



باید توجه شود که برای عملکرد بهتر دستگاه، SEM باید در خلأ کار کند؛ بنابراین، سرانجام نمونه را در دستگاه قرار داده، سیستم خلأ فعال می‌شود و پس از رسیدن به فشار موردنظر تصویربرداری آغاز می‌شود.

شرط تشکیل تصویر در میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی، برخورد الکترون‌ها به نمونه است. به همین دلیل باید به رسانا بودن یا نبودن نمونه توجه شود. در آماده‌سازی نمونه‌های رسانا، تنها اچ و پولیش کافی است اما برای مواد نارسانا باید نمونه را با یک لایه نازک از گرافیت، طلا یا آلیاژهای طلا پوشش داد تا سطح نمونه رسانا شود.

از دیگر مزیت‌های SEM می‌توان به عدم نیاز به نمونه شفاف، بررسی تمام نمونه‌های رسانا و نارسانا، امکان تصویربرداری در سه بعد، آماده‌سازی اولیه آسان نمونه‌ها، راحت بودن کار با دستگاه و سرعت بالای آن اشاره کرد.

این میکروسکوپ‌ها با وجود مزیت‌های متعدد، محدودیت‌هایی دارند؛ از جمله نیاز به خلأ بالا، سیاه و سفید بودن تصاویر و وضوح پایین (بیشتر از چندده نانومتر).

از کاربردهای میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان به بررسی مقاطع شکست، بررسی‌های کریستالوگرافی نظیر بررسی فازهای رسوبی و دندریته‌ها، بررسی قطعات نیمه‌رسانا، ابررساناها، سرامیک‌ها، مواد مغناطیسی، لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها اشاره کرد. هم‌چنین این دستگاه امکان بررسی ساختارهای نانو کامپوزیت‌ها، پوشش‌های نانو ساختار، نانوالیاف نمونه‌های بیولوژیکی و نانوساختارهای دارویی را می‌دهد.

میکروسکوپ الکترونی عبوری

میکروسکوپ الکترونی عبوری یکی از قدرتمندترین ابزارهای موجود در دنیا برای مطالعه مواد و ساختار آن‌ها در مقیاس نانو و حتی کوچک‌تر از آن است. قدرت تفکیک این میکروسکوپ به کوچکی ۰/۱ تا ۱ نانومتر و بزرگ‌نمایی آن به ۱۵۰۰۰۰ برابر می‌رسد، به گونه‌ای که ذره‌ای با ابعاد چند آنگستروم را قابل مشاهده می‌سازد. TEM از ابزارهای ویژه در مشخص نمودن ساختار و مورفولوژی مواد محسوب می‌شود. علاوه بر این از آن جهت مطالعه ساختار، تقارن، جهت‌گیری و نقائص بلوری می‌توان استفاده نمود. در این میکروسکوپ مانند SEM به جای نور از الکترون استفاده می‌شود. اجزای TEM شامل تفنگ الکترونی، عدسی‌ها، محفظه نمونه، سیستم تصویر، صفحه نمایش و پمپ خلأ می‌باشد.

در این میکروسکوپ، از عدسی‌های الکترومغناطیسی استفاده شده است تا الکترون‌ها را روی نمونه متمرکز کرده و به صورت یک پرتوی باریک گسیل کنند.

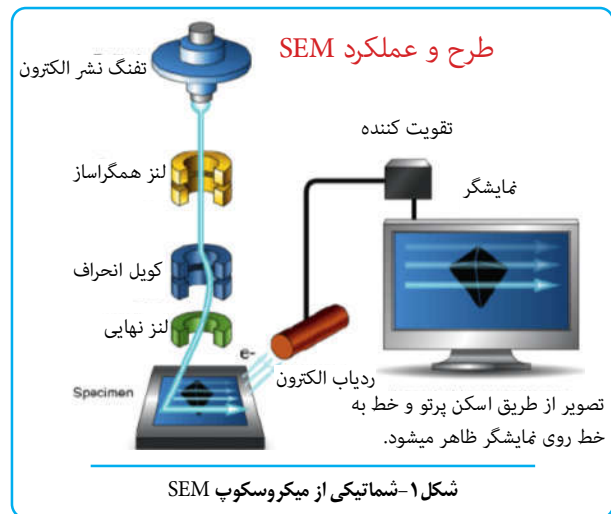
در گستره علم و پژوهش، میکروسکوپ‌های فراوانی به منظور مشاهده سطح مواد به کار می‌روند. از مهم‌ترین میکروسکوپ‌های جدید می‌توان به میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱، میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ و میکروسکوپ نیروی اتمی^۳ اشاره کرد قبل از پرداختن به جزئیات این میکروسکوپ‌ها، لازم است تا نحوه کارکرد آن‌ها به صورت ساده شرح داده شود.

میکروسکوپ الکترونی روبشی

SEM از پرکاربردترین ابزار الکترونی در جهان است. این میکروسکوپ در سال ۱۹۳۵ توسط آزمایش ماکس نول^۴ در آلمان اختراع و سپس در سال ۱۹۶۵ به صورت تجاری روانه بازار شد برخلاف میکروسکوپ‌های نوری که در آن‌ها از نور مرئی به عنوان پدیدآورنده تصویر استفاده می‌شود، در میکروسکوپ الکترونی روبشی باریکه الکترونی عامل به وجودآورنده تصویر است. به همین علت بزرگنمایی و قدرت تفکیک آن نسبت به میکروسکوپ نوری به شدت افزایش یافته است؛ به طوری که این میکروسکوپ دارای بزرگنمایی ۱۰ تا ۱۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیک در حد ۳ تا ۱۰ نانومتر است. در نتیجه با این میکروسکوپ ذرات به کوچکی چند نانومتر را می‌توان مشاهده کرد.

مزیت مهم این میکروسکوپ، تهیه تصاویر مستقیم و نقطه به نقطه از سطح نمونه با وضوح و قدرت تفکیک بالا است.

SEM دارای سه بخش اصلی تفنگ الکترونی، ستون الکترونی و محفظه دستگاه است. در تفنگ الکترونی، الکترون‌ها پس از تولید برای برخورد با سطح نمونه شتاب می‌گیرند؛ سپس یک ستون از الکترون‌ها تولید می‌شود که برای تمرکز پرتو بر روی نمونه، شعاع آن را به کمک چند لنز الکترومغناطیس کاهش می‌دهند. این پرتوهای الکترونی که با نمونه برخورد می‌کنند دارای انرژی حدود ۱ تا ۵۰ الکترون‌ولت هستند.



- 1 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 2 Transmission Electron Microscopy (TEM)
- 3 Atomic Force Microscopy (AFM)
- 4 Max Knoll

در میکروسکوپ‌های TEM به این دلیل که باید تعداد زیادی الکترون از نمونه عبور کند، ضخامت نمونه باید خیلی کم باشد. پس در آماده‌سازی نمونه ابتدا باید نمونه را بسیار نازک کرد؛ این عملیات با استفاده از روش‌های مکانیکی مانند پولیش مکانیکی و یا روش‌های شیمیایی مانند الکتروپولیش امکان‌پذیر است. همچنین باید نمونه‌های نارسانا را با استفاده از یک لایه نازک طلا یا گرافیت رسانا کرد.

تفاوت‌های میکروسکوپ SEM و TEM

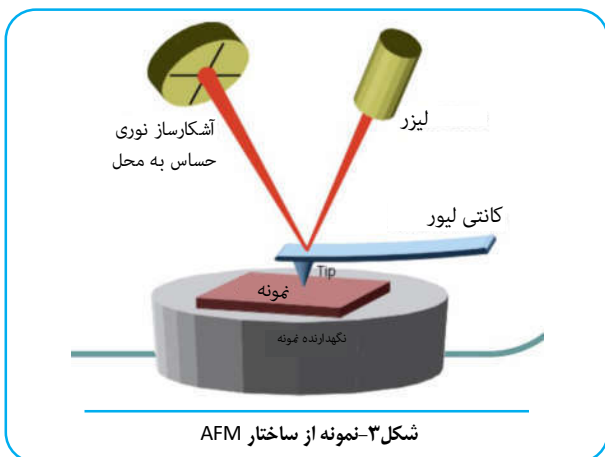
در SEM پرتو به سطح ماده می‌خورد و سطح نمونه را مورد آنالیز قرار می‌دهد، اما در TEM پرتو از نمونه عبور می‌کند و داخل نمونه را بررسی می‌کند. به همین دلیل شتاب الکترون‌ها در TEM از SEM بیشتر است و نمونه باید بسیار نازک‌تر باشد. پس در نتیجه آماده‌سازی نمونه در میکروسکوپ TEM سخت‌تر از SEM است.

دیگر تفاوت مهم این دو میکروسکوپ در قدرت تفکیک و بزرگ‌نمایی است، به طوری که در TEM بزرگ‌نمایی و قدرت تفکیک به ترتیب تا $1/10$ نانومتر و 50 تا 1500000 برابر می‌تواند باشد اما در SEM این مقادیر $1/5$ نانومتر و 10 تا 1000000 برابر است.

SEM به صورت خط به خط نمونه را مورد آنالیز قرار می‌دهد اما TEM دارای پرتوی الکترونی عریض است و کل نمونه را در یک مرحله آنالیز می‌کند.

میکروسکوپ نیروی اتمی

این میکروسکوپ در سال ۱۹۸۶ در شرکت NEC و توسط دانشمندان گرد بینینگ^۱ و کوات^۲ برای مطالعه خواص مکانیکی سطوح ساخته شد. در این میکروسکوپ‌ها یک سوزن به طول تقریبی ۲ میکرومتر و قطر کمتر از ۱۰ نانومتر به یک تیرک که دارای طول و قطر ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر می‌باشد، متصل است. تیرک باید خاصیت ارتجاعی بالایی داشته باشد تا در اثر تحریک الکتریکی از خود حرکت مکانیکی نشان دهد، بنابراین معمولاً جنس آن از سیلیوم یا سیلیسیم نیتريد بوده و دارای مقاومت بالایی در برابر فرسایش می‌باشد.



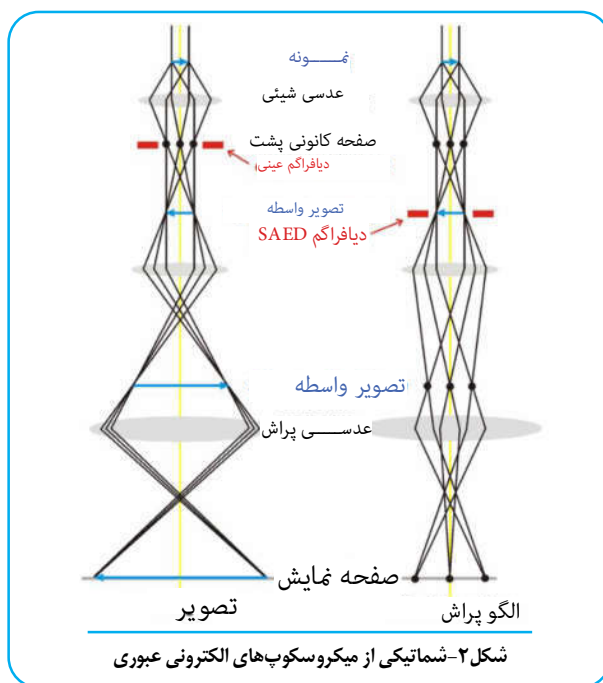
روش عملکرد میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری به طور خلاصه به این شرح است: یک پرتوی الکترونی از سطح نمونه عبور داده می‌شود و پس از عبور از عدسی‌ها به صفحه نمایش فلئوئوسنت برخورد کرده و تشکیل تصویر می‌دهد. رنگ این تصاویر بستگی به میزان الکترون عبوری از نمونه دارد؛ نواحی روشن‌تر، الکترون‌های بیشتر و نواحی تاریک‌تر، الکترون‌های کمتری دریافت کرده‌اند.

تصاویر تشکیل شده به دو صورت است:

- تصاویر زمینه روشن
- تصاویر زمینه تاریک

در تصاویر زمینه روشن، در نواحی که نمونه وجود دارد یا ضخامت نمونه بیش‌تر است تصویر به صورت تاریک دیده می‌شود و زمینه به صورت روشن. این نوع تصاویر چون ریزساختار را به خوبی نشان می‌دهند، به منظور بررسی حالت‌های بلوری، وضعیت و نقایص دانه استفاده می‌شوند.

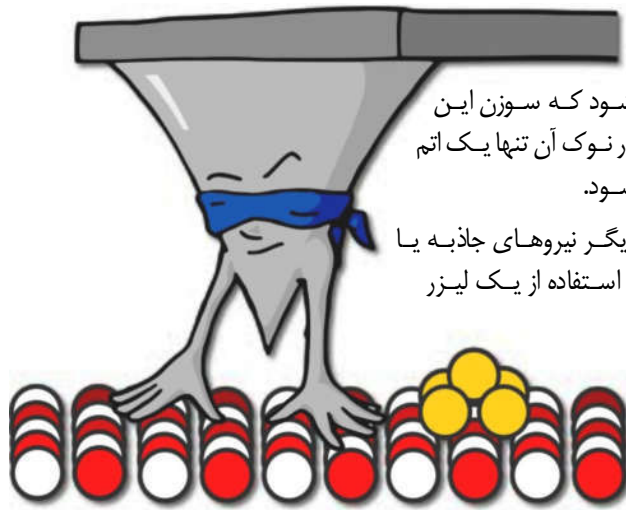
تصاویر زمینه تاریک برعکس تصاویر زمینه روشن هستند. در این تصاویر زمینه به صورت تاریک و در نواحی وجود نمونه، تصویر به صورت روشن است. این تصاویر در مشخص کردن نقائص بلوری و کنتراست پراش کاربرد دارند اما دارای حد تفکیک پایینی هستند.



از میکروسکوپ TEM برای تعیین خستگی، اکسیداسیون، رسوب، جهت رشد مواد بلورین، بردار برگرز، بررسی سطوح شکست و شناسایی ترکیب شیمیایی استفاده می‌شود.

از محدودیت‌های این میکروسکوپ می‌توان به فرآیند سخت و زمان‌بر آن، قدرت تفکیک پایین (حدود $1/2$ نانومتر)، میدان دید کوچک و آسیب رساندن اشعه به نمونه اشاره کرد. همچنین این میکروسکوپ‌ها امکان ایجاد تصویر رنگی را ندارند و نمونه‌های گازی، مایع و ضخیم را نمی‌توانند آنالیز کنند.

1 Gerd Binnig
2 Quate



جنس سر دیگر انبرک متصل به بازویی از ماده‌ای پیزوالکتریک است؛ این پیزوالکتریک با ایجاد تغییرات و ولتاژ بسیار کوچک، در راستای x ، y و z حرکت می‌کند. باید توجه شود که سوزن این میکروسکوپ باید بسیار تیز باشد به طوری که در حالت ایده‌آل در نوک آن تنها یک اتم جای گیرد سطح نمونه با استفاده از این سوزن روبش می‌شود.

در این حالت اتم‌های سوزن و اتم‌های سطح ماده به یکدیگر نیروهای جاذبه یا دافعه وارد می‌کنند که باعث ایجاد انحنای تیرک می‌شود. با استفاده از یک لیزر که حرکات تیرک را آنالیز می‌کند، یک سیگنال به آشکارساز ارسال و ثبت می‌شود. برای انعکاس بیشتر لیزر، تیرک را با یک لایه‌ای بسیار نازک از فلزاتی مانند طلا، آلومینیوم یا نقره پوشش می‌دهند. با روبش خط به خط تمام سطح نمونه، تصویر و توپوگرافی سطح به دست می‌آید و خواص سطحی مثل پستی و بلندی‌ها، چسبندگی، میزان اصطکاک و خواص مغناطیسی بررسی می‌شود.

نیروهای بین سوزن و سطح نمونه می‌تواند وان‌دروالسی، الکترواستاتیکی، موینگی و مغناطیسی باشد. بسته به وجود این نیروها و فاصله بین سوزن و سطح نمونه، حالت‌های تصویربرداری به سه دسته حالت تماسی، غیرتماسی و ضربه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. از حالت تماسی برای نمونه‌های سخت و از غیرتماسی برای نمونه‌های نرم و زیستی استفاده می‌شود. قدرت تفکیک حالت غیرتماسی نسبت به حالت تماسی کمتر است.

از حالت ضربه‌ای برای بررسی نمونه‌های آسیب‌پذیر در حالی که نیاز به قدرت تفکیک بالا باشد، استفاده می‌شود. مقایسه حالت‌های گوناگون این میکروسکوپ در جدول زیر آورده شده است:

حالت عملیاتی	مزایا	معایب
تماسی	<ul style="list-style-type: none"> ✓ سرعت روبش بالا ✓ نمونه‌های سفت به راحتی روبش می‌شوند 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ نیروهای جانبی اثر منفی بر تصویر می‌گذارند ✗ صدمه زدن به نمونه و کاهش قدرت تفکیک
ضربه‌ای	<ul style="list-style-type: none"> ✓ حذف نیروهای جانبی ✓ قدرت تفکیک بالاتر ✓ صدمه کمتر به نمونه 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ سرعت روبش پایین‌تر
غیرتماسی	<ul style="list-style-type: none"> ✓ مناسب نمونه‌های نرم ✓ در خلا بسیار بالا قدرت تفکیک اتمی می‌دهند 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ سرعت روبش پایین‌تر

جدول ۱- مقایسه حالت‌های AFM

همچنین از AFM می‌توان برای نمونه‌های رسانا، عایق و نیمه‌رسانا استفاده کرد، پس در نتیجه هیچ محدودیتی از لحاظ خواص فیزیکی مواد برای بررسی انواع نمونه‌ها ندارد و این از مهم‌ترین مزیت‌های این دستگاه است. این نوع میکروسکوپ نسبت به سایر روش‌های آنالیز آماده‌سازی و کاربرد آسان‌تری دارد؛ همچنین کار در محیط‌های خلأ و هوا و کاهش هزینه‌ها، منجر به تمایز بین استفاده از این میکروسکوپ با سایر روش‌های آنالیز شده است. از میکروسکوپ نیروی اتمی در علوم مختلف از جمله الکترونیک، فضاوردی، انرژی، نانوفناوری، علم مواد، داروسازی، دیسک‌های حافظه و ... استفاده می‌کنند.

محدودیت‌های این روش نیز بازه بزرگ‌نمایی محدود و امکان آسیب رسیدن به نوک سوزن یا نمونه می‌باشد.

- [1] Zhou, W., Wang, Z. L. (Editors), "Scanning Microscopy for Nanotechnology - Techniques and Applications", New York: Springer, (2006).
- [2] Goldstein, J. I., Newbury, D., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., Michael, J. R., "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis", 3rd Edition. New York: Kluwer Academic/Plenum, (2003).
- [3] Sriamornsak, P., Thirawong, N., "Use of back-scattered electron imaging as a tool for examining matrix structure of calcium pectinate", International Journal of Pharmaceutics, Vol. 267, pp. 151–156, (2003).
- [4] Transmission Electron Microscopy a Textbook for Materials Science, David B. Williams, C. Barry Carter, springer, 2009.
- [5] Jian Min Zuo, John C.H. Spence, "Advanced Transmission Electron Microscopy: Imaging and Diffraction in Nanoscience", 1 ed., Springer-Verlag, New York, 2017.
- [6] Prof. Dr. Brent Fultz, Prof. Dr. James M. Howe (auth.) "Transmission Electron Microscopy and Diffraction of Materials", Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [7] Snehajyoti Chatterjee, Shrikanth S Gadad and Tapas K Kundu, "Atomic Force Microscopy: A Tool to Unveil the My stery of Biological Systems", 2010
- [8] V. Bellitto, "Atomic Force Microscopy - Imaging, Meas., Manip. Surfs. at the Atomic Scale", Intech, 2012
- [9] Greg Haugstad, "Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications", 2012.
- [10] Peter Eaton, Paul West, "Atomic Force Microscopy", Oxford University Press, USA, 2010.

