



NAISL

Quarterly, 2017

Volume 1, Number 1

Pages 41 – 46

Print ISSN: 2588-6401

Online ISSN: 2588-641X

## Scanning Electron Microscope: Principles of operation

Seyedeh Mehri Hamidi Sangdehi<sup>1\*</sup>, Saeed Javadi Anaghizi<sup>2</sup> and Mehdi Jahanfar<sup>3</sup>

### Abstract

The human effort in obtaining a technique for observing small-sized bodies was based on the light intensity of the visible light from the outset, based on photon energy.

However, due to the limited frequency of visible light, this human attempt failed to observe the dimensions of the micrometer and set his creative mind in order to make microscopic devices reach more powerful sources of energy, such as the electron source, and the addition of electron microscopes It flares up today.

When the electron beam collides with the surface of the specimen, there is interaction between the surface and the electrons, and the result is that the emission of electron beams is different from the wide information indicators of the sample surface, the electrons are a standard for identification and labeling of the surface The materials are transformed into an image and other useful information on the processor of an electron microscope by the complex detector system. The main physical mechanisms in image production of Scanning electron microscope have been reported. For this reason, after interpretation of resolution and depth of focus, the main emitted electrons such as secondary electrons and backscattered electrons have been analyzed.

### Key Words

Scanning electron microscope,  
Magnetic lens,  
Secondary electrons,  
Detectors,  
Electron beam

(\*) Corresponding author.

1. Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.  
E-mail: m\_hamidi@sbu.ac.ir, Tel: 021 29904016
2. Central Laboratory Of Shahid Beheshti University, Thehran, Iran.  
E-mail: bit.sbulab@gmail.com, Tel: 09829905428
3. Central Laboratory Of Shahid Beheshti University, Thehran, Iran.  
E-mail: Jahanfar61@gmail.com, Tel: 09829905427



فصلنامه علمی

سال اول، شماره ۱

صفحات ۴۱ - ۴۶، ۱۳۹۶

شاپای چاپی: ۶۴۰۱-۲۵۸۸

شاپای الکترونیکی: X-۶۴۱۸-۲۵۸۸

# میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope): اصول عملکرد

سیده مهری حمیدی سنگدهی<sup>۱\*</sup>، سعید جوادی آناقیزی<sup>۲</sup> و مهدی جهانفر<sup>۳</sup>

## چکیده

تلاش بشر در به دست آوردن تکنیکی برای رویت اجسام ریز ابعاد از ابتدا با تکیه بر انرژی فوتونی بازه نور مرئی استوار بود اما به دلیل محدودیت طول موج نور مرئی این تلاش بشر در رویت ابعاد زیر میکرومتر ناکام ماند و ذهن خلاق وی را بر آن گماشت تا از جهت ساخت ادوات میکروسکوپی دست به دامان منابع انرژی پر توان تر چون منبع الکترونی شود و چاشنی ساخت میکروسکوپ‌های الکترونی امروزی را هر چه بیش‌تر شعله‌ور سازد.

هنگامی که باریکه الکترونی به سطح نمونه تابش می‌کند، بین سطح و الکترون‌ها برهم‌کنش رخ داده و نتیجه حاصله ساطع شدن پرتوهای الکترونی متفاوتی با شاخصه‌های اطلاعاتی گسترده‌ای از سطح و اجزا تشکیل دهنده نمونه می‌باشند. الکترون‌های مذکور معیاری از شناسایی و برجسب‌زنی سطح مواد می‌باشند که توسط سیستم پیچیده آشکارسازها، تبدیل به تصویر و اطلاعات مفید دیگری در پردازنده میکروسکوپ الکترونی می‌شوند.

اصول فیزیکی تصویرسازی در میکروسکوپ‌های الکترونی در این گزارش مورد بررسی قرار گرفته شده است. به این منظور پس از توصیف بزرگنمایی و عمق روشنایی در میکروسکوپ‌ها، انواع الکترون‌های اصلی ساطع شده از نمونه در اثر برخورد الکترون‌های منبع الکترونی همانند الکترون ثانویه و الکترون‌های بازپراکننده مورد شناسایی قرار می‌گیرند.



سیده مهری حمیدی



سعید جوادی



مهدی جهانفر

## واژگان کلیدی

میکروسکوپ الکترونی روبشی،

باریکه الکترونی،

لنز مغناطیسی،

آشکارساز،

الکترون ثانویه

(\*)مسئول مکاتبات.

۱. پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ایمیل: m\_hamidi@sbu.ac.ir

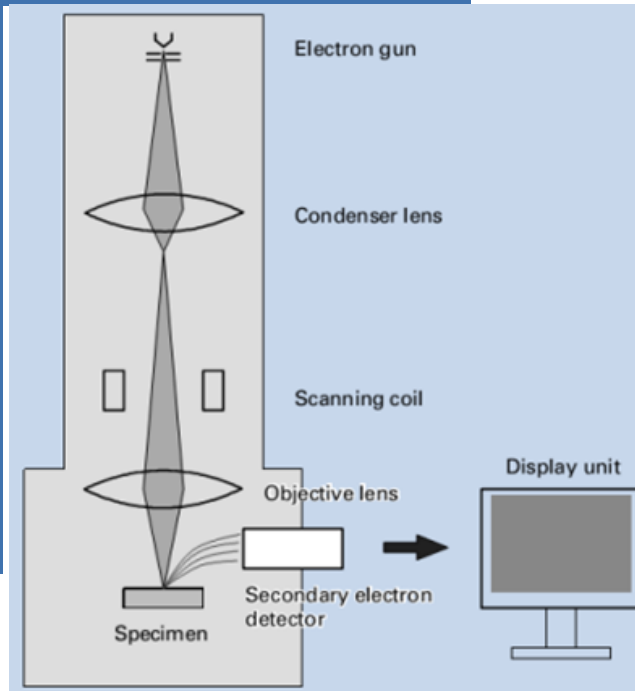
تلفن: ۰۲۱ ۲۹۹۰۴۰۱۶

۲. آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ایمیل: bit.sbulab@gmail.com

تلفن: ۰۹۸۲۹۹۰۵۴۲۸

۳. آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ایمیل: Jahanfar61@gmail.com

تلفن: ۰۹۸۲۹۹۰۵۴۲۷



شکل ۱: عناصر اصلی سازنده میکروسکوپ الکترونی

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) حدود ۴۰ سال قبل برای اولین بار به صورت تجاری به بازار عرضه شد و پس از آن، صنعت میکروسکوپ الکترونی پیشرفت قابل توجهی را در این عرصه از خود به نمایش گذاشته است.

امروز از انواع مختلفی از SEMها استفاده می‌شود که عملکرد و اجزای سازنده آنها بسیار متفاوت از یکدیگر است، به منظور استفاده از SEMهای گوناگون، شناخت ابزارها و عملکردهای و یا تشخیص ویژگی‌هایشان ضروری است، تا به علم و فهم خوبی از خروجی و تصویرهای SEM برسیم. بدین منظور درک پایه و اصول آن که شامل شناخت اجزاء، قطعات کلیدی، نحوه آماده سازی نمونه‌ها و مسیر آنالیز نمونه‌ها لازم و ضروری می‌باشد.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مشاهده و روبش سطح مواد استفاده می‌شود. برای این منظور یک دسته باریکه الکترونی (پروب الکترونی) به نمونه تابیده شده، والکترون‌های ثانویه از سطح نمونه (لایه ظرفیت) شروع به گسیل می‌کنند و تصویرسازی توسط رایانه فوق سریع و پردازش تصویر بین آشکارسازها تشکیل شده و به نمایش در می‌آید. توپوگرافی و یا تصویر ۳ بعدی (نقشه‌برداری) سطح توسط روبش دو بعدی بیم الکترونی از بالای سطح قابل مشاهده است.

سیستم اپتیکی الکترونی شامل یک تفنگ الکترونی، یک لنز متراکم کننده (همگرا) و یک لنزشی‌ای به منظور تولید باریکه منسجم الکترونی، یک سیم‌پیچ کنترل کننده روبش باریکه الکترونی بر روی نمونه و دیگر اجزای تشکیل دهنده آن است. این سیستم اپتیکی الکترونی (داخل میکروسکوپ) و فضای اطراف نمونه (ستون میکروسکوپ) در محیط خلاء نگهداری می‌شوند.

در ادامه کلیه اجزای سازنده میکروسکوپ‌های الکترونی و نحوه عملکرد آنها به تفصیل آمده اند.

## ۲ ساختار اصلی میکروسکوپ‌های الکترونی

### ۱.۲ تفنگ الکترونی

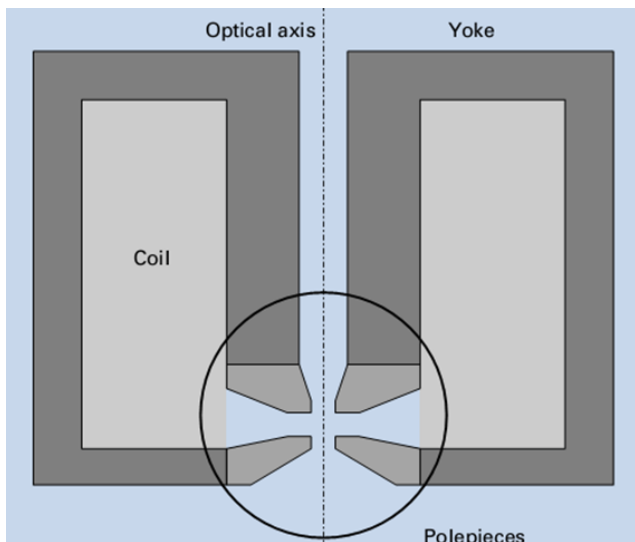
ساختار اصلی تفنگ الکترونی در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این تفنگ الکترونی بسته به شرایط کاربری خود دارای انواع گوناگونی می‌باشد. (در این مبحث به تفنگ الکترونی ترمونیک یا گرما یونی TE Gun می‌پردازیم.

میکروسکوپ الکترونی به یک سیستم اپتیکی الکترونی نیاز دارد تا باریکه الکترون تولید کند، یک پایه‌ی نمونه برداری برای جاگذاری نمونه، یک آشکارساز الکترون ثانویه، یک صفحه نمایش و در نهایت به سیستم اپراتور برای انجام عملکردهای گوناگون نیازمند است. شکل ۱.



## ۲.۲ ساختمان لنزها

میکروسکوپ‌های الکترونی عموماً از لنز مغناطیسی استفاده می‌کنند. با توجه به قواعد فیزیک پایه، با عبور جریان الکتریکی مستقیم از میان یک سیم‌پیچ الکتریکی پیچشی (سیم‌پیچ فیزی)، یک میدان مغناطیسی متقارن چرخشی تولید شده و نتیجه حاصل از عملکرد لنز، تولید یک باریکه الکترونی می‌باشد. از طرفی برای ساخت یک لنز مغناطیسی قوی (با فاصله کانونی کوچک یا محدود)، لازم است که چگالی خطوط میدان مغناطیسی افزایش یابد. بنابراین همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، محیط اطراف سیم‌پیچ توسط یک میله عریض به نام (Yoke) محاط می‌شود و بنابراین شار تولیدی از این میدان مغناطیسی از یک روزنه باریک شارش و نفوذ می‌کند.



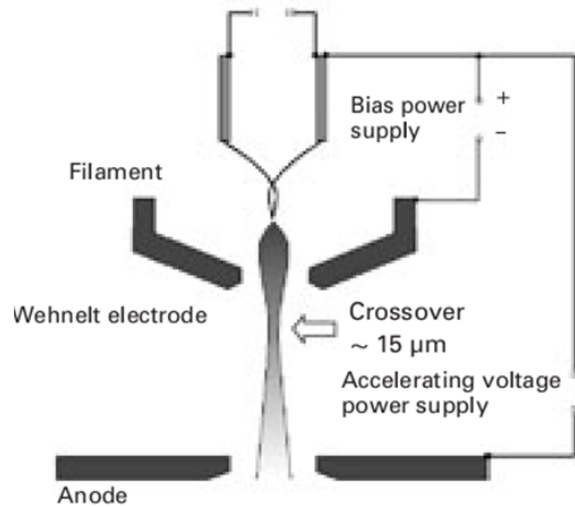
شکل ۳: ساختار کلی لنز مغناطیسی

به منظور کاهش قطر باریکه الکترونی در لنزهای مغناطیسی، قسمتی به نام polepiece تعبیه شده است که دارای شکاف بسیار نازک و دقیق است.

یکی از ویژگی‌های بارز و اصلی لنزهای مغناطیسی این است که با تغییر جریان الکتریکی عبوری از میان سیم‌پیچ می‌توان قدرت لنز را تغییر داد که این شاخصه در لنزهای اپتیکی دیده نمی‌شود.

اما لازمه یک تصویر برداری قابل قبول و مناسب، داشتن یک باریکه الکترونی با استاندارد و با کیفیت خوب است. به همین منظور قرارگیری یک لنز در زیر باریکه الکترونی این اختیار را به ما می‌دهد تا قطر باریکه الکترونی را تنظیم کنیم.

Filament heating power supply



شکل ۲: ساختار داخلی تفنگ الکترونی

الکترون‌های گرم توسط اعمال حرارت بالاتر از ۲۸۰۰ کلوین به فیلامان (کاتد) که از سیم نازک تنگستنی ساخته شده (حدود ۰/۱ میلی متر) گسیل شده و از تجمع این الکترون‌ها در کنار هم یک باریکه الکترونی تشکیل شده است. این باریکه با اعمال ولتاژ بالای مثبت ۱ کیلوولت تا ۳۰ کیلوولت از یک صفحه فلزی (آند) شارش می‌یابد. با ایجاد یک حفره در مرکز آند، باریکه الکترونی از میان این حفره عبور می‌کند. حال با قراردادن یک الکتروود (الکتروود Wehnelt) بین کاتد و آند و اعمال یک ولتاژ منفی به آن، قادر خواهیم بود فقط جریان باریکه‌ی الکترونی را مشاهده کرده و در این حین، باریکه الکترونی به وسیله عملکرد الکتروود wehnelt متمرکز شده است. بهترین نقطه این باریکه crossover نامیده شده و به عنوان منبع الکترونی واقعی با قطر ۱۵ تا ۲۰ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود.

عموماً تفنگ‌های الکترونی مورد استفاده از نوع TE gun می‌باشد و انواع مختلف تفنگ الکترونی بسته به نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال می‌شود از تفنگ الکترونی تک کریستال LAB6 به عنوان کاتد استفاده کرد که به دلیل حساسیت بسیار بالای آن، به میزان خلاء بسیار بالا نیاز است و هم‌چنین از تفنگ‌های الکترونی دیگر می‌توان از تفنگ الکترونی گسیل میدانی (FE-Gun) و تفنگ الکترونی گسیل schottky نام برد.

همچنان که در شکل ۱ قابل مشاهده است، باریکه الکترونی پس از تولید توسط تفنگ الکترونی، از لنز عبور داده می‌شود که در بخش بعد به ساختار لنزهای مورد استفاده می‌پردازیم.

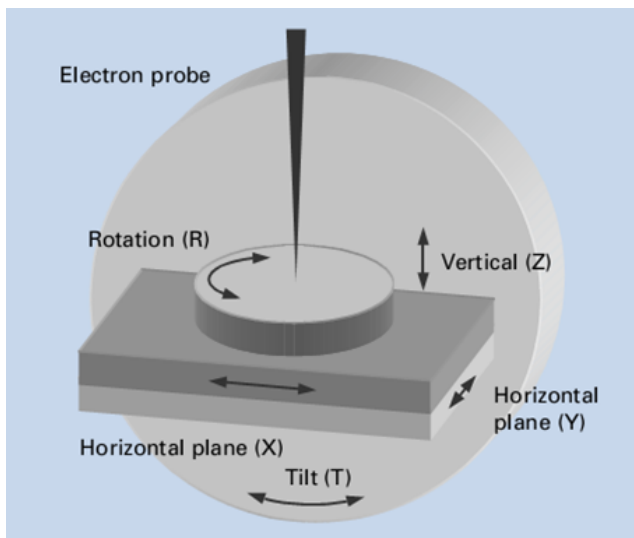


از سوی دیگر، از لنز شی‌ای برای متمرکز کردن باریکه الکترونی استفاده می‌شود، این لنز در تعیین قطر نهایی باریکه الکترونی نقش بسیار مهمی دارد. به صورتی که در صورت ناکارآمد بودن، حتی با رسیدن باریکه مناسب به آن، نمی‌تواند به تصویر مناسبی منجر گردد. بنابراین ساخت لنزهای شی‌ای با بهترین کارآمد امری دشوار و حساس و دقیق است.

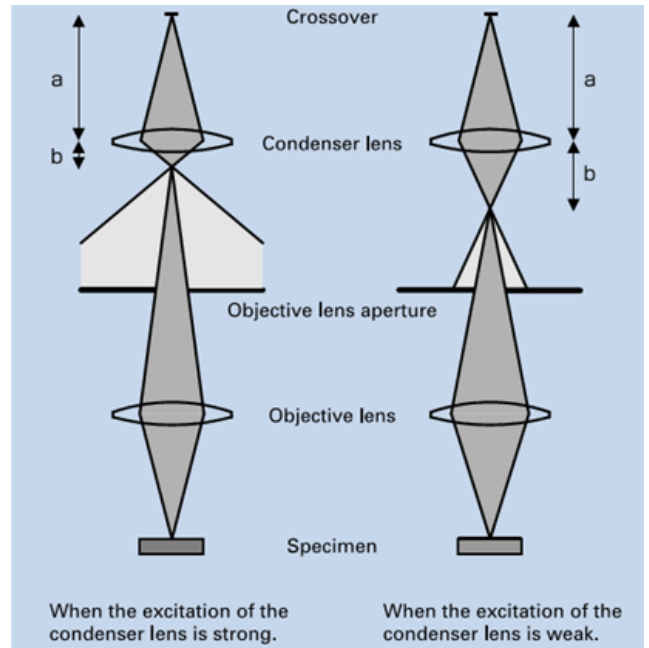
پس از رسیدن به تمرکز مناسب باریکه الکترونی، نوبت به قرارگیری نمونه در مکان و موقعیت مناسب می‌رسد که در بخش آینده به آن پرداختیم.

### ۳.۲ پایه نگهدارنده نمونه

به طور کلی نمونه‌ها در میکروسکوپ الکترونی در بزرگ‌نمایی بالا دیده می‌شوند. بنابراین، یک پایه نگهدارنده نمونه که از نمونه محافظت کند و به نرمی حرکت کند، مورد نیاز است. پایه نمونه نگهدارنده برای SEM می‌تواند دارای آزادی عمل با حرکت‌های افقی ( $Y, X$ )، عمودی ( $Z$ )، زاویه دار (Tilting) و چرخش حول محور (Rotating) باشد. از حرکت افقی ( $Y, X$ )، برای انتخاب و رویش و دیدن تمام نقاط مختلف سطح استفاده می‌شود. در حالیکه حرکت عمودی ( $Z$ )، تغییر عمق روشنایی و تغییر در وضوح (resolution) تصویر و فاصله کانونی را به همراه دارد. شکل ۵ ساختار پایه نگهدارنده نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۵: ساختار کلی نگهدارنده نمونه در میکروسکوپ‌های الکترونی اغلب SEMها از پایه نگهدارنده نمونه تحت عنوان (Eucentric) استفاده می‌کنند. با استفاده از این نوع پایه، فرایند رویش و جابه‌جایی



شکل ۴: تولید کاوه الکترونی با کمک لنزهای همگرا و شی‌ای

نقش لنزها در همگرایی باریکه الکترونی به صورتی است که اگر نسبت  $\frac{b}{a}$  (شکل ۴) کوچک باشد، باریکه الکترونی به حد بسیار باریکی خواهد رسید. با توجه به شکل فوق، روزنه تنظیم عمق روشنایی (aperture) بین لنز همگرا و لنز شی‌ای قرار داده شده است این روزنه از یک صفحه فلزی نازک شامل چند حفره کوچک با قطرهای مختلف ساخته شده است که بسته به نیاز یکی از حفره‌ها در مقابل شارش باریکه الکترونی قرار می‌گیرد. باریکه الکترونی که از میان لنز همگرا عبور کرده و صفحه روزنه را روشن و درخشان می‌کند. این روزنه اجازه می‌دهد تا قسمتی از باریکه به لنز شی‌ای برسد. اگر برانگیختگی و تحریک لنزهای همگرا، افزایش یابد، گستره باریکه الکترونی روی روزنه بسیار پهن و وسیع می‌شود و بنابراین تعداد الکترون‌ها (میزان و چگالی جریان باریکه الکترونی) که به لنز شی‌ای می‌رسند کاهش می‌یابد. در مقابل اگر از برانگیختگی لنزهای همگرا کاسته شود، باریکه الکترونی بسیار وسیع و پهن نمی‌گردد، بنابراین بیشتر الکترون‌ها از میان روزنه عبور کرده و الکترون‌های زیادی به لنز شی‌ای می‌رسند. تنظیم‌پذیری برانگیختگی لنزهای همگرا به ما این قابلیت را می‌دهد تا قطر باریکه الکترونی و جریان الکترونی عبوری را افزایش دهیم.

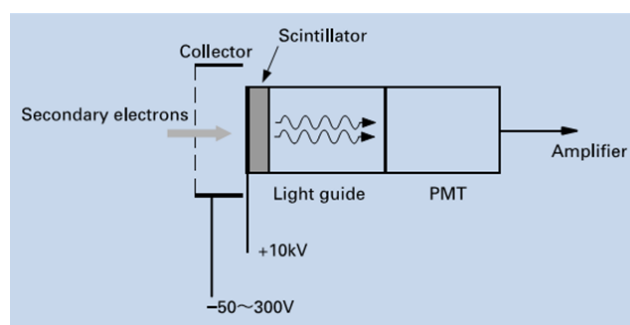
لازم به ذکر است در صورتی که برانگیختگی لنزهای همگرا به صورت نامحدود افزایش یابد، قطر باریکه الکترونی به صورت نامحدود کوچک نخواهد شد.



در روی نمونه دارای خاصیت حرکت و جابجایی نمونه (Tilting) نبوده و وضوح و تنظیمات اولیه جهت کانونی شدن در طول روبش با تغییر مکان بر روی نمونه تغییر نخواهند کرد. از طرفی حرکت پایه به صورت دستی مرسوم بوده و با استفاده از موتور حرکت دهنده‌ی پایه در سال‌های اخیر افزایش یافته است. علاوه بر این استفاده از پایه‌ی نمونه که توسط کامپیوتر کنترل شود نیز در حال افزایش است. اما دست یابی به الکترون کاوه مناسب و کانونی سازی مفید آن بر روی نمونه، بدون حضور آشکارساز الکترون ثانویه که از نمونه گسیل شده است، مطمئناً به تصویر منجر نخواهد شد. اصول عملکرد آشکارساز الکترون ثانویه را در بخش بعد با هم می‌خوانیم.

#### ۴.۲ آشکارساز الکترون ثانویه

آشکارسازی الکترون‌های ثانویه گسیل شده از نمونه، با کمک نوع خاصی از آشکارسازها امکان‌پذیر است که یک نمونه از آن در شکل ۶ نشان داده شده است. یک ماده فلورسانس (scintillator) در بالای آشکارساز به صورت لایه نازکی پوشش‌دهی شده است و تمامی آشکارساز در شرایط خلاء بالا نگهداری شده و با اعمال ولتاژ بالا در حدود ۱۰ کیلوولت به آن شروع به کار می‌کند.



شکل ۶: ساختار کلی آشکارساز الکترون ثانویه

الکترون‌های ثانویه نمونه در این ولتاژ با برخورد به صفحه فلورسانس جذب شده و سپس نور تولید شده از این صفحه توسط پدیده بهمنی (برخورد فوتون نور به صفحات پی در پی و تولید الکترون از صفحات) وارد یک لوله از فتو مولتی پلایر (PMT) هدایت می‌شوند. سپس این نور به الکترون‌ها تبدیل شده و این الکترون‌ها به عنوان یک سیگنال الکتریکی تقویت شده، فراهم می‌شوند. یک الکترواد اضافی که الکترواد جمع‌کننده نامیده می‌شود، قبل از صفحه فلورسانس قرار داده می‌شود. به طور کلی چند صد ولت به الکترواد جمع‌کننده اعمال می‌شود تا

به صفحه فلورسانس برای جمع‌آوری الکترون‌های ثانویه کمک شود. با تغییر این ولتاژ قادر خواهیم بود تا تعداد الکترون‌های ثانویه را در الکترواد جمع‌کننده کنترل کنیم. این نوع آشکارسازها توسط Everhart و Thornley توسعه یافته‌اند. به همین دلیل، این آشکارساز می‌تواند آشکارساز E-T نامیده شود. در بسیاری از میکروسکوپ‌های الکترونی این آشکارساز در محفظه نمونه قرار می‌گیرد. اگر چه زمانی که یک SEM به لنز شی‌ای برانگیخته قوی برای رزلوشن بالا مجهز است، یک آشکارساز الکترون ثانویه در بالای لنز شی‌ای قرار داده می‌شود و الکترون ثانویه به وسیله‌ی استفاده از میدان مغناطیسی آشکارسازی می‌شود. این آشکارساز (Through The Lens) TTL نامیده می‌شود.

#### ۵.۲ ذخیره و نمایش تصویر

سیگنال‌های خروجی آشکارساز الکترون ثانویه تقویت شده و سپس به سیستم تصویرسازی منتقل می‌شوند. روبش روی سطح نمونه در سیستم تصویرسازی با روبش باریکه الکترونی همزمان است. هم‌چنین تغییرات روشنایی بطور مستقیم به تعداد الکترون‌های ثانویه ظاهر شده بر روی نمایشگر سیستم تصویرسازی ارتباط دارد و در نهایت به شکل‌گیری تصویر SEM منجر می‌شود.

نمایشگر و تیوپ‌های CRT برای سال‌های بسیاری به عنوان سیستم تصویرسازی استفاده می‌شده است. اگرچه در این سال‌ها liquid-crystal display LCD نمایشگر کریستال مایع به طور وسیعی استفاده شده است. به طور کلی، سرعت اسکن باریکه الکترونی در مراحل مختلف می‌تواند تغییر کند. به همین منظور سرعت اسکن بسیار سریع برای مشاهده و روبش سطح و سرعت اسکن پایین برای ذخیره‌سازی تصاویر مورد نظر استفاده می‌شود.

با استفاده از ادوات و چینش مطرح شده، تصویری با کیفیت و با تفکیک‌پذیری بالا در انتظار شماست. لازم به ذکر است که تمامی ستون سیستم اپتیکی الکترونی و محفظه نگهدارنده نمونه باید در خلاء نگه داشته شوند تا تصویر میکروسکوپ الکترونی شما حاصل گردد.

#### مراجع

- [1] Scanning electron microscope, JEOL USA Electron Optics Documents, 2016.
- [2] Reimer, Ludwig, Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer series, 1998.