نویسندگان

مریم خسروی^{(۴۹»} مینا محبیمراد^{۴۹۳} غلامرضا دهقانی^{۴۹۳}

m2012.khosravi@gmail.com

واژەھاي كليدى

روش پرتو یونی متمرکز – میکروسکوپهای الکترونی روبشی، تفنگ الکترونی از منبع یون فلزی مایع، پرتو

يوني، فرز كاري، رسوب گذاري، ماشين كاري.

معرفی روش پرتو یونی متمر کز میکروسکوپ الکترونی روبشی

چکیدہ

روش پرتو یونی متمرکز⁴، بهعنوان یکی از قویترین تجهیزات، کاربردهای گستردهای را در زمینه آمادهسازی نمونه، بازرسی و پردازش تجهیزات و ماشین کاری 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 نمونه³، امکان آمادهسازی فیلمهای متوالی و قابلیت ایجاد تصاویر و کنترل تمامی مراحل آمادهسازی و ماشین کاری نمونهها ترکیبی از این دو روش در تحقیقات به صورت روش پرتو یونی متمرکز – میکروسکوپهای الکترونی روبشی⁹ 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 به ارائه شدهاست. با توجه به گسترش پروژههای تحقیقاتی یونی متمرکز – میکروسکوپهای الکترونی روبشی و 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.

www.IJLK.ir



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

دستگاه پرتو یونی متمرکز – میکروسکوپهای الکترونی روبشی از لحاظ ساختمان کاملا شبیه به میکروسکوپ الکترونی روبشی بوده که شامل ستون الکترونی، آشکارسازهای الکترونهای ثانویه[^] و الکترونهای برگشتی⁶ و همچنین طیفسنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^{۱۰} است، با این تفاوت که در این دستگاه علاوهبر ستون الکترونی، یک ستون یونی هم وجود دارد، این ستون بهصورت مورب نسبت به ستون الکترونی قرار میگیرد. علاوهبر آن، برای انجام فرآیندهایی نظیر آمادهسازی نمونه، بازرسی و پردازش تجهیزات و ماشین کاری و غیره از لولههای تزریق گاز^{۱۱} و میکروپروب هم استفاده می شود. (شکل (۱)) [او۲].

همان گونه 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 می شود و با قطری مطلوب که از توزیع تراکم مناسبی برخوردار و حتی الامکان متقارن و دایرهای است، به سطح نمونه برخورد می کند [آو۴].

بهطور کلی، ستون یونی نیز کاملا 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 به طور معمول از جنس گالیوم^{۱۲} است، گالیوم به دلیل نقطه ذوب بسیار پایینی که دارد، در دمای اتاق به صورت 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 می شود. 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 می شود، با اعمال ولتاژی در حدود ۲ کیلو ولت به صفحه استخراج کننده، یونهای حاصل به داخل ستون رانده و از اولین دریچه وارد آن می شوند، با استفاده از اولین لنز مغناطیسی متمرکز شده و با اکتاپول بالا^{۱۴} آستیگماتیسم^{۱۵} آن برطرف می شود. در این مرحله، انرژی پرتو ۱۰تا 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) [۱و۵].

مقدمه

میکروسکوپهای الکترونی روبشی – 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 [۴و۵].



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

📕 تصويرسازى

در اثر برخورد پرتو یونی با سطح نمونه، ذرات ثانویهای شامل اتمهای خنثی، یونها و الکترونها از سطح خارج می شود، 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 تخريب نمونه بر اثر افزايش مدت زمان برخورد پرتو به سطح، تصاویر حاصل، از وضوح و بزرگنمایی مناسبی برخوردار نیست، لذا با استفاده از ستون الكتروني دستگاه و تابش پرتو الكتروني 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 می شود. 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 ' 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 آلومیزیوم دیده می شود که این تغییر زاویه در میزان کنتراست و روشنایی دانهها در تصاویر تاثیر گذار است (شکل (۴)).

قابل ذکر است علاوهبر مشخص شدن دانهبندیهای مختلف، برچسب پلیمری روی قوطی نیز قابل مشاهده است [۵و8].



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].

به منظور کاهش اثرات ناخواسته در عملیات فرزکاری، به طور معمول قطر پرتو یونی و جریان آن را تا حد امکان کاهش می دهند. 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 نمی گیرد، روش اچ کردن، زاویه برخورد پرتو یونی با سطح و رخ دادن بارگذاری مجدد نمونه به شدت بر سرعت اچ کردن^{۳۲} اثرگذار است، میزان راندمان کندوپاش سطح (اچ کردن سطح)، به زاویه برخورد پرتو یونی نسبت به سطح ماده وابسته است و از طریق رابطه (θ) cos /۱ محاسبه می شود که

	(عمق کاشت (نانومتر)		بازده کندوپاش (يون – اتم)			
انرژی یونی گالیوم	سيليسيم	دىاكسيد سيليسيم	آلومينيوم	سيليسيم	دىاكسيد سيليسيم	آلومينيوم	
۱۰ کیلوالکترون ولت	13±0	١٢±۴	11±4	1/49	سیلیسیم ۱۰/۶۲کسیژن ۲/۲۳	2/09	
۲۰ کیلوالکترون ولت	۲۰±۷	19±9	۱۷±۶	1/84	سیلیسیم ۲/۳۴کسیژن۲/۶۴	۲/۹۸	
۳۰کیلوالکترون ولت	۲۷±۹	۲۵±۸	۲۳±۸	١/٩٨	سیلیسیم ۱۰/۶۷کسیژن ۲/۲۵	۲/۹۱	
۴۰ کیلوالکترون ولت	۳۳±۱۱	۳1±1۰	۲۹±۱۰	۲/۰۴	سیلیسیم ۱۰/۷۷کسیژن ۲/۵۴	3/54	
۵۰کیلوالکترون ولت	89±14	۳۸±۱۱	ra±1r	۲/۰۱	سیلیسیم ۱۰/۶۷ اکسیژن ۲/۳۹	37/42	

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

در آن: (θ) زاویه بین سطح نرمال و پرتو یونی است [۵و۶].

روش کندوپاش فیزیکی، روشی مستقیم و رو به جلو است که در آن پرتوهای یونی منطقه مورد نظر را بمباران میکنند 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 واکنشهای شیمیایی بین سطح زیر لایه و مولکولهای 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 رسوبدهی و آسیب حاصل از پسماند به حداقل میرسد. در این روش، همزمان با عملیات فرزکاری، تزریق سرعت اچ کردن افزایش و از طرف دیگر به دلیل حضور واکنشهای شیمیایی حذف و برداشتن مواد مختلف راحت تر میشود، روش ستفاده، سرعت فرآیند و شرایط محیطی و نوع ماده بر روند این استفاده، سرعت فرآیند و شرایط محیطی و نوع ماده بر روند این

📕 رسوبگذاری

یکی دیگر از قابلیتهای روش فوق، رسوبگذاری روی سطح

به دو روش فیزیکی و شیمیایی است. در رسوب گذاری فیزیکی از یونهای با انرژی کم استفاده می شود، در حالی که رسوب گذاری شیمیایی بر پایه واکنشهای شیمیایی بین زیر لایه و مولکولهای جذب شده روی سطح است و باید از یونهایی با انرژی بالا استفاده شود، هر دو روش بهصورت موضعی و با دقتی مناسب روی انواع مواد عایق و رسانا قابل انجام است. روش رسوب گذاری شیمیایی دارای قدرت تفکیک بهتر و سرعت لایهنشانی بالاتری نسبت به روش فیزیکی است. در این روش، بهطور معمول فلزاتی نظیر پلاتین یا تنگستن و نیمههادیهایی نظیر سیلیس برای لایهنشانی استفاده می شود، درصورت استفاده از فلزات، از گاز پیشرو فلزی-آلی^{۲۵} و در پوششدهی سیلیس از گاز پیشرو ۱و۳و۵و۷ تترامتیل سیکلو تراکسیلان^{۴۲} به همراه اکسیژن و گاهی بخار آب استفاده میشود. 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 لایهای از سیلیس روی سطح باقی میماند (شکل(۶)).

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

مواد مختلف [۵].	شیمیایے در	کندو باش	. ف آىند	مختلف د	گازهای	بر سے اثر	:(٢), [حدو
	<u> </u>		ر در بیت			بررسی ار		J

	آلومينيوم	تنگستن	سيليكون	دیاکسید سیلیسیم - سیلیسیم نیترید	مقاومت نوری - پلی آمید
كلر	1	-	۱۰	-	-
برم	1+-7+	-	۶-۱۰	-	-
کلرید ید	۸-۱۰	۲-۶	۴-۵	-	-
فلوئوريد زنون	_	۱۰	8-1+	۳-۵	- www.S

www.IJLK.ir

متن به صورت یک روش، انعطاف پذیری آن است، این قابلیت به دلیل امکان پذیر روی سیلندری بودن، انجام پردازش موضعی فراهیم می شود، لذا در بررسی - (شکل (۷-الف))؛
آزمون های مخرب به راحتی می توان قطعات معیوب را شناسایی گذاری روی سطوح و از برد الکترونیکی خارج کرد و دیگر قطعات باقی مانده روی کی کمتری نسبت به برد قابل استفاده هستند. به منظور آشنایی بیشتر به بررسی زروش امکان ایجاد یک مدار الکتریکی در این بخش پرداخته می شود؛ بعد از به راحتی فراهیم می شود؛ بعد از به راحتی فراهیم می شود؛ با اعمال یک مرتب شده ای معلیات فرزکاری، بخشی از مدار که دارای قطعه معیوب است، کل مرتب شده ی عملیات فرزکاری، بخشی از مدار که دارای قطعه معیوب است، کل مرتب شده ی انجام بازرسی های سطح و شناسایی قطعات معیوب، با اعمال یک مرتب شده ی می انجام بازرسی های سطح و شناسایی قطعات معیوب است، کر مرتب شده ی می انجام بازرسی های سطح و شناسایی قطعات معیوب ایت به ایمال است، اعمال یک مرتب شده ی می می می داری قطعه معیوب است، در ای نامت روی میکروسکوپی حاصل بعد از عملیات روش در کاری، ۳ لایه (شکل (۸)).



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

به منظور پایش انجام کامل این عملیات، همزمان علاوه بر تصویر برداری تمام مراحل با میکروسکوپ، از روش آشکار ساز نقطه نهایی^{۲۸} نیز استفاده می شود، با استفاده از نمودار به دست آمده با روش فوق (شکل (۹)) و بررسی میزان شدت روشنایی و رسانایی مدار، مشخص می شود خارج شدن قطعه معیوب به درستی انجام شده است. با توجه به نمودار حاصل مشخص می شود در نواحی علیق (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 شده است.

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

می شود، تصویری از رسوب گذاری تنگستن به صورت یک خط نازک با پهنایی در حدود ۱۰ میکرومتر روی سیلندری از جنس اکسید تیتانیوم تهیه شده است (شکل (۷-الف))؛ نکته قابل توجه این است که امکان رسوب گذاری روی سطوح غیر منظمی همچون سیلندر با فشار و استرس کمتری نسبت به دیگر روش های رایج است. همچنین با این روش امکان ایجاد لایه های کوچک سه بعدی در ابعاد نانومتر به راحتی فراهم می شود، مانند لایه ای از سیلیس که با شکل مرتب شده ای با ابعاد جانبی ۲۰۰ نانومتر و حداقل ضخامت ۱۰ نانومتر روی سطح ایجاد شده است (شکل (۷-ب)) [۵و].

شکل (۶): نمایی از عملیات رسوب گذاری 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؛

- بررسی و باررسی 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 موج شکست، آنالیز عیوب، تعمیر ماسکها و بهسازی مدارات پرداخته می شود. یکی از قابلیتهای بینظیر این

11

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 الکترود 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 می گیرد. با انجام عملیات فرزکاری بخشی از این سوئیچ برداشته می شود؛ بعد از عملیات برداشت، دیوار حاصل چرخانده شده و در حالت افقی قرار می گیرد و سپس عملیات پرداخت کاری^{۳۰} روی آن انجام می شود، سپس برای انجام عملیات تصویربرداری و آنالیز دوباره ۴۵ تا ۶۰ درجه چرخانده می شود (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 الکترودهای پلاتین روی زیرلایه، اتصال الکترودهای پلاتین واقع در زیر لایه اکسید سیلیکونی و اتصال لایه نازک اکسید سیلیکونی و سطح سیلیکون مورد بررسی و پردازش قرار می گیرد. علاوهبر 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

ذکر است با روش فوق، امکان تصویربرداری گام به گام مراحل ذکر شده نیز به راحتی فراهم است [۵و۶].

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

📕 انجام فرآیند ماشین کاری

روش فوق به دلیل امکان جابه جایی نمونه ها در راستای ۵ محور، دارا بودن قدرت بالا در انجام عملیات فرزکاری، رسوب گذاری و پرداخت کاری نمونه ها به صورت موضعی، امکان تصویربرداری و پایش لحظه ای تمام عملیات های فوق به عنوان تجهیزی بسیار قدرتمند، در عملیات ماشین کاری در مقیاس میکرو و نانو مورد استفاده قرار می گیرد. در حین انجام عملیات ماشین کاری فرآیندهای لیتو گرافی، کاشت و اچ کردن روی نمونه ها انجام می شود؛ به منظور آشنایی بیشتر با این فرآیند، برخی از روش های متداول قابل استفاده در ماشین کاری با روش پرتو یونی متمرکز – میکروسکوپ الکترونی روبشی مقایسه شده اند (جدول (۳)).

همان گونه که از جدول (۳) مشاهده می شود، روش فوق با دو روش لایه نشانی به روش شیمیایی^{۳۱} و استریولیتو گرافی^{۳۲} از لحاظ وضعیت رسوب دهی 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 رسوب دهی، نرخ اچ کردن، اندازه ساختارهای حاصل و ایجاد ساختارهای سه بعدی، دارای قدرت و دقت بسیار مناسب تری است ولی از معایب آن، زمان بر بودن فرآیند به خصوص در ایجاد ساختارهای با ابعاد بزرگ است. در این بخش، به بررسی برخی از کاربردهای این روش در ماشین کاری نمونه ها پرداخته شده است [۵]

■ 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

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

روش	هندسه سه بعدی	حداکثر ابعاد نمونه	محدوده اندازه ساختار	سرعت رسوبگذاری - سرعت اچ کردن
روش رسوبنشانی میکروسکوپ الکترونی - پرتو متمرکز یونی	+	۱٠	₹• mµ–nm₹••	•/•۵ m [°] µ s ⁻٬
لايەنشانى شيميايى	•	١	۱ mm–µm۱۰	··· m ^r μ s [−]
استريوليتوگرافى	++	n/a	۵ mm–µm۵	۱ m ^r μ s ⁻¹
عملیات فرزکاری در میکروسکوپ الکترونی - پرتو متمرکز یونی	+	۱۵	۵۰ mµ–nm۵۰	\ m^rμ s ⁻¹
برش لیزری	+	۵	۵ mm–µm۵	۵۰۰ m ^r µ s ⁻۱
روش تخليه الكتريكى	++	۱.	۱ mm–µm۱۰۰	\ m^rμ s ⁻¹

سنگین تر از الکترون ها است؛ بنابراین، پر تو یونی متمر کز کمتر از میدان مغناطیسی اثر می پذیرد و از طرف دیگر، با امکان انجام عملیات فرزکاری مستقیم و رسوب دهی مناسب با استفاده از الگوهای بارگذاری، نانو ساختارهای مغناطیسی مناسب ایجاد می شود. در این فرآیند، ابتدا با عملیات فرزکاری ساختار نانو مغناطیسی (سرهای مغناطیسی) ایجاد شده و سپس با فرآیند رسوب دهی، لایه تنگستن مغناطیسی در افزایش حجم محیطهای ذخیره سازی و کاهش ابعاد ساختار تا افزایش مراحل ساخت، ایجاد مراحتی با استفاده از این روش قابلیت پایش و تصویر برداری با قدرت تفکیک مناسب را دارند [۵].

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

■ ساخت پروب^{۴۶} میکروسکوپ نیروی اتمی^{۳۷}

همانگونے کے میدانیے، میکروسےکوپ نیےروی اتمے، یکی از پرکاربردترین میکروسکوپها است که به کمک آن می تـوان تو یو گرافی سـطح، زبـری سـطح، تغییـرات فـاز، تغییـرات اصطـکاک، خـواص مغناطیسـی، دانهبنـدی سـطح و ضخامت تک لایه ها را مورد بررسی قرار داد. یکی از اصلی ترین قسمتهای دستگاه، پروب بوده که مجموعهای از تیـرک^{۳۸} و یـک سـوزن^{۳۹} اسـت. جنـس پـروب بهطـور معمـول از جنـس سـیلیکون بـوده و طـول تیـرک آن در حـدود 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 حائر اهمیت است و از طرف دیگر، تیرک باید از میزان مقاومت کافی در برابر جابهجاییهای عمودی برخوردار باشـد. بهطـور معمـول پروبهـای AFM بـه دو روش، فرآینـد شـكلدهي معكوس سوزن باروش قالب كيرى ريخته كرى میکرونی و روش اچ کردن تر یا خشک ساخته میشوند. در حال حاضر، بسیاری از پروب ها به طور مستقیم از روش اچ ناهمسانگرد ایجاد می شوند؛ در این فرآیند، یک لایه SiO₂ با ضخامت ۱/۲ میکرومتر روی سطح سیلیکون پوشش داده شدهاست (شکل (۱۴ -الف)) و عملیات اچ کردن با محلول هيدروكسيد پتاسيم . * انجام مى شود (شكل (۱۴-ب))؛ سپس ماسک روی سوزن برداشته می شود (این مرحله شامل فتوليتو گرافي ماسك، عمليات اچ با استفاده از اسيد هیدروفلوئوریک، شستشو با استون و پروپان و خشک کردن در معرض نیتروژن است) (شکل (۱۴–پ))؛ دوباره پشت ویفر بهمنظور عمليات اچ کردن، پوشش SiO₂ داده شده (شکل (۱۴–ت)) و سیس مشابه قبل، ماسک برداشته می شود

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)) [۵و۷].

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

■ ساخت حسگر فشار گاز مطلق (*

حسگرهای فشار گاز، روزانه برای کنترل هزاران کاربرد، مورد استفاده قرار می گیرند، این حسگرها به طور معمول به صورت مبدل کار و سیگنالی از اثر تغییرات فشار تولید می کنند؛ یکی از انواع آن ها حسگر فشار گاز مطلق است. این حسگر از مواد پیزو الکتریک ساخته شده تا میزان کشش ناشی از فشار را اندازه گیری کند، این حسگر برای اندازه گیری فشارهای پویا به کار رفته و فشار یک نقطه نسبت به خلاء کامل را اندازه گیری می کند. بلورهای به کار رفته در ساختمان این نوع از حسگرها در اثر تغییر شکل مکانیکی، سیگنال الکتریکی تولید می کند، سطح ولتاژ این سیگنال متناسب با میزان تغییر شکل اعمالی است. این بلور به یک دیافراگم فلزی متصل می شود و از سمت دیگر برای اندازه گیری فشار در تماس با سیال (شکل (۱۴–ج)). با استفاده از روش لایهنشانی فیزیکی یک لایه SiO₂ به ضخامت ۳ میکرومتر و یک لایه Si₃N₄ به ضخامت ۱ میکرومتر روی سطح پروب داده می شود (شکل (۱۴–چ))، سپس ویفر دوباره با KOH اچ می شود (شکل (۱۴– ح)) و در نهایت، ویفر شستشو شده و دوباره در اسید قرار داده می شود تا لایه اکسیدی برداشته شود و در نهایت محصول نهایی (پروب) (شکل(۱۴–خ)) در داخل دستگاه آون در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت قرار می گیرد.

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

همان گونه که در قسمتهای بالا توضیح داده شد، مراحل ساخت پروبهای AFM با روشهای مرسوم بسیار زمان گیر و از طرف دیگر، ناخالصی های موجود در ویفر بسیار تاثیر گذار بر روند کار، بهخصوص سرعت اچ کردن است. با بکارگیری روش پرتو يونی متمرکز - ميکروسکوپ الکترونی روبشی در مدت زمان كمتر و با نظارت دقیقتری میتوان به تولید این پروبها پرداخت. با این روش، ابتدا با استفاده از فرآیند رسوب گذاری یون های گالیوم روی سطح ویفر کاشته می شود (شـکل (۱۵-الـف))، در مرحلـه بعـد، عمليـات فـرزکاری روی آن انجام می شود (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 می شود (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.

پر صیقلدهی مکانیکی تا حد امکان ضخامت نمونه کاسته و لایهای با
یار ضخامت حدودی ۵۰ میکرومتر تهیه می شود، سپس نمونه در داخل
ند دستگاه قرار داده شده و با استفاده از پرتو یونی، عملیات برش دادن دو
ای شیار، در دو طرف لایه مورد نظر انجام می گیرد (شکل (۱۹))، سپس
نی با انجام فرز کاری و پرداخت کاری ضخامت نمونه تا محدوده میکرومتر
نام و نانومتر می تواند کاهش پیدا کند. با توجه به شکل هندسی ایجاد
س شده (اگر از بالا نمونه دیده شود، مانند خط عرضی حرف H است) به
نام این روش آمادهسازی، روش H-bar نیز گفته می شود.

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 (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 می گیرد. به طور کلی، مراحل ساخت این حسگرها بسیار پیچیده، پر هزینه، زمان بر و نیاز به روش های پیشرفته لایه نشانی با خلاء کاری بسیار بالا است. از طرف دیگر، نمی توان هیچ گونه کنترل دقیقی بر کل فرآیند ساخت آنها به طور مستقیم داشت؛ لذا امروزه یکی از بهترین روش های 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 می شود (شکل های (۱۷ – الف) و (۱۷ – ب)) سپس فرآیند رسوب گذاری روی گودال^{۲۲} به صورت لایه لایه و طبقاتی انجام می گیرد (شکل (۱۷ – ب)). طی مراحل رسوب گذاری در خلاء کاری بالای دستگاه، در داخل حفره خلاء در حدود mbar ^{۹-} ۱۰ × ۵۰ حبس می شود، در اصطلاح به این روش تولید حسگر، کپسوله گذاری^{۳1} نیز گفته می شود.

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 اندازه گیری افت فشار، میزان نشتی حسگر فشار را در طول بازه زمانی مورد نظر اندازه گیری کنند [۵].

شكل (١٨): تصاوير ميكروسكوپ الكتروني از حسگر فشار گاز مطلق [۵].

📕 آمادهسازی نمونه و ایجاد لایههای نازک

یکی از مهم ترین کاربردهای این روش، آماده سازی نمونه ها به منظور بررسی میکرو سکوپی، به خصوص میکرو سکوپ الکترونی عبوری^{۴۴} است. برای تهیه اسلایدها و مقاطع عرضی^{۴۵} در ضخامت های مختلف از نمونه، دو روش کلی، روش برش مقطعی (روش پیش نازک^{۴۶}) و روش برداشت ^{۲۷} وجود دارد.

■ روش برش مقطعی

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

۱۵

پىنوشت

 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 Electeron (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 براحتی فراهم میشود. قابل ذکر است در این روش آمادهسازی، براحتی فراهم میشود. قابل ذکر است در این روش آمادهسازی، بمانظور کاهش اثرات کاشت یونهای گالیوم روی سطح، تغییر ساختار بلوری به آمورف در اثر برخورد پرتو یونی و کاهش جزییات ماختار بلوری به آمورف در اثر برخورد پرتو یونی، و کاهش مزییات 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)) [۱۰۹.۲ و ۱۱].

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

امروزه، توسعه سريع روش پرتو يونی متمرکز – میکروسکوپ الکترونی روبشی باعث شدهاست که این تجهیز بهعنوان ابزاری توانا در انجام بسیاری از یروژهها 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 امکان پذیر 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 چشم گیری 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.

مراجع

[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 dol 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. Hrncir2, A. David3, P. Sudraud1, F. Lopour2.

[11] EUFN 2017, 1st European FIB Network Workshop July 4th–July 5th Graz, Austria

۱۷