میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری

میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری (TEM[1]) ابزارهایی ویژه در مشخص نمودن ساختار و مورفولوژی مواد محسوب می‌شوند که مطالعات ریزساختاری مواد با قدرت تفکیک بالا، و بزرگنمایی خیلی زیاد را امکان‌پذیر می‌سازند. علاوه بر این از این میکروسکوپ‌ها جهت مطالعات ساختارهای بلور، تقارن، جهت‌گیری و نقائص بلوری می‌توان استفاده نمود. این موارد سبب شده است که TEM امروزه به یک ابزار بسیار مهم در بسیاری از تحقیقات پیشرفته فیزیک، شیمی، بلورشناسی، علم مواد و زیست‌شناسی شناخته شود.

چرا باید از الکترون‌ها استفاده نمود؟

چرا باید از میکروسکوپ‌های الکترونی استفاده نمود؟ از نظر تاریخی به دلیل محدودیت قدرت تفکیک میکروسکوپ‌های نوری که از طول موج نور مرئی ناشی می‌شود، میکروسکوپ‌های الکترونی ارائه شدند. بعدها مشخص شد که دلایل محکم دیگری نیز برای استفاده از الکترون‌ها وجود دارد که در قابلیت این نوع میکروسکوپ نهفته است و در میکروسکوپ‌های جدید، اغلب آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-تاریخچه

اولین بار در سال ۱۹۲۵ لوئی دوبروی (louis de Broglie) تئوری موجی بودن الکترون با طول موجی کمتر از نور مرئی را مطرح نمود. در سال ۱۹۳۱ نول و رسکا (knoll &Ruska) با استفاده از این اصل اولین نمونه آزمایشی میکروسکوپ الکترونی را ارائه نمودند. در سال ۱۹۳۳ ر سکا میکرو سکوپ الکترونی ارائه نمود که و ضوح آن برای اولین بار از میکرو سکوپ نوری فراتر رفته بود. در سال ۱۹۳۸ نیز برای اولین بار نمونه تجاری میکروسکوپ الکترونی در دانشگاه تورنتو ساخته شد.

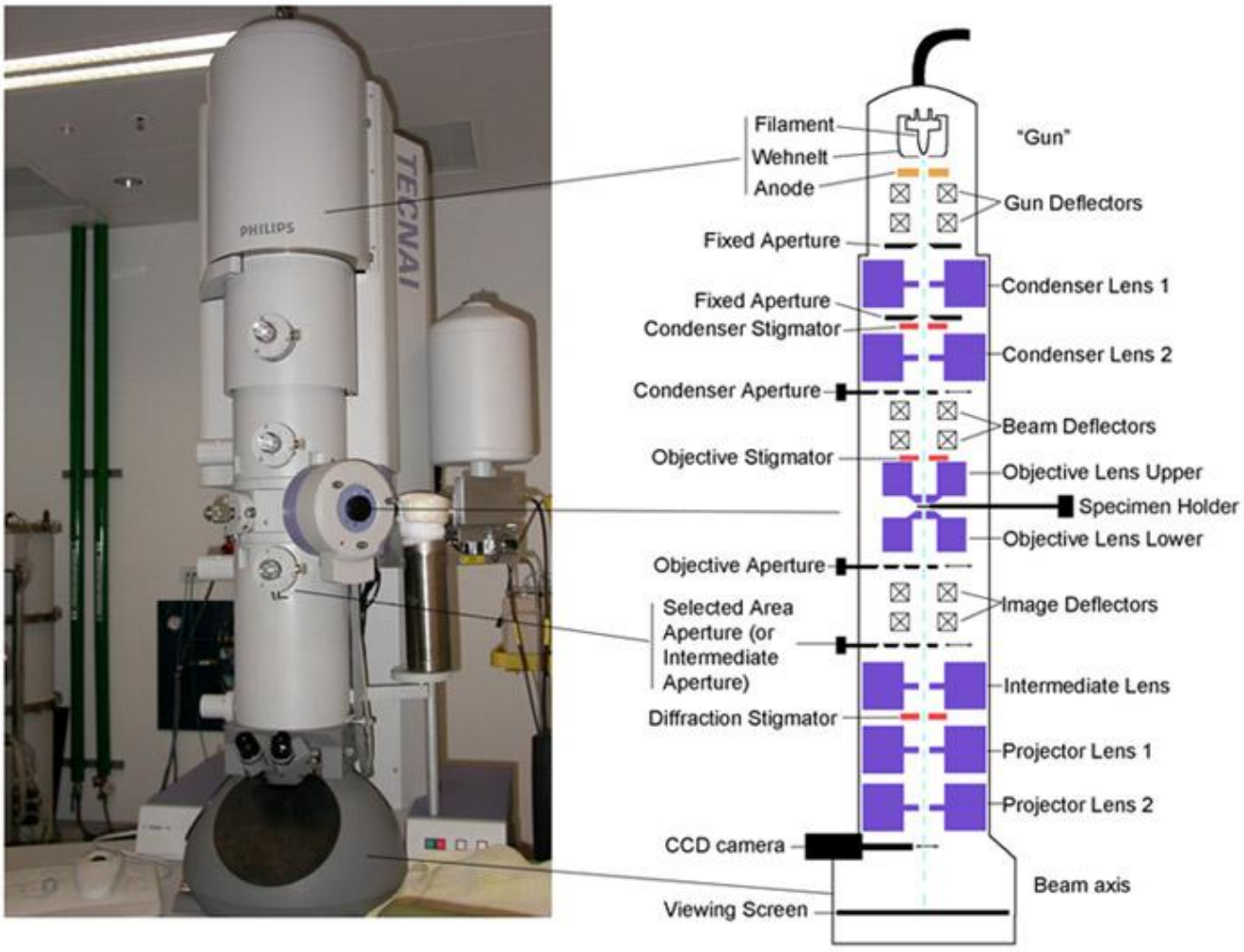
NANOCLUB

۳- بخش‌های مهم میکروسکوپ الکترونی عبوری

اگرچه دستگاه‌های TEM پیشرفته دارای اجزاء اصلی و فرعی فراوانی می‌باشند که هر کدام از عملکرد ویژه‌ای برخوردار هستند، اما در هر نوع TEM بخش‌های اصلی زیر قابل مشاهده‌اند. در شکل ۱ شماتیکی از بخش‌های مهم ستون میکروسکوپ الکترونی عبوری نشان داده شده است.

باشگاه نانو

[1] Transmission electron microscope



شکل ۱- بخش‌های مهم ستون میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری [۱].

NANOCLUB

۳-۱-تفنگ الکترونی

تفنگ الکترونی، باریکه‌ای از الکترون‌های پرقدرت ایجاد می‌کند که قادر به عبور از داخل نمونه های نازک در TEM است. این تفنگ شامل یک منبع الکترونی (معروف به کاتد) و یک سیستم شتاب‌دهنده، تامین کننده ولتاژ پایدار، است. تفنگ الکترونی در بخش فوقانی دستگاه قرار گرفته است. رایج‌ترین تفنگ الکترونی مورد استفاده در TEM از نوع حرارتی (thermoionic) می‌باشد که می‌تواند الکترون‌ها را در محدوده اختلاف پتانسیل ۲۰۰-۴۰ کیلوولت شتاب دهند. اینکه انرژی الکترون‌ها باید چقدر باشد، به طبیعت نمونه و اطلاعات مورد نیاز بستگی دارد. در برخی کاربردها خصوصاً در ضخامت‌های نسبتاً زیاد نمونه و یا در مواردی که نیاز به قدرت تفکیک بالا باشد، احتیاج به انرژی‌های الکترونی بالاتری است. برای این منظور میکروسکوپ‌هایی با ولتاژ متوسط (۴۰۰-۳۰۰ کیلوولت) و یا ولتاژ بالا (۳۰۰۰-۶۰۰ کیلوولت) ساخته شده‌اند. امروزه از میکروسکوپ‌های با انرژی بسیار بالا کمتر استفاده می‌شود زیرا قدرت تفکیک میکروسکوپ‌هایی با انرژی کمتر نیز به دلیل طراحی بهتر عدسی‌ها بهبود یافته‌اند و همچنین

تکنیک‌های موثرتری برای آماده‌سازی نمونه ایجاد گردیده است. علاوه براین، امروزه تفنگ‌های انتشار میدانی (field emission) ساخته شده‌اند که می‌توانند پرتوهای الکترونی بسیار ظریفی تولید کنند (در حد ۱ نانومتر بر نمونه) و اینگونه تفنگ‌ها کاربرد فزاینده‌ای پیدا کرده است .

۳-۱-۱- سیستم گسیل گرما یونی

همانطور که عنوان شد معمول‌ترین سیستم مورد استفاده در تفنگ الکترونی، سیستم گسیل گرمایونی از یک رشته داغ است. در تفنگ الکترونی، الکترون‌ها از میان اختلاف پتانسیل ده‌ها یا صدها شتاب داده می‌شوند تا پرتویی از الکترون‌ها با انرژی کنترل شده را ایجاد کنند، که حاصل آن ایجاد پرتوی متراکم از الکترون‌های پرانرژی است . در این تفنگ‌ها معمولاً از سیم تنگستن به عنوان کاتد استفاده شده که با عبور جریان، تا حدود ۲۸۰۰ کلوین گرم و در حالت پتانسیل منفی بالایی نسبت به آند و بقیه میکروسکوپ نگه داشته می‌شود. در این تفنگ‌ها، الکترون‌ها از فیلامنت داغ منتشر و به سوی آند شتاب داده می‌شوند. در نتیجه پرتویی از الکترون‌ها، از محفظه آند خارج می‌شود. آند صفحه مثبت است که موجب شتاب پیدا نمودن پرتوهای الکترونی می‌شود. فیلامنت ماده‌ای با نقطه ذوب بالا و تابع کار نسبتاً پایین است که امکان ساطع نمودن الکترون‌های بیشتری را می‌تواند فراهم نماید. فیلامنت معمولا از تنگستن یا لانتانیوم هگزابوراید (La_2B_6) ساخته می‌شوند .

۳-۱-۲-تفنگ گسیل میدانی

اگر سطح یک فلز تحت ولتاژ بسیار زیاد قرار گیرد (۱۰۰ V/m<) به احتمال زیاد الکترون‌ها می‌توانند سطح آن را ترک کنند بدون اینکه نیازی به اعمال انرژی پیشنهادی توسط تابع باشد. این امر به دلیل اتفاق افتادن پدیده تونل‌زنی است که توسط مکانیک کوانتوم پیش بینی شده است. نتیجه این است که می‌توان الکترون‌های بسیار بیشتری نسبت به انتشار ترمیونیک از تنگستن استخراج کرد و روشنایی را هزار برابر یا بیشتر افزایش داد. جریان انتشار میدانی بر مبنای رابطه فولر-نوردلهم (Fowler-Nordlhim) به میدان اعمال شده F بستگی دارد:

$$j = 6.2 \times 10^{-6} \frac{\left(E_f/\emptyset\right)^{1/2} F^2}{(E_f + \emptyset)} e^{\left(\frac{-6.8\times10^9 \emptyset^{3/2}}{F}\right)} Am^{-2}$$

که در آن E_f انرژی فرمی بوده که برای تنگستن حدود ۵ eV در دمای محیط است. برای میدانی بیش از حدود 5×10^9 ولت بر متر جریانی که توسط انتشار میدانی در دمای محیط منتشر می‌شود بیش از آن چیزی است که به صورت ترمویونیکی می‌تواند منتشر شود. برای اینکه چنین میدان بالایی اعمال شود باید منتشر کننده، معمولاً تنگستن، به شکل نوک تیز تهیه شود. قطر نوک منتشر کننده حدود ۰٫۱ µm یعنی چندین برابر کوچکتر از نوک سوزن است. برای حفظ این نوک تیز در حین استفاده، باید محیط کاری

آن حاوی یون‌های بسیار کمی باشد، پس باید از تکنیک خلا بسیار بالا استفاده نمود. جدول ۱ مقایسه سه نوع منبع تولیدکننده الکترون را در ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت را نشان می‌دهد.

جدول ۱ - مقایسه سه منبع تولید کننده الکترون در ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت

	Units	Tungsten	LaB_6	Schottky FEG	Cold FEG
Work function, Φ	eV	4.5	2.4	3.0	4.5
Richardson's constant	A/m^2K^2	6×10^9	4×10^9		
Operating temperature	K	2700	1700	1700	300
Current density (at 100 kV)	A/m^2	5	10^2	10^5	10^6
Crossover size	nm	$> 10^5$	10^4	15	3
Brightness (at 100 kV)	A/m^2sr	10^{10}	5×10^{11}	5×10^{12}	10^{13}
Energy spread (at 100 kV)	eV	3	1.5	0.7	0.3
Emission current stability	%/hr	<1	<1	<1	5
Vacuum	Pa	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-9}
Lifetime	hr	100	1000	>5000	>5000

۳-۲- سیستم‌های عدسی

هر کدام از عدسی‌های موجود در TEM دارای نام خاصی می‌باشند. عدسی‌هایی که بین منبع الکترونی و نمونه قرار می‌گیرند، عدسی متمرکز کننده نامیده می‌شود که برای کانونی نمودن پرتوهای الکترونی استفاده می‌شوند، به گونه‌ای که وقتی این پرتوها به نمونه می‌رسند به صورت پرتوی ظریف و پرقدرت ظاهر شوند. برای محدود نمودن پرتوهایی که برخورد می‌نمایند، از یک یا چند متمرکز کننده استفاده می‌شود. روزنه (Aperture) شیئی نیز در صفحه کانونی پشتی عدسی‌های شیئی قرار داده می‌شود تا پرتوهایی که با زاویه باز پراکنش می‌یابند را محدود نمایند. عدسی‌های شیئی از حساس‌ترین بخش‌های TEM محسوب می‌شوند که نمونه بین آن‌ها قرار می‌گیرد. بزرگنمایی اولیه، کانونی نمودن تصویر و ایجاد الگوهای پراش توسط همین عدسی‌ها انجام می‌گیرد. در یک TEM ، عدسی‌های اضافی دیگری نیز وجود دارد که بین نمونه و تصویر قرار می‌گیرند. اولین آنها، عدسی پراش می‌باشد که برای ایجاد الگوی پراش مورد استفاده قرار گیرد. هر عدسی نیز تصویر حاصل از عدسی‌های قبلی را بزرگتر می‌نماید. عدسی‌هایی که بعد از عدسی‌های پراش قرار دارند، عدسی‌های میانی نامیده شده و آخرین عدسی، عدسی پروژکتوری می‌باشد. جریانی که از هر عدسی عبور می‌نماید، فاصله کانونی و در نتیجه بزرگنمایی را کنترل می‌نماید. تصویر نمونه توسط هر عدسی به طور متوالی بزرگ شده تا اینکه در نهایت تصویری با بزرگنمایی مطلوب ایجاد شود.

۳-۳- عملکرد عدسی های الکترومغناطیس

ایده کانونی شدن پرتوهای الکترونی توسط میدان مغناطیسی در سال ۱۹۲۰ عنوان شد و تاکنون نیز در میکروسکوپ‌های الکترونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته کلیدی در فهم مکانیزم کار عدسی‌های مغناطیسی، جهت نیرویی است که روی الکترون در حال حرکت در یک میدان مغناطیسی اعمال می‌شود. یک عدسی الکترومغناطیس طوری طراحی می‌شود که میدانی مغناطیسی تقریبا

موازی با حرکت الکترون ایجاد نماید. الکترونی که به عدسی وارد می‌شود تحت تاثیر میدان مغناطیسی (B) به دو مولفه محوری و شعاعی تبدیل می‌شود که اولی در طول محور میکروسکوپ و دومی در جهت شعاعی قرار می‌گیرد. در ابتدا الکترون تحت تاثیر نیروی کوچکی از مولفه شعاعی قرار می‌گیرد. این نیرو باعث می‌شود تا الکترون در مسیر یک منحنی مارپیچ در طول عدسی حرکت نماید. به محض آنکه الکترون شروع به حرکت مارپیچ نمود، مولفه سرعتی عمود بر صفحه پیدا می‌نماید و تحت تاثیر نیرویی در جهت شعاعی قرار می‌گیرد. در نتیجه مسیر مارپیچ تنگتر و کوچکتری را می‌پیماید و اثر آن این است که پرتوهای الکترونی موازی وارد عدسی می‌شود، در یک نقطه همگرا می‌شوند (این دقیقا همان عملی است که یک عدسی شیشه‌ای در مقابل نور انجام می‌دهد). با عبور جریان از میان سری سیم پیچ‌ها، میدان مغناطیسی قوی ایجاد می‌شود این میدان همانند یک عدسی، پرتوها را کانونی می‌نماید. در این عدسی‌ها، تصویر با توجه به قدرت عدسی الکترومغناطیس چند درجه‌ای می‌تواند چرخش نماید. فاصله کانونی نیز با تغییر مقدار جریان می‌تواند قابل تغییر باشد.

مشخصات و عملکرد عدسی‌های الکترومغناطیس عبارتند از:

۱-الکترون‌ها با عدسی ها تماس واقعی ندارند.

۲-الکترون‌ها در میدان مغناطیسی چرخش پیدا می‌نمایند.

۳-الکترون‌ها همدیگر را دفع می‌نمایند.

۴-عمل تمرکز و بزرگنمایی عدسی‌ها به صورت الکتریکی کنترل می‌شود و هیچ حرکت فیزیکی وجود ندارد.

۵-عدسی‌های الکترونی می‌توانند همانند عدسی‌های همگرا عمل نمایند.

۳-۴-سیستم متمرکز کننده[2]

در زیر تفنگ الکترونی دو یا چند عدسی متمرکز کننده قرار دارند. این عدسی‌ها به کمک یکدیگر پرتو منتشره از طریق تفنگ الکترونی را باریک نموده و قطر آن را در هنگام برخورد با نمونه کنترل می‌کنند. این امر باعث می‌شود تا اپراتور بتواند سطحی از نمونه را که در معرض پرتو قرار می‌گیرد و نیز شدت پرتو تابیده شده بر روی نمونه را کنترل کند. دریچه‌ای[3] بین عدسی‌های متمرکز کننده قرار دارد که به دریچه متمرکز کننده معروف بوده و جهت کنترل مقدار زاویه همگرایی پرتو مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهایی که از طریق سیستم متمرکز کننده کنترل می‌شود عبارتند از: میزان روشنایی، کنترل بر روی قسمتی از نمونه که تحت اثر پرتو قرار می‌گیرد، و نوع الگوی پراشی که تشکیل می شود. بیان جزئیات بیشتر از سیستم متمرکز کننده با دو سری عدسی می‌تواند مفید باشد. عدسی‌های سری اول (C_1) که اغلب به عنوان عدسی‌های "اندازه نقطه[4]" معروفند، میزان پرتوی خروجی از تفنگ الکترونی را تنظیم می‌نماید. سری دوم عدسی‌ها (C_2) که اغلب به عنوان عدسی‌های "تنظیم کننده شدت"

[2] condenser
[3] aperture
[4] spot size

معروفند می‌توانند زاویه همگرایی پرتویی که از کل سیستم متمرکز کننده خارج می‌شود را کنترل کنند.

۳-۵- محفظه نمونه[5]

محفظه نمونه یکی از قسمت‌های بسیار مهم میکروسکوپ می‌باشد که در زیر قسمت سیستم متمرکز کننده قرار دارد. باید نمونه‌ای بسیار کوچک به طور بسیار دقیقی در جای مناسب خود در بین عدسی‌های شیئی قرار گیرد. محفظه نمونه باید بتواند در حد چند میلی‌متر جابجا شده و به میزان زیادی بچرخد. علاوه براین اگر از میکروسکوپ برای آنالیز شیمیایی نیز استفاده شود، پرتو X باید بتواند از این محل خارج شود. برای دستیابی به این مشخصات از میله نگهدارنده نمونه استفاده می‌شود که می‌تواند نمونه‌ای به قطر ۳ میلی متر یا کوچکتر را که بر روس شبکه حمایتی با اندازه ۳ میلی متر قرار دارد، مابین قطب‌های عدسی‌های شیئی قرار دهد. شکل ۲، نگهدارنده نمونه در میکروسکوپ الکترونی عبوری را نشان می‌دهد.

شکل ۲- نگهدارنده نمونه در میکروسکوپ الکترونی عبوری [۱].

میله نگهدارنده نمونه از طریق دریچه (airlock) به داخل ستون میکروسکوپ برده می‌شود. این میله می‌تواند در جهت های x و yتا ۲ میلی‌متر حرکت کند تا نمونه در محل مناسب و مورد نظر قرار گیرد. این میله همچنین می‌تواند در حد کسری از میلی متر در جهت z جابجا شود تا نمونه در موقعیت صفحه شیئی عدسی جای گیرد.

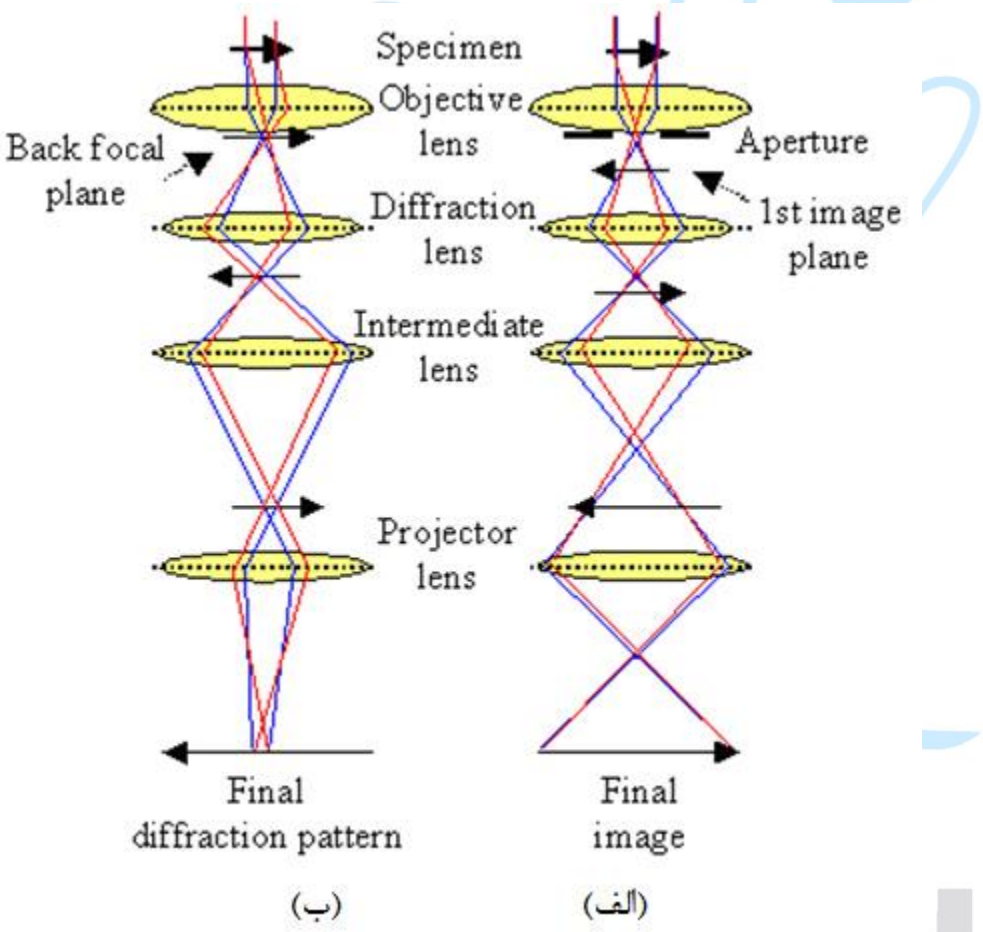
۳-۶- عدسی‌های میانی و شیئی[6]

عدسی‌های شیئی آنقدر قدرت دارند که نمونه می‌تواند در میان قطب‌های آن‌ها قرار گیرد. نقش عدسی شیئی تشکیل اولین تصویر و یا الگوی پراش میانی است که بعداً توسط عدسی‌های تصویری بزرگ شده و بر روی صفحه نمایش نمایانده می‌شود.

---

[5] Specimen chamber
[6] Objective and intermediate lenses

اپتیک عدسی‌های شیئی در شکل ۳ نمایش داده شده است. اولین سری عدسی‌های شیئی که اغلب عدسی‌های میانی و یا پراش نامیده می شوند به یکی از دو صورت که در قسمت الف و ب این شکل نمایش داده شده است تنظیم می‌گردند. در حالت تصویر (image mode)، فوکوس بر روی صفحه تصویر عدسی شیئی صورت می‌گیرد (شکل ۳-الف) و بزرگنمایی تصویر نهایی که بر روی صفحه نمایش دیده می شود از طریق عدسی‌های تصویری (projector) صورت می‌گیرد. در حالت پراش (diffraction mode)عدسی‌های میانی بر روی صفحه کانونی پشتی عدسی‌های شیئی فوکوس می شوند (شکل۳- ب) و الگوی پراش بر روی صفحه نمایش، نمایانده می‌شود.



شکل ۳- عدسی شیئی و اولین عدسی میانی [۴].

مشخصه اصلی سیستم شیئی، نگهدارنده دریچه (aperature) می‌باشد که این امکان را فراهم می‌آورد که یکی از سه یا چهار دریچه کوچک بتوانند در جایی که صفحه کانونی پشتی قرار دارد به درون ستون میکروسکوپ برده شود. دریچه شیئی محدوده ای

را که الکترون‌های پراکنده شده می‌توانند به طرف پایین ستون میکرو سکوپ حرکت و در تشکیل تصویر مشارکت کنند تعیین می‌کند. بنابراین قطر دریچه، قدرت تفکیک نهایی را کنترل می‌کند .

۳-۷- سیستم تصویری- تصویرها[7]

اولین تصویر که توسط عدسی‌های شیئی ایجاد می‌شود، معمولاً از بزرگنمایی ۱۰۰-۵۰ برابر برخوردار است. این تصویر توسط یک سری از عدسی‌های میانی و تصویری بزرگ شده و نهایتاً بر روی صفحه نمایش فلورسانس میکروسکوپ تابانده می‌شود. با استفاده از سری عدسی، که هر سری می‌تواند تا بیست برابر تصویر را بزرگ نماید، براحتی بزرگنمایی نهایی تا یک میلیون قابل دستیابی خواهد بود. برای بزرگنمایی کمتر نیازی به استفاده از تمام عدسی‌ها نیست، لذا می توان یک یا تعداد بیشتری از عدسی‌های تصویری را خاموش کرد. برخی از میکروسکوپ‌های تخصصی از یک فیلتر انرژی در زیر نمونه بهره می‌برند. این فیلتر را می‌توان طوری تنظیم نمود که فقط الکترون‌هایی که به صورت الاستیکی متفرق شده‌اند و یا الکترون‌هایی که به مقدار خاصی انرژی خود را از دست داده‌اند از آن عبور کنند. این موضوع از مزایای قابل توجهی برخوردار است، به عنوان مثال در میکرو سکوپ‌های با قدرت تفکیک بالا می‌توان از این مزیت استفاده کرد زیرا الکترون‌هایی که به صورت غیرالاستیک پراکنده می‌شوند کیفیت تصویر را کاهش می‌دهند.

۳-۸- سیستم تصویری- الگوهای پراش[8]

غالباً بهره‌گیری از الگوی پراش به دست آمده از ناحیه مورد نظر در یک نمونه می‌تواند مفید باشد. دو روش برای انجام این کار وجود دارد. این دو روش بطور اساسی از هم مجزا و مختلف می‌باشند. در یکی از روش‌ها به نام "پراش از ناحیه انتخاب شده"[9] معروف است، ناحیه‌ای از نمونه (معمولاً به صورت دایره) انتخاب می‌گردد، اگرچه منطقه بزرگتری نسبت به ناحیه انتخاب شده تحت تاثیر تابش الکترونی قرار می‌گیرد. روش دوم "پراش پرتو همگرا"[10] نامیده می‌شود. این روش به "ریز پراش"[11] نیز معروف است. در این روش پرتوهای الکترونی بر روی نقطه ای کوچک از نمونه متمرکز می‌گردد و نتیجتاً الگوی پراش ناشی از تمام ناحیه‌ای است که تحت تاثیر پرتوی الکترونی قرار می‌گیرد، البته این ناحیه کوچک است .

پراش از ناحیه انتخاب شده یا از طریق وارد نمودن یک دریچه بر صفحه‌ای که نمونه بر روی آن قرار دارد و یا در محلی که اولین تصویر تولید شده توسط عدسی‌های شیئی تشکیل می‌شود، بدست می‌آید.

---

[7] Projector system-images
[8] Projector system- diffraction patterns
[9] selected area selection
[10] convergent beam diffraction
[11] microdiffraction

۳-۹- دوربین

به طور سنتی وقتی از دوربین صحبت می شود این مفهوم به ذهن می‌آید که برگه‌ای ظریف که همان فیلم عکا سی ا ست در زیر صفحه نمایش قرار داده می شود و از طریق شاتر تحت تاثیر پرتو قرار می‌گیرد. در TEM فضای کافی و و سیعی در بخش زیرین صفحه نمایش وجود دارد، لذا می توان سی ستم تصویربرداری گوناگونی را در آن جای داد. بدلیل در د سترس بودن و نیز پیچیده بودن تکنولوژی تصویربرداری دیجیتالی، امروز استفاده از دوربین‌های (CCD)[۲] از فراگیری بیشتری برخوردار است. ساده‌ترین سیستم های دیجیتالی از مورد مصرف، از یک سیستم ویدیوئی کامپیوتری که به سوی صفحه نمایش جهت گیری شده است، بهره می‌گیرند. اما این سی ستم از محدودیت‌هایی نیز برخوردار ا ست که به پایین بودن میزان نور ساطع شده از صفحه فسفری مربوط است. همچنین پایین بودن قدرت تفکیک این نوع سیستم بر محدودیت‌های آنها می‌افزاید. دوربین‌های بسیار پیچیده‌تری نیز موجود می‌باشند که می‌توانند تصاویر را با قدرت بالاتر که به معنی هزاران نقطه تصویری می‌باشد نشان دهند. این دوربین‌ها میزان نور صفحه فسفری را نیز می‌سنجند، اما در این حالت نور از طریق یک فیبر نوری به CCD کانالیزه و منتقل می‌گردد معمولاً CCDباید خنک گردد تا از میزان نویز کاسته شده و زمان‌های طولانی در معرض قرارگرفتن در برابر پرتو امکان پذیر گردد.

۳-۱۰- پمپ خلا

یکی از سوالاتی که در ذهن کاربران میکروسکوپ‌های الکترونی ایجاد می‌شود این است که چرا این میکروسکوپ‌ها به سیستم خلا بالا (10^{-4} میلی بار) نیاز دارند. دلایل آن عبارتند از:

۱- الکترون ها توسط مولکول های گاز براحتی پراکنش یافته به حدی که در شرایط اتمسفر معمولی، الکترون هایی با انرژی ۱۵ KeV، تنها ۱۰ cm امکان نفوذ پیدا می‌نمایند.

۲- از اکسیداسیون نمونه جلوگیری می‌شود.

۳- ستون میکروسکوپ تمیز باقی می‌ماند.

سه نوع پمپی که جهت ایجاد خلا در TEM بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

۱) پمپ دورانی (چرخشی)[۱۳]: پمپ مکانیکی ساده‌ای که گازها را خارج و فشار را تا حدود 10^{-1} تا 10^{-3} میلی بار تقلیل می‌دهد.

۲) پمپ پخشی[۱۴] که فشار را به 10^{-4} تا 10^{-7} میلی بار می‌تواند تقلیل دهد.

---

1 charge-coupled device camera 3

1 Rotary pump 3

1 Diffusion pump 4

۳) پمپ یونی کندوپاش[۱]:که با جذب گازهای یونیزه شـده به طرف الکترود عمل نموده و فشـار را به کمتر از 10^{-7}میلی بار می‌تواند تقلیل دهد.

نتیجه‌گیری:

میکرو سکوپ‌های الکترونی عبوری ابزارهایی ویژه در م شخص نمودن ساختار و مورفولوژی مواد مح سوب می شوند. این د سته از میکروسکوپ‌ها شامل تجهیزاتی از جمله تفنگ الکترونی، عدسی‌های متمرکز کننده، عدسی‌های شیئی، عدسی‌های پراش، عدسی های حد واسط، عدسی های پروژ کتوری، سیستم خلا، دور بین و ... در ستون خود می‌باشد.

منابع و مراجع

---

1. Transmission Electron Microscopy a Textbook for Materials Science, David B. Williams, C. Barry Carter, springer, 2009.

۲. اصول و کاربرد میکروسکوپ های الکترونی و روش های نوین آنالیز: ابزار شناسایی دنیای نانو ، علیرضا مرعشی، پیروز کاویانی، سعید سرپولکی،حسین ذوالفقاری، ویرایشش دوم، چاپ دوم، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۹.

۳. مبانی و کاربرد میکروسکوپهای الکترونی و روشهای آنالیزهای پیشرفته، مرتضی رزم آرا، ارسلان، ۱۳۸۴

4. http://www.globalsino.com/

NANOCLUB
باشگاه نانو

[1] Sputter ion pump [5]