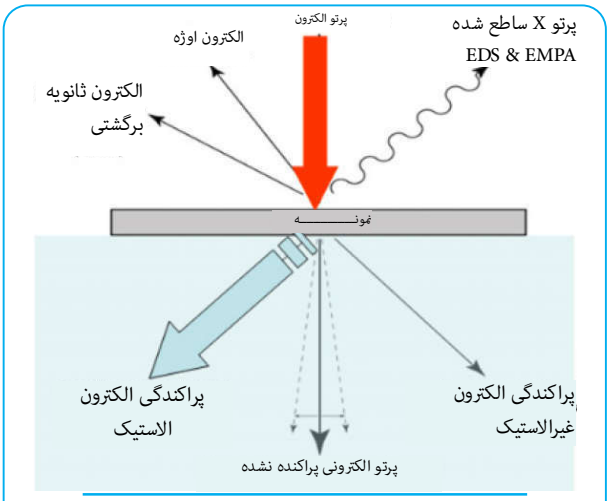
ابوالفضل انوری / کارشناسی مهندسی مواد دانشگاه تهران

مقدمه

میکروسکوپ الکترونی عبوری[1] یکی از قدرتمندترین ابزارهای موجود در دنیا برای مطالعه مواد و ساختار آن‌ها در مقیاس نانو و حتی کوچکتر از آن است. قدرت تفکیک[2] این میکروسکوپ به کوچکی ۰/۱ تا ۱ نانومتر و بزرگنمایی[3] آن به ۱۵۰۰۰۰۰ برابر می رسد، به گونه‌ای که ذرهای با ابعاد چند آنگستروم (۱A=۱۰$^{-۱۰}$m) قابل مشاهده خواهد بود. قبل از تشریح مکانیسم عملکرد و کارکردهای این میکروسکوپ، یک مثال ساده را بررسی میکنیم: دیواری را فرض کنید که درون آن یک سوراخ وجود دارد. اگر منبع نوری در یک طرف دیوار روشن شود، تصویری از روزنه‌ی دیوار، در طرف دیگر آن شکل می‌گیرد که تقریباً تمامی جزئیات آن را به تصویر می‌کشد. چنین مکانیسمی در میکروسکوپ الکترونی عبوری به کار گرفته شده است، با این تفاوت که به جای منبع نور از الکترون استفاده می‌شود. در واقع، باریکه‌ای از الکترون، تولید شده و از نمونه‌ای نازک عبور داده می‌شود. مطالعه و بررسی برهم‌کنش الکترون با ماده‌ی مورد نظر، اطلاعات فوق‌العاده‌ای از ساختار ماده را (حتی در مقیاس اتمی) آشکار می‌کند. [۱]

در اثر برخورد الکترون با ماده، پدیده‌های مختلفی رخ می‌دهد که هر یک مکانیسم منحصر به فرد خود را داراست و هر یک نوعی خاص از اطلاعات را به همراه دارد (شکل (۱)) تولید پرتو ایکس[4]، الکترون‌های بازگشتی[5]، الکترون‌های ثانویه[6]، پراکندگی الاستیک[7] الکترون، پراکندگی غیرالاستیک[8] الکترون و ... از جمله این پدیده‌هاست. در میکروسکوپ الکترونی عبوری تقریباً تمامی این سیگنال‌ها آشکارسازی شده و اطلاعات آن استخراج می‌گردد؛ بنابراین، قبل از مطالعه میکروسکوپ الکترونی عبوری لازم است که با این پدیده‌ها آشنا باشیم. [۱]

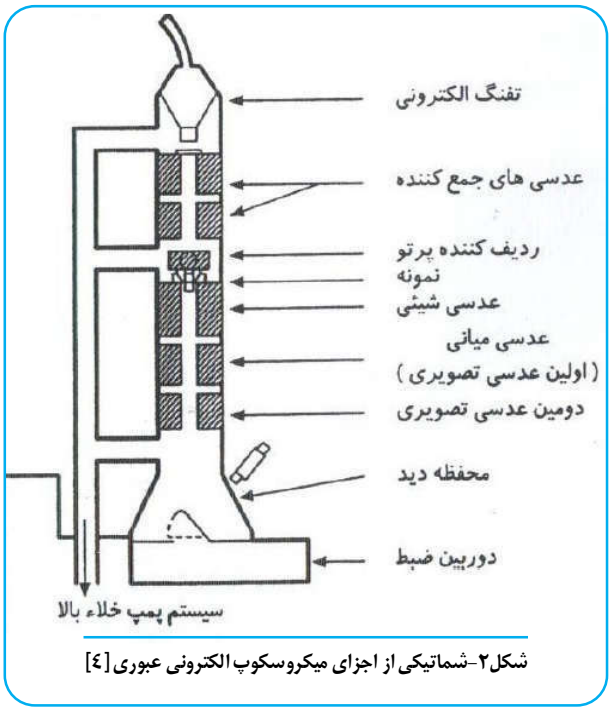


شکل۱-پدیده‌های رخ دهنده در اثر تعامل الکترون و ماده [۲]

1 Transmission Electron Microscope (TEM)
2 resolution
3 magnification
4 X-ray
5 backscattered electrons
6 secondary electrons
7 elastic scattering
8 inelastic scattering

اجزای میکروسکوپ الکترونی عبوری و عملکرد آنها

اگر چه با پیشرفت علم و فناوری، تجهیزات و امکانات بسیار مختلفی به میکروسکوپ الکترونی عبوری اضافه شده است، اما اجزای اصلی آن شامل تفنگ الکترونی، ستون الکترون، عدسی های الکترومغناطیس، نگهدارنده نمونه، عدسی های شیئی، آشکارسازها و سیستم خلأ است. (شکل (۲)) [۱، ۳]



شکل۲-شماتیکی از اجزای میکروسکوپ الکترونی عبوری [٤]

در ادامه، به تشریح کلی این اجزا پرداخته شده است.

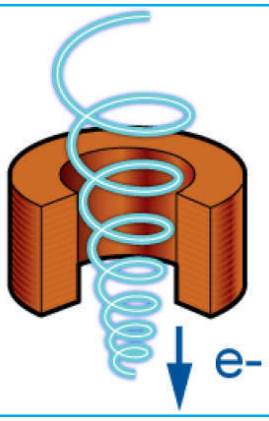
تفنگ الکترونی[9] منبع تولیدکننده‌ی الکترون است که در قسمت بالای میکروسکوپ قرار دارد. دلیل استفاده از الکترون به عنوان باریکه مورد استفاده در این میکروسکوپ آن است که طول موج پرتو الکترونی برای بررسی ساختار ماده در مقیاس‌های اتمی مناسب است. به عبارت دیگر، تمام مزایای میکروسکوپ الکترونی عبوری از جمله قدرت تفکیک و بزرگنمایی فوق‌العاده آن، به همین رفتار شگفت انگیز الکترون وابسته است.

تفنگ‌های الکترونی معمول شامل تفنگ‌های گرمایونی[10] و تفنگهای گسیل میدانی[11] هستند. در تفنگ‌های گرمایونی، یک المان داغ از جنس تنگستن یا LaB_6 تولید الکترون می کند. در تفنگ‌های گسیل میدان نیز، با اعمال یک میدان بزرگ در سطح فلز، الکترون تولید می گردد. تفنگ‌های گسیل میدان تصاویر باکیفیت‌تری به دست می‌دهند اما نسبت به تفنگ‌های گرمایونی گران‌تر هستند. الکترون‌های تولید شده در تفنگ، تحت یک میدان الکتریکی فوق‌العاده قوی در جهت ستون الکترونی و به سمت نمونه، شتابدار می‌شوند. از آن جا که الکترون‌ها باید از نمونه مورد مطالعه عبور کنند، نیاز به انرژی جنبشی بالایی دارند که این کار با اعمال اختلاف پتانسیل‌های بسیار بالا گاهی به بزرگی ۳۰۰۰ کیلوولت (محدوده ولتاژ متوسط ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوولت و ولتاژ بالا ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوولت) است) انجام می‌شود.

9 electron gun
10 thermionic emission
11 field emission

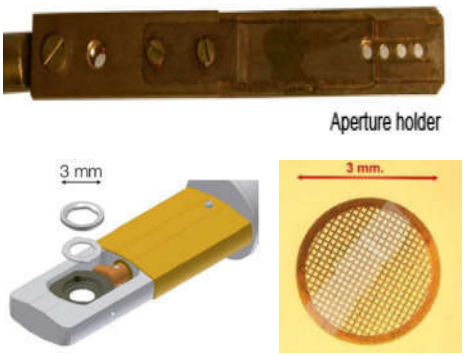
در نتیجه، خلأسازی محفظه تجهیز ضروری است. میزان این خلأ به ۱۰-۴mbar نیز می‌رسد. اعمال ولتاژ و خلأ بالا از دلایل اصلی قیمت بالای میکروسکوپ الکترونی عبوری به شمار می‌رود. ایجاد خلأ موجب حفظ نمونه از اکسید شدن در محیط اتمسفر و سلامت تجهیزات حساس میکروسکوپ نیز می‌گردد. [۱، ۳]

در ستون الکترونی چند عدسی الکترومغناطیسی قرار دارد که وظیفه آن‌ها کانونی کردن باریکه الکترونی (کاهش سطح مقطع باریکه) است. میدان مغناطیسی وارد بر الکترون‌ها از طرف این عدسی‌ها، الکترون‌های شتابدار در جهت ستون را به یک حرکت گردابه‌ای یا مارپیچی وادار می‌کند. به مرور، شعاع گردابه کوچک و باریکه الکترونی متمرکز و پرقدرت‌تر می‌گردد، (شکل (۳)). عدسی جمع/متمرکز کننده[1] نام دیگر این عدسی‌های الکترومغناطیس است که در فاصله تفنگ الکترونی و نمونه قرار دارند. [۱، ۳]



شکل۳-اثر لنز مغناطیسی بر الکترون‌های عبور کننده از آن [۲]

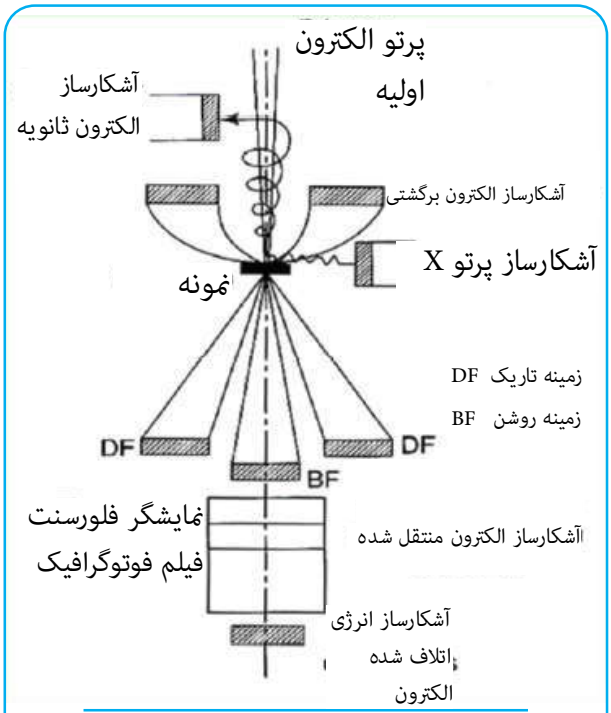
باریکه الکترونی پس از عبور از عدسی‌های متمرکز کننده از یک دریچه[2] عبور کرده و به نمونه می‌رسد. ضخامت نمونه که در یک نگه‌دارنده[3] قرار دارد در حدود ۵ میکرومتر است. در ضخامت‌های بیشتر، الکترون قادر به عبور از نمونه نخواهد بود. قطر محل قرارگیری نمونه (یک تور دایره‌ای از جنس مس) در حدود چند میلی‌متر است. (شکل (۴)) محل قرارگیری نمونه، بر روی میله‌ای قرار دارد که پس از قرار گرفتن نمونه بر روی آن، از روزنه‌ای در ستون الکترونی به میکروسکوپ وارد شده و نمونه را به محل مناسب پرتو دهی می‌رساند. [۳، ۵]



شکل٤-نگه‌دارنده‌ی نمونه [۲]

نمونه‌سازی صحیح که قبل از تصویربرداری انجام می‌شود، یکی از مهم‌ترین مراحل در به دست آوردن اطلاعات از ماده است. به دلیل خلأ بالای دستگاه، استفاده از نمونه‌های گاز و مایع امکان‌پذیر نیست. ابعاد نمونه‌های جامد نیز باید به مقادیر بسیار کوچکی تقلیل یابند. روش‌های مختلفی برای نمونه‌سازی به منظور استفاده در میکروسکوپ الکترونی عبوری وجود دارد که می‌توان به پولیش مکانیکی، پولیش الکتروشیمیایی، سایش اتمی، روش FIB[4] و استفاده از دستگاه میکروتوم[5] اشاره کرد. البته نمونه‌سازی نیاز به مهارت و تجربه بالایی دارد. برخی از نمونه‌ها توسط ترکیبات خاصی مانند فلزات سنگین رنگ می‌شوند تا پس از تصویربرداری، اجزای ساختار قابلیت بالاتری برای شناسایی داشته باشند.

در مرحله بعد باریکه الکترونی به نمونه برخورد می‌کند در اثر این برخورد سیگنال‌های مختلفی آشکار می‌شود که هر یک حاوی اطلاعات ویژه‌ای از ماده است و آشکارساز ویژه خود را نیاز دارد. (شکل (۵)) به عنوان مثال، از پراش الکترون‌ها برای تعیین شبکه کریستالی نمونه (اگر کریستالی باشد) و از پرتو ایکس برای تعیین ترکیب شیمیایی نمونه (EDS) استفاده می‌شود؛ اما مهم‌ترین سیگنال به وجود آمده، الکترون‌های عبورکننده از ماده است. [۱، ۳، ۵]



شکل۵-سیگنال‌های به وجود آمده در اثر برخورد باریکه الکترونی با نمونه و آشکارسازهای مربوطه [٦]

الکترون‌های عبور کرده از نمونه در ادامه ستون الکترونی به چند عدسی وارد می‌شوند. اولین عدسی، یک عدسی شیئی[6] است که وظیفه تشکیل تصویر یا الگوی پراش را به عهده دارد. در ادامه، عدسی‌های میانی[7] و عدسی‌های تصویری[8] قرار دارند که وظیفه آن‌ها بزرگ کردن تصویر تشکیل شده است. لازم به ذکر است که بر اساس هدف تصویربرداری، امکان استفاده انتخابی از عدسی‌ها وجود دارد. به عنوان مثال اپراتور دستگاه می‌تواند عدسی‌های الکترومغناطیس را خاموش نماید.

1 condenser lens
2 aperture
3 specimen chamber/holder

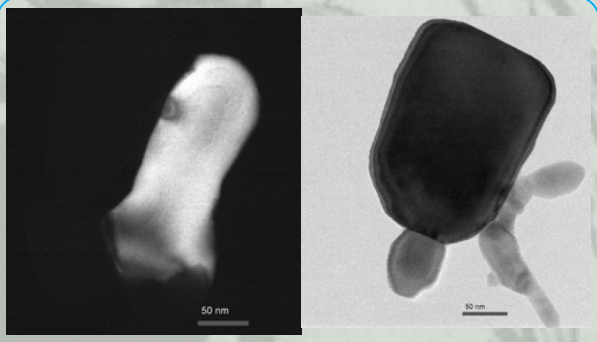
4 focused ion beam
5 microtome
6 objective lens
7 intermediate lens
8 projector lens

در انتهای ستون، یک صفحه نمایش فلورسنت[1] قرار دارد که وظیفه آشکارسازی تصویر را بر عهده دارد. بر اساس اینکه چه ترتیبی از عدسی‌ها (و دیگر تجهیزات موجود در ستون الکترونی) برای تصویربرداری استفاده شده باشد، بر روی صفحه نمایشگر یا یک تصویر ساختاری از نمونه و یا الگوی پراش نمونه[2] نقش می‌بندد. اپراتور دستگاه میتواند این تصویر را به طور مستقیم نظاره کند و یا آنکه توسط دوربین هایی (CCD)، تصویر به صفحه نمایشگر رایانه منتقل می‌شود. [۱، ۳، ۵]

خروجی میکروسکوپ الکترونی عبوری و کاربردهای آن

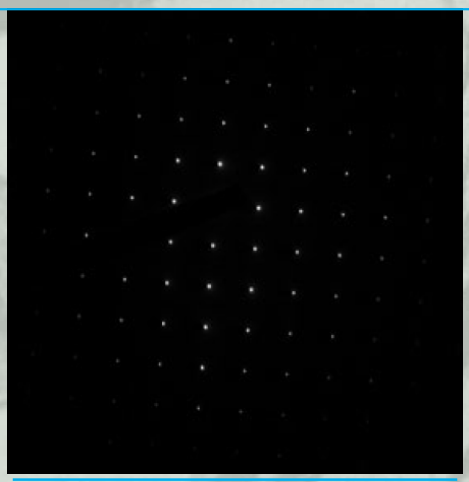
میکروسکوپ الکترونی عبوری قادر به آشکارسازی مورفولوژی[3]، ساخت تصویر سه‌بعدی، آنالیز ترکیب شیمیایی، اندازه‌گیری برخی خواص فیزیکی و مکانیکی، آشکارسازی ساختار کریستالی و... است. به جز مواردی که نمونه در مرحله آماده سازی رنگ می‌شود، میکروسکوپ الکترونی عبوری نمی‌تواند تصاویر رنگی تهیه کند. همچنین امکان تصویربرداری از نمونه‌های ضخیم و نمونه‌های گاز و مایع وجود ندارد.

دو نوع تصویر رایج در میکروسکوپ الکترونی عبوری، تصویر زمینه روشن[4] و تصویر زمینه تاریک[5] است. الکترون‌هایی که از نمونه عبور می‌کنند، پس از عبور از عدسی‌ها، به صفحه نمایش فلورسنت برخورد کرده و تصویر را تشکیل می‌دهند. این تصویر سایه مانند (تاریک و روشن)، به معنای میزان عبور الکترون از ماده است. به این ترتیب که قسمت‌های تاریک‌تر، الکترون کمتر (این بخش از نمونه، چگالی بیشتری دارد) و نواحی روشن‌تر، الکترون بیشتری دریافت کرده است (بخش‌های کم‌چگال‌تر نمونه). بر اساس شکل ۵، اگر تصویربرداری در محور کانونی پرتو الکترونی عبور کرده از ماده انجام شود، تصویری تشکیل می‌گردد که زمینه آن روشن بوده و بسته به جرم ماده، نقاط تاریکی بر روی آن تشکیل می‌شود (تصویر زمینه روشن). این تصویر حاصل از آشکارسازی الکترون‌های پراکنده شده به صورت الاستیک است. اگر محور کانونی پرتو مسدود شود و از مابقی پرتوهای عبوری از ماده، تصویر تشکیل شود، زمینه تصویر تاریک خواهد بود (پراکندگی غیرالاستیک الکترون‌ها)، (شکل (۶)). تعیین پرتو تشکیل‌دهنده تصویر توسط روزنه شیئی انجام می‌شود که اجازه عبور دسته‌های خاص از پرتوها را می‌دهد. [۱، ۳، ۵]



شکل۶-تصویر کریستال‌های اکسید زینک (سمت راست) زمینه روشن (سمت چپ) زمینه تاریک [۲]

الگوی پراش حاصل از میکروسکوپ الکترونی عبوری، به صورت نقاط سفیدرنگ هم‌مرکز ظاهر می‌گردد که نیاز به تحلیل و تفسیر دارد. در شکل ۷ الگوی پراش نمونه‌ای از جنس $Nd_{13}CaO_7$ آورده شده است. تکنیک‌های دیگری از جمله HRTEM[6] بر پایه میکروسکوپ الکترونی عبوری گسترش پیدا کرده‌اند که در جایگاه خود مهم و کاربردی هستند.



شکل۷-الگوی پراش $Nd_{۱۳}CaO_{۶}$ [۲]

1 fluorescent screen
2 diffraction pattern
3 morphology
4 bright field
5 dark field
6 high resolution transmission electron microscopy

منابع و مراجع:

[1] Jian Min Zuo, John C.H. Spence, “Advanced Transmission Electron Microscopy: Imaging and Diffraction in Nanoscience”, 1 ed., Springer-Verlag, New York, 2017

[2] https://myscope.training/legacy/tem/introduction/

[3] C. Barry Carter, David B. Williams, “Transmission Electron Microscopy: Diffraction, Imaging, and Spectrometry”, 1 ed., Springer International Publishing, 2016

[۴] یوسف خرازی، امیر شیخ غفور، ”ابزار شناسایی ساختار مواد“، دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز انتشارات، ۱۳۸۰.

[5] Brent Fultz, James Howe, “Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials”, 4 ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013

[6] http://www.soest.hawaii.edu/HIGP/Faculty/zinin/

تصویر TEM از یک سیانوباکتری بر روی یک بیوفیلم
https://imgur.com/KUWVJIm