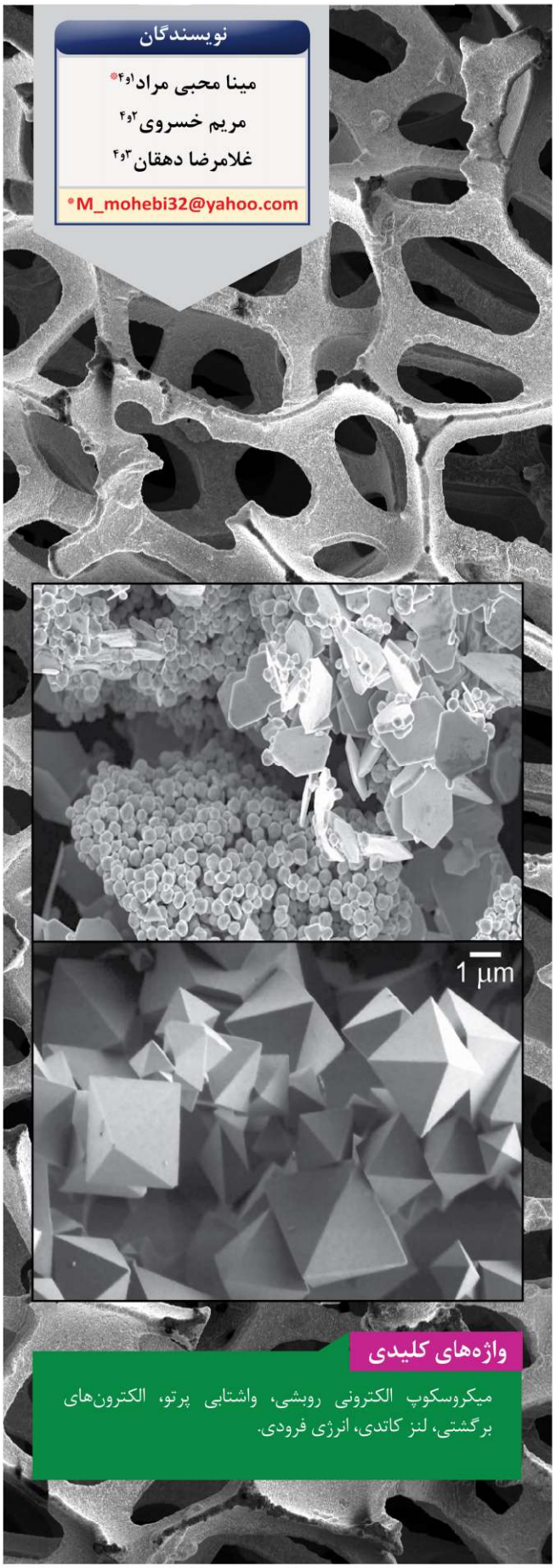
فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران سال هفتم ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۳۹۸ ■ شماره پیاپی ۲۷

معرفی روش واشتابی پرتو به‌منظور بهبود عملکرد تصویربرداری در میکروسکوپ الکترونی روبشی

نویسندگان
مینا محبی مراد[۱و۴*]
مریم خسروی[۲و۴]
غلامرضا دهقان[۳و۴]
*M_mohebi32@yahoo.com



چکیده

واشتابی پرتو[۵] روشی به نسبت ساده برای کاهش انرژی پرتو الکترونی و بهبود عوامل تصویربرداری مانند قدرت تفکیک و کنتراست است. میکروسکوپ الکترونی روبشی[۶] از یک پرتو الکترونی به شدت کانونی شده برای روبش سطح نمونه استفاده می‌کند. انرژی الکترون‌های تشکیل دهنده یک پروب با پتانسیل الکتریکی منبع الکترونی که به ولتاژ تسریع کننده یا ولتاژ بالا[۷] معروف است، تعیین می‌شود. تعداد دفعات شتاب‌دهی یا واشتابی الکترون‌ها در داخل ستون الکترونی اهمیتی نداشته و الکترون‌ها با یک انرژی متناظر با ولتاژ بالا ستون را ترک می‌کنند. ولتاژ بالا به‌طور معمول در یک دامنه از ۲۰۰ ولت تا ۳۰ کیلو ولت برای بیشتر دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل کنترل است و به اپراتور اجازه می‌دهد تا انرژی پرتو الکترونی متناسب با کاربرد مورد نظر را انتخاب کند. تصویربرداری با پرتو الکترونی با انرژی خیلی کم، که در سال‌های اخیر نشان از توسعه دستگاهی میکروسکوپ الکترونی روبشی بوده، بسیار حائز اهمیت است. امروزه کاربرد میکروسکوپ در ولتاژ پایین، موضوع مورد بحث در بسیاری از کنفرانس‌های علمی مرتبط با میکروسکوپ است و به‌طور کلی این امر با یک لنز شناور[۶] و تفنگ الکترونی گسیل میدانی در دستگاه SEM، به دلیل دانسیته بهتر جریان پرتو میسر می‌شود. قابل ذکر است در میکروسکوپ‌های الکترونی با منابع الکترونی ترمویونی نیز با استفاده از روش واشتابی پرتو، پرتو الکترونی حاصل در ولتاژ پایین به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ الکترونی روبشی، واشتابی پرتو، الکترون‌های برگشتی، لنز کاتدی، انرژی فرودی.

مقدمه

امروزه تحقیقات گسترده‌ای برای دستیابی به وضوح و قدرت تفکیک بالاتر روی میکروسکوپ‌های الکترونی انجام شده‌است. در حال حاضر اوج هنرنمایی دستگاه‌های موجود در حدود ۱ نانومتر برای دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از نوع شاتکی است. بهترین وضوح تصویر به‌طور معمول در ولتاژهای بالا بین ۱۵ تا ۳۰ کیلو ولت به‌دست می‌آید. در حالی که وضوح تصویر در اصل به دلیل افزایش خطاهای کروماتیک در ولتاژهای پایین، کم‌تر اتفاق می‌افتد.

به هر حال، ولتاژهای پایین برای بررسی مواد نارسانا، نیمه‌رسانا، پلیمرها، نمونه‌های زیستی و مواد مقاوم حساس به اشعه در لیتوگرافی مناسب است و به کاربر میکروسکوپ اجازه می‌دهد که جزئیات خیلی ظریف سطح را که نمی‌توان در ولتاژهای بالا مشاهده کرد، تشخیص داد.

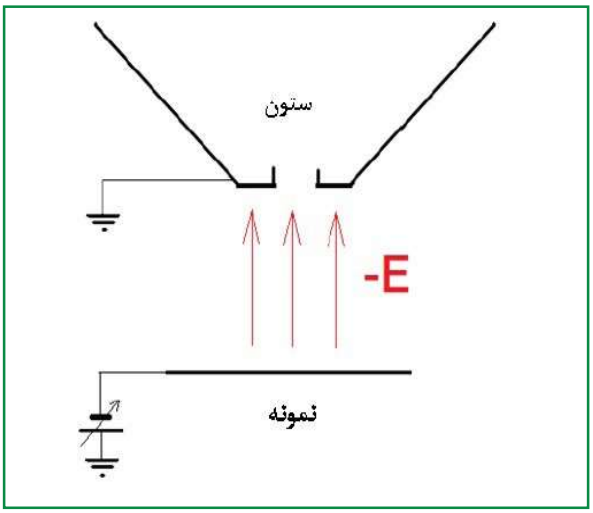
چندین پیشنهاد در رابطه با بهبود عملکرد SEM در ولتاژهای پایین ارائه شده‌است که یکی از آنها لنز کاتدی[۹] است که در طول ستون با استفاده از یک ولتاژ منفی در نمونه، باعث کند شدن سرعت پرتو الکترونی که ولتاژ بالایی دارد، می‌شود.

در این مورد، الکترون‌های ثانویه با استفاده از بایاس منفی نمونه، شتاب داده می‌شوند و شبیه به الکترون‌های برگشت داده شده[۱۰] با انرژی بالا آشکارسازی می‌شوند. اساس این روش، فناوری واشتابی پرتو نامیده می‌شود که در ادامه به تعریف، کاربرد، مزایا و محدودیت‌های آن پرداخته شده‌است [۱].

واشتابی پرتو چیست؟

کلیات فیلتراسیون غشایی

واشتابی پرتو روشی به نسبت ساده برای کاهش انرژی پرتو الکترونی اولیه بعد از ترک ستون است که به نوبه خود، وضوح یا کنتراست تصویر را بهبود می‌بخشد. مشخصه اصلی روش این است که نمونه در یک ولتاژ بایاس منفی بالا[۱۱] نگه داشته شود؛ بنابراین، الکترون‌های ترک کننده ستون قبل از اینکه به سطح نمونه برسند از سرعت آ ها کاسته می‌شود. این میدان الکتریکی واشتاب شده به‌صورت لنز نفوذی اضافی (لنز کاتدی) عمل می‌کند [۲، ۳ و ۶].



شکل (۱): اصول واشتابی پرتو: نمونه در یک بایاس منفی ولتاژ نگه داشته می‌شود و الکترون‌ها در حال ترک کردن ستون قبل از رسیدن به نمونه، واشتاب می‌شوند [۴].

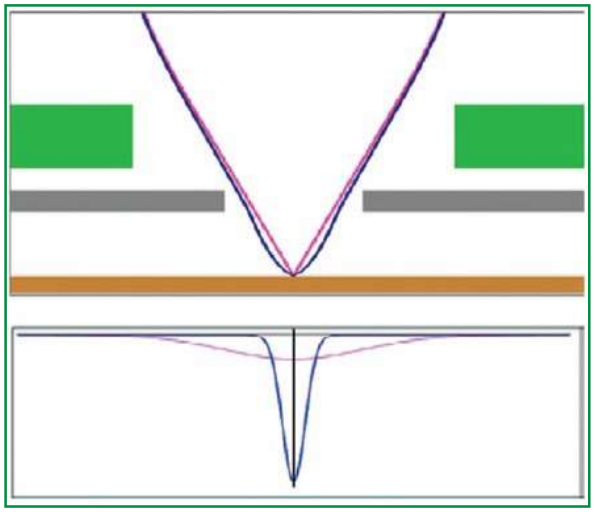
«انرژی فرودی[۱۲]» عبارتی است که برای شرح انرژی الکترون‌های واشتاب داده شده‌ای که به نمونه برخورد می‌کنند، به کار می‌رود. انرژی فرودی با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$LE=-e\,(HV-SB)$$

که در آن: LE انرژی فرودی الکترون‌های پروب بر حسب الکترون‌ولت (eV)، e شارژ اولیه، HV ولتاژ بالا (منفی) و SB ولتاژ بایاس نمونه (منفی) است.

برای مثال، اگر ولتاژ تفنگ الکترونی ۵ کیلو الکترون ولت و بایاس نگه‌دارنده نمونه ۴ کیلو الکترون ولت باشد، الکترون ابتدا در ستون به انرژی ۵ کیلو الکترون ولت شتاب داده می‌شود. همان‌طور که پرتو الکترونی ۵ کیلو الکترون ولتی ستون الکترونی را ترک می‌کند، به واسطه بایاس منفی ۴ کیلو الکترون ولت، از سرعتشان کاسته شده و به انرژی فرودی ۱ کیلو الکترون ولت می‌رسند. بنابراین، الکترون‌های اولیه با همان انرژی که اگر ولتاژ تفنگ الکترونی ۱ کیلو الکترون ولت (بدون واشتابی پرتو) بود، به سطح نمونه می‌رسند.

انگیزه اصلی برای این کار، دستیابی به تصویری قابل قبول در انرژی‌های فرودی خیلی پایین به چند ده یا چند صد الکترون ولت است. واشتابی پرتو و روش‌های مشابه موضوع‌های جدیدی نیستند و خیلی از مقالات علمی درباره این موضوع به چاپ رسیده‌اند. با این حال آنچه که جدید است، استفاده از این روش در دستگاه ای تجاری برای دامنه گسترده‌ای از کاربردهاست، نه فقط برای دستیابی به شرایط تصویری بهتر، بلکه برای بهبود عملکرد شرایط اپراتوری نیز است [۵].



شکل (۲): نمای مسیر پرتو الکترونی در یک صورت‌بندی کلی زمانی که لنز کاتدی فعال نیست (رنگ ارغوانی) و زمانی که لنز کاتدی فعال است (رنگ آبی) و پروفایل متناظر پرتو (شکل پایین). قسمت سبز رنگ قسمت پایینی لنز مغناطیسی است. پرتو بین آشکارساز الکترون برگشتی (ناحیه طوسی رنگ) و نمونه (ناحیه قهوه‌ای رنگ) واشتاب می‌شود. با اینکه پرتو واشتاب شده زاویه باز بالاتری دارد اما قطر تیزتر را ایجاد می‌کند [۴].

مزایای پرتو واشتاب شده

ازجمله مزایای تصویربرداری با استفاده از روش واشتابی پرتو می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. میدان الکتریکی بین نمونه و ستون، یا هر آشکارسازی که به‌طور مستقیم زیر ستون قرار دارد، یک لنز الکترواستاتیک (لنز کاتدی) ایجاد می‌کند که تأثیر خیلی زیادی روی خواص اپتیکی الکترونی دستگاه دارد. همان‌طور که بعداً نشان داده خواهد شد، لنز کاتدی می‌تواند قدرت تفکیک تصویر را در انرژی فرودی پایین بهبود دهد.

۲. تمامی سیگنال‌های الکترونی که از نمونه بایاس منفی شده خارج می‌شوند به سمت پایین‌ترین جزء محفظه نمونه تسریع داده می‌شوند. سیگنال‌های الکترونی زمانی که به آشکارساز می‌رسند، انرژی بالاتری دارد و مسیرهای[۱۳] سیگنال الکترونی اصلاح می‌شوند. این امر، کارایی سیگنال جمع‌آوری کننده را افزایش می‌دهد.

۳. تصویربرداری با انرژی‌های فرودی پایین به‌طور معمول با منابع الکترونی و ستون‌های طراحی شده برای کار در ولتاژهای بالاتر انجام می‌شود. از این رو، نیاز به دستگاه میکروسکوپی جداگانه نیست.

معرفی لنز کاتدی

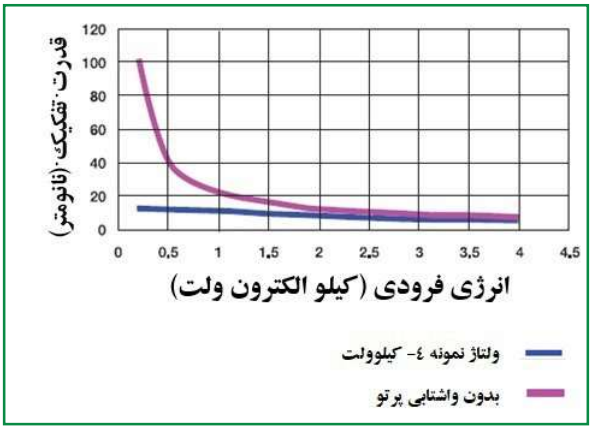
در حالی که پرتو الکترونی، ستون اپتیکی را ترک می‌کند با لنز نهایی کانونی می‌شود. میدان الکتریکی حاصل از واشتابی به‌صورت یک لنز همگرای شناور (لنز کاتدی) عمل کرده و از سرعت الکترون‌ها کاسته می‌شود. در این روش، پرتوی الکترون اولیه در طول واشتابی، بیشتر کانونی می‌شود.

در یک صورت‌بندی هندسی، قدرت لنز کاتدی فقط با یک عامل شرح داده می‌شود، «نسبت شناوری[۱۴]». نسبت شناوری (K) نسبتی بین انرژی پرتو اولیه و انرژی فرودی است که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$K=-e\,HV/\,LE=\,HV/\,(HV-SB)$$

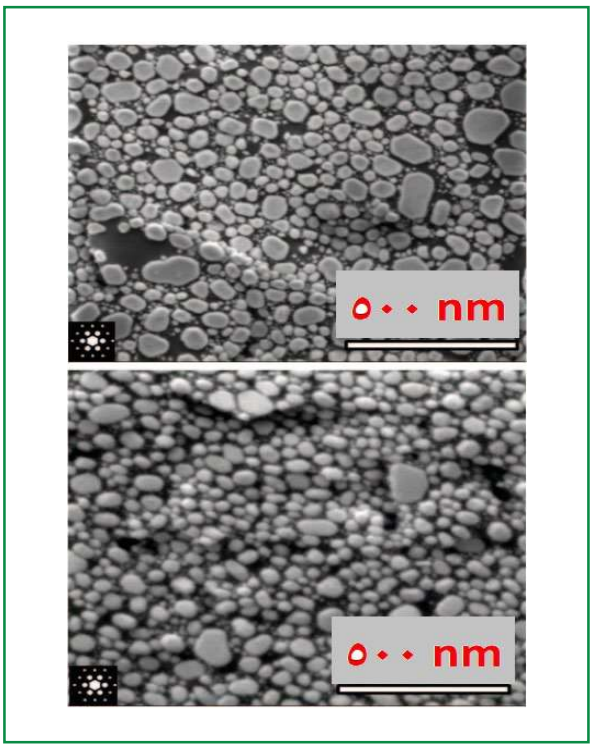
هر چه نسبت شناوری بیشتر باشد، قدرت لنز شناور بیشتر می‌شود. جالب‌ترین ویژگی لنز از نقطه نظر قدرت تفکیک، نقایص محوری است که نقایص کروماتیک[۱۵] و کروی[۱۶] نیز نامیده می‌شوند. ضرایب هر دوی این نقایص محوری، با افزایش نسبت شناوری k، به‌طور چشمگیری افت می‌کند. برای مثال، ضریب نقایص کروماتیک Cc که تأثیر عمده‌ای در قدرت تفکیک در انرژی‌های فرودی پایین دارد، بیشتر نسبت عکس با نسبت شناوری k دارد. این امر منجر به جبران جزئی زوال قطر پرتو در پرتو کم‌انرژی می‌شود که در مواردی که واشتابی پرتو استفاده نشده، مشاهده شده‌است. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده‌است.

شکل (۳) مثالی از قدرت تفکیک محاسبه شده از تنظیمات واشتابی پرتو در دستگاه SEM با منبع الکترونی ترمویونی (فیلمان تنگستنی) است، لنزهای رایج و بایاس نمونه SB = -۴ kv، با نمونه بایاس نشده، مقایسه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید، قدرت تفکیک در انرژی‌های فرودی پایین در مورد واشتابی پرتو، بخصوص در انرژی‌های پایین‌تر از ۲ کیلو الکترون ولت به‌طور چشمگیری بهبود یافته است.



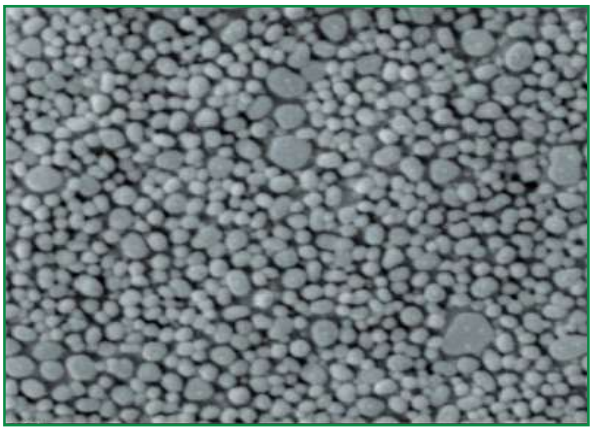
شکل (۳): قدرت تفکیک محاسبه شده در تنظیمات واشتابی پرتو در یک SEM با منبع الکترون ترمویونی و لنزهای مغناطیسی رایج با و بدون واشتابی پرتو (بایاس نمونه SB = -۴ kv) [۴].

حتی یک مقدار نسبتاً کم برای نسبت شناوری، به‌طور قابل توجهی قطر پرتو را بهبود می‌دهد. این موضوع در شکل (۴) در تصاویر گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی، با لنز نهایی رایج و نه شناور نشان داده شده‌است. قدرت تفکیک انرژی فرودی با مقدار ۱کیلوولت با استفاده از واشتابی پرتو، به مقدار ۱/۵ برابر بهبود می‌یابد.



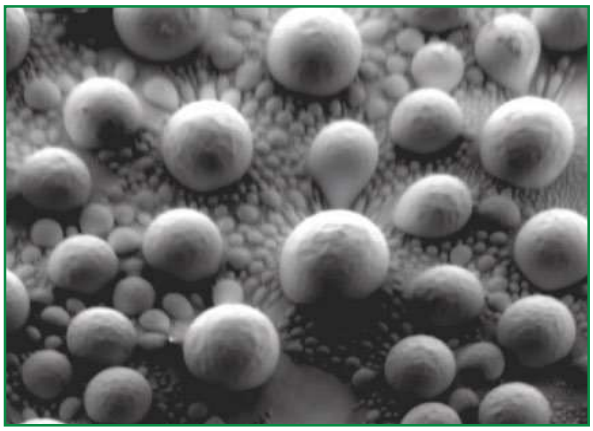
شکل (۴): بهبود قدرت تفکیک تصویر با استفاده از لنز کاتدی در تصویر بالا (واشتابی پرتو). انرژی فرودی LE = ۱ keV تصویر حاصل بدون استفاده از واشتابی پرتو (k=۱) در شکل پایین و بایاس پایه نگهدارنده نمونه SB = -۳ kV، (k=۴). [۴]

قابل ذکر است، با افزایش نسبت شناوری در انرژی ای فرودی پایین‌تر امکان دستیابی به قدرت تفکیک بالاتر(<۵۰ درصد) نیز فراهم می‌شود (شکل (۵)).



شکل (۵): قدرت تفکیک تصویر با لنز کاتد و نسبت بالای شناوری. انرژی فرودی LE = ۱۰۰ eV و بایاس پایه نگهدارنده نمونه SB = -۴ kV، (K = ۴۱) [۴].

زمانی که لنز کاتدی با لنز مغناطیسی شناور ترکیب شود، روندی مشابه در بهبود قدرت تفکیک نیز وجود دارد. با وجود مزایای مطرح شده برای لنز کاتدی، وابستگی توانایی این لنز به ویژگی‌های سطح نمونه از جمله محدودیت‌های آن است: با واشتابی پرتو، سطح نمونه بخشی از سیستم الکترو اپتیکی می‌شود. این سیستم در صورتی که سطح روبش شده مسطح، صاف، بزرگ و عمود بر محور اپتیکی باشد، به‌طور کامل کار می‌کند و در میدان الکتریکی اختلالی ایجاد نمی‌شود. در غیر اینصورت مشکلات متعددی مانند اعوجاج تصویر و آستیگماتیسم می‌تواند رخ دهد (شکل (۶)). زمانی که نسبت شناوری بالاتر و لنز کاتدی قوی‌تر است، محدودیت نمونه بیشتر اهمیت پیدا می‌کند. خوشبختانه در بیشتر کاربردهای عملی، توانایی لنز کاتدی محدود نشده‌است. برای مثال، با مانت کردن مناسب نمونه حتی نمونه‌های کوچک می‌توان تصویربرداری موفقی انجام داد [۳].



شکل (۶): مثالی از تصویری با اعوجاج زیاد با استفاده از لنز کاتدی با قدرت زیاد در ترکیب با یک نمونه زاویه‌دار (توپ‌های ظریف روی کربن). توپک‌ها به‌طور نرمال گرد و متقارن هستند اما بعضی از آن‌ها نقص تصویر را نشان می‌دهند که به دلیل عدم بهینه تنظیمات تصویر ایجاد شده‌است [۴].

بهبودآشکارسازی سیگنال الکترون‌ها با واشتابی پرتو

بررسی محدودیت‌های تصویربرداری در انرژی‌های فرودی خیلی پایین:

معمولاً دامنه ولتاژ بالا در SEM های رایج از ۲۰۰ ولت شروع می‌شود. تنظیم تصویربرداری با ولتاژهای تسریع کننده پایین‌تر، برخی مشکلات فنی زیر را به وجود می‌آورد:

- پایداری ولتاژ بالا؛
- کالیبراسیون و تنظیم ستون؛
- برهم‌کنش‌های کولومب در پرتو و غیره.

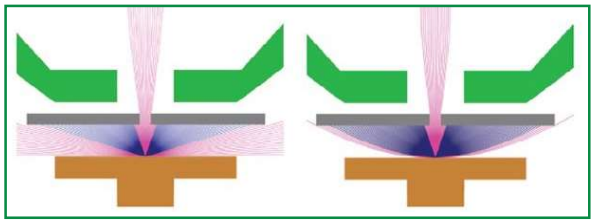
همه این عوامل طوری عمل می که قطر پرتو را افزایش داده و قدرت تفکیک را کاهش دهند. واشتابی پرتو نیز روشی به نسبت ساده برای کاهش محدودیت‌های انرژی فرودی قابل استفاده است در حالی که تمامیت[۱۷] پرتو را نیز حفظ می‌کند.

اثر واشتابی بر الکترون‌های برگشتی (BSE):

در غیاب واشتابی پرتو، الکترون برگشتی با همان انرژی که هنگام ترک سطح نمونه داشتند، نزدیک به انرژی فرودی الکترون‌های اولیه به آشکارساز می‌رسند. ساده‌ترین و بیشترین

استفاده از روش آشکارسازی الکترون برگشتی در بیشتر دستگاه ای SEM، جذب مستقیم آن‌ها در یک آشکارساز نیمه‌هادی (حالت جامد) یا آشکارساز نوع جرقه‌زن در پتانسیل پایه است. در آشکارسازهای حالت جامد، همان‌طور که انرژی الکترون فرودی به چند کیلو الکترون‌ولت افت می‌کند، حساسیت خود را از دست می‌دهند و با اینکه امروزه آشکارسازهای حساس‌تری در دسترس است که این محدودیت را بهبود می‌بخشد، ولی این محدودیت اساسی در این قبیل آشکارسازها وجود دارد. در حالت واشتابی پرتو، الکترون ای برگشتی به سمت آشکارساز، تسریع داده می‌شوند که این امر موجب می‌شود که سیگنال و محدودیت تشخیص شده بهبود یابد و همچنین قادر به شناسایی خوب سیگنال حتی در انرژی‌های فرودی خیلی پایین می‌شود.

نتیجه دیگر استفاده از واشتابی پرتو این است که مسیرهای الکترون‌های برگشت داده شده توسط میدان الکتریکی اضافی به‌صورت منحنی در می‌آیند. شکل (۷) مثالی از ساختار آشکارسازی BSE با یک آشکارساز قرار گرفته زیر لنز نهایی است.



شکل (۷): مسیرهای تشخیص داده شده (رنگ آبی) و تشخیص داده نشده (رنگ ارغوانی) الکترون‌های برگشتی بدون (چپ) و با (راست) واشتابی پرتو. جمع‌آوری پرتو با آشکارساز الکترون برگشتی (رنگ طوسی) با واشتابی پرتو بهتر انجام شده‌است [۴].

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌کنید (شکل سمت چپ) بدون اثر واشتابی پرتو هیچ بایاس نمونه‌ای به کار نرفته است و مسیرهای BSE مستقیم هستند. توزیع زاویه‌ای الکترون برگشتی به‌صورت هندسی مشخص شده‌است و با واشتابی پرتو به‌عنوان نتیجه فوکوس لنز کاتدی، بیشتر الکترون برگشتی با توزیع زاویه‌ای پهن‌تر جمع‌آوری شده‌اند (شکل سمت راست). علاوه‌بر این، با تغییر نسبت شناوری (قدرت لنز کاتدی)، کاربر می‌تواند به‌طور مستمر طبیعت سیگنال شناسایی شده را یا به سمت کنتراست توپوگرافی با جزئیات سطح از الکترون برگشتی کم زاویه تغییر دهد (زوایای پایین ر با سطح نمونه موازی‌تر هستند) و یا به سمت کنتراست ترکیبی با الکترون‌های برگشتی زاویه بالا تغییر دهد.

اثر واشتابی پرتو بر الکترون‌های ثانویه:

الکترون‌های ثانویه (SE) در انرژی‌های خیلی پایین‌تر از الکترون‌های برگشتی (کمتر از ۵۰ الکترون ولت) نشر می‌کنند و به‌طور معمول توسط یک آشکارساز جرقه‌زن در محفظه نمونه جمع‌آوری می‌شود (بدون سیستم لنز شناور). به علت انرژی پایین‌شان، زمانی که از حالت واشتابی پرتو استفاده می‌شود، به‌طور شدیدی با محور اپتیکی موازی می‌شوند. در این مورد آن‌ها می‌توانند در انتهای محور اپتیکی نزدیک به لنز نهایی شناسایی شوند.

معایب و اثرات ناخواسته واشتابی پرتو

پیاده‌سازی و اجرای حالت واشتابی پرتو پیامدهای زیادی برای طراحی یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی دارد. اولین الزام، امنیت کاربران است. به‌منظور دستیابی به چندین کیلوولت روی سطح نمونه، قسمت بالایی میز نمونه باید کاملا ایزوله و متصل به یک نگه دارنده با ولتاژ بالا باشد. هم‌زمان، تا وقتی که کاربر در تماس با نمونه است، پایه نگهدارنده نمونه نباید شارژ باشد. این امر باید با استفاده از یک سیستم قفل امنیت داخلی مستقل از کنترل نرم‌افزاری تضمین شده باشد. همچنین اگر نمونه بایاس شده با هر قسمت از محفظه نمونه در تماس باشد، ستون یا آشکارساز در طول کار کردن، نباید موجب خطری برای اپراتور یا دستگاه شود.

نگه دارنده نمونه در قسمت بالای نمونه باید به خوبی ایزوله شده باشد تا در برابر ولتاژ بالای چندین کیلوولت پایدار باشد. این امر بدیهی نیست زیرا ولتاژ به کار گرفته شده باید خیلی پایدار باشد. هر جریان نشت کننده یا میکرو - تخلیه بار[۱۸] باعث نوسان ولتاژ نمونه و از دست رفتن کیفیت تصویر می‌شود. این به آن معناست که واشتابی پرتو کاملاً با حالت خلأ پایین سازگار نیست. همچنین در جایی که تقاطع قوی میدان الکتریکی و مغناطیسی در فاصله کاری کوتاه باعث ایجاد شراط ایده‌ال برای تخلیه گازهای باقی‌مانده حتی در اتاقک نمونه با خلأ بالا می‌شود، ایزوله کردن پایه نگهدارنده نمونه چالشی برای لنز مغناطیسی شناور ستون‌ها است.

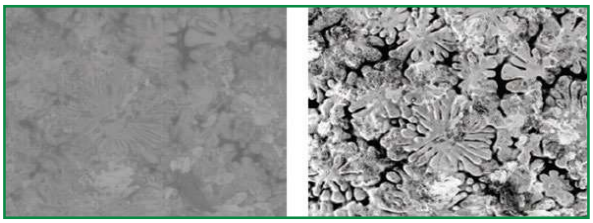
چالشی دیگر، تجمع حالت واشتابی پرتو در نرم‌افزار کنترل کننده عناصر اپتیکی ستون الکترونی است. لنز کاتدی یک لنز بزرگ و منعطف است و در هر ترکیبی از ولتاژ بالا، ولتاژ بایاس نمونه و فواصل کاری کار می‌کند. برای تمامی این ترکیبات، صحت حالت اپتیکی، که فاصله کاری نامیده می‌شود، بازخوانی شده و دقت بزرگنمایی، نباید دستخوش تغییر شود. سیستم کالیبراسیون و روند تنظیمات نیز باید به خوبی توسعه یابد.

از طرفی دیگر، واشتابی پرتو، توانایی دستگاه را بهبود می‌بخشد. برای دستیابی به انرژی فرودی مشخص با واشتابی پرتو، ستون با افزایش ولتاژ بالا عمل می‌کند، که به‌طور خودکار حساسیت کمتری به میدان مغناطیسی خارجی و تلرانس[۱۹] بالاتری برای شارژ قسمتی از ستون و کیفیت دریچه[۲۰] دارد.

امکان تصویربرداری‌های غیرممکن با به کارگیری روش واشتابی پرتو

تصویربرداری در انرژی کم با استفاده از الکترون‌های برگشتی بیشتر آشکارسازهای BSE رایج در دسترس، تصاویر با کیفیت

و خوب را فقط با پرتو الکترونی که انرژی‌های بالای ۲ کیلو الکترون‌ولت دارد، فراهم می‌کند. این محدودیت به آسانی با شتاب دادن BSE در حالت واشتابی پرتو (شکل (۸)) رفع شد. به‌طور طبیعی، ترکیبی از الکترون‌های برگشتی با زاویه زیاد و کم در جریان تغییر مسیرهای BSE، شناسایی شده که نمایی از آن در شکل (۷) نشان داده شده‌است.



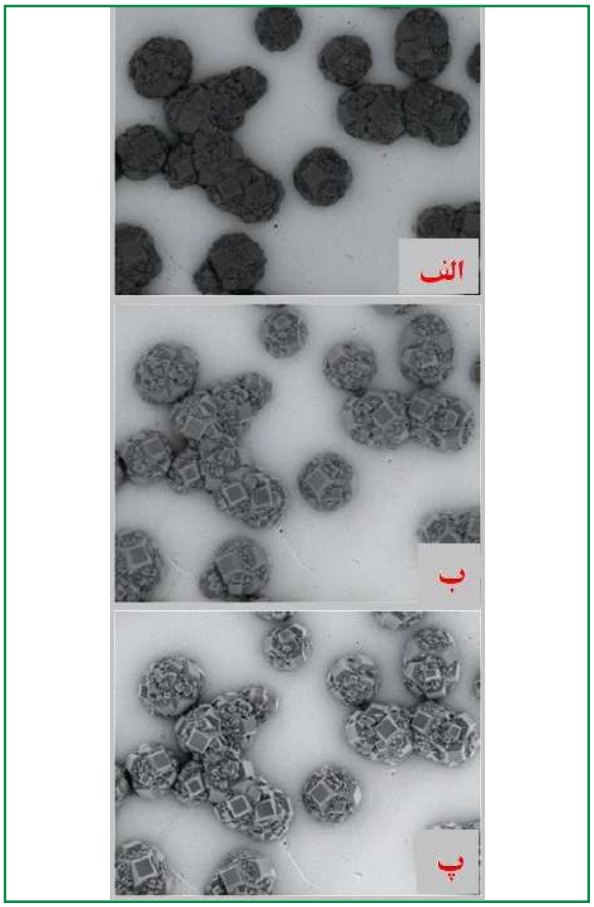
شکل (۸): تصویر جوش آلیاژ مس/پالادیوم در انرژی فرودی مشابه ۱ کیلو الکترون‌ولت بدون واشتابی پرتو (چپ) و با واشتابی پرتو (راست)، نسبت شناوری k = ۳ [۴].

تشخیص الکترون‌های برگشتی با زاویه انتخابی[۲۱]

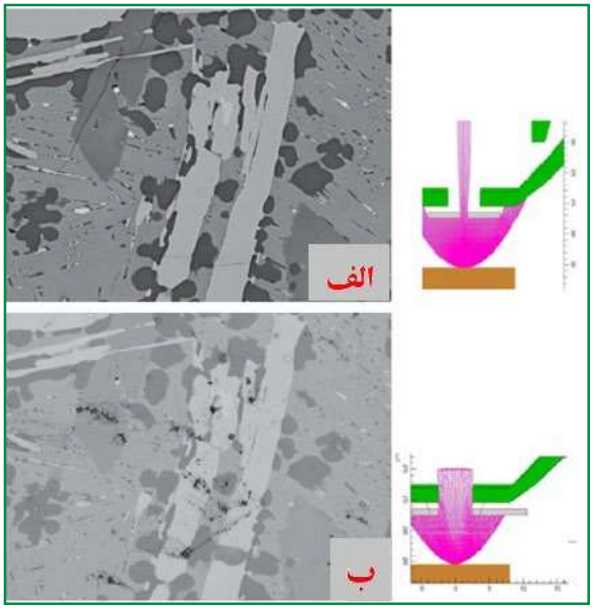
آشکارسازهای الکترون‌های برگشتی اولیه طراحی شده تا تصاویری با اطلاعاتی از ترکیب نمونه با استفاده از جمع‌آوری الکترون‌های برگشتی زاویه بالا فراهم کنند. حالت واشتابی پرتو، بر مسیرهای الکترون‌های برگشتی از قبیل تشخیص الکترون‌های برگشتی با زاویه کم نیز تاثیر می‌گذارد و آن‌ها را به راحتی قابل دستیابی می‌کند. تشخیص الکترون‌های برگشتی با زاویه زیاد یا کم به‌طور عمده‌ای به نسبت شناوری بستگی دارد. تشخیص الکترون‌های برگشتی با زاویه انتخابی در شکل (۹) نشان داده شده‌است. در این شکل، یک سری از تصاویر با کنتراست متفاوت از ترکیب تا توپوگرافی (شکل (۹-پ)) با افزایش نسبت شناوری نشان داده شده‌است.

تصویربرداری از جزئیات سطح

برای مشاهده مشخصه ی کوچک سطح، پرتو کم انرژی و بنابراین عمق نفوذ ضروری است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، واشتابی پرتو می‌تواند یک پرتو الکترونی کم انرژی با وضوح بالا به سطح نمونه بیاورد. شکل (۱۰) یک نمونه سرباره کوره بلند[۲۲] است که با آشکار BSE، keV PE=۱۰ (انرژی الکترون‌های اولیه) بدون واشتابی پرتو و با واشتابی پرتو در انرژی فرودی ۱ کیلو الکترون‌ولت مشاهده شده‌است. جزئیات جدید در تصاویر با ۱۰ کیلو الکترون‌ولت قابل مشاهده نیست ولی زمانی که انرژی فرودی به ۱ کیلو الکترون‌ولت می‌رسد ظاهر می‌شوند. با استفاده از واشتابی پرتو کنتراست نمونه باقی می ماند در حالی که جزئیات اضافی سطح نیز قابل مشاهده هستند (شکل (۱۰-ب)).



شکل (۹): تصاویر میکرو بلور ذرات الماس قرار گرفته روی بستر سیلیکونی است که با استفاده از آشکارساز الکترون برگشتی جمع‌آوری شده‌است. انرژی فرودی LE = ۳ keV با نسبت‌های شناوری متنوع است. (الف) k = ۱، (ب) k = ۱/۳۳، (پ) k = ۲ [۴].



شکل (۱۰): سرباره‌ی کوره بلند مشاهده شده با استفاده از آشکارساز الکترون برگشتی در (الف) انرژی پرتو اولیه PE = ۱۰ keV و (ب) با واشتابی پرتو در انرژی فرودی LE = ۱ keV [۳-۶].

فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران سال هفتم ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۳۹۸ ■ شماره پیاپی ۲۷

نتیجه گیری

واشتابی پرتو، روشی سودمند برای انواع مختلف دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی است تا عوامل تصویربرداری مانند قدرت تفکیک و کنتراست را بهبود بخشد. این روش می‌تواند باعث بهبود محدودیت آشکارسازی و افزایش قابلیت استفاده از انرژی کم باشد. واشتابی پرتو نه تنها به تراز شارژ کمک می‌کند، بلکه به طرز مؤثری نقایص لنز را کاهش می‌دهد [۶]؛ بنابراین، باعث بهبود کلی وضوح تصویر می‌شود. برای شناوری دستگاه‌هایی با لنز شناور، واشتابی پرتو قابلیت تصویربرداری نهایی در انرژی کم را ممکن می‌سازد. علاوه‌بر این، برای میکروسکوپ‌های الکترونی مبتنی بر تفنگ گسیل میدانی[۲۳] یا نشر حرارتی[۲۴] با لنزهای رایج، ارتقای عملکرد برای تصویربرداری در انرژی کم می‌تواند به نسبت چشمگیری عملکرد تصویربرداری و انعطاف این دستگاه‌ها را بسط دهد.

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد شیمی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

۲. مهندس برق الکترونیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

۳. مهندسی مواد و متالورژی، مرکز پژوهش متالورژی رازی

۴. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ الکترونی روبشی

5. Beam deceleration

6. scanning electron microscope (SEM)

7. high voltage (HV)

8. Immersion lens

9. Cathode lens

10. Back Scattered Electrons (BSE)

11. High negative bias voltage

12. Landing energy

13. trajectories

14. Immersion ratio

15. Chromatic aberration

16. Spherical aberration

17..Beam integrity

18. Mico-discharges

19. tolerance

20. aperture

21. Angularly selective

22. Blast furnace slag

23. Field emission gun

24. Thermionic emitters gun

مراجع

[1] J Jiruse1, F Lopour1 and M Havelka, A novel FE-SEM column with beam deceleration technology, Ultra microscopy, 146, (2014), 27- 32.

[2] I Mullerova, L Frank, Use of cathode lens in scanning electron microscope for low voltage applications, Mikrochim Acta, 114/115 (1994) 389-396.

[3] R young, T Templeton, L Roussel, I Gestmann, G van veen, T Dingle, and S Henstra, Extreme high-resolution SEM: A paradigm shift, Microscopy Today 16(4) (2008) 24-28.

[4] D Phifer, L Tuma, T Vystavel, P Wandrol, and R.J Young, Improving SEM imaging performance using beam deceleration, Microscopy Today, 17(4) (2009) 40- 49.

[5] I Mullerova, L Frank, Scanning low energy electron microscopy, Adv Image and Electr Phys 128 (2003) 309-443.

[6] M Darus, O Ugurlu, Common rules to follow for Stage Bias and Beam Deceleration imaging, using any FEI Immersion Lens SEM and Dual beam equipped with Stage Bias functionality, FEI Company, (2012), www.fei.com.