی سطح انجام می‌شود (شکل (۵)).

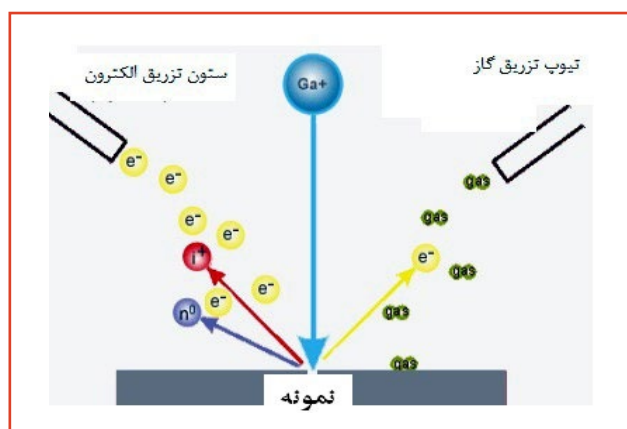


شکل (۵): نمایی از عملیات کندوپاش سطح (فرزکاری) [۵].

به‌منظور کاهش اثرات ناخواسته در عملیات فرزکاری، به‌طور معمول قطر پرتو یونی و جریان آن را تا حد امکان کاهش می‌دهند. برای ایجاد عمق نفوذ مناسب در فرآیندهای کاشت یا کندوپاش سطح، امکان تغییر ولتاژ کاری در محدوده ۵ تا ۵۰ کیلوولت وجود دارد (جدول (۱)). قابل ذکر است این عوامل به تنهایی در محاسبه سرعت اچ کردن مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، روش اچ کردن، زاویه برخورد پرتو یونی با سطح و رخ دادن بارگذاری مجدد نمونه به شدت بر سرعت اچ کردن^{۲۳} اثرگذار است، میزان راندمان کندوپاش سطح (اچ کردن سطح)، به زاویه برخورد پرتو یونی نسبت به سطح ماده وابسته است و از طریق رابطه $1/\cos(\theta)$ محاسبه می‌شود که

بررسی عملکرد دستگاه پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی

با اصابت پرتو یونی متمرکز شده به سطح نمونه و در اثر برهم‌کنش بین یون‌ها و ماده، انرژی پرتو یونی کاسته می‌شود، از مهم‌ترین اثرات فیزیکی ناشی از برخورد یون‌ها به بستر می‌توان به مواردی نظیر، کندوپاش اتم‌های خنثی و یونیزه شدن بستر، انتشار الکترون‌ها، جابه‌جایی اتم‌های جامد، انتشار فوتون‌ها، واکنش‌های شیمیایی شامل شکسته شدن باندهای شیمیایی و در نتیجه آن، جدا شدن مولکول‌ها اشاره کرد (شکل (۳)). لذا با استفاده از این عملکردها در دستگاه پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی می‌توانیم سه سازوکار کلی تصویربرداری^{۱۷}، فرزکاری و رسوب‌گذاری^{۱۸} را داشته باشیم [۵و۴].



شکل (۳): نمایی از برهم‌کنش پرتو یونی و ماده [۵].

تصویرسازی

در اثر برخورد پرتو یونی با سطح نمونه، ذرات ثانویه‌ای شامل اتم‌های خنثی، یون‌ها و الکترون‌ها از سطح خارج می‌شود، با استفاده از آشکارساز چندکاناله^{۱۹} واقع در ستون یونی می‌توان این الکترون‌ها و یون‌های ثانویه حاصل را جمع‌آوری و تصویرسازی کرد. ولی به دلیل وجود معایبی نظیر کاشته شدن مقداری از یون‌های گالیوم و تخریب نمونه بر اثر افزایش مدت زمان برخورد پرتو به سطح، تصاویر حاصل، از وضوح و بزرگنمایی مناسبی برخوردار نیست، لذا با استفاده از ستون الکترونی دستگاه و تابش پرتو الکترونی مناسب به سطح، اثرات ناشی از کاشت یون‌های گالیوم را به حداقل رسانده، با ایجاد الکترون‌های ثانویه و بازگشتی مناسب، تصاویری با قدرت تفکیک بالا و وضوح مناسب تهیه می‌شود. در تهیه تصاویری از نمونه‌های شامل ساختارهای بلورین، به کارگیری پرتو یونی در ایجاد مقاطع عرضی با عمق نفوذ مناسب و افزایش سرعت انتشار الکترون‌های ثانویه بسیار تاثیرگذار است. این امر در بررسی یک قوطی نوشابه از جنس آلومینیوم و بررسی سطح مقطع^{۲۰} آن مورد بررسی قرار گرفته است. با تغییر زاویه (زوایای مورد استفاده ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵) بین برخورد پرتو یونی و سطح نمونه دانه‌بندی‌های مختلفی از آلومینیوم دیده می‌شود که این تغییر زاویه در میزان کنتراست و روشنایی دانه‌ها در تصاویر تاثیرگذار است (شکل (۴)).

جدول (۱): بررسی اثر ولتاژهای مختلف بر عمق کاشت و بازده کندوپاش در مواد مختلف [۵].

انرژی یونی گالیوم	عمق کاشت (نانومتر)			بازده کندوپاش (یون - اتم)		
	سیلیسیم	دی اکسید سیلیسیم	آلومینیوم	سیلیسیم	دی اکسید سیلیسیم	آلومینیوم
۱۰ کیلوکترن ولت	۱۳±۵	۱۲±۴	۱۱±۴	۱/۴۶	سیلیسیم ۰/۶۲ اکسیژن ۲/۲۳	۲/۵۹
۲۰ کیلوکترن ولت	۲۰±۷	۱۹±۶	۱۷±۶	۱/۸۷	سیلیسیم ۰/۶۴ اکسیژن ۲/۳۴	۲/۹۸
۳۰ کیلوکترن ولت	۲۷±۹	۲۵±۸	۲۳±۸	۱/۹۸	سیلیسیم ۰/۶۷ اکسیژن ۲/۲۵	۲/۹۱
۴۰ کیلوکترن ولت	۳۳±۱۱	۳۱±۱۰	۲۹±۱۰	۲/۰۴	سیلیسیم ۰/۷۷ اکسیژن ۲/۵۴	۳/۵۴
۵۰ کیلوکترن ولت	۳۹±۱۴	۳۸±۱۱	۳۵±۱۲	۲/۰۱	سیلیسیم ۰/۶۷ اکسیژن ۲/۳۹	۳/۴۸

در آن: (θ) زاویه بین سطح نرمال و پرتو یونی است [۶۰۵].

به دو روش فیزیکی و شیمیایی است. در رسوب گذاری فیزیکی از یون های با انرژی کم استفاده می شود، در حالی که رسوب گذاری شیمیایی بر پایه واکنش های شیمیایی بین زیر لایه و مولکول های جذب شده روی سطح است و باید از یون هایی با انرژی بالا استفاده شود، هر دو روش به صورت موضعی و با دقتی مناسب روی انواع مواد عایق و رسانا قابل انجام است. روش رسوب گذاری شیمیایی دارای قدرت تفکیک بهتر و سرعت لایه نشانی بالاتری نسبت به روش فیزیکی است. در این روش، به طور معمول فلزاتی نظیر پلاتین یا تنگستن و نیمه هادی هایی نظیر سیلیس برای لایه نشانی استفاده می شود، در صورت استفاده از فلزات، از گاز پیشرو فلزی-آلی^{۲۵} و در پوشش دهی سیلیس از گاز پیشرو^{۳۱} و^{۳۰} و^{۳۲} تترامتیل سیکلو تراکسیلان^{۲۶} به همراه اکسیژن و گاهی بخار آب استفاده می شود. گاز پیشرو با سوزن (نازل)^{۲۷} بر سطح اسپری و روی آن جذب می شود، سپس با برخورد پرتو یونی به سطح، مواد آلی از سطح جدا شده و توسط سیستم خلاء خارج می شود در نهایت یک لایه نازک از فلزاتی نظیر پلاتین یا تنگستن و یا لایه ای از سیلیس روی سطح باقی می ماند (شکل (۶)).

در تمام مراحل رسوب گذاری امکان تصویربرداری هم زمان با استفاده از روش فوق فراهم است، همان گونه که مشاهده

روش کندوپاش فیزیکی، روشی مستقیم و رو به جلو است که در آن پرتوهای یونی منطقه مورد نظر را بمباران می کنند تا ماده از نمونه جدا شود، این روش بسیار ساده است و قابلیت تنظیم و به کارگیری برای هر نوع ماده را دارد. روش کندوپاش شیمیایی یا اچ کردن شیمیایی بر پایه واکنش های شیمیایی بین سطح زیر لایه و مولکول های گاز جذب شده روی زیر لایه است. نرخ اچ کردن در این روش بیشتر از حالت فیزیکی بوده و میزان اثرات ناخواسته ناشی از باز رسوب دهی و آسیب حاصل از پسماند به حداقل می رسد. در این روش، هم زمان با عملیات فرز کاری، تزریق گاز به داخل محفظه بر سطح نمونه صورت می گیرد و به این ترتیب سرعت اچ کردن افزایش و از طرف دیگر به دلیل حضور واکنش های شیمیایی حذف و برداشتن مواد مختلف راحت تر می شود، روش ذکر شده، اچ کردن همراه گاز^{۲۴} نیز نامیده می شود. نوع گاز مورد استفاده، سرعت فرآیند و شرایط محیطی و نوع ماده بر روند این روش بسیار تاثیر گذار است (جدول (۲)) [۶۰۵].

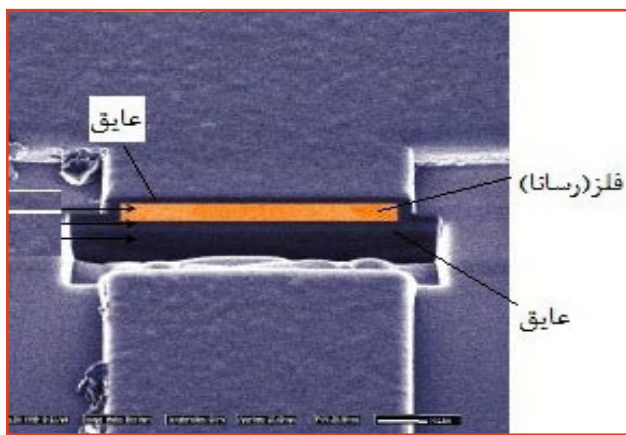
رسوب گذاری

یکی دیگر از قابلیت های روش فوق، رسوب گذاری روی سطح

جدول (۲): بررسی اثر گازهای مختلف بر فرآیند کندوپاش شیمیایی در مواد مختلف [۵].

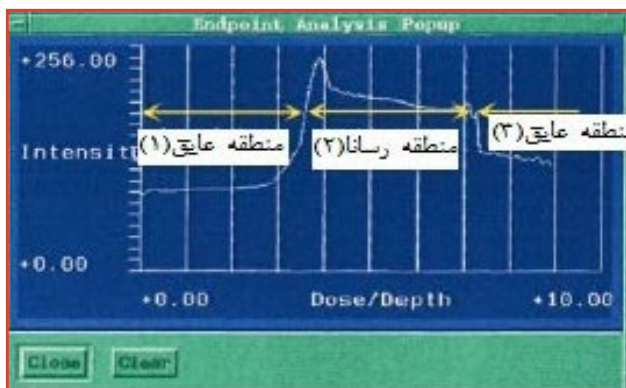
مقاومت نوری - پلی آمید	دی اکسید سیلیسیم - سیلیسیم نیتريد	سیلیکون	تنگستن	آلومینیوم
-	-	۱۰	-	۱۰-۲۰
-	-	۶-۱۰	-	۱۰-۲۰
-	-	۴-۵	۲-۶	۸-۱۰
-	۳-۵	۶-۱۰	۱۰	-

روش، انعطاف‌پذیری آن است، این قابلیت به دلیل امکان پذیر بودن، انجام پردازش موضعی فراهم می‌شود، لذا در بررسی - آزمون‌های مخرب به راحتی می‌توان قطعات معیوب را شناسایی و از برد الکترونیکی خارج کرد و دیگر قطعات باقی‌مانده روی برد قابل استفاده هستند. به‌منظور آشنایی بیشتر به بررسی یک مدار الکتریکی در این بخش پرداخته می‌شود؛ بعد از انجام بازرسی‌های سطح و شناسایی قطعات معیوب، با اعمال عملیات فرزکاری، بخشی از مدار که دارای قطعه معیوب است، برداشته می‌شود، در تصویر میکروسکوپی حاصل بعد از عملیات فرزکاری، ۳ لایه (عایق-رسانا-عایق) به‌صورت مناطق تیره و روشن مشاهده می‌شود (شکل ۸).



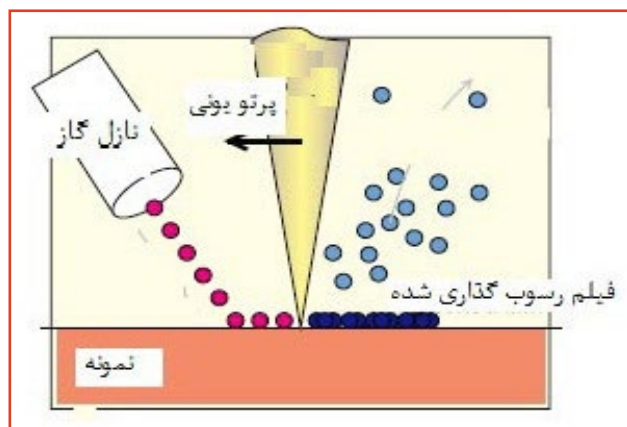
شکل (۸): تصویری از مدار الکتریکی بعد از خارج کردن قطعه معیوب [۵].

به‌منظور پایش انجام کامل این عملیات، هم‌زمان علاوه بر تصویربرداری تمام مراحل با میکروسکوپ، از روش آشکارساز نقطه نهایی^{۲۸} نیز استفاده می‌شود، با استفاده از نمودار به‌دست آمده با روش فوق (شکل ۹) و بررسی میزان شدت روشنایی و رسانایی مدار، مشخص می‌شود خارج شدن قطعه معیوب به درستی انجام شده‌است. با توجه به نمودار حاصل مشخص می‌شود در نواحی عایق (مناطق ۱-۳) میزان روشنایی کم و در نواحی مرکزی نمودار که مربوط به مناطق رسانا (منطقه ۲) بوده روشنایی افزایش داشته است. لذا قطعه معیوب به درستی و بدون تخریب دیگر قسمت‌های برد از مدار خارج شده‌است.

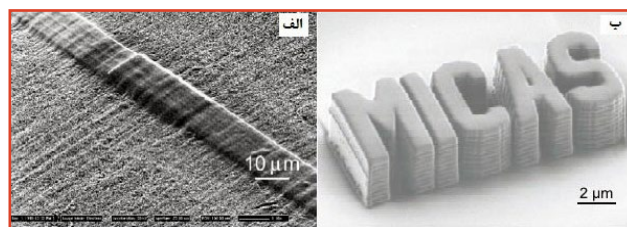


شکل (۹): تصویر نمودار حاصل از روش آشکارساز نقطه نهایی [۵].

می‌شود، تصویری از رسوب‌گذاری تنگستن به‌صورت یک خط نازک با پهنایی در حدود ۱۰ میکرومتر روی سیلندری از جنس اکسید تیتانیوم تهیه شده‌است (شکل ۷-الف))؛ نکته قابل توجه این است که امکان رسوب‌گذاری روی سطوح غیرمنظمی همچون سیلندر با فشار و استرس کمتری نسبت به دیگر روش‌های رایج است. همچنین با این روش امکان ایجاد لایه‌های کوچک سه‌بعدی در ابعاد نانومتر به راحتی فراهم می‌شود، مانند لایه‌ای از سیلیس که با شکل مرتب شده‌ای با ابعاد جانبی ۶۰۰ نانومتر و حداقل ضخامت ۱۰ نانومتر روی سطح ایجاد شده‌است (شکل ۷-ب)) [۶۵].



شکل (۶): نمایی از عملیات رسوب‌گذاری روی سطح [۵].



شکل (۷): تصاویری از رسوب‌گذاری‌های فلزی و نیمه‌هادی روی سطح [۵].

بررسی کاربردها

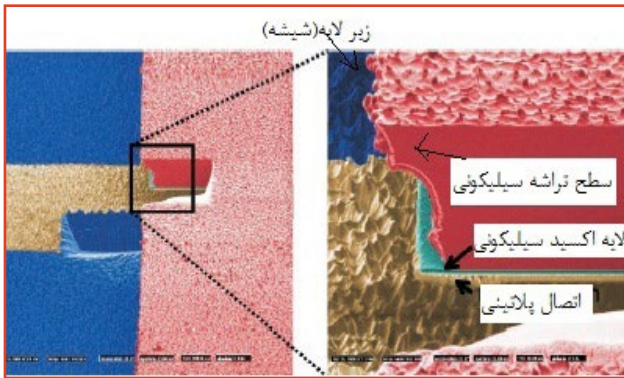
روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی، در بررسی نیمه‌هادی‌ها، فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و علوم زیستی بسیار پرکاربرد است و در سه حوزه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- بررسی و بازرسی میکرو سیستم‌ها؛
- ابزاری برای فرآیند ماشین کاری؛
- آماده‌سازی نمونه و ایجاد لایه‌های نازک [۵].

بررسی و بازرسی میکرو سیستم‌ها

روش فوق به‌عنوان ابزاری قدرتمند در بررسی و بازرسی میکرو الکترونیک‌ها و میکرو سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در بررسی این فناوری‌ها، به پردازش نیمه‌هادی‌ها، بررسی سطوح شکست، آنالیز عیوب، تعمیر ماسک‌ها و به‌سازی مدارات پرداخته می‌شود. یکی از قابلیت‌های بی‌نظیر این

ذکر است با روش فوق، امکان تصویربرداری گام به گام مراحل ذکر شده نیز به راحتی فراهم است [۶۵].



شکل (۱۲): تصویر از لایه‌های مختلف اتصالات روی تراشه میکرو سوئیچ [۵].

انجام فرآیند ماشین کاری

روش فوق به دلیل امکان جابه‌جایی نمونه‌ها در راستای محور، دارا بودن قدرت بالا در انجام عملیات فرزکاری، رسوب‌گذاری و پرداخت کاری نمونه‌ها به صورت موضعی، امکان تصویربرداری و پایش لحظه‌ای تمام عملیات‌های فوق به‌عنوان تجهیزاتی بسیار قدرتمند، در عملیات ماشین کاری در مقیاس میکرو و نانو مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حین انجام عملیات ماشین کاری فرآیندهای لیتوگرافی، کاشت و اچ کردن روی نمونه‌ها انجام می‌شود؛ به‌منظور آشنایی بیشتر با این فرآیند، برخی از روش‌های متداول قابل استفاده در ماشین کاری با روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی مقایسه شده‌اند (جدول (۳)).

همان‌گونه که از جدول (۳) مشاهده می‌شود، روش فوق با دو روش لایه‌نشانی به روش شیمیایی^{۳۱} و استریولیتوگرافی^{۳۲} از لحاظ وضعیت رسوب‌دهی مقایسه شده و با دو روش برش لیزری^{۳۳} و روش تخلیه الکتریکی^{۳۴} از لحاظ قدرت فرزکاری مورد بررسی قرار گرفته است. در یک مقایسه کلی، این روش نسبت به دیگر روش‌ها از لحاظ نرخ رسوب‌دهی، نرخ اچ کردن، اندازه ساختارهای حاصل و ایجاد ساختارهای سه بعدی، دارای قدرت و دقت بسیار مناسب‌تری است ولی از معایب آن، زمان‌بر بودن فرآیند به‌خصوص در ایجاد ساختارهای با ابعاد بزرگ است. در این بخش، به بررسی برخی از کاربردهای این روش در ماشین کاری نمونه‌ها پرداخته شده‌است [۶۵].

■ ساخت سرهای مغناطیسی^{۳۵}

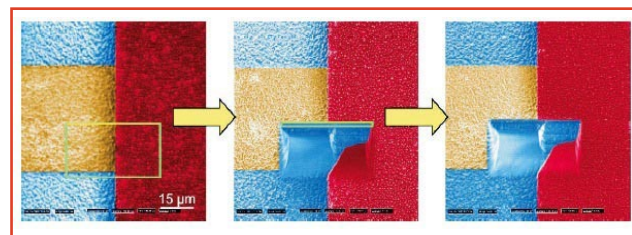
یکی از امتیازهای روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی، ساخت و پردازش ساختارهای مغناطیسی در مقیاس نانو و با توان تفکیک بالاتر در مقایسه با ایجاد این ساختار از طریق لیتوگرافی پرتو الکترونی است. در روش فوق، در مقایسه با لیتوگرافی الکترونی، یون‌های مورد استفاده

یکی دیگر از کاربردهای این روش، بازرسی و بررسی عملکرد سوئیچ‌های رزونانسی تمام اتوماتیک^{۲۹} است، در این سوئیچ‌ها تراشه سیلیکونی روی زیر لایه قرار می‌گیرد که روی این تراشه پنجره‌هایی وجود دارد که تحریک نوری آن‌ها باعث ایجاد و انتقال جریان می‌شود. به این ترتیب، جریان از لایه سیلیکونی به لایه اکسید سیلیکونی، سپس به الکتروود پلاتین و در نهایت به مدار الکتریکی موجود روی زیر لایه منتقل می‌شود (شکل (۱۰)).



شکل (۱۰): تصویر نمای کلی تراشه میکرو سوئیچ (سمت چپ) و تصویر اتصال لایه سیلیکونی به پایه پلاتینی (سمت راست) [۵].

با استفاده از روش فوق، وضعیت این اتصالات و چگونگی عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با انجام عملیات فرزکاری بخشی از این سوئیچ برداشته می‌شود؛ بعد از عملیات برداشت، دیوار حاصل چرخانده شده و در حالت افقی قرار می‌گیرد و سپس عملیات پرداخت کاری^{۳۰} روی آن انجام می‌شود، سپس برای انجام عملیات تصویربرداری و آنالیز دوباره ۴۵ تا ۶۰ درجه چرخانده می‌شود (شکل (۱۱)).



شکل (۱۱): مراحل انجام عملیات فرزکاری و پرداخت کاری روی تراشه میکرو سوئیچ [۵].

در نهایت روی سطح مقطع حاصل از پنجره تراشه، مورفولوژی قسمت‌های مختلف قابل مشاهده است (شکل (۱۲)) و به راحتی لایه‌های مختلفی از اتصالات شامل اتصال الکتروودهای پلاتین روی زیر لایه، اتصال الکتروودهای پلاتین واقع در زیر لایه اکسید سیلیکونی و اتصال لایه نازک اکسید سیلیکونی و سطح سیلیکون مورد بررسی و پردازش قرار می‌گیرد. علاوه بر بررسی مورفولوژی و چگونگی اتصالات این امکان فراهم است که با چرخش دوباره نمونه تعداد لایه‌ها، وضعیت اتصال آن‌ها و ضخامت هر کدام نیز بررسی شود. قابل

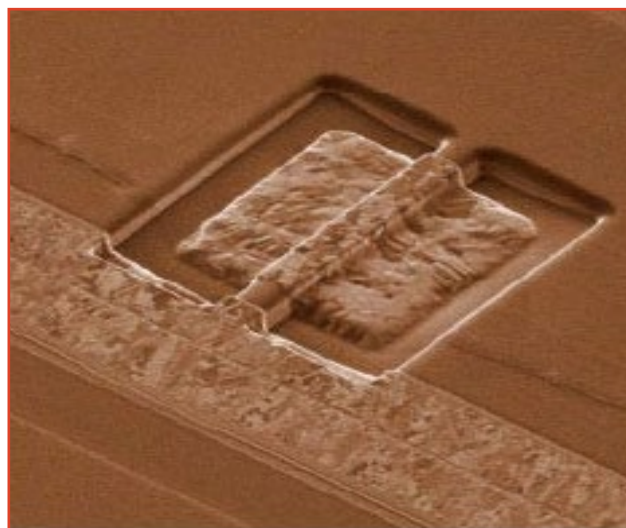
جدول (۳): مقایسه روش‌های مختلف ماشین کاری [۵].

سرعت رسوب‌گذاری - سرعت اچ کردن	محدوده اندازه ساختار	حداکثر ابعاد نمونه	هندسه سه بعدی	روش
$0.5 \text{ m}^2 \mu \text{ s}^{-1}$	$20 \text{ nm} - 200 \text{ nm}$	۱۰	+	روش رسوب‌نشانی میکروسکوپ الکترونی - پرتو متمرکز یونی
$100 \text{ m}^2 \mu \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ mm} - 10 \mu \text{m}$	۱	۰	لایه‌نشانی شیمیایی
$100 \text{ m}^2 \mu \text{ s}^{-1}$	$5 \text{ mm} - 5 \mu \text{m}$	n/a	++	استریولیتوگرافی
$1 \text{ m}^2 \mu \text{ s}^{-1}$	$50 \text{ nm} - 50 \mu \text{m}$	۱۵	+	عملیات فرز کاری در میکروسکوپ الکترونی - پرتو متمرکز یونی
$500 \text{ m}^2 \mu \text{ s}^{-1}$	$5 \text{ mm} - 5 \mu \text{m}$	۵	+	برش لیزری
$100000 \text{ m}^2 \mu \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ mm} - 10 \mu \text{m}$	۱۰	++	روش تخلیه الکتریکی

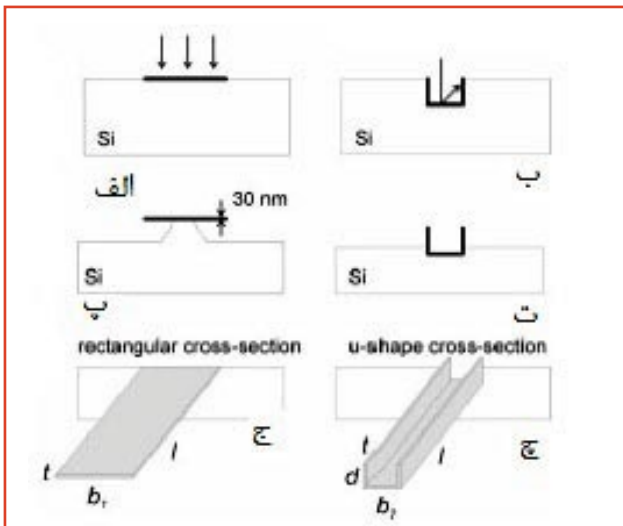
■ ساخت پروب^{۳۶} میکروسکوپ نیروی اتمی^{۳۷}

همان‌گونه که می‌دانیم، میکروسکوپ نیروی اتمی، یکی از پرکاربردترین میکروسکوپ‌ها است که به کمک آن می‌توان توپوگرافی سطح، زبری سطح، تغییرات فاز، تغییرات اصطکاک، خواص مغناطیسی، دانه‌بندی سطح و ضخامت تک لایه‌ها را مورد بررسی قرار داد. یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های دستگاه، پروب بوده که مجموعه‌ای از تیرک^{۳۸} و یک سوزن^{۳۹} است. جنس پروب به‌طور معمول از جنس سیلیکون بوده و طول تیرک آن در حدود ۱۰۰ تا ۴۵۰ میکرومتر و شعاع نوک سوزن حدود ۱۰ نانومتر است. به‌منظور کسب اطلاعات دقیق و مناسب از سطح نمونه، ویژگی‌های پروب، به‌خصوص شعاع نوک آن بسیار حائز اهمیت است و از طرف دیگر، تیرک باید از میزان مقاومت کافی در برابر جابه‌جایی‌های عمودی برخوردار باشد. به‌طور معمول پروب‌های AFM به دو روش، فرآیند شکل‌دهی معکوس سوزن با روش قالب‌گیری ریخته‌گری میکرونی و روش اچ کردن تر یا خشک ساخته می‌شوند. در حال حاضر، بسیاری از پروب‌ها به‌طور مستقیم از روش اچ ناهمسانگرد ایجاد می‌شوند؛ در این فرآیند، یک لایه SiO_2 با ضخامت ۱/۲ میکرومتر روی سطح سیلیکون پوشش داده شده است (شکل ۱۴-الف)) و عملیات اچ کردن با محلول هیدروکسید پتاسیم^{۴۰} انجام می‌شود (شکل ۱۴-ب))؛ سپس ماسک روی سوزن برداشته می‌شود (این مرحله شامل فتولیتوگرافی ماسک، عملیات اچ با استفاده از اسید هیدروفلوئوریک، شستشو با استون و پروپان و خشک کردن در معرض نیتروژن است) (شکل ۱۴-پ))؛ دوباره پشت ویفر به‌منظور عملیات اچ کردن، پوشش SiO_2 داده شده (شکل ۱۴-ت)) و سپس مشابه قبل، ماسک برداشته می‌شود

سنگین‌تر از الکترون‌ها است؛ بنابراین، پرتو یونی متمرکز کمتر از میدان مغناطیسی اثر می‌پذیرد و از طرف دیگر، با امکان انجام عملیات فرز کاری مستقیم و رسوب‌دهی مناسب با استفاده از الگوهای بارگذاری، نانو ساختارهای مغناطیسی مناسب ایجاد می‌شود. در این فرآیند، ابتدا با عملیات فرز کاری ساختار نانو مغناطیسی (سرهای مغناطیسی) ایجاد شده و سپس با فرآیند رسوب‌دهی، لایه تنگستن مغناطیسی در داخل حفره‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۱۳)). با این روش، امکان افزایش حجم محیط‌های ذخیره‌سازی و کاهش ابعاد ساختار تا حدود ۱۰۰ نانومتر فراهم می‌شود. تمام مراحل ساخت، ایجاد برش، فرز کاری، شکل‌دهی، پرداخت کاری و رسوب‌نشانی به راحتی با استفاده از این روش قابلیت پایش و تصویربرداری با قدرت تفکیک مناسب را دارند [۵].

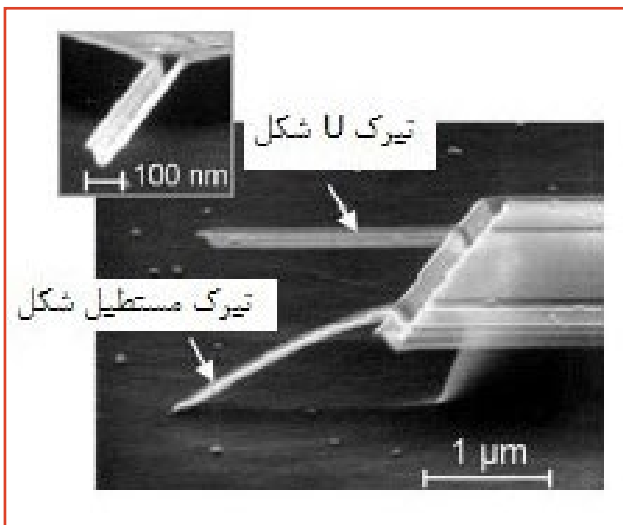


شکل (۱۳): ساختار مغناطیسی (سر مغناطیسی) حاصل با استفاده از پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی [۵].



شکل (۱۵): نمایی از ساخت پروب با پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی [۵].

با توجه به امکان تصویربرداری هم‌زمان از تمام مراحل ساخت، امکان نظارت و پایش مستقیم از کل فرآیند تولید وجود دارد (شکل (۱۶)) [۷۵].

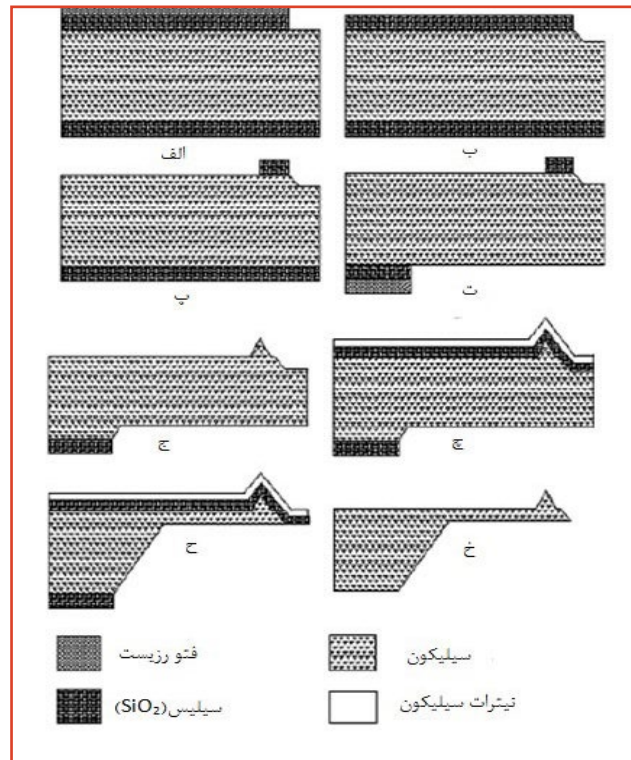


شکل (۱۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تولید پروب [۵].

■ ساخت حسگر فشار گاز مطلق^{۴۱}

حسگرهای فشار گاز، روزانه برای کنترل هزاران کاربرد، مورد استفاده قرار می‌گیرند، این حسگرها به‌طور معمول به‌صورت مبدل کار و سیگنالی از اثر تغییرات فشار تولید می‌کنند؛ یکی از انواع آن‌ها حسگر فشار گاز مطلق است. این حسگر از مواد پیزو الکتریک ساخته شده تا میزان کشش ناشی از فشار را اندازه‌گیری کند، این حسگر برای اندازه‌گیری فشارهای پویا به کار رفته و فشار یک نقطه نسبت به خلاء کامل را اندازه‌گیری می‌کند. بلورهای به کار رفته در ساختمان این نوع از حسگرها در اثر تغییر شکل مکانیکی، سیگنال الکتریکی تولید می‌کند، سطح ولتاژ این سیگنال متناسب با میزان تغییر شکل اعمالی است. این بلور به یک دیافراگم فلزی متصل می‌شود و از سمت دیگر برای اندازه‌گیری فشار در تماس با سیال

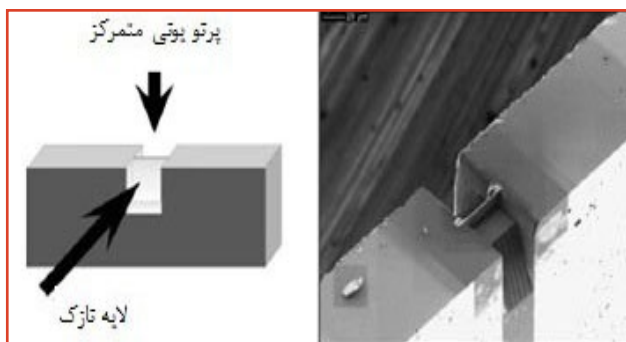
(شکل (۱۴-ج)). با استفاده از روش لایه‌نشانی فیزیکی یک لایه SiO_2 به ضخامت ۳ میکرومتر و یک لایه Si_3N_4 به ضخامت ۱ میکرومتر روی سطح پروب داده می‌شود (شکل (۱۴-ا))، سپس ویفر دوباره با KOH اچ می‌شود (شکل (۱۴-ح)) و در نهایت، ویفر شستشو شده و دوباره در اسید قرار داده می‌شود تا لایه اکسیدی برداشته شود و در نهایت محصول نهایی (پروب) (شکل (۱۴-خ)) در داخل دستگاه آن در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت قرار می‌گیرد.



شکل (۱۴): مراحل ساخت پروب میکروسکوپ نیروی اتمی به روش اچ تر [۷].

همان‌گونه که در قسمت‌های بالا توضیح داده شد، مراحل ساخت پروب‌های AFM با روش‌های مرسوم بسیار زمان‌گیر و از طرف دیگر، ناخالصی‌های موجود در ویفر بسیار تأثیرگذار بر روند کار، به‌خصوص سرعت اچ کردن است. با بکارگیری روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی در مدت زمان کمتر و با نظارت دقیق‌تری می‌توان به تولید این پروب‌ها پرداخت. با این روش، ابتدا با استفاده از فرآیند رسوب‌گذاری یون‌های گالیوم روی سطح ویفر کاشته می‌شود (شکل (۱۵-الف))، در مرحله بعد، عملیات فرزکاری روی آن انجام می‌شود (شکل (۱۵-ب)) و عملیات اچ تر با گازهای پیش رو، روی سطح انجام (شکل‌های (۱۵-پ) و (۱۵-ت)) و در نهایت پروب‌هایی با شکل تیرک‌های مستطیل یا U شکل ایجاد می‌شود (شکل‌های (۱۵-ج) و (۱۵-چ)). قابل ذکر است که این روش امکان تولید تیرک‌هایی با طول و عرض کمتر و همچنین سوزن‌هایی با شعاع نوک بسیار تیزتر، نسبت به دیگر روش‌ها وجود دارد.

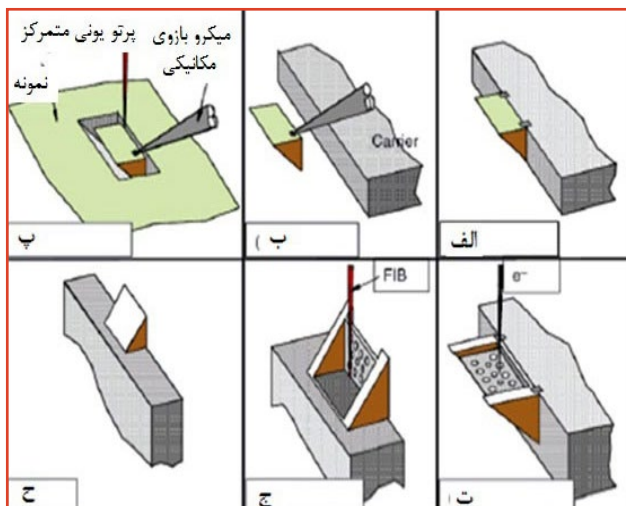
صیقل دهی مکانیکی تا حد امکان ضخامت نمونه کاسته و لایه‌ای با ضخامت حدودی ۵۰ میکرومتر تهیه می‌شود، سپس نمونه در داخل دستگاه قرار داده شده و با استفاده از پرتو یونی، عملیات برش دادن دو شیر، در دو طرف لایه مورد نظر انجام می‌گیرد (شکل (۱۹))، سپس با انجام فرزکاری و پرداخت کاری ضخامت نمونه تا محدوده میکرومتر و نانومتر می‌تواند کاهش پیدا کند. با توجه به شکل هندسی ایجاد شده (اگر از بالا نمونه دیده شود، مانند خط عرضی حرف H است) به این روش آماده‌سازی، روش H-bar نیز گفته می‌شود.



شکل (۱۹): تصویر مقطع عرضی آماده شده به روش برش مقطعی (روش H-bar) [۸].

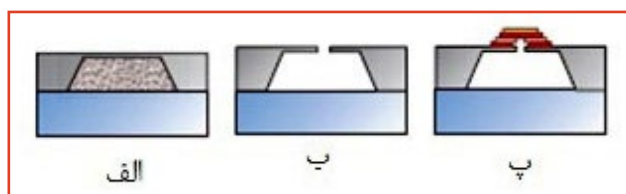
■ روش برداشت

این روش نیاز به آماده‌سازی اولیه ندارد، کافی است نمونه مورد نظر در ابعادی باشد که بتوان آن را در دستگاه نصب نمود. در روش فوق، روی یک قطعه کوچکی از نمونه به شکل گوه (مثلثی شکل) عملیات فرزکاری انجام و (شکل‌های (۲۰-الف) و (۲۰-ب)) سپس با یک میکرو بازوی مکانیکی برداشته شده و روی یک نگهدارنده نمونه یا نیم شبکه مسی نصب می‌شود (شکل (۲۰-پ))؛ سپس نگهدارنده نمونه به اندازه ۹۰ درجه چرخانده شده (شکل (۲۰-ت)) و دوباره عملیات نازک کاری روی آن انجام می‌شود تا در نهایت به ضخامت مورد نظر برسد (شکل (۲۰-ج))؛ در نهایت دوباره ۹۰ درجه چرخانده شده تا به جای اول خود برگردد (شکل (۲۰-ح)).



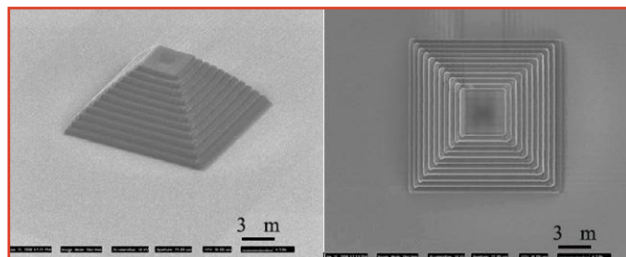
شکل (۲۰): تصاویر مراحل آماده‌سازی نمونه به روش برداشت [۸].

قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، مراحل ساخت این حسگرها بسیار پیچیده، پرهزینه، زمان‌بر و نیاز به روش‌های پیشرفته لایه‌نشانی با خلاء کاری بسیار بالا است. از طرف دیگر، نمی‌توان هیچ‌گونه کنترل دقیقی بر کل فرآیند ساخت آن‌ها به‌طور مستقیم داشت؛ لذا امروزه یکی از بهترین روش‌های ساخت این حسگرها، روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی است. با استفاده از این روش، ابتدا عملیات فرزکاری روی بلور انجام و حفره مورد نظر ایجاد می‌شود (شکل‌های (۱۷-الف) و (۱۷-ب))، سپس فرآیند رسوب‌گذاری روی گودال^{۴۲} به‌صورت لایه لایه و طبقاتی انجام می‌گیرد (شکل (۱۷-ب)). طی مراحل رسوب‌گذاری در خلاء کاری بالای دستگاه، در داخل حفره خلاء در حدود 5×10^{-6} mbar حبس می‌شود، در اصطلاح به این روش تولید حسگر، کپسوله‌گذاری^{۴۳} نیز گفته می‌شود.



شکل (۱۷): نمایی از تولید حسگر فشار گاز مطلق [۵].

به‌منظور پایش مراحل ساخت، تصاویر میکروسکوپی مختلفی از تمام مراحل ماشین کاری تهیه می‌شود (شکل (۱۸)) و در نهایت بعد از تکمیل فرآیند ساخت، آن را از دستگاه خارج نموده و به‌منظور کنترل عملکرد حسگر، آن را در فشار ۳۲۵/۱۰۱ کیلو پاسکال به مدت چند ماه قرار می‌دهند تا با اندازه‌گیری افت فشار، میزان نشتی حسگر فشار را در طول بازه زمانی مورد نظر اندازه‌گیری کنند [۵].



شکل (۱۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی از حسگر فشار گاز مطلق [۵].

■ آماده‌سازی نمونه و ایجاد لایه‌های نازک

یکی از مهم‌ترین کاربردهای این روش، آماده‌سازی نمونه‌ها به‌منظور بررسی میکروسکوپی، به‌خصوص میکروسکوپ الکترونی عبوری^{۴۴} است. برای تهیه اسلایدها و مقاطع عرضی^{۴۵} در ضخامت‌های مختلف از نمونه، دو روش کلی، روش برش مقطعی (روش پیش نازک^{۴۶}) و روش برداشت^{۴۷} وجود دارد.

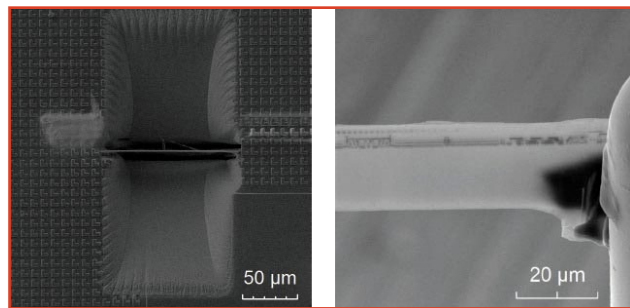
■ روش برش مقطعی

در روش فوق باید آماده‌سازی اولیه روی نمونه، قبل از قرارگیری آن در دستگاه انجام شود؛ در این آماده‌سازی اولیه، ابتدا از طریق

پی‌نوشت

۱. کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
۲. کارشناسی ارشد شیمی آلی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران
۳. مهندسی مواد متالورژی، مرکز پژوهش متالورژی رازی
۴. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ الکترونی روبشی
5. Focused Ion Beam(FIB)
6. In Situ
7. Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope (FIB-SEM)
8. Secondary Electron (SE)
9. Back Scatter Electron (BSE)
10. Energy Diffraction X-Ray (EDX)
11. tubing for gas injection
12. Liquid Metal Ion Source (LMIS)
13. Gallium (Ga)
14. Upper Octopole
15. Stigmatism
16. Ion Pump
17. Imaging
18. deposition
19. Multi-Channel Plate (MCP)
20. Cross Section
21. Sputtering
22. Etching
23. Rate Etching
24. gas-assisted etching
25. Organometallic precursor
26. TMCTS, tetramethylcyclotetrasiloxane
27. Nozzle
28. End point detection
29. Autonomous switched resonator
30. polishing
31. Low Chemical Vapor Deposition
32. Stereo lithography
33. Laser ablation
34. Electro discharge machining
35. Magnetic head
36. Probe
37. AFM, Atomic Force Microscope
38. Cantilever
39. tip
40. KOH
41. Absolute pressure sensor
42. hole
43. Encapsulation
44. TEM, Transmission Electron Microscope
45. Cross Section
46. Pre thinning
47. Lift -out

با استفاده از پرتو الکترونی و امکان تهیه تصاویر از تمام مراحل آماده‌سازی نمونه، می‌توانیم پایش دقیقی از تمام مراحل فرزکاری و پرداخت کاری داشته باشیم و لذا از بروز بسیاری از عیوب سطحی حاصل از دیگر روش‌های مرسوم جلوگیری کنیم؛ از طرف دیگر، قابلیت انتخاب مکان مناسب و ایجاد برش‌های متوالی براحتی فراهم می‌شود. قابل ذکر است در این روش آماده‌سازی، به‌منظور کاهش اثرات کاشت یون‌های گالیوم روی سطح، تغییر ساختار بلوری به آمورف در اثر برخورد پرتو یونی و کاهش جزییات ریز ساختارهای آسیب دیده از پرتو یونی، قبل از انجام هر گونه فرزکاری روی سطح لایه نازکی از پلاتین یا کربن پوشش می‌دهند. با روش فوق، امکان تهیه برش‌های با ضخامت نانومتر به راحتی فراهم می‌شود (شکل (۲۱) [۱۰، ۹، ۸ و ۱۱].



شکل (۲۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از برش تهیه شده از ویفر سیلیکونی [۱۰].

نتیجه‌گیری

امروزه، توسعه سریع روش پرتو یونی متمرکز - میکروسکوپ الکترونی روبشی باعث شده‌است که این تجهیز به‌عنوان ابزاری توانا در انجام بسیاری از پروژه‌ها و زمینه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تمام قابلیت‌ها و مزایای مطرح شده، به‌خصوص در مقیاس نانومتر و با در کنار هم داشتن دو ستون پرتو یونی و الکترونی، امروزه انجام بسیاری از غیرممکن‌ها به راحتی امکان‌پذیر شده‌است. البته باید در کنار مزایا، معایب و اثرات ناخواسته ناشی از پرتو یونی، نظیر کاشت یون‌های گالیوم روی سطح، اثرات حرارتی پرتو یونی روی نمونه، رسوب‌دهی مجدد و تغییرات ناشی از پرتو روی جزییات ساختار نیز در نظر گرفته شود. ولی با یک نگاه کلی بر تمام موارد مطرح شده مشخص شد این روش موجب رشد چشم‌گیری در بسیاری از صنایع، به‌خصوص نیمه‌هادی‌ها شده و بسیاری از مشکلات آماده‌سازی و بررسی نمونه‌های نرم نظیر پلیمرها و نمونه‌های زیستی را بر طرف نموده است.

- [1] Introduction to FIB-SEM, Basic Physics and Applications, Joakim Reuteler, Nonmetallic Inorganic Materials
- [2] Recent advances in focused ion beam technology and applications Nabil Bassim , Keana Scott , and Lucille A. Giannuzzi ,Guest Editors
- [3] ‘Tri-3D’ electron microscopy tomography by FIB, SEM and TEM: Application to polymer nanocomposites Yang Liu
- [4] Focused ion beam (FIB)/scanning electron microscopy (SEM) in tissue structural research Vladka Lešer & Marziale Milani & Francesco Tatti & Živa Pipan Tkalec & Jasna Štrus & Damjana Drobne
- [5] A review of focused ion beam applications in microsystem technology Steve Reyntjens and Robert Puers Katholieke Universiteit Leuven, ESAT-MICAS, K Mercierlaan 94, B-3001 Heverlee, Belgium
- [6] Focused Ion Beam Nanofabrication, Nanotechnology for Engineers: J. Brugger (LMIS-1) & P. Hoffmann (IOA)
- [7] Jia-dong Li, Jie Xie and Wei Xue “Fabrication of cantilever with self-sharpening nanosilicon-tip for AFM applications” *Microsyst Technol* (2013) 19:285-290 doi 10.1007/s00542- 012-1622-x
- [8] TEM Sample Preparation and FIB-Induced Damage Joachim Mayer, Lucille A. Giannuzzi, Takeo Kamino, and Joseph Michael
- [9] Preparation Method of Plan-View Transmission Electron Microscopy Specimen of the Cu Thin-Film Layer on Silicon Substrate Using the Focused Ion Beam with Gas-Assisted Etch Ji-Soo Kim, Sang-Yeol Nam, Young-Hwan Choi1, Ju-Cheol Park
- [10] High Speed TEM Sample Preparation by Xe FIB. A. Delobbe1, O. Salord1, T. Hrcir2, A. David3, P. Suddraud1, F. Lopour2.
- [11] EUFN 2017, 1st European FIB Network Workshop July 4th–July 5th Graz, Austria