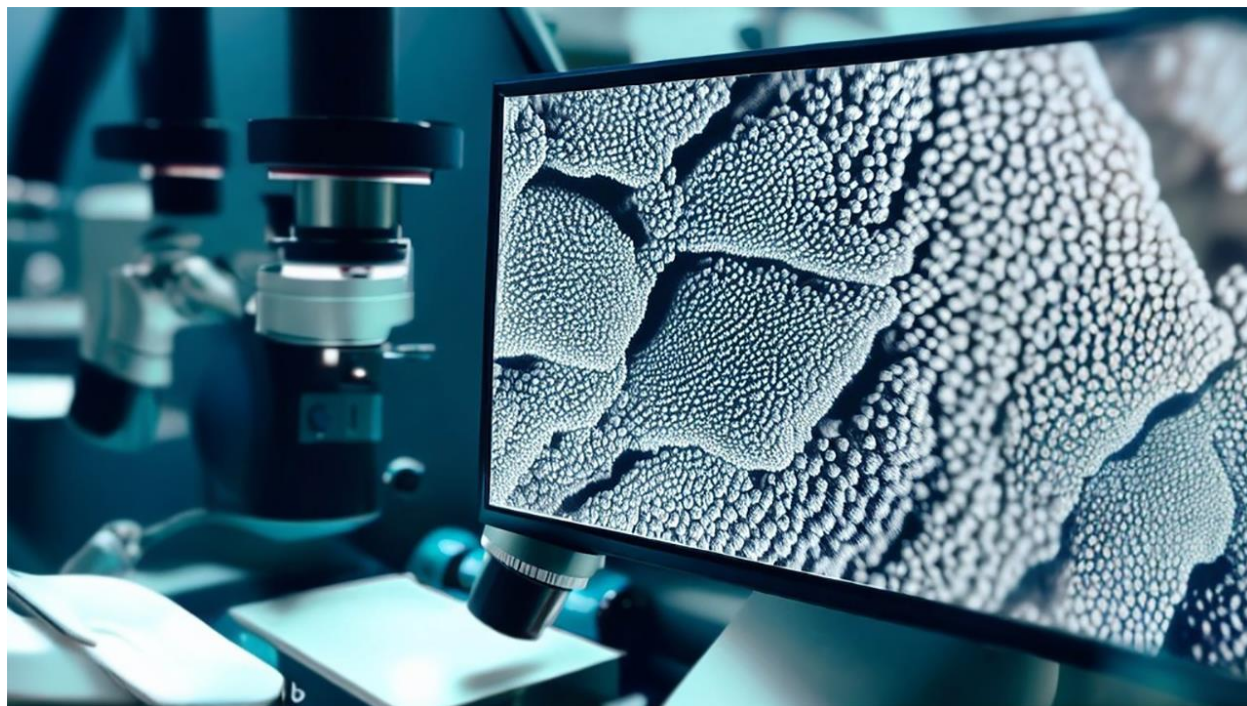


دوره : میکروسکوپ الکترونی کد تقویم هفتگی: ۵۶۱۲۹

مدرس: محمد علی خدادوست تاریخ اجرا: ۹ آبان ۱۴۰۳ سامانه سامک



با استفاده از انواع میکروسکوپهای الکترونی می‌توانیم تصاویری بسیار واضح و با کیفیت بالا از نمونه‌های زیستی و غیرزیستی تهیه کنیم. از این میکروسکوپ‌ها می‌توانیم در پژوهش‌های پزشکی برای مطالعه ساختار انواع بافت، سلولها، درشت مولکولهای پیچیده و وسایل نانوالکترونیک استفاده کنیم.

همچنین، با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی می‌توانیم سطوح و ساختار انواع نانوساختارها را بررسی و مطالعه کنیم. در میکروسکوپهای الکترونی، به جای پرتو نور، از پرتوهای الکترون با طول موج کوتاهتر استفاده می‌شود.

در این مطلب، ابتدا میکروسکوپ الکترونی را تعریف و ساختار کلی آن را با یکدیگر بررسی می‌کنیم. در ادامه، مزیت‌های این میکروسکوپ بر میکروسکوپهای نوری را توضیح و انواع میکروسکوپهای الکترونی را با بررسی جزئیات ساختار آنها توضیح می‌دهیم.

فهرست مطالب :

میکروسکوپ الکترونی چیست؟

میکروسکوپ الکترونی چگونه کار می کند؟

تفاوت میکروسکوپ الکترونی و نوری چیست؟

اجزای تشکیل دهنده میکروسکوپ الکترونی چیست؟

انواع میکروسکوپ الکترونی

مزایا و معایب میکروسکوپ الکترونی چیست؟

تصاویر میکروسکوپ الکترونی

تاریخچه ساخت و پیشرفت میکروسکوپ الکترونی

پرسش‌های رایج در مورد میکروسکوپ الکترونی

جمع‌بندی

میکروسکوپ الکترونی چیست؟

میکروسکوپ الکترونی از پرتویی از الکترون‌های شتاب‌دار به عنوان منبع روشنایی استفاده می‌کند. از آنجا که طول موج الکترون می‌تواند در حدود ۱۰۰ هزار مرتبه کوچک‌تر از طول موج فوتون‌های نور مرئی باشد، میکروسکوپ الکترونی در مقایسه با میکروسکوپ نوری، قدرت تفکیک بالاتری دارد. بنابراین، از این میکروسکوپ می‌توانیم برای مشاهده ساختار اجسام بسیار کوچک با اندازه‌ای در محدوده کمتر از ۱۰۰ نانومتر استفاده کنیم. از این میکروسکوپ الکترونی می‌توانیم در پژوهش‌های پزشکی برای مطالعه ساختار انواع بافت، سلول‌ها و درشت‌مولکول‌های پیچیده یا مطالعه و بررسی سطوح و ساختار انواع نانو ساختارها استفاده کنیم.

پرتو الکترون پس از برخورد با نمونه، انرژی خود را طی فرایندهای مختلف از دست می‌دهد. انرژی از دست رفته به شکل‌های مختلفی مانند گرما، تابش الکترون‌های ثانویه با انرژی کم و الکترون‌های بازگشتی با انرژی زیاد، تابش نور یا اشعه ایکس تبدیل می‌شود. هر یک از این شکل‌ها، اطلاعات زیادی در مورد نمونه مورد مطالعه، مانند سطح نمونه و ترکیب شیمیایی آن، به ما می‌دهد.

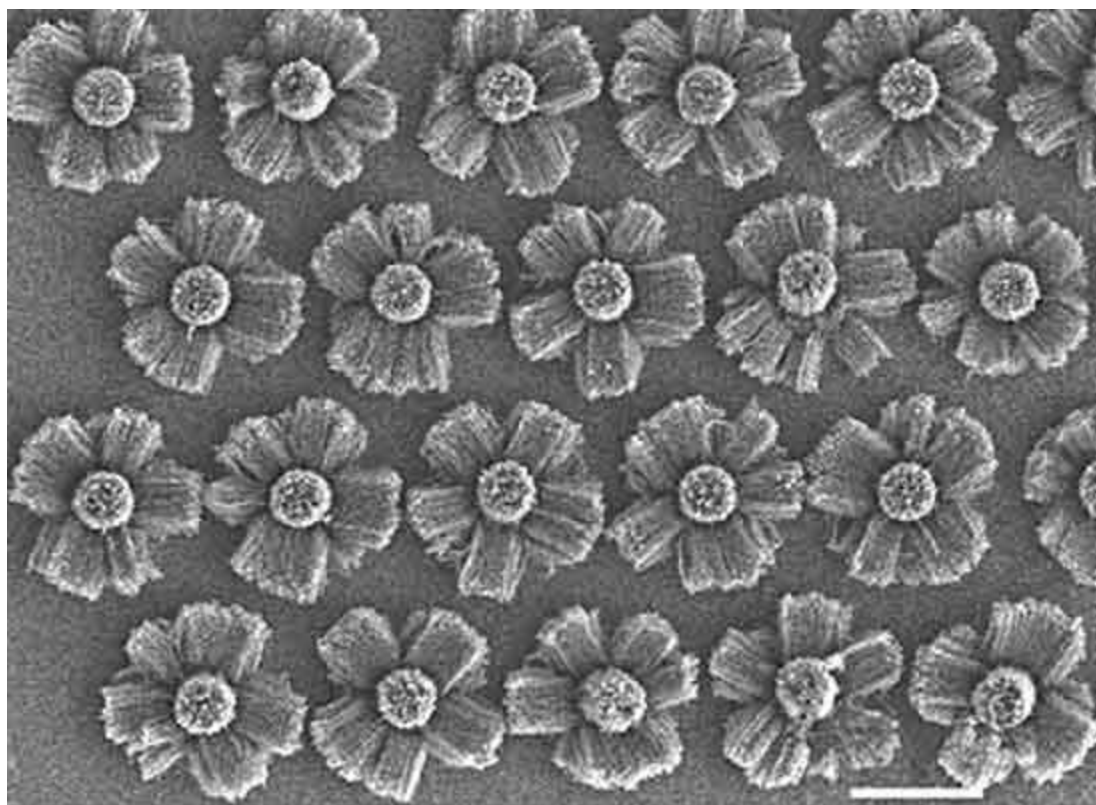
هزینه ساخت و نگهداری میکروسکوپ‌های الکترونی بسیار زیاد است. نمونه‌هایی که می‌خواهیم توسط میکروسکوپ الکترونی مطالعه شوند باید در خلأ قرار بگیرند. چرا؟ زیرا پرتو الکترونی نباید در اثر برخورد با ذرات موجود در هوا پراکنده و واگرا شود.

میکروسکوپ‌های نوری معمولی، تنها می‌توانند جسم را بین ۴۰ تا ۲۰۰۰ برابر بزرگ‌تر کنند. در سال‌ها اخیر میکروسکوپ‌های نوری با قدرت تفکیک بسیار بالا و بزرگنمایی برابر ۲۰۰۰۰ و بیشتر ساخته شده‌اند و از آن‌ها برای مطالعه سلول‌های زیستی زنده استفاده می‌شود. اما، میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توانند نمونه‌های بسیار کوچک را تا یک میلیون برابر و حتی بیشتر بزرگ‌تر کنند. عملکرد میکروسکوپ‌های الکترونی شباهت زیادی به عملکرد میکروسکوپ‌های نوری دارد، با این

تفاوت که در میکروسکوپ الکترونی به جای باریکه نور از پرتو الکترون برای تصویربرداری استفاده می‌شود. عدسی‌ها نقش مهمی در میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی ایفا می‌کنند. برای آشنایی بهتر با میکروسکوپ‌های الکترونی ابتدا باید کمی با عدسی‌ها آشنا شویم.

عوامل موثر بر کیفیت تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ

سلول‌های زیستی اندازه‌های مختلفی دارند، اما در حالت کلی اندازه آن‌ها بسیار کوچک است. به عنوان مثال، قطر گلبول‌های قرمز خون در بدن انسان در حدود ۸ میکرومتر یا ۰,۰۰۸ میلی‌متر تخمین زده می‌شود. همچنین، نانوساختارهای متفاوت نیز بسیار کوچک هستند. به عنوان مثال، ضخامت ورقه گرافن بین ۰,۴ تا ۱,۷ نانومتر است. برای بررسی ویژگی‌های سلول‌های زیستی یا نانوساختارهای مختلف باید از وسیله‌ای به نام میکروسکوپ استفاده کنیم. از آنجا که طول موج پرتو الکترونی استفاده شده در میکروسکوپ الکترونی بسیار کوچک‌تر از طول موج پرتو نور مرئی در میکروسکوپ‌های نوری است، میکروسکوپ نوری وسیله بسیار مناسب‌تری برای مطالعه ویژگی‌های نمونه‌هایی با اندازه بسیار کوچک خواهد بود.

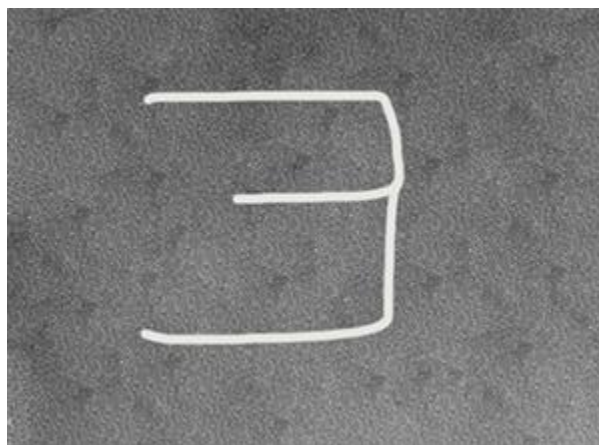


تصویر SEM از الگوهای تکراری زیبا از ساختارهای نانولوله‌ای

در حالت کلی میکروسکوپ وسیله‌ای است که اجسام بسیار کوچک را تا اندازه‌ای مشخص بزرگ می‌کند و به ما تصویر بزرگ شده‌ای از جسم می‌دهد. بنابراین، این‌گونه به نظر می‌رسد که میکروسکوپ نوعی ذره بین است. در حقیقت، ذره‌بین‌ها کاری مشابه میکروسکوپ‌ها انجام می‌دهند. از آنجا که ذره‌بین، تنها یک عدسی دارد، به آن میکروسکوپ ساده گفته می‌شود. از دید بیشتر دانش‌آموزان و دانشجویان، میکروسکوپ‌ها ساختار بسیار پیچیده‌تری دارند و از ترکیب چندین عدسی در کنار یکدیگر تشکیل شده‌اند. عدسی‌ها در میکروسکوپ به گونه‌ای در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که می‌توانند نور را برای تولید تصویر بزرگ شده منحرف کنند. از این‌رو، تصاویر تولید شده توسط میکروسکوپ‌ها بسیار بزرگ‌تر از تصاویر تولید شده توسط ذره‌بین‌ها هستند.

میکروسکوپی با دو عدسی را در نظر بگیرید. چیدمان دو عدسی به گونه‌ای است که با نتیجه‌ای بسیار جالب روبرو می‌شویم. جهت تصویر ایجاد شده نسبت به نمونه مورد بررسی تغییر می‌کند. به عنوان مثال، لایه‌ای فلزی را در نظر بگیرید که روی آن با استفاده از لیتوگرافی حرف E حک شده باشد. حرف E روی تصویر ایجاد شده توسط میکروسکوپ به صورت زیر نشان داده می‌شود. میکروسکوپ‌های پیچیده‌تر ممکن است چنین تصویری ارائه ندهند و تصویری درست از ورقه حک شده به ما نشان دهند. دلیل این موضوع وجود عدسی‌های بیشتر در این میکروسکوپ‌ها است که تصویر معکوس شده را به حالت اولیه خود برمی‌گردانند.

سوال مهمی که مطرح می‌شود آن است که چه ویژگی‌هایی میکروسکوپ‌های ساده را از میکروسکوپ‌های پیشرفته‌ای که در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌کنیم متمایز می‌کند.



در میکروسکوپ‌های ساده که در آن‌ها از دو عدسی استفاده شده است، تصویر به صورت معکوس دیده می‌شود.

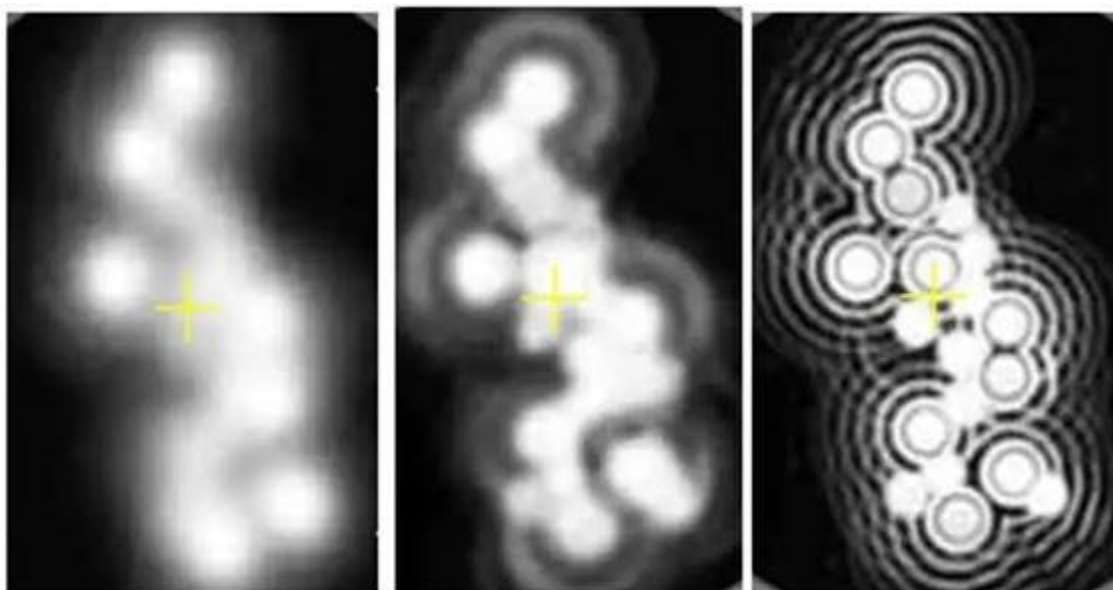
دو عامل در میکروسکوپ‌ها بسیار مهم هستند:

۱. **بزرگنمایی** : هر میکروسکوپ یا مجموعه عدسی‌های داخل آن می‌تواند تصویری بزرگ‌شده

از نمونه تهیه کند. به عنوان مثال، میکروسکوپ‌های نوری استفاده شده در دبیرستان‌ها

می‌توانند تصویر نمونه آزمایشگاهی را تا ۴۰۰ برابر اندازه واقعی آن بزرگ‌تر کنند. از این‌رو، اگر اندازه نمونه برابر یک میلی‌متر باشد، در آزمایشگاه و با استفاده از میکروسکوپ نوری ساده می‌توانید تصویری از نمونه برابر ۴۰۰ میلی‌متر تهیه کنید.

۲. **قدرت تفکیک** : دو نقطه بسیار نزدیک به هم در نمونه‌ای که می‌خواهید اندازه بگیرید را در نظر بگیرید. به توانایی میکروسکوپ در اندازه‌گیری میزان جدایی زاویه‌ای این دو نقطه بسیار نزدیک به هم قدرت تفکیک گفته می‌شود. به بیان دیگر، قدرت تفکیک همان توانایی میکروسکوپ در آشکار کردن جزئیات است. هرچه قدرت تفکیک میکروسکوپ بزرگ‌تر باشد، جزئیات نمونه بهتر تشخیص داده می‌شوند. فرض کنید دو سلول باکتری روی لام (شیشه) آزمایشگاهی در فاصله بسیار کمی از یکدیگر قرار دارند. اگر به آن‌ها توسط میکروسکوپی با قدرت تفکیک پایین نگاه کنید، ممکن است تنها یک باکتری با وضوح کم ببینید. اما به راحتی می‌توانید دو باکتری را با استفاده از میکروسکوپی با قدرت تفکیک بالا تشخیص دهید.



میکروسکوپ‌های پیشرفته و میکروسکوپ‌های استفاده شده در آزمایشگاه‌ها تحقیقاتی، قدرت تفکیک بسیار بالایی دارند. قدرت تفکیک در میکروسکوپ‌های نوری به دلیل مشخصه‌های فیزیکی نور محدود شده است. اگر فاصله دو نقطه با یکدیگر در نانوساختار (دو نانوذره) کمتر از نصف طول موج نور استفاده شده برای تصویربرداری باشد، آن‌ها را نمی‌توان با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری معمولی تشخیص داد. به این پدیده، سد پراش گفته می‌شود. میکروسکوپ الکترونی با استفاده از پرتو الکترونی این مشکل را دور می‌زند. طور موج پرتو الکترونی بسیار کوچک‌تر از طول موج نور استفاده شده در میکروسکوپ‌های نوری است.

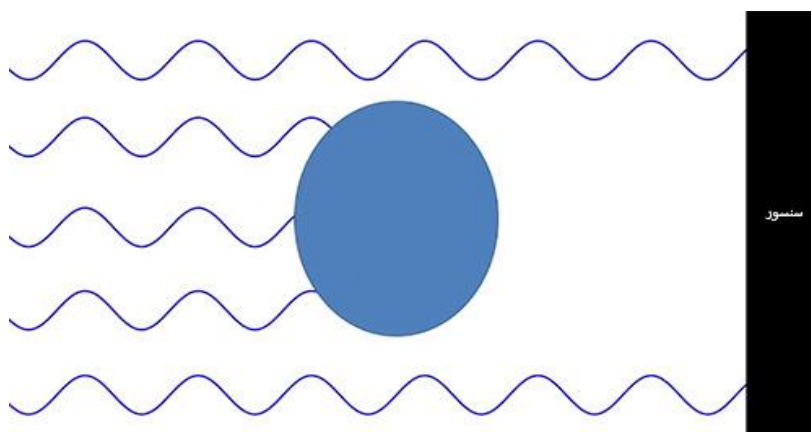
قدرت تفکیک و بزرگ‌نمایی برای داشتن تصویری با جزییات و وضوح بالا از جسمی بسیار کوچک، بسیار مهم هستند. به عنوان مثال، اگر میکروسکوپی بزرگ‌نمایی زیاد، اما قدرت قویک کوچکی داشته باشد، تنها چیزی که می‌توانیم داشته باشیم تصویری تار از نمونه، اما در مقیاسی بسیار بزرگ‌تر است.

میکروسکوپ الکترونی چگونه کار می‌کند؟

در مطالب بالا فهمیدیم میکروسکوپ الکترونی و تفاوت آن با میکروسکوپ نوری چیست. سوال مهمی که ممکن است مطرح شود آن است که چرا میکروسکوپ الکترونی اختراع شد. نور، موج الکترومغناطیسی است و طول موج و فرکانس دارد. طول موج نور، رنگ آن را مشخص می‌کند. به عنوان مثال، طول موج نور قرمز بلندتر از طول موج نور آبی یا بنفش است.

سوال مهمی که ممکن است مطرح شود آن است که میکروسکوپ‌های معمولی چگونه کار می‌کنند یا چگونه اجسام مختلف را با استفاده از آن‌ها می‌بینیم. بیشتر آن‌ها با جذب نور و تولید رنگ‌های مختلف یا تاریکی کار می‌کنند. به تصویر زیر توجه کنید. جسم دلخواهی به رنگ آبی روبروی

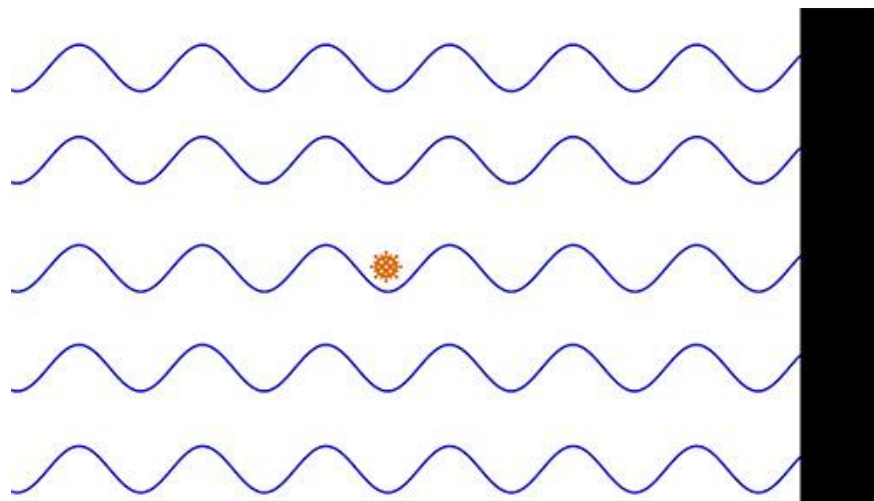
حسگری قرار گرفته است. حسگر می تواند چشم ما یا حسگری الکترونیکی باشد. نور به صورت موج می آید و به جسم برخورد می کند.



نور پس از برخورد به جسم، توسط آن جذب یا پراکنده می شود. بنابراین، در انتها مشاهده می کنیم که قسمتی از حسگر، هیچ نوری را آشکار نمی کند. در نتیجه، سایه ای روی چشم ما تشکیل می شود. از این رو، متوجه می شویم لکه ای تاریک روبروی نور یا دایره ای تاریک در فضای نورانی قرار گرفته است. حال فرض کنید دایره آبی رنگ بسیار کوچک می شود. چه اتفاقی رخ می دهد؟ آیا نور با جسم کوچک برهم کنش می کند؟ اگر اندازه جسم بسیار کوچک شود، ممکن است نور هنگام عبور از جسم، هیچ برهم کنشی با آن نداشته باشد. در اینجا، اندازه جسم در مقایسه با طول موج نور برخوردی بسیار مهم است. اگر اندازه جسم بسیار کوچک تر از طول موج نور برخوردی باشد، هیچ برهم کنشی بین نور و جسم رخ نخواهد داد.

به عنوان مثال، فرض کنید تعداد زیادی توپ کوچک به سمت شما پرتاب می شوند. تعدادی از توپ های پس از برخورد به شما متوقف می شوند یا مسیر حرکت آنها پس از برخورد به شما تغییر می کند (تصویر نشان داده شده در بالا).

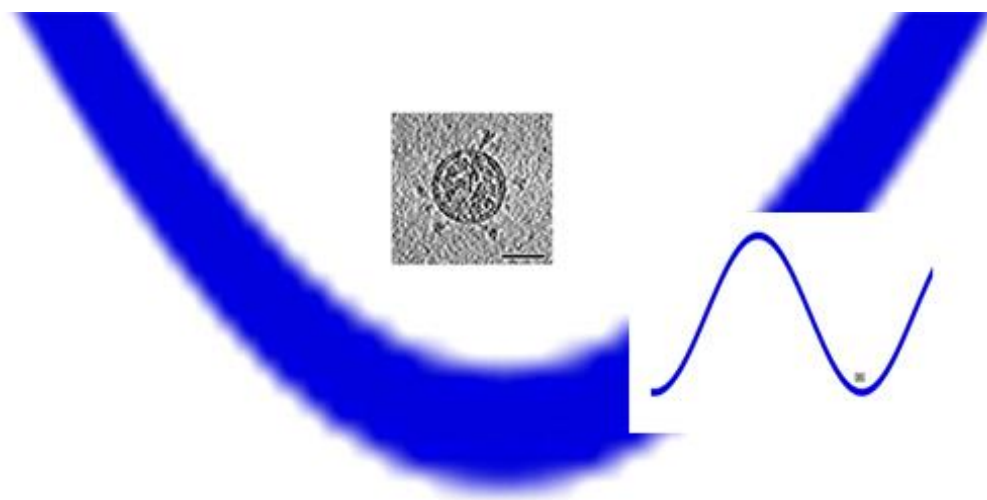
اکنون فرض کنید اندازه توپ‌ها بسیار بزرگ‌تر از اندازه شما باشد، چه اتفاقی رخ می‌دهد. توپ‌ها شما را نادیده می‌گیرند و به مسیر حرکت خود بدون تغییر ادامه می‌دهند (تصویر نشان داده شده در ادامه). حالت دیگری که می‌توان برای این مورد در نظر گرفت حرکت سونامی به سمت ساحل و افراد، در ساحل است. ارتفاع امواج سونامی در مقایسه با اندازه افراد بسیار بزرگ‌تر و بلندتر است. در نتیجه، این امواج بدون تغییر مسیر به حرکت خود ادامه می‌دهند. بنابراین، با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری نمی‌توانیم اجسام مختلف با هر اندازه‌ای را ببینیم. هرچه اندازه جسم کوچک‌تر باشد، مشاهده آن با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری بسیار سخت‌تر می‌شود، تا جایی که اجسامی با اندازه بسیار کوچک‌تر از طول موج نور را نمی‌توانیم با استفاده از این میکروسکوپ‌ها مشاهده کنیم.



بنابراین، اجسام تا اندازه‌ای مشخص را می‌توانیم با استفاده از میکروسکوپ نوری مشاهده کنیم و برای مشاهده اجسام کوچک‌تر باید از روش‌های دیگری استفاده کنیم. طول موج نور مرئی در طیف الکترومغناطیسی در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر قرار گرفته است. امواج دیگری نیز، مانند امواج فرابنفش و رادیویی، در طیف الکترومغناطیس قرار گرفته‌اند. شاید از خود پرسیده باشید چرا برای مشاهده اجسام با اندازه کوچک‌تر از امواج با طول موج کوچک‌تر مانند اشعه گاما یا پرتو ایکس،

استفاده نمی‌شود. دلیل استفاده نکردن از این امواج آن است که آن‌ها با جسم فیزیکی برهم‌کنش خیلی خوبی نخواهند داشت. به همین دلیل، از پرتو ایکس برای دیدن داخل بدن استفاده می‌کنیم. پرتو ایکس به سختی با بافت‌های داخلی بدن برهم‌کنش می‌کند. همچنین، امواج گاما بدون کوچک‌ترین برهم‌کنش با اجزای داخلی بدن، به طور مستقیم از بدن می‌گذرند.

بنابراین، طیف الکترومغناطیسی گزینه مناسبی برای دیدن اجسام کوچک‌تر نیست. به این نکته توجه داشته باشید که تصویر نشان داده شده در بالا مقایسه درستی از اندازه جسم کوچک و طول موج نور را نشان نمی‌دهد. وقتی می‌گوییم طول موج نور بزرگ‌تر از جسم کوچک است، منظورمان خیلی خیلی بزرگ‌تر است. در تصویر نشان داده شده در ادامه، ویروس کرونا با طول موج نور آبی مقایسه شده است. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌کنید ویروس کرونا بسیار کوچک‌تر از طول موج نور آبی است، بنابراین ویروس کرونا را نمی‌توانیم با استفاده از میکروسکوپ نوری مشاهده کنیم.



از چه راهی می‌توان ویروس کرونا یا نمونه‌های مختلف با اندازه‌های بسیار کوچک را مشاهده کنیم. برای انجام این کار می‌توانیم از الکترون‌ها استفاده کنیم. بیشتر ما می‌دانیم الکترون چیست. الکترون ذره‌ای کوانتومی با بار الکتریکی منفی است که در مدارهای مشخصی به دور هسته حرکت می‌کند.

بیشتر ما این ذره کوانتومی را به عنوان منبع الکتریسیته می‌شناسیم، اما کاربرد آن فراتر از الکتریسیته است. تا اوایل قرن بیستم میلادی الکترون را به عنوان ذره می‌شناختند، اما در اوایل قرن بیستم و با آغاز فیزیک کوانتوم، انقلابی در فیزیک رخ داد و رفتار دوگانه موج ذره مطرح شد. بر طبق این دیدگاه، الکترون هم ذره است و هم موج. به بیان دیگر، الکترون علاوه بر ویژگی ذره، می‌تواند از خود رفتار موجی نیز نشان دهد. این رفتار در ابتدا بسیار عجیب به نظر می‌رسید، اما بعدها توسط آزمایش معروف ینگ به اثبات رسید.

آیا می‌دانید طول موج الکترون چه مقدار است؟ طول موج پرتو الکترونی استفاده شده در میکروسکوپ الکترونی تا حدودی به ولتاژ اعمال شده بستگی دارد ولی در حالت کلی، طول موج آن در حدود 0.01 نانومتر است. این عدد را با طول موج نور مرئی مقایسه کنید. طول موج الکترون بسیار کوچک‌تر از طول موج نور مرئی با رنگ‌های مختلف است. از این‌رو، پرتو الکترونی گزینه بسیار مناسبی برای مشاهده نمونه‌های بسیار کوچک، مانند ویروس کرونا، به نظر می‌رسد. در تصویر زیر، طول موج الکترون با اندازه ویروس کرونا مقایسه شده است. طول موج الکترون با خط افقی سیاه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید طول موج الکترون بسیار کوچک‌تر از ویروس کرونا است، بنابراین پرتو الکترون هنگام برخورد با این ویروس نمی‌تواند بدون تغییر، به مسیر خود ادامه دهد.



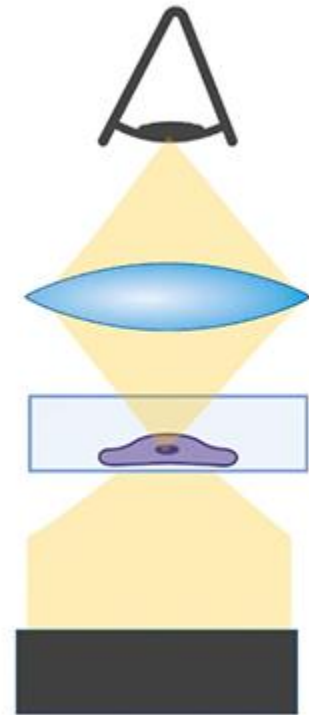
برای آن که بدانیم میکروسکوپ الکترونی چگونه کار می کند، ابتدا خیلی سریع نحوه عملکرد میکروسکوپ نوری و در ادامه عملکرد میکروسکوپ الکترونی را توضیح می دهیم. در میکروسکوپ نوری با استفاده از عدسی به نام عدسی همگرا، نور را متمرکز می کنیم. نور متمرکز شده به نمونه برخورد می کند. پرتو نور پس از برخورد به نمونه، پراکنده می شود و به سمت عدسی دیگری حرکت می کند. این عدسی، نور پراکنده شده را دریافت و آن را به چشم ما می رساند. به این طریق می توانیم، نمونه را در اندازه بزرگ تر مشاهده کنیم. در میکروسکوپ های نوری منبع نور در پایین قرار گرفته است و قسمت بالا را از طریق قطعه نازکی از نمونه روشن می کند. ما یکی از چشم های خود را در قسمت چشمی میکروسکوپ نوری قرار می دهیم و تصویر بزرگ شده ای از نمونه را مشاهده می کنیم. نمونه با استفاده از عدسی های قدرتمند بین ۱۰ تا ۲۰۰ مرتبه بزرگ تر می شود. در حالت کلی، میکروسکوپ های معمولی از چهار بخش اصلی تشکیل شده اند:

۱. منبع نور

۲. نمونه

۳. عدسی‌هایی که با استفاده از آن‌ها نمونه بزرگ‌تر می‌شود.

۴. تصویر بزرگ شده نمونه که می‌بینیم.



میکروسکوپ نوری

اکنون، به چیدمان میکروسکوپ الکترونی نگاه می‌کنیم. چیدمان آن بسیار شبیه چیدمان میکروسکوپ نوری است، با این تفاوت که در آن به جای منبع نور از تفنگ الکترونی استفاده می‌شود. تفنگ الکترونی، پرتو الکترونی را شلیک می‌کند. پرتو الکترونی روی نمونه مورد نظر متمرکز می‌شود. قسمتی از پرتو الکترونی پس از برخورد با نمونه، پراکنده می‌شود و قسمت دیگر بدون برهم‌کنش با نمونه، از آن عبور می‌کند. به این نکته توجه داشته باشید که نمونه بسیار کوچک است، بنابراین ممکن است از نظر اندازه بسیار کوچک‌تر از طول موج الکترون باشد. از این‌رو، بخشی از الکترون‌ها بدون برخورد به نمونه، از آن عبور می‌کنند. پرتو الکترون عبوری از نمونه باید توسط عدسی متمرکز

شود. به این نکته توجه داشته باشید که عدسی‌های معمولی نمی‌توانند پرتو الکترونی را متمرکز کنند.

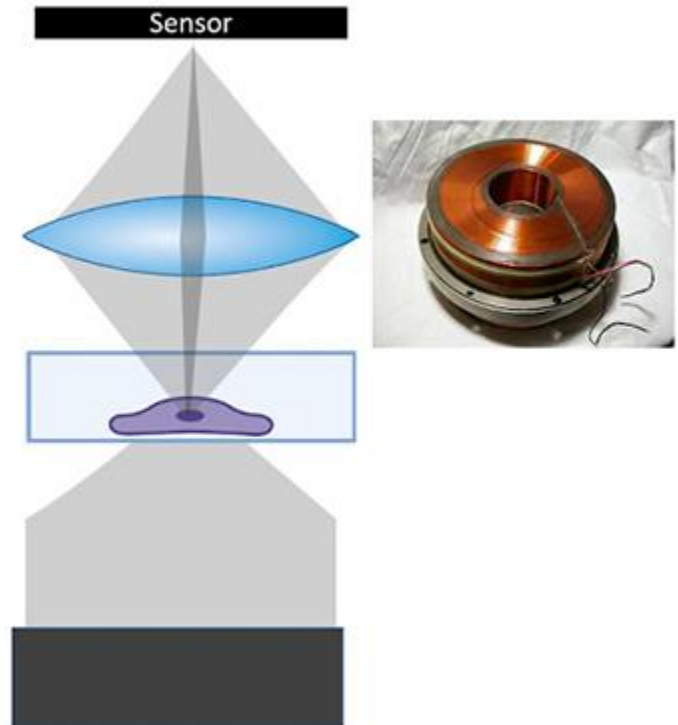
الکترون‌ها می‌توانند با استفاده از میدان الکترومغناطیسی منحرف شوند و تغییر مسیر دهند. زیرا الکترون‌ها برخلاف فوتون‌ها خنثی نیستند و بار الکتریکی منفی دارند. از این‌رو می‌توانیم به جای عدسی معمولی از عدسی‌های الکترومغناطیسی استفاده کنیم. آهن‌رباها با ایجاد میدان مغناطیسی می‌توانند مسیر حرکت الکترون را تغییر و آن‌ها را در راستای مشخصی قرار دهند. این رفتار شبیه حالتی است که الکترون توسط پروتون جذب می‌شود. پرتو الکترونی پس از عبور از عدسی الکترومغناطیسی، به حسگر برخورد می‌کند و تصویر ایجاد می‌شود. به این نکته توجه داشته باشید که ممکن است پرتو الکترونی توسط بخشی از نمونه پراکنده شود و از بخشی دیگر بدون تغییر مسیر بگذرد. بنابراین، تصویر تشکیل شده از بخش‌هایی با روشنایی متفاوت تشکیل شده است. در نتیجه، عملکرد میکروسکوپ الکترونی بسیار مشابه میکروسکوپ نوری است، با این تفاوت که در آن به جای پرتو نور از پرتو الکترون استفاده شده است و برای متمرکز کردن پرتو الکترونی باید عدسی را بین آهن‌رباهای الکتریکی قرار دهیم. چهار قسمت اصلی در میکروسکوپ‌های الکترونی عبارت هستند از:

۱. منبع نور با تفنگ الکترونی جایگزین می‌شود. تفنگ الکترونی الکترونی‌هایی با شتاب بسیار زیاد به سمت بیرون شلیک می‌کند.

۲. نمونه قبل از دیدن توسط میکروسکوپ باید آماده شود. آماده‌سازی نمونه به نوع نمونه بستگی دارد.

۳. برای متمرکز کردن پرتو الکترونی از آهن‌رباهایی به شکل سیم پیچی استفاده می‌شود.

۴. تصویر بزرگ شده نمونه روی نمایشگر ظاهر می‌شود.



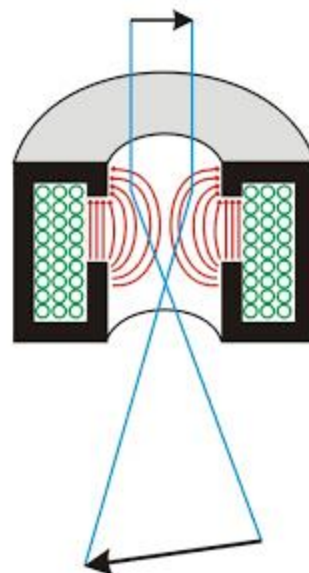
میکروسکوپ الکترونی

به چیدمان میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده در تصویر بالا، "میکروسکوپ الکترونی عبوری" (Transmission Electron Microscopy | TEM) می‌گوییم. زیرا الکترون‌ها از نمونه عبور می‌کنند. نوع دیگری میکروسکوپ الکترونی به نام "میکروسکوپ الکترونی روبشی" (Scanning Electron Microscopy | SEM) نیز وجود دارد. همان‌گونه که از نام این میکروسکوپ الکترونی مشخص است، الکترون‌ها به جای عبور از نمونه، سطح آن را روبش می‌کنند. در بخش بعد، در مورد هر یک از این میکروسکوپ‌ها با جزئیات صحبت می‌کنیم.

هرچه سرعت الکترون‌های خروجی از تفنگ الکترونی بیشتر باشد، طول موج آن‌ها کوتاه‌تر خواهد بود. در این حالت، میکروسکوپ الکترونی قدرت تفکیک بهتری دارد. بنابراین، شتاب دادن به الکترون‌ها، نخستین کاری است که باید در میکروسکوپ الکترونی انجام دهیم. برای انجام این کار ولتاژ بالایی اعمال و میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. الکترون پس از قرار گرفتن در میدان الکتریکی، شتاب می‌گیرد و انرژی جنبشی به دست می‌آورد:

$$E = VQ$$

در معادله فوق، V اختلاف پتانسیل و Q بار الکتریکی الکترون است. به عنوان مثال، اگر اختلاف پتانسیل برابر ۶۰ کیلوولت باشد، طول موج الکترون برابر ۵ پیکومتر یا ۰,۰۰۵ نانومتر خواهد بود. این بدان معنا است که قدرت تفکیک میکروسکوپ‌های الکترونی صدها برابر بهتر از قدرت تفکیک میکروسکوپ‌های نوری است. الکترون‌ها بار الکتریکی منفی دارند. بنابراین، به راحتی نمی‌توانند متمرکز شوند و برای متمرکز کردن آن‌ها باید از میدان مغناطیسی استفاده کنیم. بنابراین، در میکروسکوپ الکترونی از سیم‌پیچ‌هایی با عنوان عدسی الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. این سیم‌پیچ‌ها به راحتی می‌توانند پرتو الکترون پراکنده را متمرکز کنند. عملکرد آن‌ها مشابه عملکرد عدسی‌های همگرا در میکروسکوپ‌های نوری است.



طول موج الکترون در میکروسکوپ الکترونی با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} \sqrt{2mc^2 + eV}$$

در رابطه فوق:

- c سرعت نور در خلأ و مقدار آن برابر 3×10^8 متر بر ثانیه است.

- e بار الکترون و برابر 1.6×10^{-19} کولمب است.

- m جرم الکترون و مقدار آن برابر 9.1×10^{-31} کیلوگرم است.

- V ولتاژ شتاب دهنده است

تفاوت میکروسکوپ الکترونی و نوری چیست؟

میکروسکوپ در اوایل قرن هفدهم میلادی اختراع شد و تحول شگرفی در مطالعات علوم مختلف مانند زیست و فیزیک به وجود آورد. از زمان اختراع میکروسکوپ در اوایل قرن هفدهم میلادی تا ۲۰۰ سال بعد، پیشرفت‌های بسیاری در ساخت عدسی‌های استفاده شده در میکروسکوپ‌ها ایجاد شد.

میکروسکوپ الکترونی	میکروسکوپ نوری
منبع تابش، پرتو الکترون با طول موج در محدوده یک نانومتر است.	منبع تابش، نور با طول موج در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است.
بزرگنمایی بزرگ‌تری در مقایسه با میکروسکوپ نوری دارد.	بزرگنمایی این میکروسکوپ کمتر از میکروسکوپ الکترونی است.
خطر تشعشع اشعه، زیرا از پرتو الکترونی با انرژی بسیار زیاد استفاده می‌کند.	بدون خطر نشت اشعه، زیرا از نور مرئی استفاده می‌کند.
آماده‌سازی نمونه از چند ساعت تا چند روز به طول می‌انجامد.	آماده‌سازی نمونه، تنها چند دقیقه تا یک ساعت به طور می‌انجامد.
تنها نمونه‌های بی‌جان و خشک را می‌توان بررسی کرد.	نمونه‌های زیستی جان‌دار و بی‌جان را می‌توان مطالعه کرد.
تشکیل تصویر در این میکروسکوپ به پراکندگی نور وابسته است.	تشکیل تصویر در این میکروسکوپ به جذب نور توسط نواحی مختلف در نمونه بستگی دارد.
تصویر روی پرده فلورسانس سولفات زینک تشکیل می‌شود.	تصویر نمونه از طریق عدسی‌های چشمی دیده می‌شود و نیازی به پرده نیست.
بزرگنمایی مستقیم در حدود ۱۶ هزار برابر و بزرگنمایی عکاسی در حدود یک میلیون برابر است.	بزرگنمایی بیشتر میکروسکوپ‌های نوری در محدوده ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ برابر است.
وضوح و قدرت تفکیک بالا	وضوح و قدرت تفکیک پایین
گران و هزینه نگهداری بالا	نسبتاً ارزان و هزینه نگهداری پایین
عدسه‌های استفاده شده در این میکروسکوپ الکترومغناطیسی هستند.	عدسی‌های استفاده شده در این میکروسکوپ شیشه‌ای هستند.
قدرت تفکیک عدسی الکترونی در حدود ۰.۱/۰ میکرومتر است.	قدرت تفکیک میکروسکوپ نوری در حدود ۲/۰ میکرومتر است.
در میکروسکوپ‌های الکترونی از سیستم خنک‌کننده استفاده می‌شود.	در میکروسکوپ نوری از سیستم خنک‌کننده استفاده نمی‌شود.
در میکروسکوپ‌های الکترونی از خلأ استفاده می‌شود.	در میکروسکوپ‌های نوری از خلأ استفاده نمی‌شود.
ضخامت نمونه‌های بسیار نازک تا حدود ۱/۰ نانومتر	ضخامت نمونه تا ۵ میکرومتر
با استفاده از میکروسکوپ الکترونی می‌توان تصویر دوبعدی و سه‌بعدی از نمونه تهیه کرد.	میکروسکوپ نوری، تنها می‌تواند تصویری دوبعدی از نمونه نشان دهد.

میکروسکوپ نوری از پرتو نور به عنوان منبع تابش استفاده می‌کند. در حالی که در میکروسکوپ‌های الکترونی به جای پرتو نور از پرتو الکترونی به عنوان منبع تابش استفاده می‌شود. دو میکروسکوپ الکترونی و نوری در جدول زیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

عدسی‌های استفاده شده در میکروسکوپ نوری عبارت هستند از:

- عدسی چشمی
- عدسی شیئی
- عدسی همگرا

و عدسی‌های استفاده شده در میکروسکوپ الکترونی عبارت هستند از:

- عدسی همگرا
- عدسی شیئی
- عدسی تصویرساز

اجزای تشکیل دهنده میکروسکوپ الکترونی چیست؟

همان‌طور که در مطالب بالا اشاره شد، میکروسکوپ الکترونی برای مطالعه و تشکیل تصویر از نمونه‌های مختلف، از پرتو الکترونی با انرژی مشخصی استفاده می‌کند. هر میکروسکوپ الکترونی از اجزای مختلفی تشکیل شده است که داخل ستونی خلأ به صورت عمودی قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین و اصلی‌ترین اجزای تشکیل دهنده میکروسکوپ الکترونی عبارت هستند از:

- **تفنگ الکترونی :** تفنگ الکترونی، رشته تشکیل شده از تنگستن است که تا دمای مشخصی داغ می‌شود. این رشته پس از گرم شدن، الکترون تولید می‌کند.

- **عدسی‌های الکترومغناطیسی :** در هر میکروسکوپ الکترونی از سه نوع عدسی الکترومغناطیسی استفاده شده است:

- **عدسی همگرا :** این عدسی پرتو الکترونی را روی نمونه متمرکز می‌کند. عدسی همگرای دوم الکترون‌ها را به شکل باریکه‌ای با شعاع بسیار کم درمی‌آورد.

- **عدسی شیئی :** پرتو الکترونی پس از عبور از نمونه از سیم‌پیچ‌های مغناطیسی دوم به نام عدسی شیئی می‌گذرد. این عدسی توان بزرگ‌تری دارد و تصویر بزرگ شده میانی را تشکیل می‌دهد.

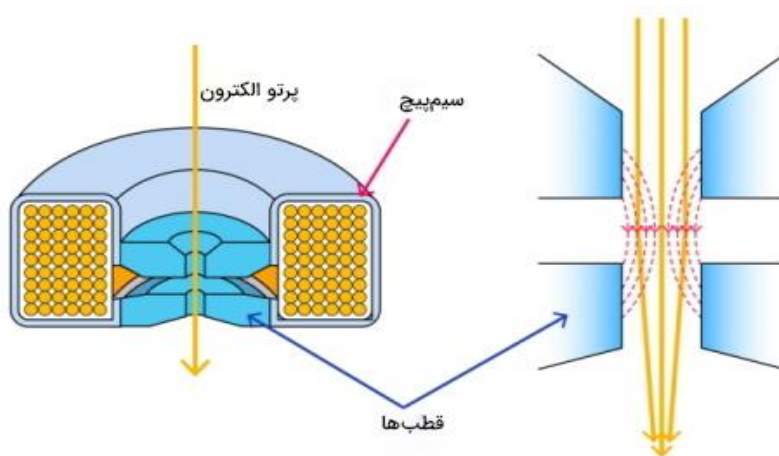
- **عدسی چشمی :** سری سوم عدسی‌های مغناطیسی، عدسی چشمی نام دارند. این عدسی‌ها تصویر بزرگ شده و نهایی نمونه را تشکیل می‌دهند. به این نکته توجه داشته باشید که هر یک از این عدسی‌ها به عنوان بزرگ‌کننده تصویر عمل و همزمان تلاش می‌کنند جزییات و وضوح تصویر تشکیل شده را در بهترین حالت خود نگه دارند.

- **نگه‌دارنده نمونه :** نگه‌دارنده نمونه لایه‌ای بسیار نازک از کربن است که توسط توری فلزی نگه داشته می‌شود.

- **سیستم ضبط و مشاهده تصویر :** تصویر نهایی روی پرده فلورسانس تشکیل می‌شود. زیر این پرده دوربینی برای ضبط تصویر قرار گرفته است.

ابیراهی چیست ؟

تصویر زیر، نمایی از سطح مقطع عدسی الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. هنگامی که جریان الکتریکی از سیم‌پیچ‌ها عبور می‌کند، میدان الکترومغناطیسی بین قطب‌ها ایجاد می‌شود. میدان الکترومغناطیسی تشکیل شده سبب ایجاد شکافی در مدار مغناطیسی می‌شود. بزرگنمایی عدسی‌های با تغییر جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها، تغییر می‌کند. تغییر بزرگنمایی عدسی الکترومغناطیسی با جریان الکتریکی یکی از تفاوت‌های اصلی این عدسی‌ها با عدسی‌های شیشه‌ای معمولی است. در غیر این صورت، هر دو نوع عدسی رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند و «ابیراهی» (aberration) یکسانی خواهند داشت.



ابیراهی چیست؟

به انحراف از مسیر رایج و معمول، ابیراهی گفته می‌شود:

• "ابیراهی کروی" (Spherical aberration) در این حالت، بزرگنمایی در مرکز

عدسی با بزرگنمایی در لبه‌های آن تفاوت دارد.

• "ابیراهی رنگی" (Chromatic aberration): در این حالت، بزرگنمایی با مقدار طول

موج الکترون‌ها در پرتو، تغییر می‌کند.

• "آستیگماتیسم" (Astigmatism): در این حالت، دایره در نمونه به شکل بیضی در

تصویر تشکیل شده از نمونه در می‌آید.

ابیراهی کروی مشخصه بسیار مهمی است که توسط طراحی و چگونگی ساخت عدسی تعیین می‌شود. چگونه می‌توان ابیراهی رنگی را کاهش داد؟ ابیراهی رنگی با ثابت نگه داشتن مقدار ولتاژ شتاب‌دهنده و استفاده از نمونه بسیار نازک کاهش می‌یابد. آستیگماتیسم نوع دیگری از ابیراهی است که باید کاهش یابد، زیرا در غیر این صورت نمی‌توانیم جزییات و ساختار نمونه را به درستی تشخیص دهیم. آستیگماتیسم می‌تواند با استفاده از سیم‌پیچ‌های جبرانی الکترومغناطیسی متغیر اصلاح شود.

همان‌طور که در مطالب ابتدا بخش اشاره شد، عدسی همگرا پرتو الکترون را روی نمونه متمرکز می‌کند. عدسی شیئی تصویر از نمونه ایجاد می‌کند. تصویر تشکیل شده توسط عدسی‌های تصویربرداری باقی‌مانده، بزرگ و روی پرده فلورسانس نمایش داده می‌شود. نمونه‌ها ممکن است کریستالی یا غیرکریستالی باشند. اگر نمونه مورد مطالعه کریستالی باشد، الگوی پراش در عدسی به نام صفحه کانونی پشتی تشکیل خواهد شد. با تغییر قدرت عدسی‌های قرار گرفته زیر عدسی شیئی، می‌توان الگوی پراش را بزرگ و آن را روی پرده فلورسانس انداخت. در فاصله بین تفنگ الکترونی و پرده فلورسانس، پرتو الکترونی از دریچه‌های متوالی با قطرهای متفاوت می‌گذرد. این دریچه‌ها، الکترون‌هایی را که برای تشکیل تصویر لازم نیستند، متوقف می‌کنند. قطر دریچه‌ها به راحتی از بیرون، توسط اپراتور کنترل می‌شود.

سیستم مشاهده و ذخیره تصویر

تصویر تشکیل شده روی پرده فلورسانس را می‌توانیم از طریق پنجره‌ای بزرگ مشاهده کنیم. در بیشتر مواقع لازم است تصویر ایجاد شده از نمونه، ذخیره شود. از این‌رو، برخی از میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توانند از تصویر تشکیل شده عکس‌برداری کنند. برای انجام این کار، تنها کافی است پرده فلورسانس با فیلم عکاسی جایگزین شود. همچنین، برای ذخیره تصویر می‌توان از دوربین تلویزیونی استفاده کرد. در این صورت، تصویر را می‌توانیم به صورت دیجیتالی ذخیره و ضبط کنیم.

خلأ

همان‌طور که در مطالب بالا اشاره شد، میکروسکوپ‌های الکترونی تحت خلأ کار می‌کنند. مقدار خلأ ایجاد شده به نوع میکروسکوپ بستگی دارد. الکترون‌ها تنها هنگامی می‌توانند مانند نور رفتار کنند که در خلأ قرار داشته باشند. تمام سیستم میکروسکوپ الکترونی، از تفنگ الکترونی تا پرده فلورسانس، باید در محفظه خلأ قرار داشته باشند. توجه به این نکته مهم است که خلأ در قسمت‌های مختلف میکروسکوپ متفاوت است. به عنوان مثال، بالاترین مقدار خلأ در اطراف نمونه و تفنگ الکترونی است. برای انجام این کار از پمپ‌های مختلفی استفاده می‌شود. فشار معمولی اتمسفر در حدود 760 میلی‌متر جیوه یا 10^5 پاسکال است. به طور معمول، فشار در محفظه میکروسکوپ در حدود 2×10^{-5} Pa خواهد بود.

خلا چیست؟

در این فشار، تعداد مولکول‌های هوا بر واحد لیتر در حدود $7 \times 10^{12} \times 10^{12}$ است. بنابراین، احتمال آن که الکترونی در مسیر خود از تفنگ الکترونی تا نمونه و پس از آن، به مولکول هوا برخورد کند تقریباً برابر صفر خواهد بود. در میکروسکوپ‌های الکترونی جدید، سیستم خلأ کاملاً خودکار است و سطح خلأ به طور پیوسته بررسی می‌شود. پس از

قرار دادن نمونه داخل محفظه و رسیدن به مقدار خلأ موردنظر، باید جریان و ولتاژ شتاب‌دهنده را اعمال کنیم. برای داشتن تصویری با جزییات و وضوح بسیار بالا، ولتاژ شتاب‌دهنده و جریان عبوری از عدسی‌ها باید تا حد امکان پایدار و ثابت باشند.

جهت‌گیری نمونه

در نگاه نخست این‌گونه به نظر می‌رسد که می‌توان از نمونه بدون حرکت دادن یا چرخاندن آن، تصویری مناسب به‌دست آورد. اما برای داشتن تصویری با وضوح بالا از نمونه باید آن را در جهت‌های مختلف حرکت داد یا حتی در راستای محورهای مختلف چرخاند. گرچه نمونه بسیار نازک است، تصویر تشکیل شده اطلاعاتی در مورد عمق‌های مختلف از نمونه می‌دهد. شاید از خود پرسیده باشید چگونه تصویر تشکیل شده اطلاعاتی در مورد عمق‌های مختلف نمونه می‌دهد. برای به‌دست آوردن چنین اطلاعاتی باید نمونه را در راستای محورهای مختلف بچرخانیم. سوال مهم دیگری که ممکن است مطرح شود آن است که آیا نمونه را بدون آماده‌سازی می‌توانیم داخل محفظه خلأ قرار دهیم. بیشتر نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در محفظه خلأ باید توسط روش‌های مختلف آماده شوند.



نگه‌دارنده نمونه در میکروسکوپ الکترونی

به عنوان مثال، نمونه استفاده شده در TEM باید بسیار کوچک و نازک باشد. چرا؟ زیرا با استفاده از این میکروسکوپ می‌توانیم ساختار داخلی نمونه‌ها را تا مقیاس اتمی مطالعه کنیم. نمونه مطالعه شده توسط TEM باید بسیار کوچک (کمتر از ۳ میلی‌متر)، پایدار و ضخامت آن برای عبور آسان الکترون‌ها باید کمتر از ۰,۵ میکرومتر باشد. آماده‌سازی نمونه با توجه به نوع و اطلاعاتی که می‌خواهیم از آن به‌دست آوریم، متفاوت است. به عنوان مثال، فرض کنید نمونه‌ای زیستی داریم. برای آماده‌سازی این نمونه باید مراحل زیر را طی کنیم:

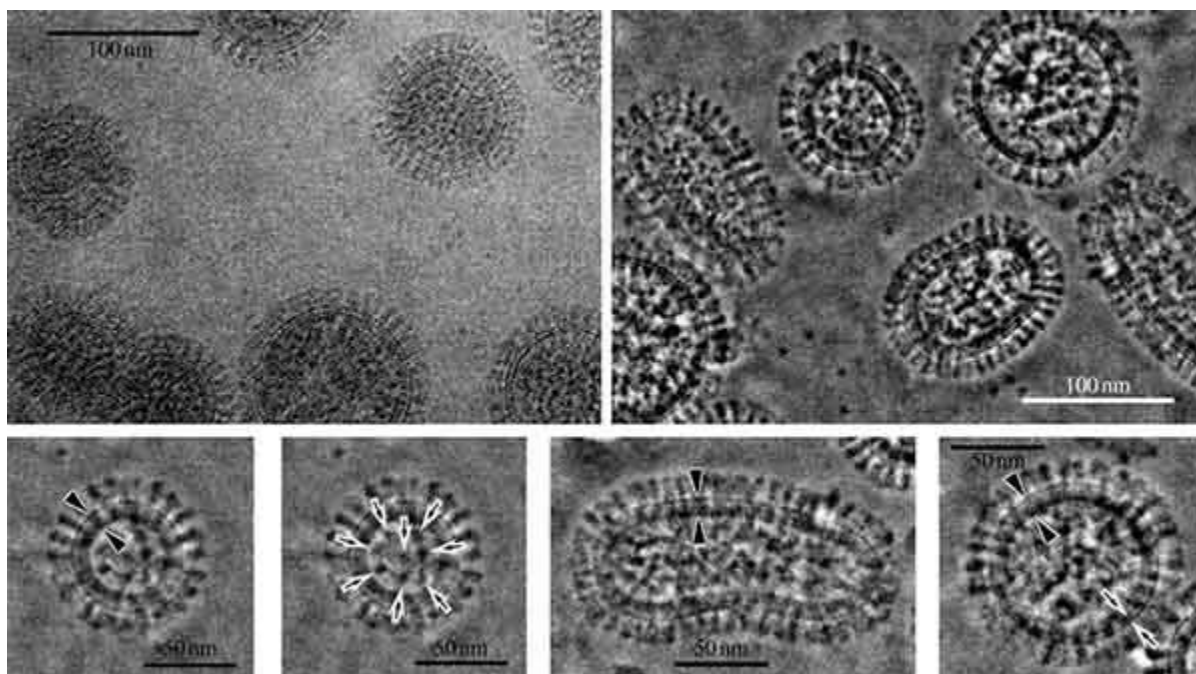
- با انجام واکنش‌های شیمیایی لازم باید آب نمونه حذف شود. باید بتوانیم نمونه را تا جای که می‌شود در حالت اصلی نگه داریم.
 - سپس، نمونه را داخل رزین سخت‌کننده قرار می‌دهیم.
 - پس از گرفتن و سفت شدن رزین، قطعاتی با ضخامت متوسط ۵/۰ میکرومتر با استفاده از وسیله‌ای مناسب بریده می‌شوند.
 - قطعات بریده شده داخل نگه‌دارنده نمونه در میکروسکوپ الکترونی قرار داده می‌شوند.
- سوالی که ممکن است مطرح شود آن است که پس از برخورد پرتو الکترون به نمونه چه اتفاقی رخ می‌دهد. در ادامه، برخورد پرتو الکترون به نمونه و اتفاقاتی که ممکن است پس از این برخورد رخ دهند را به اختصار توضیح می‌دهند.

پس از برخورد پرتو الکترونی به نمونه چه اتفاقی رخ می‌دهد؟

در حالت کلی، انتظار می‌رود که بیشتر نمونه‌ها پس از برخورد پرتو الکترونی به سطح آن‌ها، تغییر کنند. اما برخلاف این تصور، بیشتر نمونه‌ها در صورتی که برخورد الکترون به آن‌ها به صورت کنترل

شده انجام شود، هیچ تغییری نخواهند کرد. پس از برخورد پرتو الکترونی به سطح نمونه، اتفاق‌های مختلفی ممکن است رخ دهند:

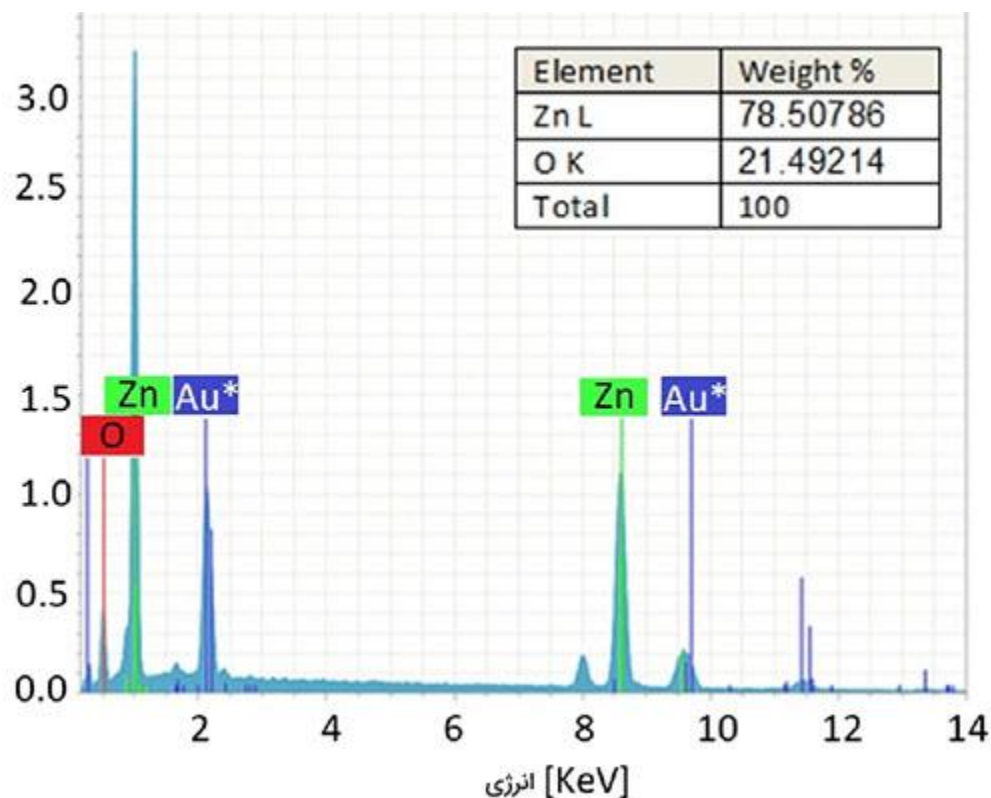
- برخی الکترونی‌ها توسط نمونه جذب می‌شوند. مقدار الکترون جذب شده توسط نمونه، تابعی از ضخامت و ترکیب شیمیایی نمونه است. با توجه به آن‌که بیشتر نمونه‌های سنتز شده در آزمایشگاه ضخامت ثابتی ندارند، مقدار الکترون جذب شده توسط نمونه در قسمت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. از این‌رو، تصویر تشکیل شده در برخی نقاط روشن‌تر و در برخی نقاط تیره‌تر است. به این حالت، کنتراست دامنه در تصویر گفته می‌شود.
- برخی از الکترون‌ها پس از برخورد به سطح نمونه، پراکنده می‌شوند. زاویه پراکندگی به ترکیب نمونه بستگی دارد. به این حالت کنتراست فازی در تصویر می‌گوییم.



کنتراست فازی در میکروسکوپ الکترونی

- در نمونه‌های کریستالی، الکترون‌ها در جهت‌های مشخصی پراکنده می‌شوند. این جهت‌ها تابعی از ساختار کریستالی نمونه هستند. در این حالت، کنتراستی به نام کنتراست انکسار در تصویر ایجاد می‌شود.

- علاوه بر آن که برخی الکترون‌ها جذب و برخی دیگر پراکنده می‌شوند، درصدی از الکترون‌های برخوردی به سطح نمونه نیز از سطح آن منعکس خواهند شد. به این الکترون‌ها، الکترون‌های برگشتی می‌گوییم.
- گاهی الکترون‌های برخوردی به سطح نمونه، سبب برانگیختگی الکترون‌های سطحی نمونه و خروج آن‌ها می‌شوند. به این الکترون‌ها، الکترون‌های ثانویه می‌گوییم.
- حتی الکترون‌های برخوردی به سطح نمونه می‌توانند سبب تابش پرتو ایکس توسط نمونه می‌شوند. انرژی و طول موج پرتو ایکس به ترکیب عنصری نمونه وابسته است. از این طریق می‌توان عنصرهای تشکیل‌دهنده نمونه سنتز شده و تا حدودی درصد هر یک از آن‌ها داخل نمونه را به دست آورد.



شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه در میکروسکوپ الکترونی با استفاده از پرتو ایکس

- الکترون‌ها ممکن است پس از برخورد به نمونه سبب تابش فوتون یا نور از آن شوند. به این حالت «کاتدولومینسانس (Cathodoluminescence)» گفته می‌شود.

- الکترون‌ها پس از برخورد به سطح نمونه، مقداری از انرژی اولیه خود را از دست می‌دهند. مقدار انرژی از دست داده شده را می‌توان توسط اسپکتروسکوپی انرژی از دست داده شده اندازه گرفت.

در میکروسکوپ الکترونی روبشی یا TEM، تصویر توسط الکترون‌های جذب شده یا پراکنده شده توسط نمونه‌های زیستی (غیرکریستالی) تشکیل می‌شود. بنابراین، برای مطالعه نمونه‌های زیستی و داشتن تصویری واضح از آن‌ها، کنتراست دامنه و فازی نقش مهمی ایفا می‌کنند. در مقابل، کنتراست انکسار و فازی عامل‌های مهمی برای تشکیل تصویر در نمونه‌های کریستالی و غیرزیستی هستند. همان‌طور که گفتیم به هنگام برخورد پرتو الکترون با نمونه، اتفاق‌های مختلفی رخ می‌دهند. کنتراست‌های دامنه، فازی و انکسار نقش مهمی در تشکیل تصویر دارند. برای آن‌که بتوانیم از برهم‌کنش‌های دیگر نیز اطلاعات مفیدی به دست آوریم، باید به میکروسکوپ پایه، تجهیزات جانبی اضافه کنیم. این برهم‌کنش‌ها، اطلاعات مختلفی در مورد ترکیب شیمیایی نمونه، ضخامت و ساختار کریستالی آن به ما می‌دهند.

انواع میکروسکوپ الکترونی

چهار نوع میکروسکوپ الکترونی وجود دارند:

- **میکروسکوپ الکترونی عبوری**: در این نوع میکروسکوپ الکترونی، پرتو الکترون به سمت نمونه فرستاده می‌شود. برخی از الکترون‌ها از سطح نمونه منعکس می‌شوند و برخی دیگر از آن می‌گذرند. الکترون‌های عبوری از نمونه، تصویری از نمونه تهیه می‌کنند. این تصویر می‌تواند تا ۵ میلیون مرتبه بزرگ شود.

- **"میکروسکوپ الکترونی انعکاسی" | (Reflection Electron Microscope)**

(REM): عملکرد این میکروسکوپ مشابه عملکرد میکروسکوپ الکترونی عبوری یا TEM است. تفاوت این دو میکروسکوپ در آن است که در میکروسکوپ الکترونی REM تصویر نمونه از الکترون‌های منعکس شده از سطح نمونه تهیه می‌شود. این میکروسکوپ برای بررسی دقیق سطح نمونه‌های مختلف بسیار مفید است.

- **میکروسکوپ الکترونی روبشی :** در این میکروسکوپ، پرتو باریکی از الکترون سطح نمونه مورد مطالعه را جاروب می‌کند. الکترون‌ها ممکن است از سطح نمونه منعکس یا توسط آن جذب شوند. بنابراین، تصویر نهایی ممکن است از الکترون‌های بازتابی یا جذب شده تهیه شده باشد.

- **"میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی" | (Scanning Transmission Electron Microscope | STEM)**

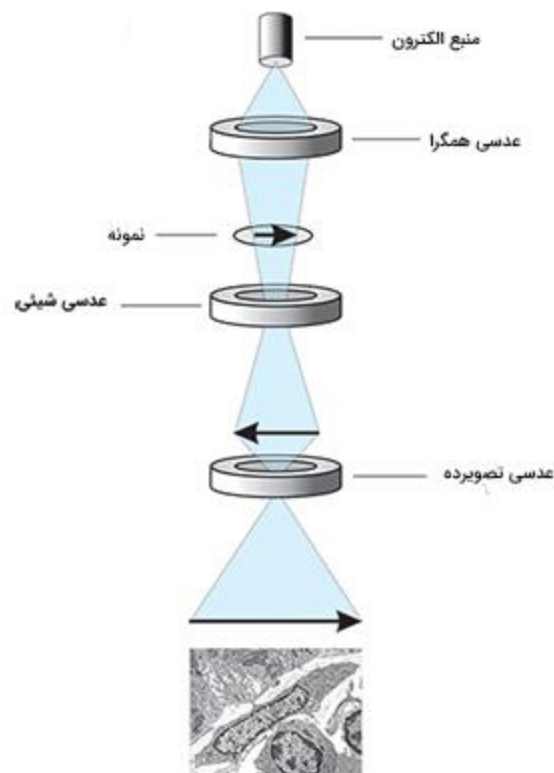
(STEM | Microscope): در این میکروسکوپ جزئیات سطحی میکروسکوپ الکترونی روبشی و بزرگنمایی بسیار بالای میکروسکوپ الکترونی عبوری با یکدیگر ترکیب شده‌اند. با استفاده از این میکروسکوپ می‌توانیم تحلیل‌های پیچیده‌ای از نمونه داشته باشیم.

در ادامه، در مورد هر یک از این میکروسکوپ‌ها به اختصار صحبت می‌کنیم.

میکروسکوپ الکترونی عبوری چیست؟

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی می‌توانیم تصاویری با وضوح و کیفیت بالاتری در مقایسه با میکروسکوپ نوری، از نمونه‌های مختلف تهیه کنیم. شاید از خود بپرسید چرا تصاویر به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی کیفیت و وضوح بهتری دارند. دلیل این موضوع به طول موج بسیار کوچک پرتو الکترونی برمی‌گردد. هرچه طول موج موجی کوچک‌تر باشد، انرژی آن بیشتر است. بنابراین، پرتو الکترونی استفاده شده در میکروسکوپ الکترونی عبوری یا TEM انرژی بسیار زیادی دارد. پرتو الکترونی از تفنگ الکترونی آزاد می‌شود. اما این پرتو باید از منبعی به وجود آمده باشد. آیا می‌دانید منبع تولید الکترون در میکروسکوپ الکترونی چیست؟ به طور معمول، برای تولید الکترون در میکروسکوپ‌های الکترونی از رشته تنگستن استفاده می‌شود.

دمای رشته تنگستنی افزایش می‌یابد. با افزایش دما، الکترون از تنگستن خارج می‌شود. سوال مهمی که ممکن است مطرح شود آن است که چگونه الکترون‌های تولید شده را می‌توان به سمت نمونه هدایت کرد. برای انجام این کار از عدسی همگرا استفاده می‌شود. نمونه پس از عدسی همگرا قرار گرفته است. پس از نمونه، به ترتیب عدسی شیئی، عدسی چشمی و آشکارساز قرار گرفته‌اند. اگر این چیدمان را با میکروسکوپ نوری مقایسه کنیم، از نظر ظاهری هیچ تفاوتی مشاهده نمی‌کنیم. اما باید بدانیم که عدسی‌های استفاده شده در میکروسکوپ نوری با عدسی‌های استفاده شده در میکروسکوپ نوری با یکدیگر تفاوت دارند. عدسی‌های استفاده شده در میکروسکوپ الکترونی، عدسی‌های الکترومغناطیسی هستند.



مرتب کردن الکترون‌ها و قرار دادن آن‌ها در یک خط مستقیم بسیار مهم است. برای انجام این کار باید انرژی زیادی به الکترون‌ها بدهیم. الکترون‌ها پس از دریافت انرژی مجبور می‌شوند در یک خط به نام پرتو در کنار یکدیگر قرار بگیرند. این انرژی چگونه تامین می‌شود؟ برای دادن انرژی به الکترون‌ها می‌توانیم ولتاژ بسیار بالایی، در حدود ۲۰ کیلوولت، را به آن‌ها اعمال کنیم. گاهی اوقات برای آن‌که بتوانیم الکترون‌ها را به خوبی متمرکز کنیم از آن‌ها استفاده می‌کنیم. اما آن‌ها بیشتر در میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM استفاده می‌شوند. در بخش بعد، در مورد این میکروسکوپ با جزئیات بیشتری صحبت خواهیم کرد. ضخامت نمونه مورد استفاده در TEM باید بسیار کوچک و نازک باشد. چرا؟ زیرا می‌خواهیم جزئیات بیشتری را مشاهده کنیم.

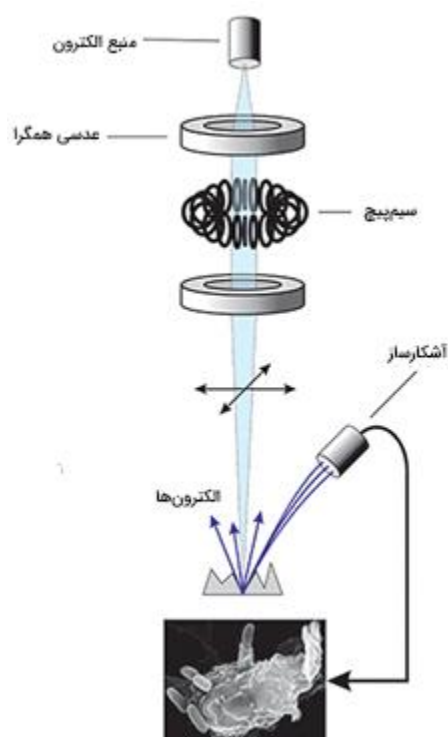
نمونه از اتم‌های زیادی ساخته شده است. برخی از این اتم‌ها سنگین و برخی دیگر سبک هستند. اتم‌های سنگین‌تر، الکترون‌های بیشتری را جذب می‌کنند. در مقابل، الکترون‌های کمتری

توسط اتم‌های سبک‌تر جذب می‌شوند. بنابراین، اتم‌های سبک‌تر الکترون‌های بیشتری را از خود عبور می‌دهند. به این الکترون‌ها، الکترون‌های عبوری گفته می‌شود. به دلیل جذب متفاوت الکترون‌ها توسط اتم‌های مختلف در نمونه، تصویر آن ساخته می‌شود. به این نکته توجه داشته باشید که تصویر به‌دست آمده از نمونه، سیاه و سفید است. با میکروسکوپ الکترونی نمی‌توانیم از نمونه خود تصویر رنگی تهیه کنیم. برای متمرکز کردن الکترون‌ها به آن‌ها انرژی می‌دهیم. این انرژی از طریق اعمال ولتاژ بالا تامین می‌شود. ولتاژ بالا سبب ایجاد جریان الکتریکی و به دنبال آن میدان مغناطیسی می‌شود. میدان مغناطیسی ایجاد شده به ما کمک می‌کند که الکترون‌ها را در یک خط و به صورت پرتویی متمرکز داشته باشیم. چیدمان نشان داده شده در تصویر بالا داخل محفظه‌ای با خلأ بالا قرار دارند. چرا؟ زیرا مولکول‌های تشکیل دهنده هوا می‌توانند الکترون‌های متمرکز شده را پراکنده کنند.

میکروسکوپ الکترونی روبشی چیست؟

در بخش قبل با میکروسکوپ الکترونی عبوری آشنا شدیم. در این بخش با میکروسکوپ الکترونی روبشی آشنا می‌شویم. با استفاده از SEM می‌توانیم تصویری سه‌بعدی از نمونه تهیه کنیم. با استفاده از TEM معمولاً می‌توانیم تصویری دوبعدی از نمونه داشته باشیم که جزئیات داخلی آن را با وضوح بسیار بالایی نشان می‌دهد.

هدف اصلی استفاده از میکروسکوپ الکترونی، تهیه تصویری سه‌بعدی با وضوح و بزرگنمایی مناسب از نمونه مورد مطالعه است. ساختار و چیدمان کلی میکروسکوپ الکترونی عبوری در تصویر زیر نشان داده شده است. ساختار SEM و TEM در حالت کلی بسیار شبیه یکدیگر هستند.



همان‌طور که در تصویر بالا مشاهده می‌شود، ابتدا تفنگ الکترونی قرار دارد. پرتو الکترونی در SEM ، همانند TEM ، با استفاده از رشته تنگستن تولید می‌شود. پس از تفنگ الکترونی، آند قرار گرفته است. آند، الکترونی با بار مثبت است که الکترون‌ها را در جهتی مشخص قرار می‌دهد و آن‌ها را به سمت نمونه هدایت می‌کند. دلیل این موضوع آن است که الکترون‌ها بار الکتریکی منفی دارند و توسط بار مثبت آند، جذب می‌شوند. پس از آند عدسی همگرا قرار دارد. پس از عدسی همگرا، سیم‌پیچ روبشی و پس از آن عدسی شیئی قرار گرفته است. نمونه‌ای که می‌خواهیم مطالعه کنیم را پس از عدسی شیئی قرار می‌دهیم. الکترون پس از برخورد به نمونه، پراکنده و توسط آشکارساز، آشکار می‌شود.

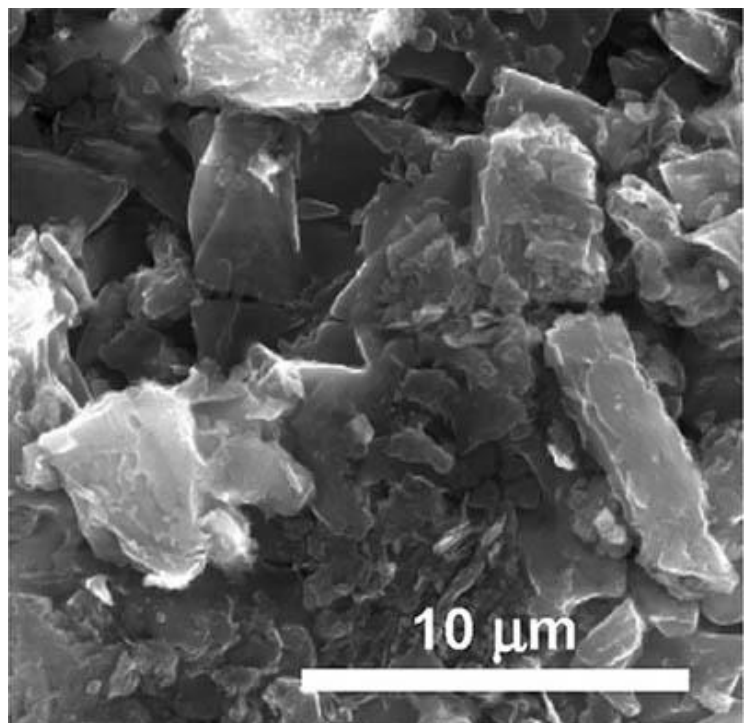
الکترون‌های خارج شده از تفنگ الکترونی در ابتدا متمرکز و در جهتی مشخص قرار نگرفته‌اند. برای متمرکز کردن الکترون‌ها به انرژی نیاز داریم. این انرژی از طریق اعمال ولتاژ به الکترون‌ها داده می‌شود. مقدار این ولتاژ ممکن است در حدود ۲۰ کیلووات یا ۲۰ هزار وات باشد. این ولتاژ به الکترون‌ها کمک می‌کند که به شکل پرتو در کنار یکدیگر قرار بگیرند. همچنین، آند با بار مثبت کمک می‌کند تا الکترون‌ها در راستای خطی مستقیم (پرتو) هم‌خط شوند. پرتو الکترون تشکیل شده به عدسی همگرا (کندانسور) و پس از آن به سیم‌پیچ روبشی وارد می‌شود. این پرتو پس از عبور از عدسی شیئی، به نمونه برخورد می‌کند. پس از برخورد پرتو الکترون به سطح نمونه چند اتفاق ممکن است رخ دهند:

- الکترون‌ها ممکن است پس از برخورد به سطح نمونه، منعکس شوند. به این الکترون‌ها، الکترون‌های برگشتی می‌گوییم. این الکترون‌ها پس از برهم‌کنش کشسان با سطح نمونه، منعکس می‌شوند.

- الکترون‌ها ممکن است به هنگام برخورد به سطح نمونه سبب خروج الکترون‌ها از اتم‌های تشکیل‌دهنده نمونه شوند. به الکترون‌های خروجی از نمونه، الکترون‌های ثانویه گفته می‌شود. به بیان دیگر، انرژی الکترون‌ها پس از برخورد به سطح نمونه، به الکترون‌های نمونه منتقل خواهد شد.

- پس از برخورد الکترون‌ها به سطح نمونه ممکن است اشعه ایکس تولید شود. پس از برخورد الکترون به سطح نمونه و خروج الکترون از لایه‌های داخلی اتم‌های تشکیل‌دهنده نمونه، حفره ایجاد می‌شود. الکترون از لایه بیرونی‌تر، حفره ایجاد شده را پر می‌کند. الکترون لایه خارجی با رفتن به لایه داخلی‌تر و پر کردن حفره، اشعه ایکس تابش می‌کند.

فرض کنید سطح نمونه به صورت نشان داده شده در تصویر زیر است. ساختاری توده‌ای (بالک) روی سطح نمونه قرار دارد.



تصویر SEM از پودر اکسید شده GCN

پرتو الکترون به سمت ساختار بالک در نمونه می‌آید. دو حالت ممکن است اتفاق بیافتد:

۱. پرتو الکترون به نقاط روی قله برخورد می‌کند.

۲. پرتو الکترون به نقاطی در ارتفاع کمتر، دره، برخورد می‌کند.

همان‌طور که گفتیم الکترون به چند صورت می‌تواند پراکنده شود. آشکارساز می‌تواند پراکندگی‌های مختلف را شناسایی کند. در ادامه و پس از شناسایی انواع پراکندگی‌ها، آشکارساز تصویری سه‌بعدی از نمونه به ما می‌دهد. سوال مهمی که ممکن است مطرح شود آن است که چه تعداد از الکترون‌ها پس از برخورد به سطح نمونه، پراکنده و چه تعداد از آن‌ها بدون پراکندگی، حفظ می‌شوند. پاسخ به این پرسش به محل برخورد پرتو الکترونی به نمونه بستگی دارد. سطح نمونه از تعداد زیادی دره و قله تشکیل شده است. الکترون‌هایی که به قله برخورد می‌کنند، در مقایسه با الکترون‌هایی که به دره برخورد می‌کنند، بهتر می‌توانند پراکنده شوند. به بیان دیگر، تعداد الکترون‌های پراکنده شده پس از برخورد پرتو الکترونی به دره بیشتر از تعداد الکترون‌های پراکنده شده پس از برخورد پرتو الکترونی به دره است.

از آنجا که نقاط مختلف روی نمونه، درصد پراکندگی متفاوتی از خود نشان می‌دهند، به راحتی می‌توانیم تصویری سه‌بعدی از سطح نمونه تهیه کنیم. گاهی برای آن که تمام سطح نمونه توسط پرتو الکترون جاروب شود، باید آن را حرکت دهیم یا در جهت‌های مختلف بچرخانیم. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توانیم نمونه‌های زیستی و غیرزیستی را مطالعه و نانوساختارهای متفاوت را به خوبی می‌توانیم با استفاده از آن بررسی کنیم. همچنین، با استفاده از SEM می‌توانیم ساختار کریستالی انواع نانوساختارها و کریستال‌ها را به‌دست آوریم. با استفاده از SEM و TEM می‌توانیم تصاویری با جزییات زیاد و بسیار واضح از نمونه‌های خود به‌دست آوریم. تفاوت اصلی این

دو میکروسکوپ در این موضوع نهفته است که با استفاده از TEM به جزییات نمونه دقت می‌کنیم، در حالی که با استفاده از SEM می‌توانیم تصاویر سه‌بعدی زیبایی از نمونه‌های خود تهیه کنیم.

مقایسه میکروسکوپ‌های SEM و TEM

در هر دو میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری برای تولید پرتو الکترون از رشته تنگستن با دمای بالا استفاده و برای متمرکز کردن الکترون‌های تولید شده به آن‌ها ولتاژ بالایی اعمال می‌کنیم. میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری هر کدام به هنگام مقایسه با یکدیگر، مزیت‌هایی نسبت به دیگری دارند که در ادامه آن‌ها را بیان می‌کنیم.

SEM در مقایسه با TEM شامل موارد زیر است.

- ارزان‌تر است.
- در زمانی کمتر، تصویری با بزرگنمایی و وضوح بالا از نمونه تهیه می‌کند.
- آماده‌سازی کمتری برای نمونه لازم است.
- می‌تواند از نمونه‌هایی با ضخامت بیشتر تصویر تهیه کند.
- نمونه‌های بزرگ‌تر را می‌تواند مطالعه کند.
- همچنین، TEM در مقایسه با SEM شامل موارد زیر است.
- تصویری با وضوح بسیار بالاتر ایجاد می‌کند.
- داده‌های کریستالوگرافی و اتمی از نمونه‌ها می‌دهد.
- تصاویر دوبعدی از نمونه‌ها می‌دهد. تفسیر تصاویر دوبعدی بسیار راحت‌تر از تفسیر تصاویر سه‌بعدی است.

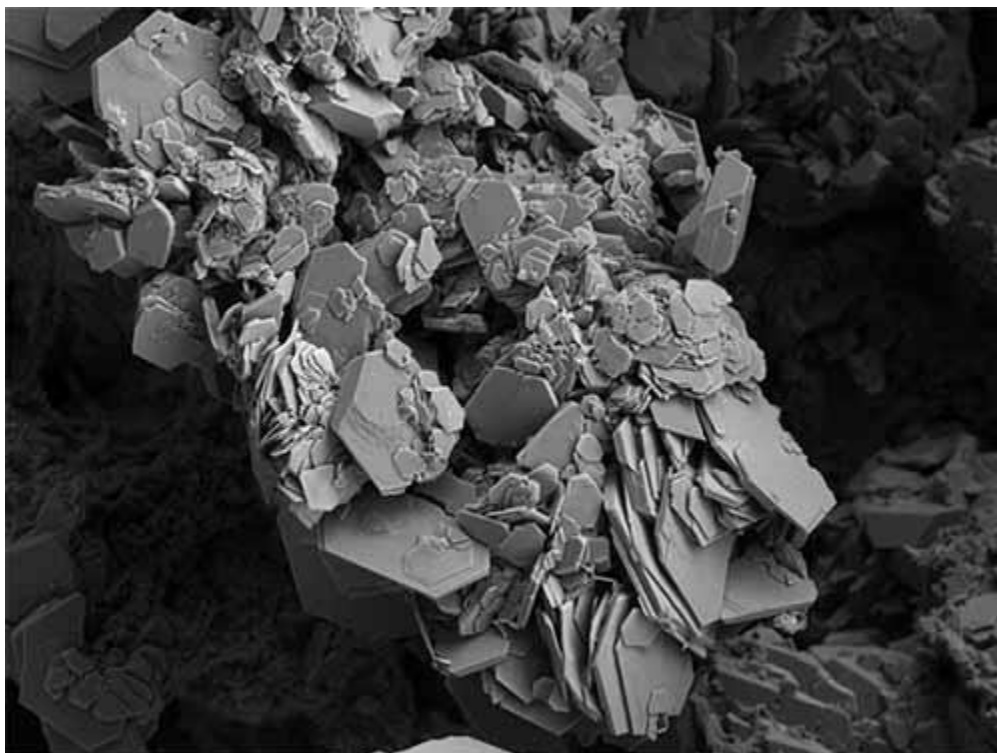
- به کاربر اجازه می‌دهد ویژگی‌های بیشتری از نمونه را مطالعه و بررسی کند.

جدول زیر میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری را از جنبه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه کرده است.

میکروسکوپ الکترونی عبوری	میکروسکوپ الکترونی روبشی	
شعاع پرتو الکترونی در TEM بزرگ‌تر از شعاع آن در SEM است.	الکترون‌ها متمرکز شده‌اند.	جریان الکترون
قدرت تفکیک بالایی دارد.	قدرت تفکیک پایینی دارد.	قدرت تفکیک
تصویر گرفته شده ساختار داخلی نمونه را نشان می‌دهد.	تصویر گرفته شده سطح و توپوگرافی نمونه را نشان می‌دهد.	تصویر گرفته شده
نمونه تا ۵۰ میلیون مرتبه می‌تواند بزرگ شود.	نمونه تا ۲ میلیون مرتبه می‌تواند بزرگ شود.	بزرگ‌نمایی
دوبعدی	سه‌بعدی	ابعاد تصویر سه‌بعدی
پرتو الکترونی به داخل نمونه نفوذ و با اتم‌های عمقی برهم‌کنش می‌کند.	پرتو الکترونی به داخل نمونه نفوذ نمی‌کند و با اتم‌های سطحی برهم‌کنش می‌کند.	نفوذ به داخل نمونه
برای ضخامت نمونه محدودیت وجود دارد.	محدودیتی برای ضخامت نمونه وجود ندارد.	ضخامت نمونه
برای آماده‌سازی نمونه باید مرحله‌های مختلفی طی شود.	نمونه به راحتی آماده می‌شود.	آماده‌سازی نمونه
گران‌تر است.	ارزان‌تر است.	هزینه
آهسته‌تر است.	سریع‌تر است.	سرعت
کار با آن پیچیده‌تر است و نیاز به آموزش دارد.	کار با آن آسان‌تر است.	عملکرد

میکروسکوپ الکترونی انعکاسی چیست؟

عملکرد این میکروسکوپ بسیار شبیه عملکرد میکروسکوپ الکترونی عبوری یا TEM است. تفاوت این دو میکروسکوپ در آن است که در میکروسکوپ الکترونی REM تصویر نمونه از الکترون‌های منعکس شده از سطح نمونه تهیه می‌شود. این میکروسکوپ برای بررسی دقیق سطح نمونه‌های مختلف بسیار مفید است.

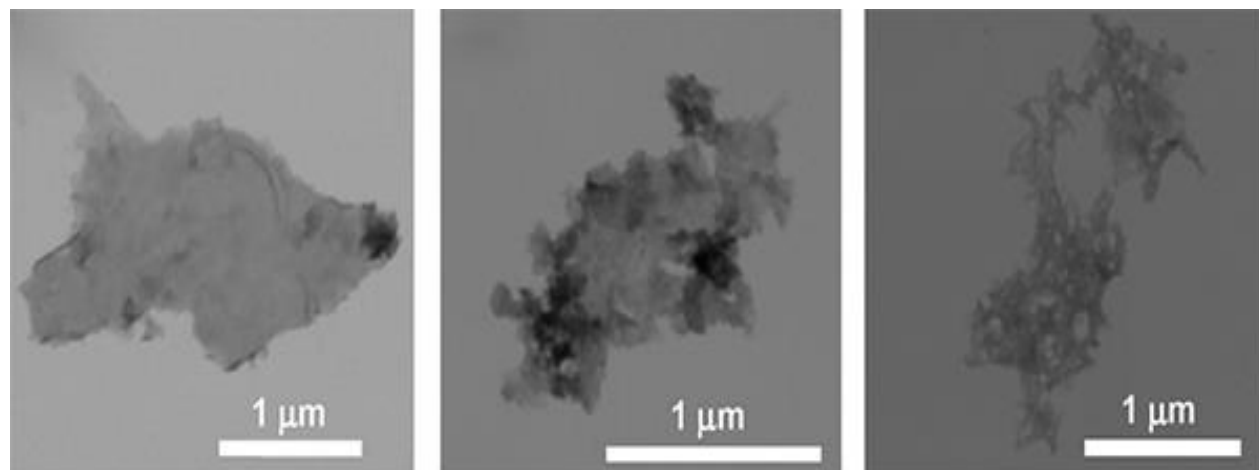


تصویر REM از نانوساختار

میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی چیست؟

در بخش قبل با میکروسکوپ الکترونی انعکاسی آشنا شدیم. در این بخش با میکروسکوپ الکترونی روبشی آشنا می‌شویم. این میکروسکوپ همان‌گونه که از نام آن مشخص است ترکیبی از دو میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری است. این بدان معنا است که تصویر عبوری با استفاده از روش روبشی به دست می‌آید. TEM می‌تواند با اضافه کردن سیستمی که بتواند پرتو متمرکز شده الکترون را روی سطح نمونه جاروب کند، به STEM ارتقا یابد. در این صورت، پس از جاروب سطح

نمونه توسط پرتو متمرکز الکترون، تصویری از آن ایجاد خواهد شد. همچنین، SEM نیز می‌تواند به STEM ارتقا یابد. بنابراین، STEM برخی از مزایای SEM و TEM را با یکدیگر ترکیب می‌کند. تصویر به‌دست آمده از STEM مشابه تصویر به‌دست آمده از TEM است.



تصاویر STEM از نمونه‌های مختلف GCN

در این میکروسکوپ پرتو الکترون از نمونه‌ای نازک عبور می‌کند و تصویر از نمونه در مقیاس اتمی با وضوح بسیار بالا تهیه می‌شود. به هنگام برهم‌کنش پرتو الکترون با نمونه، سیگنال‌های مختلفی ایجاد می‌شوند. از این‌رو، STEM علاوه بر تصویر، اطلاعات دیگری نیز می‌تواند از نمونه در اختیار ما قرار دهد. به عنوان مثال، الکترون‌های که پس از برخورد غیرکشسان از سطح نمونه پراکنده شده‌اند می‌توانند اطلاعاتی در مورد ساختار الکترونیکی، حالت‌های اکسایش، و ترکیب شیمیایی از نمونه به ما بدهند. میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی را می‌توان برای مطالعه ابرشبکه‌ها استفاده کرد.

مزایا و معایب میکروسکوپ الکترونی چیست؟

گرچه میکروسکوپی الکترونی نسبت به میکروسکوپ نوری مزیت‌های زیادی دارد، استفاده از میکروسکوپ الکترونی مزایا و معایبی دارد که در ادامه آن‌ها را بیان می‌کنیم.

مهم‌ترین مزیت‌های میکروسکوپ الکترونی عبارت هستند از:

- همان‌طور که در مطالب بالا اشاره شد میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توانند جزئیات نمونه را با وضوح بالایی نشان دهند. قدرت تفکیک این میکروسکوپ کمتر از $5/0$ نانومتر و در حدود 400 مرتبه بیشتر از میکروسکوپ‌های نوری معمولی است.
 - این میکروسکوپ به طور معمول می‌تواند نمونه‌ها را تا 10 میلیون مرتبه بزرگ‌تر کند.
 - با استفاده از این میکروسکوپ می‌توانیم تصاویر سه‌بعدی از نمونه خود تهیه کنیم.
 - همان‌طور که گفتیم طول موج پرتو الکترون 100 هزار مرتبه کوچک‌تر از طول موج نور مرئی است. بنابراین، جزئیات بسیار بیشتری را می‌توانیم با وضوح بسیار بالایی تماشا کنیم.
 - از آنجا که قدرت تفکیک این میکروسکوپ در حدود $2/0$ نانومتر است، جزئیات بسیار دقیقی را از داخل سلول‌های زیستی و نانوساختارها می‌توانیم تماشا کنیم.
 - با استفاده از این میکروسکوپ می‌توانیم تصویر دقیق و واضحی از نمونه‌های زیستی، بدون آسیب رساندن به آن‌ها، تهیه کنیم.
- در کنار تمام مزیت‌های عنوان شده برای میکروسکوپ الکترونی، از معایب آن نمی‌توانیم چشم‌پوشی کنیم:
- میکروسکوپ الکترونی، تنها می‌تواند تصاویر سیاه و سفید تهیه کند.

- عملکرد پیچیده‌ای دارد.
- بسیار گران است و به راحتی نمی‌توان آن را تهیه کرد.
- تنها نمونه‌های مرده و ثابت را می‌توان تماشا و مطالعه کرد.
- تصویر نمونه را تنها می‌توان روی پرده فلورسانس تماشا کرد.
- خطر نشت بالا است.
- میکروسکوپ‌های الکترونی برای تولید تصاویری با وضوح بالا باید در ساختمان‌های پایدار قرار بگیرند و مجهز به امکاناتی باشند که بتوانند میدان‌های مغناطیسی اطراف را خنثی کنند .
- نمونه‌های استفاده شده در میکروسکوپ الکترونی باید در خلأ نگه داشته شوند. دلیل انجام این کار جلوگیری از پراکندگی پرتو الکترونی توسط مولکول‌های هوا است. برای رسیدن به خلأ بالا باید از پمپ‌های بسیاری قوی استفاده کرد.
- بیشتر نمونه‌های استفاده شده در میکروسکوپ‌های الکترونی باید رسانی باشند. بنابراین، نمونه‌های نارسا باید با لایه‌ای رسانی، مانند طلا، پالادیوم، کربن یا نقره، پوشانده شوند.

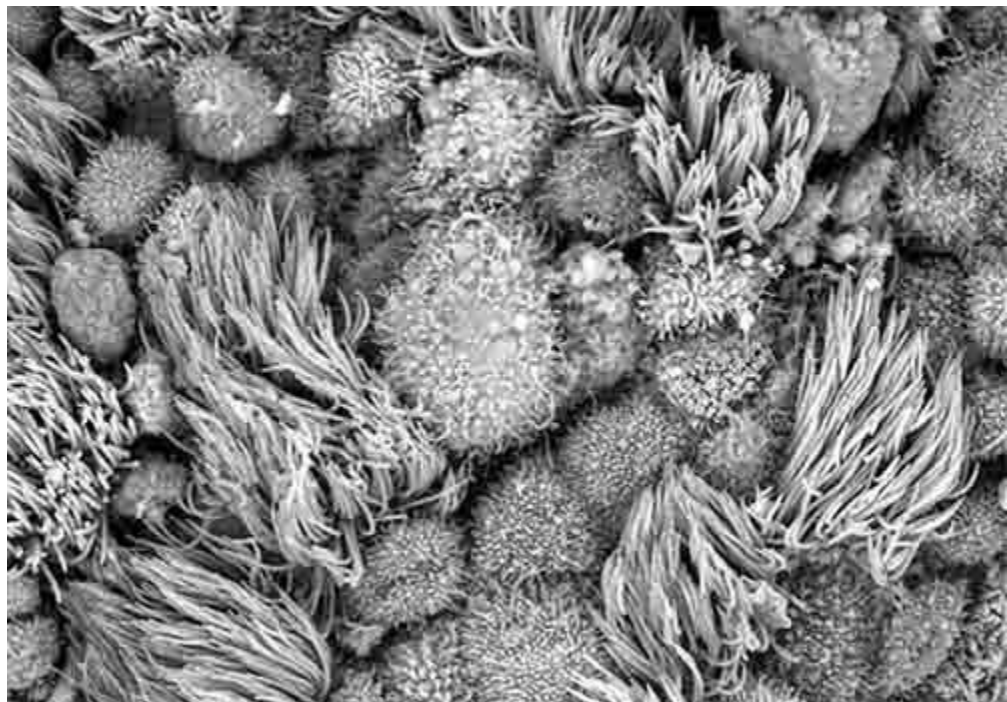
تصاویر میکروسکوپ الکترونی

در مطالب بالا فهمیدیم میکروسکوپ الکترونی چیست و چه تفاوتی با میکروسکوپ نوری دارد. با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توانیم اجسام بسیار کوچک، در محدوده بین یک تا ۱۰۰ نانومتر را مشاهده کنیم. همچنین، با انواع میکروسکوپ‌های الکترونی آشنا شدیم. در این بخش، تصاویر زیبایی که از نمونه‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گرفته شده است را با یکدیگر مشاهده می‌کنیم. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی به ما نشان می‌دهد زندگی در دنیای نامرئی ویروس‌ها، باکتری‌ها و نانوساختارهای مختلف چگونه است. دنیای میکروسکوپی دنیای بسیار جالب و شگفت‌انگیزی است. برای مشاهده این دنیای جالب باید از پیشرفت تکنولوژی ممنون باشیم. میکروسکوپ الکترونی در حدود ۹۰ سال قبل و در سال ۱۹۳۰ میلادی اختراع شد. پس از آن که پای انسان به دنیای ناشناخته میکروسکوپی باز شد و توانست تصاویری شگفت‌انگیز از این جهان کوچک مشاهده کند.

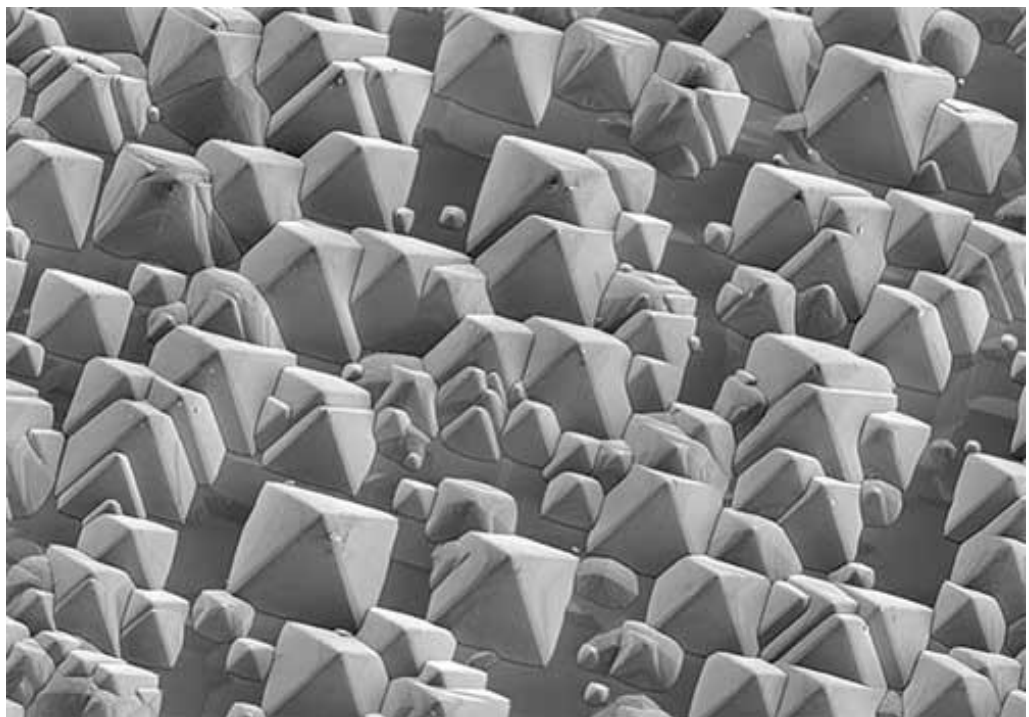
میکروسکوپ الکترونی با ترکیب انواع سیگنال‌ها، دنیای نامرئی میکرواورگانیسم‌ها را به ما نشان می‌دهد. همچنین، سطح نانوساختارهای مختلف سنتز شده را می‌توانیم با استفاده از میکروسکوپ الکترونی بررسی و مشاهده کنیم. در میکروسکوپ الکترونی روبشی، پرتو الکترون به سطح نمونه برخورد می‌کند و مقداری انرژی از دست می‌دهد. این انرژی به شکل الکترون‌های برگشتی، الکترون ثانویه، گرما یا پرتو ایکس ظاهر می‌شود. از این سیگنال‌ها می‌توان برای ایجاد انواع تصویر استفاده کرد. همچنین، هر یک از این سیگنال‌ها اطلاعات مختلفی، مانند توپوگرافی، بافت، ترکیب شیمیایی و جهت‌گیری مواد تشکیل‌دهنده نمونه را به ما می‌دهد. با ترکیب این سیگنال‌ها، تصویری دوبعدی و سیاه و سفید ایجاد می‌شود. میکروسکوپ الکترونی می‌تواند نمونه را بین ۱۰ تا ۳۰۰ هزار مرتبه

بزرگ کند. حتی بزرگ‌نمایی برخی میکروسکوپ‌های الکترونی بزرگ‌تر از ۳۰۰ هزار مرتبه و تا دو میلیون مرتبه است.

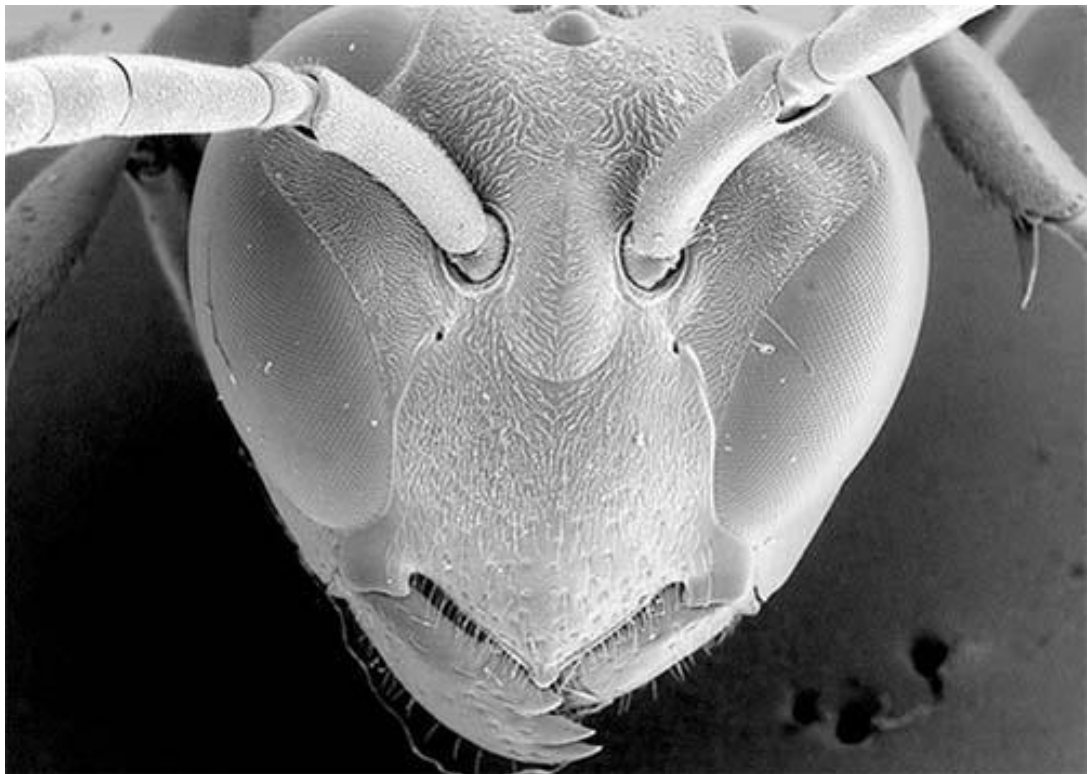
از زمان اختراع میکروسکوپ الکترونی در سال ۱۹۳۱ میلادی تا دسترسی تجاری به آن در سال ۱۹۶۵ میلادی، این میکروسکوپ‌ها به یکی از بخش‌های ثابت در پژوهش‌های دانشگاهی تبدیل شده‌اند. در ادامه، تعدادی از تصویرهای گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری را مشاهده می‌کنیم. در تصویر زیر تصویری از سطح مخاطی وابسته به نایژه در موش صحرایی را مشاهده می‌کنید. در این تصویر گرفته شده توسط SEM ، جزئیات به خوبی نشان داده شده‌اند. ساختارهای مو مانند و بلند سلول‌های مژک‌دار نقش مهمی در فرایند خودپاکسازی نایژه ایفا می‌کنند. این تصویر در ولتاژ ۱۰ کیلووات گرفته شده است.



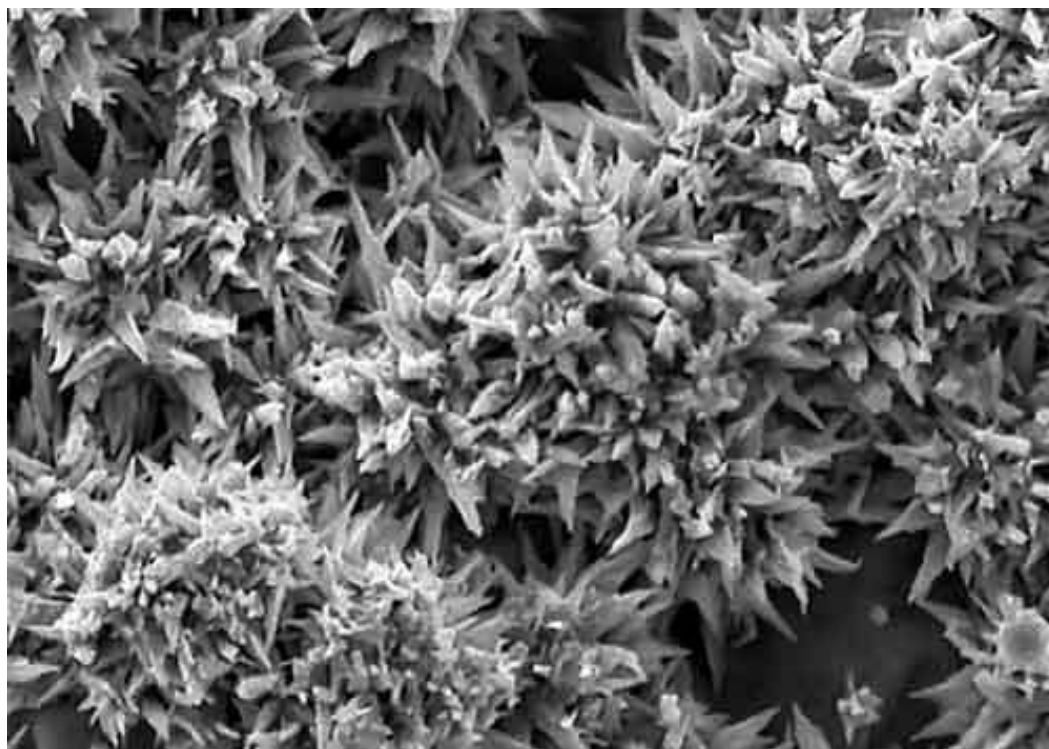
در تصویر زیر سطح ۵۰ میکرومتری صفحه خورشیدی نشان داده شده است. ساختارهای هرمی شکل تشکیل شده در سطح صفحه خورشیدی، در به دام انداختن نور و کاهش انعکاس آن کمک می‌کند. پژوهشگرهای زمینه فتوولتائیک به دنبال راه‌هایی برای بهینه کردن ساختار و بافت این سطح هستند. دلیل این موضوع آن است که شکل، اندازه و یکنواختی هرم‌های تشکیل شده تاثیر بسزایی بر بازتاب اپتیکی و به دام انداختن انرژی دارد. به این نکته توجه داشته باشید که ولتاژ شتاب‌دهنده مقدار نفوذ پرتو الکترونی به داخل نمونه را کنترل می‌کند. هر چه مقدار این ولتاژ بیشتر باشد، الکترون‌ها تا عمق بیشتری می‌توانند داخل نمونه نفوذ کنند. بنابراین، اگر هدف مشاهده سطح باشد باید مقدار ولتاژ شتاب‌دهنده کوچک باشد. برای ثبت تصویر زیر، مقدار ولتاژ شتاب‌دهنده نسبتاً کوچک و برابر ۵ کیلوولت است.



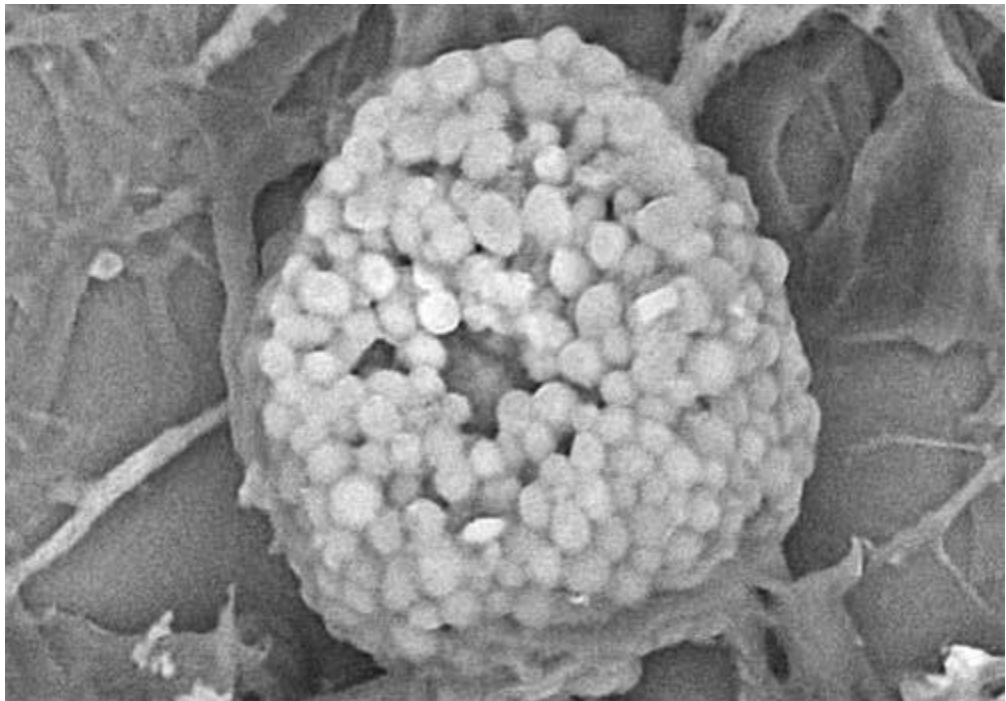
در تصویر زیر سر زنبور نشان داده شده است. زنبورهای عسل یکی از موضوعهای جذاب برای پژوهشگران هستند و پژوهش‌های زیادی روی ویژگی‌های آن‌ها انجام شده است. تعداد زنبورهای عسل به دلیل گسترش کنه‌های واروا در حال کاهش است. این کنه به لارو کندو یا به بدن زنبور می‌چسبد و با مکیدن چربی‌های بدن، لارو را ضعیف می‌کند. از مهم‌ترین علائم زنبورها پس از چسبیدن کنه‌ها به آن‌ها، وزن کم و تغییر شکل بال‌ها است. هر دو این علامت‌ها توسط تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی می‌توانند به راحتی بررسی و مطالعه شوند.



آلیاژ جذب‌کننده هیدروژن با بزرگنمایی ۳۰ هزار مرتبه در تصویر زیر نشان داده شده است. آلیاژهای ذخیره‌کننده هیدروژن مواد فلزی هستند که می‌توانند به صورت بازگشت‌پذیر هیدروژن را از حالت گازی یا به صورت الکتروشیمیایی جذب و آزاد کنند. از این آلیاژها در ساخت الکتروود استفاده می‌شود.

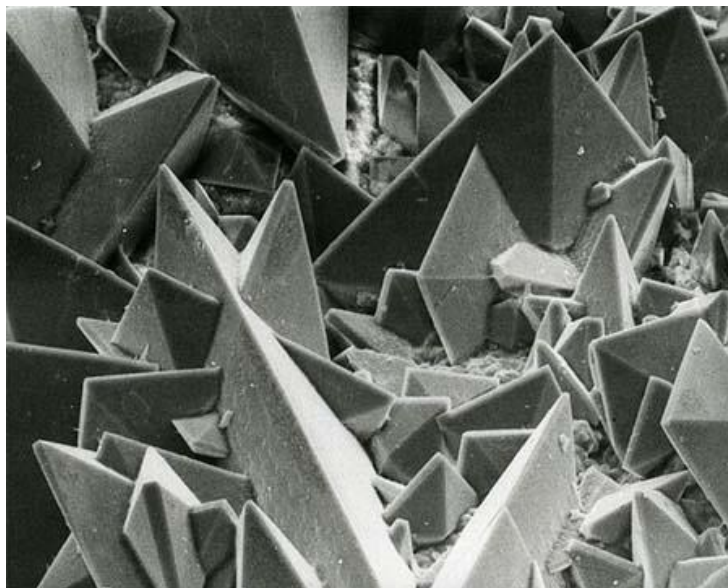


ماست سل با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ در تصویر زیر نشان داده شده است. این سلول‌ها نوعی سلول گلبول سفید هستند که در بافت همبند یافت می‌شوند. کره‌های کوچک در تصویر شامل واسطه‌های شیمیایی مانند هیستامین هستند. ماست سل‌ها نقش مهمی در واکنش‌های سیستم ایمنی ایفا می‌کنند. هنگامی که ماست سل به هنگام واکنش آلرژیک یا پاسخ به زخم و تورم فعال می‌شود، واسطه‌های شیمیایی موجود در هر یک از کره‌های کوچک آزاد می‌شوند. برای ثبت تصویر زیر، مقدار ولتاژ شتاب‌دهنده برابر ۱۰ کیلوولت است.



تصویر ماست سل

تصویری بزرگ‌شده از سنگ کلیه در ادامه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید سطح سنگ کلیه از هرم‌های نوک تیزی تشکیل شده است.

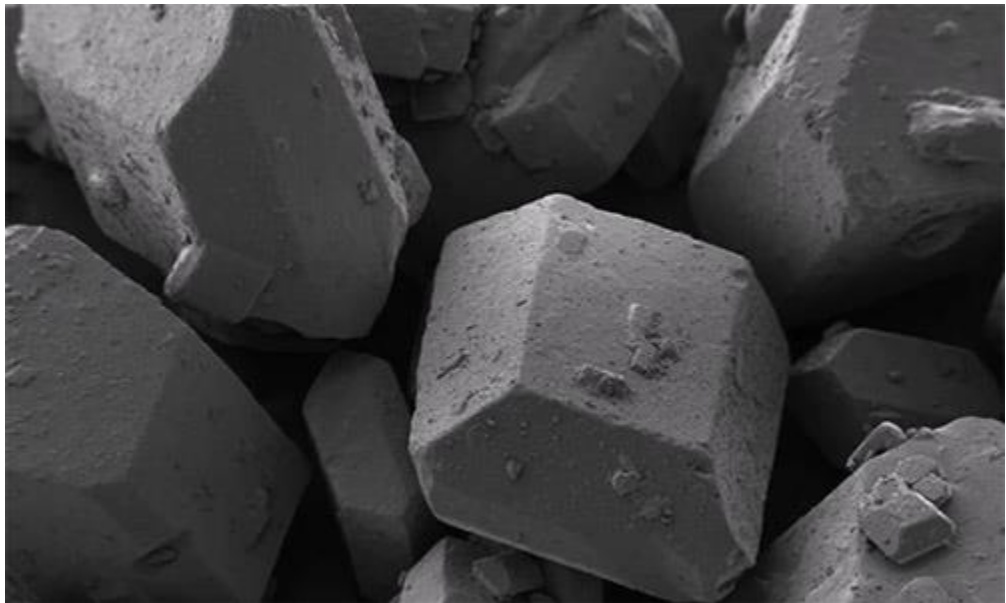


تصویر سنگ کلیه

در تصویر زیر، نمایی بسیار نزدیک از پوست کوسه را مشاهده می‌کنید. برای داشتن این تصویر، قسمتی بسیار نازک و کوچک از پوست کوسه تهیه و پس از آماده‌سازی، داخل محفظه خلأ میکروسکوپ الکترونی قرار داده شده است.



به طور حتم به هنگام صرف صبحانه، چای خود را با شکر شیرین کرده‌اید. آیا تا به حال پیش خود تصور کرده‌اید دانه‌های شکر زیر میکروسکوپ، چه شکلی دارند. اگر دانه‌ای شکر را با میکروسکوپ الکترونی تماشا کنید، تصویری همانند آنچه در ادامه نشان داده شده است، مشاهده خواهید کرد، دانه‌هایی به شکل مکعب. در کریستال‌های شکر، مولکول‌های ساکاروز شامل ۱۲ اتم کربن، ۲۲ اتم هیدروژن و ۱۱ اتم اکسیژن، به صورت منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.



تاریخچه ساخت و پیشرفت میکروسکوپ الکترونی

امروزه میکروسکوپ الکترونی وسیله‌ای بسیار ضروری برای مشخصه‌یابی و مطالعه ساختارها و مواد جدید است. اختراع این میکروسکوپ موفقیت بزرگی برای مطالعه نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی با اندازه بسیار کوچک محسوب می‌شد. در میکروسکوپ الکترونی نوعی، پرتو الکترونی روی نمونه هدف متمرکز می‌شود. پرتو الکترون پس از برخورد با نمونه یا از آن پراکنده می‌شود یا از آن عبور می‌کند. الکترون‌های پراکنده شده یا عبوری اطلاعات متفاوتی از ساختار نمونه به ما می‌دهند. شاید از خود پرسیده باشید ایده ساخت میکروسکوپ الکترونی چگونه به ذهن دانشمندان رسید. در سال ۱۹۲۴ میلادی، حدود ۲۰ سال پس از مطرح کردن نظریه فیزیک کوانتوم، دانشمندی به نام "دوبروی" (de Broglie) در سال ۱۹۲۴ میلادی دوگانگی موج ذره را بیان کرد.

بر طبق این نظریه، الکترون‌ها می‌توانند از خود رفتار دو گانه موج و ذره نشان دهند. به بیان دیگر، الکترون‌ها می‌توانند رفتار موجی از خود نشان دهند و طول موج و فرکانس داشته باشند. پس از بیان این نظریه، جرقه‌ای در ذهن دانشمندان زده شد، آیا می‌توان میکروسکوپی ساخت که به جای نور با پرتو الکترونی کار کند؟ بله. نخستین میکروسکوپ الکترونی که از الکترون‌های عبوری از نمونه، تصویری با بزرگنمایی ۴۰۰ تهیه کرد، توسط "ارنست روسکا" (Ernst Ruska) و "ماکس نول" (Max Knoll) در سال ۱۹۳۱ میلادی در دانشگاه فنی برلین رونمایی شد. در سال ۱۹۸۶ میلادی، روسکا به دلیل اختراع نخستین میکروسکوپ الکترونی، جایزه نوبل فیزیک در آن سال را از آن خود کرد.



نخستین میکروسکوپ الکترونی ساخته شده

اختراع میکروسکوپ الکترونی روبشی

نخستین میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM در سال ۱۹۳۷ میلادی توسط "مانفرد ون آردن" (Manfred Von Ardenne) اختراع شد. روسکا در دهه ۴۰ میلادی میکروسکوپ الکترونی روبشی را گسترش داد و بهبود بخشید. در این میکروسکوپ برای متمرکز کردن پرتو الکترون از عدسی‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. پس از آن، میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی به سرعت در دهه ۵۰ میلادی بهبود بخشیده شدند. نخستین SEM تجاری در سال ۱۹۶۵ میلادی به بازار عرضه شد.

پرسش‌های رایج در مورد میکروسکوپ الکترونی

در مطالب بالا با میکروسکوپ الکترونی آشنا شدیم و تفاوت آن با میکروسکوپ نوری را توضیح دادیم. در این بخش، به تعدادی از پرسش‌های مهم در مورد میکروسکوپ‌های الکترونی پاسخ می‌دهیم.

میکروسکوپ الکترونی چیست؟

میکروسکوپ الکترونی، میکروسکوپی است که در آن تصویر با استفاده از پرتو الکترونی شتاب‌دار ایجاد می‌شود. با استفاده از این میکروسکوپ می‌توانیم تصاویری با جزئیات واضح از سلول‌های زیستی، مولکول‌های بزرگ، فلزات، نانوساختارها و کریستال‌های مختلف تهیه کنیم.

بزرگنمایی میکروسکوپ الکترونی چه مقدار است؟

میکروسکوپ الکترونی می‌تواند نمونه‌های آزمایشگاهی را تا ۱۰ میلیون مرتبه بزرگ کند.

میکروسکوپ الکترونی در چه سالی اختراع شد؟

در سال ۱۹۳۳ میلادی، ایده ساخت میکروسکوپ الکترونی به ذهن دانشمندی به نام «ارنست روسکا (Ernst Ruska)» رسید. روسکا به دنبال ساخت میکروسکوپی بهتر از میکروسکوپ نوری بود تا بتواند تصاویر بسیار بهتری از نمونه‌های مختلف تهیه کند. ۴ سال بعد، دو دانشمند دیگر به نام‌های «بودو ون بوریس (Bodo von Borries)» و «هلموت روسکا (Helmut Ruska)» به روسکا پیوستند تا بتوانند رویای ساخت میکروسکوپ الکترونی را به واقعیت تبدیل کنند.



ارنست روسکا

از چه میکروسکوپ الکترونی برای مطالعه ساختار داخلی سلول‌ها استفاده می‌شود؟

یکی از بهترین میکروسکوپ‌های الکترونی برای مطالعه ساختار داخلی سلول‌ها، میکروسکوپ الکترونی عبوری یا TEM است.

جمع‌بندی

با استفاده از انواع میکروسکوپ‌های الکترونی می‌توانیم تصاویری بسیار واضح و با کیفیت بالا از نمونه‌های زیستی و غیرزیستی تهیه کنیم. در این مطلب با میکروسکوپ الکترونی، انواع و چگونگی عملکرد آن به زبان ساده آشنا شدیم. میکروسکوپ الکترونی، به جای پرتو نور، از پرتویی از الکترون‌های شتابدار به عنوان منبع روشنایی استفاده می‌کند. از آنجا که طول موج الکترون می‌تواند در حدود ۱۰۰ هزار مرتبه کوچک‌تر از طول موج فوتون‌های نور مرئی باشد، با استفاده از این میکروسکوپ می‌توانیم نمونه‌های بسیار کوچک را با وضوح بالا مشاهده کنیم.