



## مکانیزم تفنگ الکترونی

برای ایجاد پرتو الکترونی، تنظیم ولتاژ و مقاومت بایاس مناسب برای داشتن حداقل نقطه‌ی همگرایی و زاویه‌ی واگرایی با بیشینه دانسیته جریان بسیار حائز اهمیت است. لذا تنظیم مقدار مناسب ولتاژ بایاس تأثیری مستقیم بر روی جریان انتشار دارد. برای تفنگ‌های انتشار حرارتی، دانسیته جریان بر اساس رابطه ریچاردسون-داشمن<sup>۲</sup> بدست می‌آید:

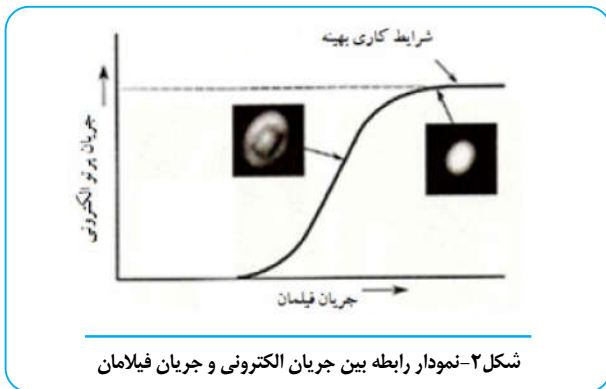
$$I = \frac{CAT^3 e^{-\phi}}{KT}$$

C عددی ثابت است که بستگی به فلز دارد، A مساحت کل سطح بیرونی سیم، T دمای سیم،  $\phi$  تابع کار (مقدار انرژی لازم برای جدا شدن سست‌ترین الکترون از سطح فلز) و K ثابت بولتزمن است که برابر  $1/388 \times 10^{-23}$  می‌باشد.

برای تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی، دانسیته جریان بر اساس فاولر نوردییم بدست می‌آید:

$$J_C = \frac{6.2 \times 10^{-6} \left( \frac{E_f}{E_w} \right)^2 F^2}{\left( \frac{E_f}{E_w} \right) e^{-6.8 \times 10^9 E_f^2 / F}}$$

قابل ذکر است که میزان روشنایی حاصله در تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی صدها برابر بیشتر از میزان روشنایی حاصل از تفنگ‌های انتشار حرارتی می‌باشد. برای داشتن فیلامانی در شرایط کاری بهینه لازم است که شرایط اشباع فیلامان تهیه گردد، در این شرایط جریان فیلامان دقیقاً به اندازه‌ای تنظیم می‌گردد که جریان انتشار بیشینه حاصل گردد. با رسیدن جریان انتشار الکترون به یک مقدار بیشینه، مقدار آن ثابت شده و با افزایش جریان فیلامان تغییری در جریان انتشار مشاهده نمی‌گردد، در این شرایط گفته می‌شود فیلامان اشباع شده است.



دلیل پدیده فوق به این شرح است: با افزایش ولتاژ بایاس، شدت میدان الکتریکی در جهت عکس حرکت الکترون‌ها در اطراف فیلامان، افزایش یافته و باعث بازگشت الکترون‌ها به سمت فیلامان، محدود کردن انتشار الکترون‌ها و کاهش شدید جریان گسیل خواهد شد. از طرف دیگر باید توجه کرد که اگر ولتاژ بایاس خیلی کم باشد، عملیات همگرایی پرتو تأثیر چندانی نخواهد داشت و منجر به افزایش قطر نقطه همگرایی و کاهش شدید روشنایی خواهد شد.

تفنگ الکترونی وسیله‌ای الکتریکی است که اشعه‌ای از الکترون با انرژی جنبشی به وجود می‌آورد و در تکنولوژی لامپ کاتدی و تلویزیون و مانیتور از آن استفاده می‌شود. همچنین در تهیه لایه‌های نازک استفاده از پرتو الکترونی برای تبخیر مواد، متداول می‌باشد در واقع وسیله‌ای که الکترون‌ها را شتاب می‌دهد و به سمت ماده تبخیرشونده هدایت می‌کند، با عنوان تفنگ الکترونی شناخته می‌شود.

## ساختمان تفنگ الکترونی

تفنگ الکترونی از یک چشمه‌ی تولید الکترون، یک میدان الکتریکی مناسب و بوته نگهداری ماده تبخیرشونده تشکیل شده است. چشمه تولید الکترون، یک سیم داغ از جنس تنگستن می‌باشد.

با توجه به اینکه اساس کار میکروسکوپ الکترونی روبشی، مبتنی بر رویش سطح نمونه توسط یک پرتو الکترونی می‌باشد و مشخصات اصلی و بنیادین یک پرتو الکترونی در تفنگ الکترونی تعیین می‌گردد، تفنگ‌های الکترونی به عنوان منابع تولید الکترون نقش بسزایی در کارایی میکروسکوپ ایفا می‌کنند. در یک نگاه کلی طبق شکل ۱ یک تفنگ الکترونی شامل سه بخش اصلی می‌باشد:

۱. کاتد یا فیلامان که الکترون‌ها در این بخش تولید و منتشر می‌شوند.
۲. کلاهک نگهدارنده فیلامان که الکترون‌های منتشر شده در این قسمت کنترل و بر روی نقطه‌ی همگرایی متمرکز می‌گردد.
۳. آند که دارای بار مثبت بوده و باعث شتابدهی الکترون‌ها به سمت ستون دستگاه و نمونه می‌گردد.



## ۲. تفنگ‌های الکترونی گسیل میدان

- ✓ تفنگ گسیل میدان سرد
- ✓ تفنگ گسیل میدان گرم (حرارتی)
- ✓ تفنگ گسیل میدان شاتکی

قابل ذکر است میزان قدرت تفکیک و رزولوشن تصویر در تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی در حدود ۰/۵ تا ۱ نانومتر می‌باشد که بسیار بالاتر از تفنگ‌های انتشار حرارتی است.

### ۱. تفنگ‌های الکترونی انتشار حرارتی

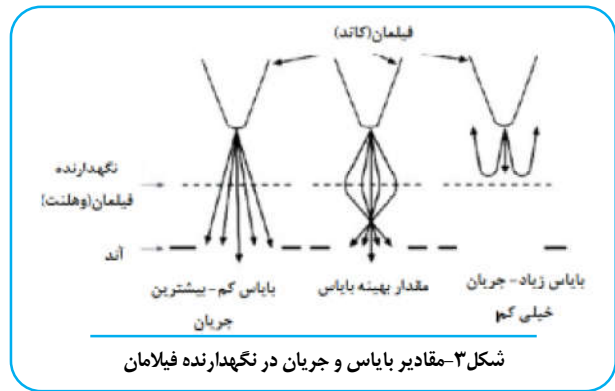
در این نوع از تفنگ‌ها از پدیده ترمیونی برای تولید الکترون استفاده می‌شود. با عبور جریان از فیلامان و رخداد پدیده ترمیونی، الکترون‌ها شروع به انتشار در داخل کلاهک نگهدارنده فیلامان می‌کنند؛ این کلاهک دارای یک روزنه در مقابل نوک فیلامان است که با اعمال ولتاژ منفی به آن و ایجاد یک اختلاف ولتاژ بسیار بالا بین آن و آند، منجر به دفع الکترون‌ها از نگهدارنده فیلامان و همگرا شدن پرتو الکترونی ضمن خروج از آن و ورود به آند می‌گردد. شرایط الکتریکی فیلامان، نگهدارنده و آند به گونه‌ای است که باعث ایجاد یک میدان الکترواستاتیکی و در نتیجه همگرا شدن پرتو الکترونی و ایجاد نقطه‌ی همگرایی پرتو می‌گردد. همان گونه که پیش‌تر گفته شد، تفنگ الکترونی انتشار حرارتی دارای دو نوع تنگستنی و لاتانیوم هگزا بوراید می‌باشد.

### ۲. تفنگ الکترونی با فیلامان تنگستی

در این نوع از تفنگ‌ها، کاتد تولیدکننده الکترون یک سیم تنگستنی به شکل سنجاخ سر خم شده و V شکل می‌باشد که شعاع نوک آن حدود ۱۰۰ میکرومتر است. دمای کاری تنگستن در حین انتشار الکترون ۲۷۰۰ درجه کلوین می‌باشد و عمر کاری آن وابسته به نرخ تبخیر سیم تنگستی است. در این نوع از تفنگ‌ها انرژی الکترون‌ها معادل ۰/۲۵ الکترون ولت می‌باشند. با اعمال اختلاف پتانسیلی معادل ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ ولت به نگهدارنده فیلامان، الکترون‌ها به سمت آند شتاب داده می‌شوند. فیلامان‌های تنگستنی نسبت به سایر فلزات، استحکام مکانیکی، فشار بخار پایین و نقطه‌ی ذوب بالایی دارند، اما دمای کاری بسیار بالا منجر به کاهش عمر فیلامان می‌گردد و طول عمر آن‌ها نهایتاً تا ۲۰۰ ساعت کاری است.



شکل ۴- تفنگ الکترونی با فیلامان تنگستی



شکل ۳- مقادیر بایاس و جریان در نگهدارنده فیلامان

وقتی از یک سیم تنگستن جریان چند آمپری عبور می‌کند، سیم داغ شده و بنا بر آنچه بیان شد الکترون‌ها آزاد می‌شوند و الکترون‌های تولیدشده در اطراف سیم سرگردان می‌مانند. اما می‌توان به وسیله‌ی یک اختلاف پتانسیل چند هزارولتی به آن‌ها انرژی داد تا به سمت یک هدف معین (ماده تبخیرشونده) شتاب بگیرند. اگر این ولتاژ را V بنامیم، انرژی هر الکترون eV خواهد بود که از نوع انرژی پتانسیل است و سبب حرکت آن به سمت آند شده و تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود و هنگام برخورد با آند تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود. حرکت این الکترون‌ها به سمت آند، باعث ایجاد جریان الکتریکی می‌شود که از معادله چاید لانلمیر بدست می‌آید:

$$I = PV^{1/2}$$

P مقدار ثابتی است که وابسته است به پارامترهای مختلف، از جمله ابعاد ثابتی که بستگی به پارامترهای مختلف از جمله ابعاد هندسی تفنگ الکترونی دارد. V همان ولتاژ آند است که در حدود چند هزار ولت می‌باشد. تفنگ الکترونی با توان بالا قابلیت تبخیر اجسام دیرگداز را دارد. تنگستن که در حدود ۳۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود، به وسیله یک تفنگ الکترونی ۲ کیلوولتی قابل تبخیر است.

تقریباً تمام تفنگ‌های الکترونی نیاز به یک سیستم چرخان آب برای سرد کردن بوت‌ه حاوی ماده تبخیرشونده دارند، زیرا در غیر این صورت بوت‌ه نیز بر اثر گرمای زیاد ذوب می‌شود. برای آن که پرتوهای الکترونی پرانرژی با سطوح جانبی بوت‌ه برخورد نکنند و انرژی آن‌ها هدر نرود، از سیستم‌های مختلف برای متمرکز کردن آن‌ها روی ماده تبخیرشونده استفاده می‌شود؛ یک سیستم ساده، استفاده از محافظ الکتریسیته ساکن است که از یک توری استوانه‌ای تشکیل شده و بوت‌ه را احاطه می‌کند. این محافظ، الکترون‌های اولیه پرتاب شده را جذب کرده و ولتاژ منفی بالایی پیدا می‌کند، به طوری که بقیه الکترون‌ها را از خود دفع کرده و در محل بوت‌ه متمرکز می‌کند و به این ترتیب باعث افزایش کارایی سیستم می‌شود.

### انواع تفنگ الکترونی

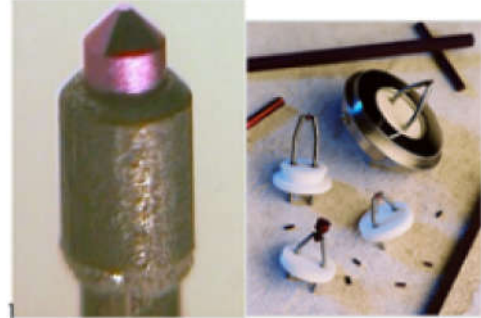
بر اساس مکانیزم تولید الکترون که در ادامه شرح داده خواهد شد، دو نوع تفنگ الکترونی وجود دارد:

#### ۱. تفنگ‌های الکترونی انتشار حرارتی

- ✓ تفنگ تنگستن
- ✓ تفنگ لاتانیوم هگزا بوراید

## تفنگ الکترونی با فیلامان لانتانیوم هگزابوراید

کاتد مورد استفاده در این نوع از تفنگ‌ها، تک کریستالی از جنس لانتانیوم هگزابوراید می‌باشد. تک کریستال به شکل مفتول به قطر ۱ میلی‌متر مربع و طول ۱/۶ سانتی‌متر و با شعاع نوک حدود ۱۰ میکرون می‌باشد.



شکل ۵- تفنگ الکترونی با فیلامان لانتانیوم هگزابوراید

در اطراف کاتد دو محافظ وجود دارد: محافظ حرارتی و محافظ تبخیر. این دو محافظ به دلیل واکنش پذیری بالای ترکیب لانتانیوم هگزابوراید، در اطراف مفتول فیلامان، تعبیه شده‌اند. با گرم شدن نوک مفتول و ایجاد پدیده ترمیونی، الکترون‌ها با دانسیته جریان بسیار بیشتر و نقطه‌ی همگرایی بسیار کوچک‌تر نسبت به فیلامان تنگستنی سنجاق سری، انتشار می‌یابند. فیلامان لانتانیوم هگزابوراید دارای ۳ نوع می‌باشد:

۱. فیلامان لانتانیوم هگزابوراید بروئر<sup>۱</sup>
۲. فیلامان لانتانیوم هگزابوراید وگل<sup>۲</sup>
۳. فیلامان لانتانیوم هگزابوراید فریس<sup>۳</sup>

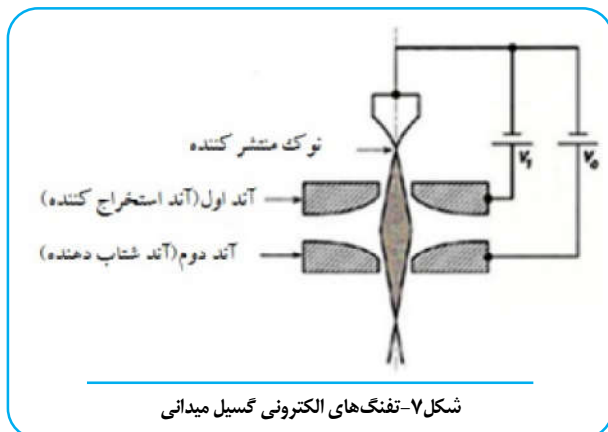
در فیلامان لانتانیوم هگزابوراید بروئر، قسمت بالایی مفتول لانتانیوم هگزابوراید، در داخل محفظه‌ای قرار دارد که در حین کار فیلامان، توسط گردش روغن خنک می‌شود و سر دیگر مفتول به وسیله‌ی یک سیم‌پیچ تنگستنی احاطه شده است. این سیم‌پیچ با عبور جریان گرم و گرمای تولید شده در سیم‌پیچ، باعث بمباران الکترونی نوک تیز فیلامان می‌گردد. در فیلامان لانتانیوم هگزابوراید وگل، به جای سیم‌پیچ، مفتول به طور مستقیم در لایه‌ی گرافیتی قرار داده می‌شود و به صورت مستقیم به پایه‌های الکتریکی وصل می‌گردد. در فیلامان لانتانیوم هگزابوراید فریس، مفتول توسط نواری از جنس لایه گرافیت یا لانتام به پایه‌های الکتریکی وصل می‌گردد. این نوع از فیلامان در مقایسه با تنگستن، نسبت دانسته جریان انتشار الکترون به نرخ تبخیر بسیار بالاتری دارد؛ از طرف دیگر میزان خلاء مورد نیاز آن ۱۰ برابر خلاء مورد نیاز برای فیلامان تنگستن می‌باشد. هم چنین امکان گرم کردن مستقیم این نوع فیلامان وجود ندارد. دمای کاری این نوع فیلامان ۱۷۰۰ تا ۲۱۰۰ درجه‌ی کلوین می‌باشد و ولتاژ بایاس در این نوع از تفنگ‌ها حدود ۲۵۰۰ ولت است. عمر کاری این نوع فیلامان تا حدود ۱۰۰۰ ساعت می‌باشد.



شکل ۶- انواع فیلامان لانتانیوم هگزابوراید

## ۲. تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی

در این نوع از تفنگ‌ها از پدیده‌ی تونلی جهت تولید الکترون استفاده می‌گردد. در این روش الکترون‌ها با استفاده از اثر تونل‌زنی و با پشت سر گذاشتن سد انرژی، یک میدان الکتریکی قوی منتشر می‌کنند. در ساختمان این نوع تفنگ‌ها دو آند تعبیه شده است. اولین آند به عنوان آند استخراج‌کننده دارای ولتاژ ۱ ولت است که جریان انتشار را کنترل می‌کند و دومین آند به عنوان آند شتاب‌دهنده دارای ولتاژ ۲ ولت بوده که تعیین‌کننده انرژی نهایی پرتو الکتریکی می‌باشد. نوک منتشرکننده الکترون در این فیلامان از یک سیم تنگستن به قطری حدود ۰/۱۲۵ میکرون با شعاع نوک حدود ۱۰۰ نانومتر بر روی یک سیم تنگستنی ل شکل جوش داده شده است؛ از آن جایی که نوک فیلامان بسیار نازک می‌باشد به منظور نگهداری آن حتماً باید محیط یونیزه باشد، لذا این نوع تفنگ‌ها در شرایط خلأ با فشار خیلی بالا کار می‌کنند.



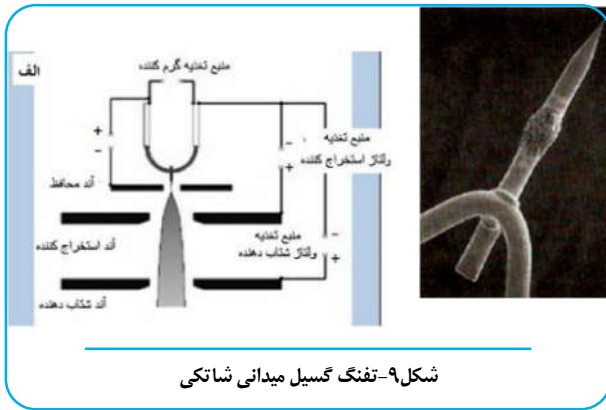
شکل ۷- تفنگ‌های الکترونی گسیل میدانی

قابل ذکر است میزان روشنایی تولید شده در این نوع تفنگ‌ها ۱۰۰ برابر بیشتر از تفنگ‌های انتشار حرارتی می‌باشد. همانگونه که قبلاً گفته شد، این دسته از تفنگ‌های الکترونی، دارای ۳ نوع تفنگ گسیل میدان سرد، تفنگ گسیل میدان گرم و تفنگ گسیل میدان شاتکی هستند.

1 Broers  
2 Vegel  
3 Ferris

### تفنگ گسیل میدانی سرد<sup>۱</sup>

اختلاف ولتاژ بین نوک منتشرکننده و آند شتاب‌دهنده تعیین‌کننده انرژی الکترون‌های پرتو الکترونی می‌باشد. از این نوع از تفنگ‌ها با مقدار بایاس حدود ۳ تا ۵ کیلوولت و ولتاژ بایاس دوم ۱۰۰ تا ۳۰ کیلوولت جریانی حدود ۱۰ میکروآمپر در شرایط خلا کاری استفاده می‌شود. با توجه به نوک فوق‌العاده نازک و نوع خاص کریستالی تنگستن و به منظور حفاظت، میزان فشار خلأ در این نوع از تفنگ‌ها بسیار بالا و دائمی می‌باشد.

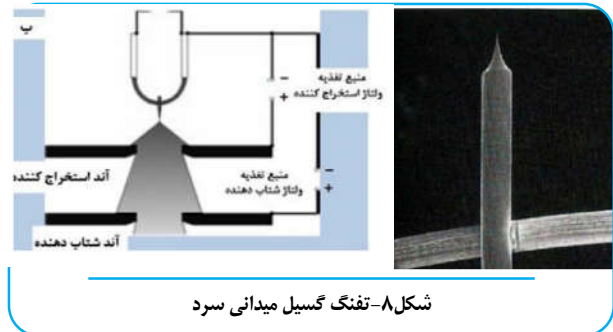


شکل ۹- تفنگ گسیل میدانی شاتکی

### تفنگ گسیل میدانی شاتکی<sup>۲</sup>

این نوع از تفنگ‌ها از لحاظ مکانیزم کاملاً شبیه تفنگ‌های گسیل میدان گرم می‌باشند، ولی به خاطر وجود دمای کاری بالای فیلامان گسیل میدان گرم و انتشار حرارتی ناخواسته از مناطق خارج از نوک فیلامان و به منظور رفع ایراد فوق در تفنگ‌های گسیل میدان شاتکی، پوششی با لایه بسیار نازک اکسید زیرکونیوم بر روی فیلامان داده می‌شود. تحت تأثیر پوشش فوق میزان دمای کاری به ۱۸۰۰ درجه‌ی کلین کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی قوی‌تر و سد انرژی عبور الکترون کمتر می‌گردد و الکترون‌ها آسان‌تر از نوک منتشر می‌گردند. همچنین قطر منبع الکترونی در مقایسه با تفنگ گسیل میدانی سرد از ۵ نانومتر به ۱۵ الی ۳۰ نانومتر افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه میزان زاویه‌ی واگرایی افزایش و قدرت تفکیک کاهش پیدا می‌کند. با توجه به افزایش قطر پرتو الکترونی و افزایش گستره‌ی انرژی، میزان روشنایی به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

در جدول ۱ مقایسه‌ی انواع میکروسکوپ الکترونی روبشی آورده شده است.



شکل ۸- تفنگ گسیل میدانی سرد

### تفنگ گسیل میدانی گرم<sup>۲</sup>

این نوع از تفنگ‌ها از نظر ساختار کاملاً شبیه تفنگ‌های گسیل میدانی سرد هستند، ولی با توجه به مشکل تأمین خلأ کاری بسیار بالا در تفنگ‌های گسیل میدان سرد، در این نوع از تفنگ‌ها از هر دوی پدیده تونل‌زنی و پدیده ترمیونی برای تولید الکترون استفاده می‌گردد. همانگونه که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، در پدیده ترمیونی، تولید الکترون با گرم کردن مستقیم فیلامان صورت می‌گیرد و میزان پهنای انرژی بیشتر از حالت تونلی بوده و لذا در این نوع از تفنگ‌ها پهنای باند انرژی در مقایسه با تفنگ‌های گسیل میدانی سرد از ۰/۳ به ۱ الکترون ولت افزایش می‌یابد و تحت تأثیر آن از میزان روشنایی نیز به مقدار قابل توجهی کاسته می‌گردد. قابل ذکر است خلأ کاری مورد نیاز ۹ تا ۱۰ تور می‌باشد. با این نوع تفنگ‌ها می‌توان در شرایط کاری تفنگ‌های گسیل میدانی سرد هم کار کرد ولی عمر کاری فیلامان کاهش پیدا می‌کند.

تفنگ الکترونی	تفنگ تنگستن	تفنگ لانتانیم هگزابوراید	تفنگ گسیل میدانی سرد	تفنگ گسیل میدانی گرم	تفنگ گسیل میدانی شاتکی
جنس کاتد	تنگستن	تک کریستال لانتانیم هگزابوراید	تک کریستال تنگستن	تک کریستال تنگستن	تک کریستال تنگستن با پوشش اکسید زیرکونیوم
خلأ (تور)	۱۰-۶	۱۰-۷	۱۰-۱۱	۱۰-۹	۱۰-۹
روشنایی	۱۰-۵	۱۰-۶	۱۰-۹	۱۰-۸	۱۰-۷
طول عمر (ساعت)	۱۰۰ - ۴۰	۲۰۰-۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	بیش از ۲۰۰۰
قطر منبع الکترون	۱۰۰-۳۰ میکرون	۵ - ۵۰ میکرون	کمتر از ۵ نانومتر	کمتر از ۵ نانومتر	۱۵ - ۳۰ نانومتر

جدول ۱. مقایسه‌ی انواع میکروسکوپ الکترونی روبشی

1 Cold field-emission (CFE)  
2 Thermal field-emission (TFE)

3 Schottky field-emission (SFE)

پنج ویژگی خاص از اطلاعات بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی را می‌توان تجزیه و تحلیل کرد که شامل موارد زیر است:

✓ بررسی سطح مقطع: می‌توان وجود ترک، حفره و گسیختگی در فصل مشترک زیرلایه یا پوشش را با این تصاویر تعیین و با روش‌های گوناگون و اصلاح شرایط پوشش‌دهی، اقدام به اصلاح عیوب کرد. علاوه بر این امکان بررسی کیفیت اتصال پوشش به زیرلایه، امکان بررسی کیفیت چسبندگی لایه‌های بالایی به لایه‌های پایینی در پوشش‌های چندلایه، تعیین ضخامت پوشش، بررسی کیفیت پوشش و وارد شدن ذرات (و یا درموردی نانوذرات) تقویت‌کننده به ریزساختار ماده مرکب با استفاده از تصاویر سطح مقطع میکروسکوپ الکترونی روبشی وجود دارد.

✓ بررسی خوردگی: باتوجه به انواع خوردگی (خوردگی یکنواخت، خوردگی حفره‌ای، خوردگی بین‌دانه‌ای و خوردگی شیاری) با بررسی انواع خوردگی می‌توان در اصلاح آن‌ها و جلوگیری از هزینه‌های سرسام‌آور اقدام کرد. در خوردگی یکنواخت، تمام سطوح به‌صورت یکنواخت خورده می‌شود که مطلوب بوده و قدرت تخریب اندکی دارد. دلیل این نوع خوردگی، تشکیل تعداد زیادی سلول خوردگی در سرتاسر سطح است. خوردگی بین‌دانه‌ای در مرزدانه‌ها رخ می‌دهد؛ مرزدانه‌ها به‌دلیل داشتن مقادیر زیاد ناخالصی، بسیار پرانرژی بوده و نقش آند را در سلول خوردگی ایفا می‌کنند و خورده می‌شوند. این درحالی است که سطح دانه کاتد می‌شود. در خوردگی حفره‌ای، معمولاً یک حفره ایجاد شده و عمق آن در اثر حضور و نفوذ بیشتر ماده‌ی خورنده، بیشتر می‌شود. خوردگی حفره‌ای یک نوع خوردگی موضعی است. در خوردگی شیاری که ناشی از حضور مایع ساکن روی یک ماده است، معمولاً شیاری یا شیاری‌هایی در سطح ماده دیده می‌شود.

✓ بررسی‌های تریبولوژیکی: دو نوع مکانیزم اصلی در بررسی تریبولوژیکی و انواع سایش وجود دارد. سایش ساینده<sup>۱</sup> و سایش چسبان<sup>۲</sup> دو نوع متداول سایش هستند. سایش ساینده معمولاً در اثر وجود برآمدگی‌ها یا ذرات سخت در راستای مسیر حرکت سطح جامد رخ می‌هد و مورفولوژی آن به صورت مضرس است. سایش چسبان به دلیل پیوند موضعی بین سطوح جامد در تماس با هم رخ داده و باعث انتقال ماده بین دو سطح، یا کاهش جرم از هر سطح می‌شود. مورفولوژی سایش چسبان به‌صورت صاف و مسطح است که هر چه پهنای خط سایش باریک‌تر باشد، ماده مقاومت بیشتری در برابر ساییده شدن از خود نشان می‌دهد.

✓ سطح شکست: نوع شکست رخ داده و ترد و یا نرم بودن شکست را می‌توان با بررسی مورفولوژی سطح شکست و با حضور حفره در تصویر شکست تشخیص داد. شکست ترد معمولاً به صورت ناگهانی رخ می‌دهد و سطح آن به صورت صاف است. اما در شکست نرم، ابتدا ترک‌ها جوانه زده و سپس با پیوستن آن‌ها به یک‌دیگر شکست رخ می‌دهد. سطح شکست پس از وقوع شکست نرم دارای حفره یا حفراتی خواهد بود.

✓ مورفولوژی سطحی: به دلیل بزرگ‌نمایی بالا در میکروسکوپ الکترونی روبشی علاوه بر بررسی کلیت مورفولوژی سطح یک ماده، می‌توان مورفولوژی تک‌تک دانه‌ها را نیز مورد مطالعه قرار داد و بررسی کرد.

## منابع و مراجع:

[۱] اصول و کاربرد میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های نوین آنالیز: ابزارشناسی دنیای نانو، دکتر پیروز مرعشی، دکتر سعید کاویانی، دکتر حسین سرپولکی، دکتر علیرضا ذوالفقاری، چاپ دوم، دانشگاه علم و صنعت ایران ۱۳۸۹

[۲] م. کرباسی، "میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو"، چاپ اول

[3] Yougui Liao, Practical Electron Microscopy and Database