



NAISL

Quarterly, 2017

Volume 1, Number 2

Pages 37 – 43

Print ISSN: 2588-6401

Online ISSN: 2588-641X

## Electrons in image production of scanning electron microscope

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,  
Secondary electrons,  
Magnification,  
Resolution,  
Depth of focus

(\*) Corresponding author.

1. Laser and plasma research institute, Shahid Beheshti university, Tehran, Iran.

E-mail: m\_hamidi@sbu.ac.ir, Phone Number: 021 29904016

2. Central laboratory of Shahid Beheshti university, Tehran, Iran.

E-mail: bit.sbulab@gmail.com, Phone Number: 021 29904016

3. Central laboratory of Shahid Beheshti university, Tehran, Iran.

E-mail: jahanfar61@gmail.com, Phone Number: 021 29905427



فصلنامه علمی

سال اول، شماره ۲

صفحات ۳۷ – ۴۳، ۱۳۹۶

شاپای چاپی: ۶۴۰۱-۲۵۸۸

شاپای الکترونیکی: ۶۴۱۸-۲۵۸۸

# الکترون‌های تصویرساز در میکروسکوپ الکترونی روبشی

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

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 توان‌تر چون منبع الکترونی شود و چاشنی ساخت میکروسکوپ‌های الکترونی امروزی را هر چه بیشتر شعله‌ور سازد.

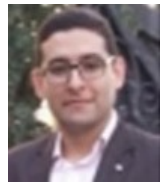
هنگامی که باریکه الکترونی به سطح نمونه تابش می‌کند، بین سطح و الکترون‌ها برهم کنش رخ داده و نتیجه حاصله ساطع شدن پرتوهای الکترونی متفاوتی با شاخصه‌های اطلاعاتی گسترده‌ای از سطح و اجزا تشکیل دهنده نمونه می‌باشند. الکترون‌های مذکور معیاری از شناسایی و برچسب زنی سطح مواد می‌باشند که توسط سیستم پیچیده آشکارسازها، 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.

## چکیده



سیده مهری حمیدی



سعید جوادی



مهدی جهانفر

## واژگان کلیدی

میکروسکوپ الکترونی روبشی،  
باریکه الکترونی،  
بزرگنمایی،  
عمق روشنایی،  
الکترون ثانویه،  
الکترون بازپراکننده

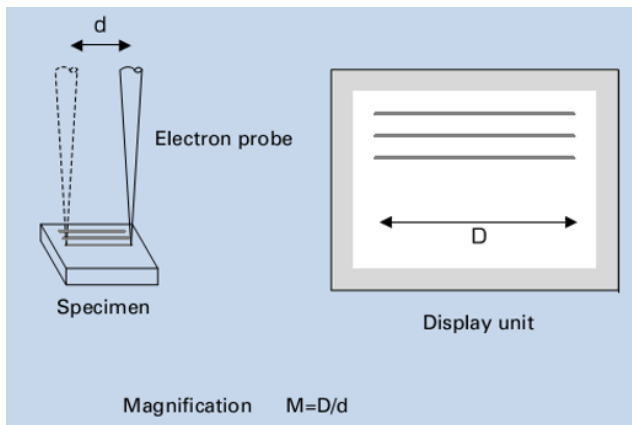
(\* مسئول مکاتبات.

۱. آزمایشگاه مرکزی و پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. آدرس ایمیل: m\_hamidi@sbu.ac.ir، شماره تلفن: ۰۲۱ ۲۲۹۰۴۰۱۶

۲. آزمایشگاه مرکزی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. آدرس ایمیل: bit.sbulab@gmail.com، شماره تلفن: ۰۲۱ ۲۲۹۰۴۰۱۶

۳. آزمایشگاه مرکزی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. آدرس ایمیل: jahanfar61@gmail.com، شماره تلفن: ۰۲۱ ۲۲۹۰۵۴۲۷

(عمودی) به عنوان شاخص استاندارد بیان شده است. واضح است که اگر یک دستگاه صفحه نمایشی بزرگ‌تر از اندازه استاندارد داشته باشد، بزرگنمایی تصاویر (SEM) نمایش داده شده نیز بزرگ‌تر می‌شود. در این مورد، بزرگنمایی و اندازه یک شیء با نوار مدرج مقیاس<sup>۱</sup> قابل محاسبه خواهد بود.

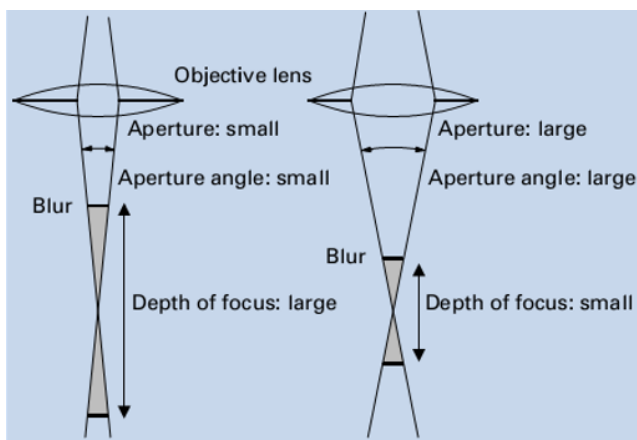


شکل ۱: اصول بزرگنمایی در میکروسکوپ الکترونی

اهمیت استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در راستای بهبود سطح پژوهش در دانشگاه‌ها و مراکز علمی و تحقیقاتی، برکسی پوشیده نیست. در بخش اول، مروری کوتاه بر درک پایه و اصول تصویربرداری شامل شناخت اجزاء، قطعات کلیدی، نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و مسیر آنالیز نمونه‌ها مورد توجه قرار گرفت [۱]. در ادامه‌ی بخش نخست توصیف عملکرد میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی، راه‌های رسیدن به تصاویر با قدرت تفکیک فضایی بالاتر و هم‌چنین شفاف‌تر را در این گزارش با هم مرور می‌کنیم. با توجه به مباحث قبلی، در نگاه کلی 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 و الکترون‌های ثانویه از سطح نمونه (لایه ظرفیت) شروع به گسیل می‌کنند و تصویرسازی توسط رایانه فوق سریع و از پردازش تصویر بین آشکارسازها، تصویر نهایی تشکیل شده و به نمایش در می‌آید. توپوگرافی و یا تصویر سه بعدی (نقشه برداری) سطح توسط روبش دو بعدی بیم الکترونی از بالای سطح قابل مشاهده است.

### ۳ عمق روشنایی

در فرآیند تصویرسازی از نمونه با فاصله طبیعی و ذاتی، اگر تمرکز شاخه الکترونی تابشی از بالای نمونه تنظیم شده باشد، قسمت انتهایی نمونه ممکن است خارج از تمرکز شاخه الکترونی باشد. اگر فاصله بین بالاترین و پایین‌ترین قسمت تیره‌ی تصویر بزرگ (کوچک) باشد، گفته می‌شود که عمق روشنایی بزرگ (کوچک) است.



شکل ۲: ارتباط بین زاویه شکاف و الکترون کاوه با عمق روشنایی

<sup>۱</sup>Scale bar

### ۲ بزرگنمایی در میکروسکوپ‌های الکترونی

زمانی که سطح نمونه توسط باریکه الکترونی به صورت دو بعدی روبش می‌شود تصویر حاصله در SEM روی صفحه نمایشگر ظاهر می‌گردد به گونه‌ای که در این زمان، اگر پهنای روبش باریکه الکترونی تغییر کند، بزرگنمایی تصویر (SEM) نمایش داده شده نیز تغییر خواهد کرد (شکل ۱).

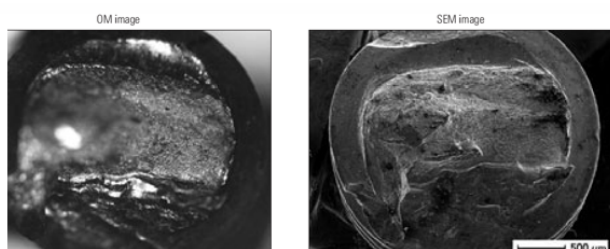
وابستگی بزرگنمایی به پارامترهای مختلف می‌تواند به ساده‌ترین زبان در این شکل توصیف شود به این ترتیب که با عدم تغییر اندازه‌ی صفحه‌ی نمایش (مانیتور)، کاهش (افزایش) پهنای روبش بزرگنمایی را بیش‌تر (کمتر) می‌کند.

به طور مثال، زمانی که سایز صفحه نمایش ۱۰ سانتی‌متر و پهنای روبش باریکه الکترونی ۱ میلی‌متر است، بزرگنمایی صد برابر است. حال اگر پهنای اسکن ۱۰ میکرومتر باشد، ۱۰۰۰۰ برابر می‌شود. بزرگنمایی برای یک صفحه ۱۲ سانتی‌متر (افقی) و ۱۰ سانتی‌متر

## مقالات علمی

است عمق روشنایی در میکروسکوپ الکترونی به شرایط تصویربرداری و نمونه بستگی مستقیم دارد [۳].

به عنوان مثال می‌توان تفاوت دو تصویر ثبت شده توسط میکروسکوپ نوری با قدرت بالا و میکروسکوپ الکترونی از سطح پیچ را در شکل ۴ مشاهده نمود.



شکل ۴: اختلاف بین دو تصویر ثبت شده توسط میکروسکوپ‌های الکترونی و نوری

تصویر ثبت شده توسط میکروسکوپ نوری دارای بی‌نظمی بزرگ بوده و تنها بخش جزئی از سطح پیچ توسط میکروسکوپ نوری فوکوس شده است. در حالی که با توجه به عمق روشنایی بالای میکروسکوپ الکترونی تمامی سطح پیچ فوکوس شده و واضح قابل رویت می‌باشد [۴].

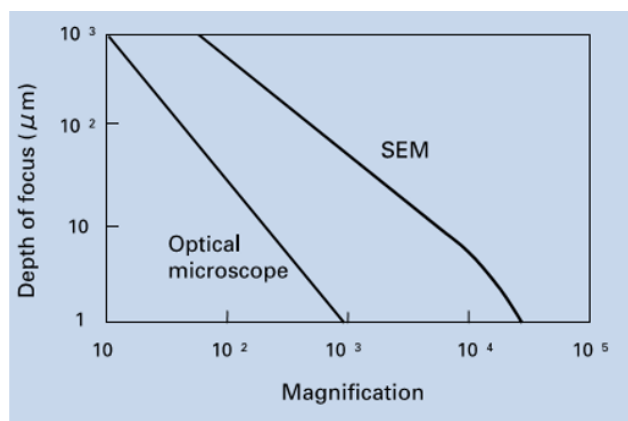
اما همچنان این سؤال مهم باقی است که چرا تصاویر با میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده هستند؟ برای درک کامل‌تر این موضوع و از بین بردن تضاد، باید قوانین فیزیکی شکل‌گیری تصویر توسط میکروسکوپ الکترونی را مرور کرد.

#### ۴ واکنش الکترون‌ها با نمونه

این واقعیت فیزیکی شناخته شده است که وقتی الکترون‌ها به سطح نمونه برخورد می‌کنند به داخل آن نفوذ و در نمونه پراکنده شده و با از دست دادن انرژی خود، جذب نمونه می‌شوند. میزان پراکندگی الکترون‌ها به موارد متفاوتی بستگی دارد: انرژی الکترون تابیده شده، عدد اتمی عناصر سازنده نمونه و چگالی اتم‌های اصلی و سازنده، به این صورت که وقتی انرژی بیشتر باشد، میزان پراکندگی بیشتر خواهد بود و در مقابل به ازای عدد اتمی و چگالی بیشتر، میزان این پراکندگی کمتر است. با عنایت به این عوامل، طرح‌واره گسیل سیگنال‌های مختلف از نمونه که جهت مشاهده و آنالیز سیگنال در میکروسکوپ‌های الکترونی استفاده می‌شود را می‌توان در شکل ۵ مشاهده نمود [۵].

همچنان که در شکل ۲ آمده است، زمانی که باریکه الکترونی موازی است (زاویه روزنه کوچک است)، تصویر در تمرکز می‌ماند حتی اگر تمرکز با یک میزان زیاد تغییر کند، زمانی که باریکه الکترونی زاویه‌دار (تغییرات زاویه ایی محدودی را داراست)، (زاویه روزنه بزرگ است) و تصویر خارج از تمرکز قرار می‌گیرد حتی اگر کانون تغییر کرده باشد.

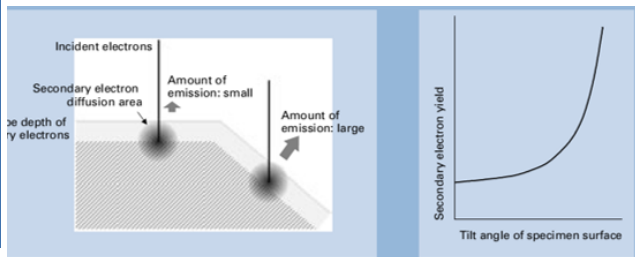
با مقایسه عمق روشنایی در میکروسکوپ‌های الکترونی و نوری، می‌توان به درک کامل‌تری در این مورد دست یافت (شکل ۳). در مورد بعضی از میکروسکوپ‌های اپتیکی، روبش باریکه برای تصویرسازی استفاده نمی‌شود. هنگامی که زاویه لنز شی‌ای از نمونه کوچک باشد (زاویه روزنه) عمق روشنایی بزرگ خواهد بود و زمانی که این زاویه بزرگ باشد عمق روشنایی کوچک خواهد بود، باید توجه داشت زمانی که تصویر تار است قابلیت دیدن آن تصویر در بزرگنمایی کم و پایین وجود نخواهد داشت، بنابراین زمانی که بزرگنمایی افزایش می‌یابد، تصویری که تار بوده است شفاف شده و تمرکز به خوبی انجام می‌گیرد و به عبارتی دیگر عمق روشنایی با تغییرات بزرگنمایی تغییر می‌کند [۲].



شکل ۳: اختلاف بین عمق روشنایی در میکروسکوپ‌های الکترونی و نوری

اگرچه یک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی بالای امروزی قادر خواهد بود تا تصویر با عمق روشنایی نسبتاً بالا فراهم سازد، اما برای دستیابی به عمق نفوذ بالا و با کیفیت حتماً نیاز به میکروسکوپ الکترونی داریم، علت این امر در زاویه روزنه (aperture) تعیین کننده عمق روشنایی بسیار باریک و کوچک در میکروسکوپ‌های الکترونی در مقایسه با لنز شی‌ای در میکروسکوپ نوری می‌باشد. لازم به ذکر

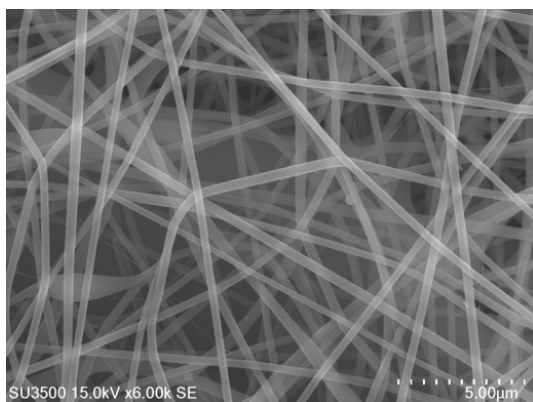
از گسیل الکترون‌های ظرفیت اتم‌های سازنده‌ی ماده تولید می‌شوند و زمانی که انرژی الکترون‌های ثانویه بسیار کم است، این الکترون‌های تولید شده در مناطق عمیق توسط نمونه‌ها سریع‌تر جذب می‌شوند. در واقع فقط الکترون‌های تولید شده در سطح نمونه به خارج از آن گسیل شده، این بدان معنی است که الکترون‌های ثانویه بسیار وابسته به سطح هستند [۷، ۸].



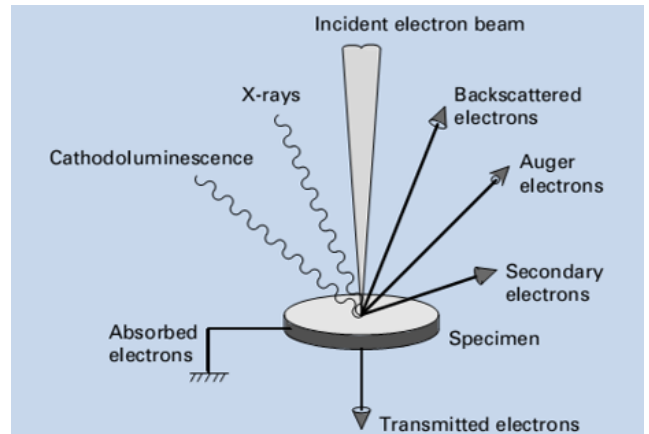
شکل ۷: ارتباط بین زاویه برخورد الکترون و الکترون‌های ثانویه گسیل شده از نمونه

علاوه بر این همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است زمانی که باریکه الکترون‌های تابشی به صورت عمودی وارد نمونه می‌شوند، میزان گسیل الکترون‌های ثانویه کمتر از زمانی است که الکترون‌های برخوردی به صورت مایل برخورد کرده‌اند [۸].

یک نمونه واقعی از تصویر الکترون ثانویه را در شکل ۸ آورده‌ایم. تفاوت در روشنایی سطح کریستال ناشی از تفاوت‌های زاویه‌های برخوردی باریکه الکترون است. پس می‌توان گفت الکترون‌های ثانویه برای مشاهده‌ی توپوگرافی (مکان‌یابی) سطح نمونه استفاده می‌شود به این دلیل که الکترون‌های ثانویه با انرژی کم، توسط انرژی پتانسیل موجود در نزدیک نمونه تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

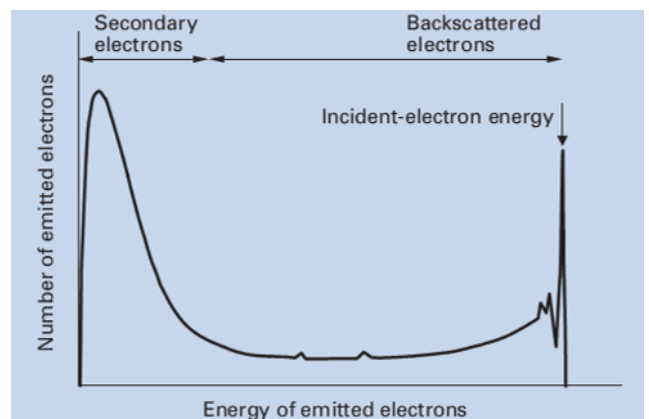


شکل ۸: تصویر نانو فیبرهای ثبت شده با الکترون‌های ثانویه در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید بهشتی



شکل ۵: طرح‌واره گسیل‌های مختلف الکترون برخوردی به نمونه

تحلیل میزان الکترون‌های ساطع شده در نمونه در حین تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که انرژی الکترون‌های ثانویه به  $50^\circ$  الکترون ولت و کمتر محدود شده است در حالی که توزیع انرژی الکترون‌های بازپراکنده بسیار پهنه وسیعی را شامل می‌شود که عبارت است از انرژی برخوردی الکترون تا انرژی کمتر از  $50^\circ$  الکترون ولت می‌باشد که این میزان بسیار کمتر از انرژی الکترون برخوردی است. پیک‌های ظاهر شده کوچک در نمودار در محدوده الکترون‌های بازپراکنده  $50^\circ$  الکترون ولت مربوط به الکترون‌های اوژه است (شکل ۶).



شکل ۶: توزیع انرژی الکترون‌های گسیل شده از نمونه

## ۵ الکترون‌های ثانویه

در شکل ۵ دسته مهمی از الکترون‌های ساطع شده از نمونه را با برخورد الکترون تحت عنوان الکترون‌های ثانویه می‌توان دید. این الکترون‌ها

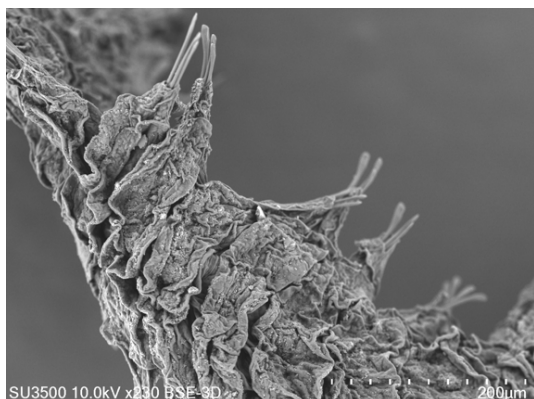
<sup>۱</sup>Back scatter

## مقالات علمی

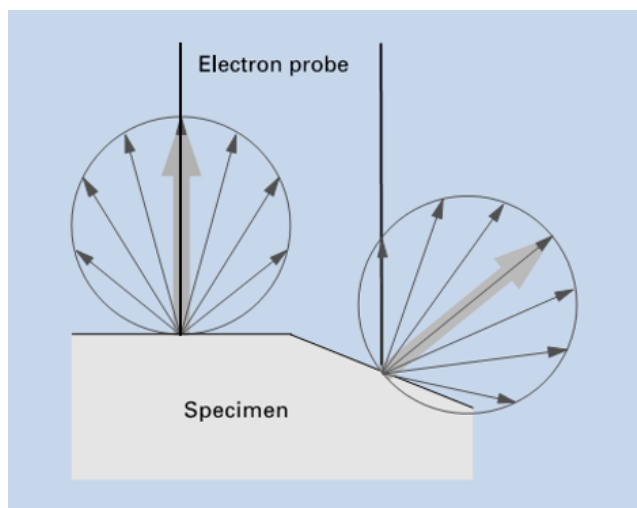
دسته دیگری از الکترون‌های پراکنده شده در شکل ۵، تحت عنوان الکترون‌های بازپراکنده در تصویربرداری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۶ الکترون‌های بازپراکنده

زمانی که الکترون‌های تابشی در نمونه پراکنده شوند، الکترون‌های بازپراکنده قابلیت ایجاد پیدا می‌کنند و به عقب پراکنده شده و از نمونه خارج می‌شوند. هنگامی که الکترون‌های بازپراکنده دارای انرژی بیش‌تری از الکترون‌های ثانویه باشند، اطلاعات از مناطق نسبتاً عمیق در الکترون‌های بازپراکنده ثبت می‌گردد. به همین دلیل می‌توان اظهار کرد که این الکترون‌های بازپراکنده به ترکیبات نمونه حساس هستند. متناسب با عدد اتمی اتم‌های سازنده در نمونه، میزان الکترون‌های پراکنده شونده ساطع می‌گردند. پس منطقه‌ای که شامل اتم‌های سنگین است تصویر الکترون‌های پراکنده را واضح‌تر آشکار می‌کند که این تصویر برای مشاهده‌ی تفاوت‌های فازی ترکیبات مناسب است (شکل ۹).



شکل ۱۰: تصویر کرم دریایی با الکترون‌های بازپراکنده ثبت شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید بهشتی



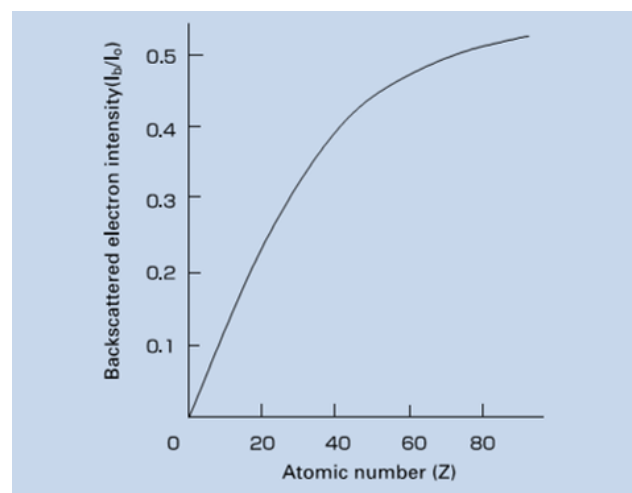
شکل ۱۱: وابستگی الکترون‌های بازپراکنده با زاویه برخوردی به نمونه

به عبارت دیگر، اگر باریکه الکترون به نمونه کریستالی که یک ترکیب یکنواخت است وارد شود، میزان تغییرات الکترون‌های پراکنده به جهت کریستال وابسته است.

در مجموع می‌توان اهمیت نوع الکترون‌های پراکنده شده در حین تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی را دریافت که انتخاب مناسب آن‌ها و سیستم آشکارساز مناسب انواع الکترون‌ها قابلیت رسیدن به تصویری شفاف‌تر را برای استفاده کننده ایجاد می‌کند [۱۱].

## مراجع

- [۱] میکروسکوپ الکترونی روبشی: اصول عملکرد، سیده مهری حمیدی، سعید جوادی و مهدی جهانفر، مجله علمی ترویجی شاعا، ۱۳۹۵.
- [۲] اصول و کاربرد میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های نوین آنالیز: ابزار شناسایی دنیای نانو، علیرضا مرعشی، پیروز کاویانی، سعید



شکل ۹: وابستگی شدت الکترون‌های بازپراکنده به عدد اتمی نمونه

یک نمونه‌ی واقعی از تصویر برگرفته از الکترون‌های بازپراکنده را در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته‌ایم.

علاوه بر این، اگر سطح نمونه دارای بی‌نظمی باشد، میزان و چگالی الکترون‌های بازگشتی در سطوح مسطح بیش‌تر می‌شود (شکل ۱۱). این ویژگی برای مشاهده‌ی توپوگرافی سطح مفید است.



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.

[۴] م. کرباسی، "میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو"، چاپ اول، اصفهان: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۸.

[۵] ی. خرازی و ا. ش. غفور، "ابزار شناسایی ساختار مواد"، چاپ اول، تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۰.

[6] Scanning electron microscope, JEOL USA Electron Optics Documents, 2016.

[7] <http://www.globalsino.com>

[8] Zhou, W., Wang, Z. L. (Editors), "Scanning Microscopy for Nanotechnology - Techniques and Applications", New York: Springer, (2006).

[9] [http://www.ammrf.org.au/myscope/images/sem/gun\\_parts.png](http://www.ammrf.org.au/myscope/images/sem/gun_parts.png)

[10] <http://nspinosa2008.wikispaces.com>

[11] Reimer, Ludwig, Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer series, 1998.