



مقدمه

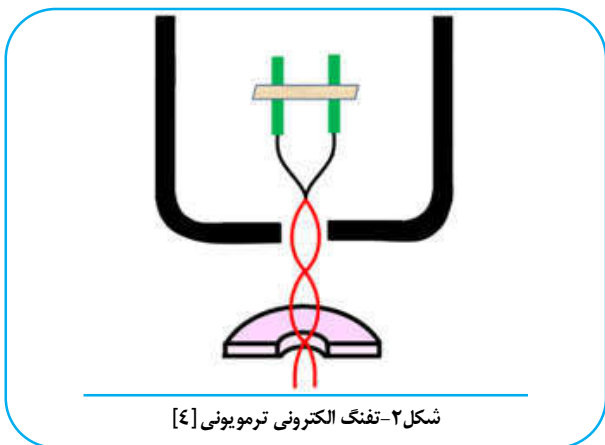
ساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی

با شرح ساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیسم تشکیل تصویر نیز روشن خواهد شد. در این متن، با گذر از تاریخچه ساخت و سیر تکامل، به توضیح بخش‌های معمول در یک میکروسکوپ الکترونی روبشی، کارکرد و وظیفه هر یک از اجزا در تشکیل تصویر پرداخته می‌شود. [۱، ۳]

همان طور که ذکر شد، عامل به‌وجودآورنده تصویر، یک باریکه از الکترون است؛ بنابراین، در ابتدا به یک منبع تولید الکترون یعنی تفنگ الکترونی^۷ نیاز است. پس از تولید الکترون، آن‌ها را به سمت نمونه مورد مطالعه شتاب می‌دهند تا برخورد صورت گیرد. بنابراین، یک سیستم برای شتابدهی الکترون‌ها، و سیستمی دیگر برای تشکیل و جهت‌دهی و کنترل باریکه الکترونی لازم است. در مرحله بعد، الکترون‌های در تعامل با ماده، توسط یک یا چند آشکارساز مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند که منجر به تشکیل تصویر می‌گردد. در ادامه بخش‌های مختلف میکروسکوپ به صورت مختصر توضیح داده می‌شوند.

تفنگ الکترونی

نقش تفنگ الکترونی، تولید الکترون به صورت پیوسته و پایدار و همچنین تشکیل باریکه الکترونی است. انواع مختلفی از تفنگ‌های الکترونی وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها تفنگ‌های الکترونی گرمایونی یا ترمیونی^۸ است که به آن‌ها سه قطبی نیز گفته می‌شود؛ چرا که دارای سه بخش اصلی (قطب) است. (شکل ۲)

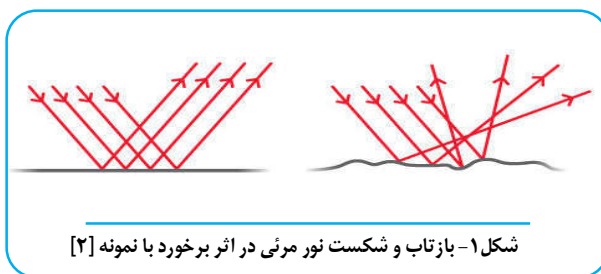


شکل ۲- تفنگ الکترونی ترمیونی [۴]

بخش اول، رشته‌ای^۹ از جنس تنگستن و یا استوانه کوچکی از جنس لاتانیوم هگزابوراید^{۱۰} است که در اثر عبور جریان الکتریکی از آن، گرم شده و الکترون ساطع می‌کند. فیلامان و یا نوک استوانه به صورت V شکل ساخته می‌شود (شکل ۳) این بخش از تفنگ الکترونی مصرفی بوده و پس از مدتی (در حدود ۱۰۰ ساعت کاری) تعویض می‌گردد. [۱، ۳]

میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱، پُرکاربردترین ابزار پرتو الکترونی در جهان است. قبل از پرداختن به میکروسکوپ الکترونی روبشی، به عنوان مقدمه و مقایسه، مطلب کوتاهی در مورد میکروسکوپ نوری ارائه می‌شود که در درک کارکرد میکروسکوپ الکترونی کمک شایانی خواهد نمود.

در میکروسکوپ نوری^۲ از نور مرئی (موج الکترومغناطیس در ناحیه مرئی) به عنوان عامل به‌وجودآورنده تصویر استفاده می‌شود. به این ترتیب که نور مرئی^۳ پس از عبور از یک یا چند عدسی، متمرکز شده، به نمونه برخورد کرده و بازتاب می‌یابد. در اثر شکست نور در برخورد با نمونه و بازتاب یافتن پرتوهای نور در جهات مختلف، تصویر بر روی عدسی چشمی میکروسکوپ یا بر روی یک نمایشگر تشکیل می‌گردد. به عبارت دیگر، مکانیسم تشکیل تصویر، شکست نور است. اگر پرتوهای نور، دچار شکست نشوند، یک تصویر کاملاً یکدست (یک صفحه سفید) و بی‌معنا حاصل خواهد شد. طول موج نور مرئی ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است، بنابراین ذراتی با ابعاد کوچک‌تر از این محدوده طول موج، حتی در بزرگ‌نمایی‌های بسیار زیاد، با نور مرئی قابل رؤیت نیستند [۱]



شکل ۱- بازتاب و شکست نور مرئی در اثر برخورد با نمونه [۲]

در میکروسکوپ الکترونی روبشی به جای نور مرئی از پرتویی از جنس الکترون با عنوان باریکه الکترونی^۴ به عنوان عامل به‌وجودآورنده تصویر استفاده می‌شود که در اثر آن بزرگ‌نمایی^۵ و قدرت تفکیک^۶ میکروسکوپ، به شدت افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که ذراتی به کوچکی چند نانومتر قابل مشاهده خواهد بود. در اثر برخورد باریکه الکترون با نمونه مورد مطالعه، پدیده‌های مختلفی رخ می‌دهد. آگاهی از این پدیده‌ها برای فهم دقیق مکانیسم تشکیل تصویر در میکروسکوپ الکترونی روبشی لازم است. در ادامه با شرح ساختار میکروسکوپ الکترونی، به مکانیسم تشکیل تصویر اشاره خواهد شد.

- 1 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 2 Light Microscope, Optical Microscope (OM)
- 3 visible light
- 4 electron beam
- 5 magnification
- 6 resolution

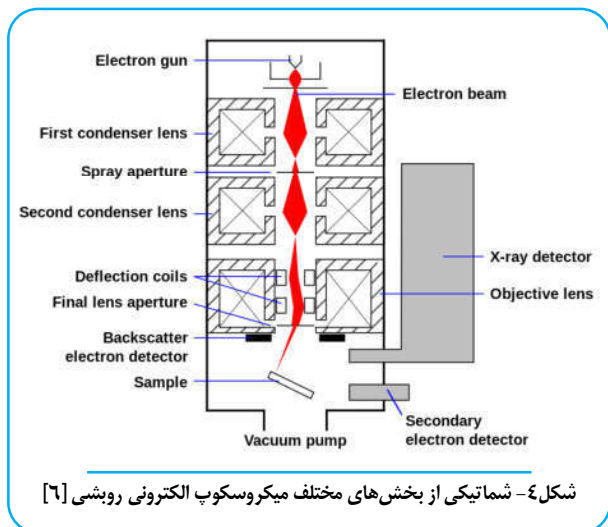
- 7 electron gun
- 8 thermionic electron gun
- 9 filament
- 10 LaB6

ستون الکترونی^۳

پس از آن که باریکه الکترونی تولید و جهت‌دهی شد، باید قطر باریکه الکترونی کاهش یابد تا تعداد الکترون‌های تعامل‌کننده با ماده در واحد سطح، افزایش یابد. برای این کار از دو عدسی الکترومغناطیسی^۴ استفاده میشود که وظیفه آن‌ها مانند عدسی‌های نوری در میکروسکوپ نوری، کانونی کردن باریکه الکترونی است؛ با این تفاوت که فاصله کانونی این عدسی‌ها ثابت نیست. به عبارت دیگر با تغییر جریان عبوری از این عدسی‌های الکترومغناطیسی، می‌توان فاصله کانونی آن‌ها را تغییر داد. این دو عدسی الکترومغناطیسی به صورت مشترک و همزمان بر روی باریکه الکترونی عمل می‌کنند و قطر باریکه الکترونی را به کمترین میزان خود^۵ (در حدود ۱۰ نانومتر) می‌رسانند.

در مرحله بعد، باریکه الکترونی از یک عدسی متمرکزکننده^۶ و یک روزنه یا دهانه با قطر متغیر عبور می‌کند و به نمونه می‌رسد. وظیفه عدسی متمرکزکننده، تنظیم دقیق باریکه الکترونی بر روی نمونه است. روزنه انتهایی نیز به این عملکرد کمک می‌کند.

پُر واضح است که باریکه الکترونی فقط بر روی یک نقطه از نمونه (نقطه برخورد) عمل می‌کند؛ بنابراین برای دریافت تصویر از یک سطح، نیاز است که این باریکه بر روی نمونه جابجا شود یا اصطلاحاً نمونه را جاروب یا روبش^۷ کند که با تعبیه کوپل‌های روبشی^۸ در ستون الکترونی، این امکان فراهم شده است. به عبارت دیگر نمونه در محل خود ثابت است و باریکه الکترونی نمونه را روبش می‌کند. به همین دلیل است که نام میکروسکوپ روبشی را به این تجهیز اختصاص داده‌اند. (شکل (۴)) [۳، ۱]



- 3 Electron Column
- 4 Electron Lens, Electromagnetic Lens, Condenser Lens
- 5 Spot Size
- 6 Objective Lens
- 7 scan
- 8 Scanning Coils



از آن جا که الکترون‌های تولید شده در فیلامان، در همه جهت‌ها منتشر می‌شوند، از یک کلاهک منفذدار^۱ برای تشکیل باریکه الکترونی که دقیقاً بر روی رشته تنگستنی واقع شده است، استفاده می‌گردد. (شکل (۲))

تا اینجا الکترون‌های مورد نیاز، تولید و باریکه الکترونی تشکیل شده است. آخرین وظیفه تفنگ الکترونی، شتاب‌دهی به الکترون‌ها به سمت نمونه است. بدین منظور بین فیلامان تنگستنی و یک صفحه که در زیر کلاهک است، اختلاف پتانسیلی برقرار می‌گردد که در این حالت فیلامان نقش کاتد، و صفحه نقش آند را بازی خواهند کرد. بدین ترتیب باریکه الکترونی شتاب گرفته و از تفنگ خارج می‌گردد. این اختلاف پتانسیل که به ولتاژ میکروسکوپ نیز معروف است، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند هر چه این ولتاژ بیشتر باشد الکترون‌ها شتاب بیشتری به خود گرفته و با انرژی بیشتری به نمونه برخورد می‌کنند که تأثیری مستقیم بر کیفیت تصویر حاصله دارد. معمول‌ترین بازه اعمال ولتاژ ۲۰ تا ۲۵ کیلوولت است. [۳، ۱]

سیستم خلأ^۲

علی‌رغم شتاب زیاد، از آن جا که الکترون‌ها جرم ناچیزی دارند در صورت برخورد به ملکول‌های هوا، گُند و منحرف می‌شوند. در نتیجه، تعداد برخوردهای مفید الکترون‌ها و تعاملات آن‌ها با ماده مورد مطالعه کم شده و کیفیت تصویر به شدت آفت می‌کند همچنین اگر دمای رشته تنگستنی، در معرض هوای حاوی اکسیژن افزایش یابد تنگستن به سرعت اکسید می‌شود. به همین دلیل، نیاز است که دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی که شامل نمونه نیز می‌شود، از هوا تخلیه گردد؛ بنابراین، فقط نمونه‌های جامد و مایع با فشار بخار پایین قابلیت آن را دارند که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری شوند. فشار خلأ در دستگاه‌های مختلف متفاوت بوده و گاهی تا تور^۲ کاهش می‌یابد. این خلأ توسط انواع پمپ‌ها ایجاد می‌شود که هزین‌بر اما ضروری است. [۳، ۱]

- 1 wehnelt cylinder, grid cap
- 2 torr

محفظه نمونه^۱

به دو آشکارگر جداگانه برای هر یک از سیگنال‌های فوق نیاز است. این آشکارسازها درون محفظه دستگاه و نزدیک به نمونه تعبیه شده‌اند. انواع مختلفی از آشکارسازها وجود دارد که طی فرایندهای پیچیده‌ای، سیگنال بازگشتی از ماده را به تصویر تبدیل می‌کنند.

آماده‌سازی نمونه

آماده‌سازی هر نمونه با در نظر گرفتن هدف تصویربرداری و قبل از آن انجام می‌گیرد. گاهی به یک سنباده‌زنی ساده اکتفا شده و گاهی انواع فرایندهای حکاکی^۸ بر روی نمونه انجام می‌گیرد. همان طور که ذکر شد، تشکیل تصویر در میکروسکوپ الکترونی روبشی منوط به برخورد الکترون به نمونه است؛ بنابراین، نمونه‌های غیررسانا را توسط لایه نازکی از یک ماده رسانا مانند طلا یا گرافیت پوشش می‌دهند تا نمونه در سطح خود رسانا گردد. [۳، ۱]

ویژگی و کاربردهای میکروسکوپ الکترونی روبشی

- ✓ تصویر گرفتن از سطوح در بزرگنمایی ۱۰ تا ۱۰۰/۰۰۰ برابر با قدرت تفکیک در حد ۳ تا ۱۰۰ نانومتر
- ✓ متالوگرافی در بزرگنمایی‌هایی بسیار بیشتر از میکروسکوپ نوری
- ✓ بررسی مقاطع شکست و سطوحی که حکاکی عمیق شده‌اند
- ✓ بررسی‌های کریستالوگرافی نظیر ارزیابی دانه‌ها، فازهای رسوبی و دندریت‌ها
- ✓ بررسی قطعات نیمه‌هادی برای آنالیز شکست، کنترل عملکرد و تأیید طراحی نمونه‌ها و...

امروزه میکروسکوپ الکترونی روبشی، کارکردهای بسیار وسیعی در میکروآنالیز پیدا کرده است که در این رابطه می‌توان به کلیدواژه‌های زیر اشاره نمود:

Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS, EDX, EDXS or XEDS)

Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDXA)

Energy Dispersive X-Ray Microanalysis (EDXMA)

نمونه مورد مطالعه توسط اپراتور، درون محفظه دستگاه و بر روی یک پایه^۲ قرار داده می‌شود. محدودیت ابعاد نمونه در دستگاه‌های مختلف متفاوت است. محفظه‌های بزرگی وجود دارند که نمونه‌هایی به بزرگی ۲۰ سانتی‌متر را نیز در خود جای می‌دهند. پس از آن که نمونه در محفظه قرار داده شد، سیستم خلأ فعال شده و پس از رسیدن به فشار مورد نظر، تصویربرداری آغاز می‌شود. از آن جا که سیستم باید دائماً تحت خلأ باقی بماند، امکان تعویض و تغییر وضعیت نمونه حین تصویربرداری وجود ندارد. به همین دلیل معمولاً پایه‌ها به گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که همزمان چند نمونه را در خود جای داده و تا حدی قابلیت تغییر زاویه و چرخش نیز داشته باشند.

آشکارسازهای الکترونی^۳

در اثر برخورد الکترون و تعامل آن با ماده، پدیده‌های مختلفی رخ می‌دهد و بازتاب‌هایی از ماده صورت می‌گیرد که به اختصار آن‌ها را سیگنال^۴ می‌نامند. در شکل ۵ برخی از سیگنال‌های بازگشتی از ماده در اثر برخورد الکترون و محدوده اثر آن‌ها^۵ در درون ماده آورده شده است. [۳، ۱]

اگر چه دریافت و تحلیل دیگر سیگنال‌ها نیز به طور موفقیت‌آمیزی در برخی میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و دیگر دستگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، اما دو سیگنال اصلی که در همه میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی مورد بهره‌برداری قرار دارد، الکترون‌های ثانویه^۶ (SE) و الکترون‌های بازگشتی^۷ (BSE) هستند. هر یک از الکترون‌های ثانویه و بازگشتی از بخش مشخصی از ماده بازتاب یافته‌اند و حاوی اطلاعاتی راجع به همان بخش از ماده‌اند؛ بنابراین، باید هر دو سیگنال آشکار گردد تا بتوان به اطلاعات ماده در سطح و عمق دست یافت. در نتیجه

- 1 sample chamber
- 2 stage
- 3 electron detectors
- 4 signal
- 5 interaction volume
- 6 Secondary Electrons (SE)
- 7 Backscattered Electrons (BSE)

[۱] مریم کرباسی، "میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو"، جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی اصفهان)، ۱۳۹۳

[2] <https://www.quora.com/Why-does-light-reflect-only-from-a-shiny-surface>

[3] Peter J. Goodhew, John Humphreys, Richard Beanland, "Electron Microscopy and Analysis", Third Edition, CRC Press, 2000.

[4] <https://myscope.training/legacy/sem/practice/principles/gun.php>

[5] http://www.snaggedworks.com/em_for_dummies/gun.html

[6] <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=67>

