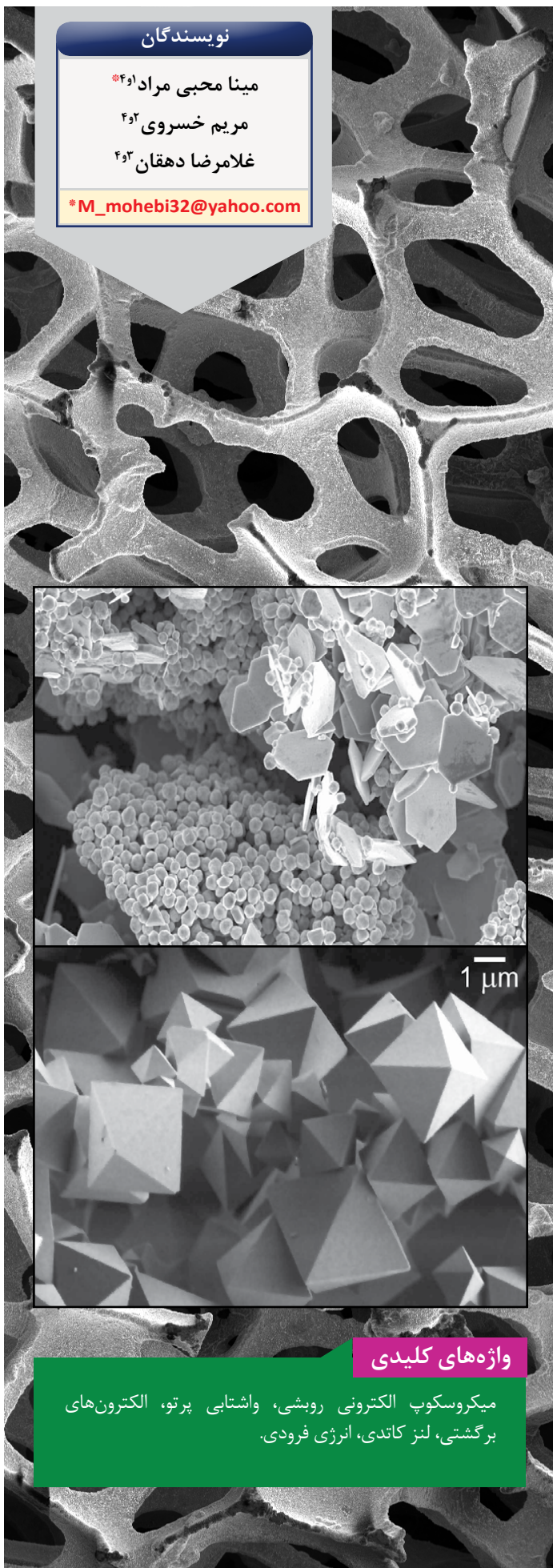


نویسندگان

مینا محبی مراد^{۴*}مریم خسروی^{۴*}غلامرضا دهقان^{۴*}

*M_mohebi32@yahoo.com



معرفی روش واشتابی پرتو به منظور بهبود عملکرد تصویربرداری در میکروسکوپ الکترونی روبشی

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^۸ 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 ترمیونی نیز با استفاده از روش واشتابی پرتو، پرتو الکترونی حاصل در ولتاژ پایین به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

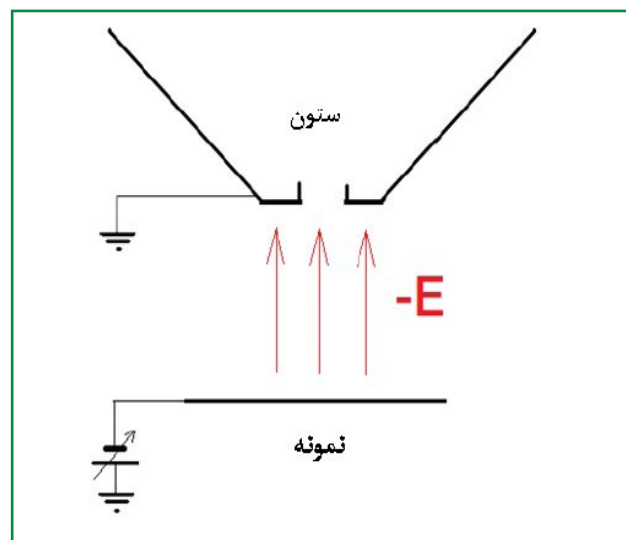
میکروسکوپ الکترونی روبشی، واشتابی پرتو، الکترون‌های برگشتی، لنز کاتدی، انرژی فرودی.

امروزه تحقیقات گسترده‌ای برای دستیابی به وضوح و قدرت تفکیک بالاتر روی میکروسکوپ‌های الکترونی انجام شده است. 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 به دست 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 شده است 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 شده است [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 آنها کاسته می‌شود. این میدان الکتریکی واشتاب شده به صورت 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.

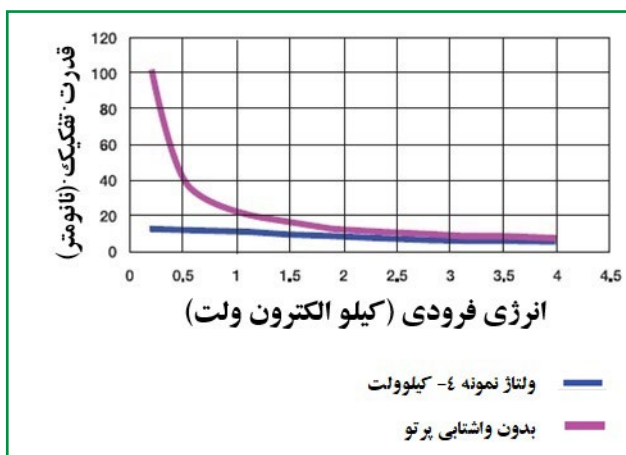
انگیزه اصلی برای این کار، دستیابی به تصویری قابل قبول در انرژی‌های فرودی خیلی پایین به چند ده یا چند صد الکترون ولت است. واشتابی پرتو و روش‌های مشابه موضوع‌های جدیدی نیستند و خیلی از مقالات علمی درباره این موضوع به چاپ رسیده‌اند. با این حال آنچه که جدید است، استفاده از این روش در دستگاه‌های تجاری برای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

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:

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

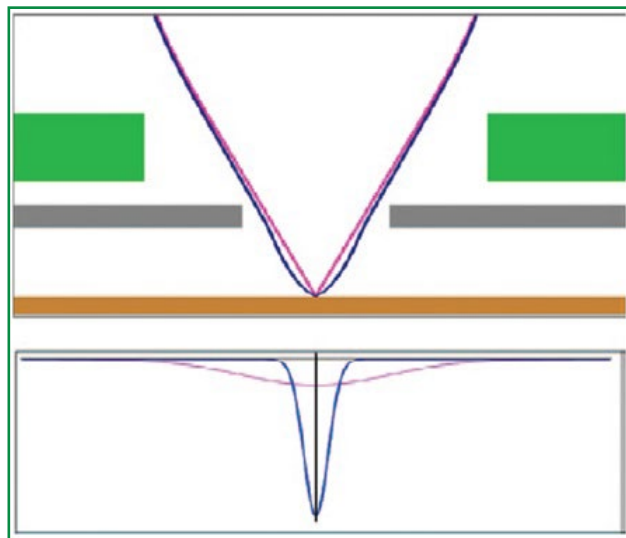
هر چه نسبت شناوری بیشتر باشد، قدرت لنز شناور بیشتر می‌شود. جالب‌ترین ویژگی لنز از نقطه نظر قدرت تفکیک، نقایص محوری است که نقایص کروماتیک^{۱۵} و کروی^{۱۶} نیز نامیده می‌شوند. ضرایب هر دوی این نقایص محوری، با افزایش نسبت شناوری k، به‌طور چشمگیری افت می‌کند. برای مثال، ضریب نقایص کروماتیک CC که تأثیر عمده‌ای 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 واکنشی پرتو استفاده نشده، مشاهده شده‌است. این موضوع در شکل (۳) نشان داده شده‌است.

شکل (۳) مثالی از قدرت تفکیک محاسبه شده از تنظیمات واکنشی پرتو در دستگاه SEM با منبع الکترونی ترمیونی (فیلمان تنگستن) است، لنزهای رایج و بایاس نمونه $SB = -4 \text{ kv}$ ، با نمونه بایاس نشده، مقایسه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید، قدرت تفکیک در انرژی‌های فرودی پایین در مورد واکنشی پرتو، بخصوص در انرژی‌های پایین‌تر از ۲ کیلو الکترون ولت به‌طور چشمگیری بهبود یافته‌است.



شکل (۳): قدرت تفکیک محاسبه شده در تنظیمات واکنشی پرتو در یک SEM با منبع الکترون ترمیونی و لنزهای مغناطیسی رایج با و بدون واکنشی پرتو (بایاس نمونه $SB = -4 \text{ kv}$) [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 ۱ کیلوولت با استفاده از واکنشی پرتو، به مقدار ۱/۵ برابر بهبود می‌یابد.



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) واکنش می‌شود. با اینکه پرتو واکنش شده زاویه باز بالاتری دارد اما قطر تیزتر را ایجاد می‌کند [۴].

مزایای پرتو واکنش شده

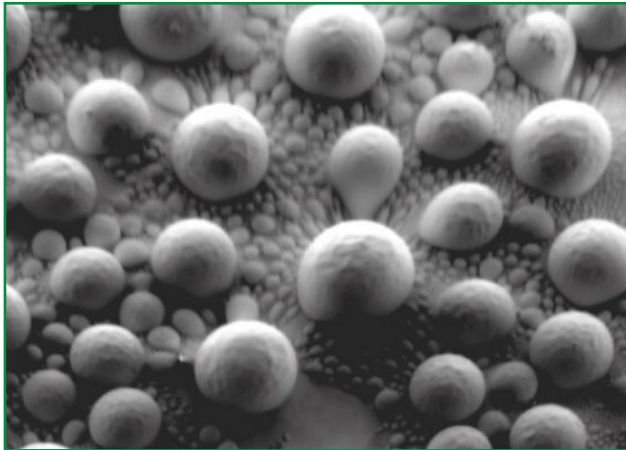
از جمله مزایای تصویربرداری با استفاده از روش واکنشی پرتو می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

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 واکنشی به‌صورت یک لنز همگرایی شناور (لنز کاتدی) عمل کرده و از سرعت الکترون‌ها کاسته می‌شود. در این روش، پرتوی الکترون اولیه در طول واکنشی، بیشتر کانونی می‌شود.

که سطح روبش شده مسطح، صاف، بزرگ و عمود بر محور اپتیکی باشد، به طور کامل کار می کند و در میدان الکتریکی اختلالی ایجاد نمی شود. در غیر اینصورت مشکلات متعددی مانند اعوجاج تصویر و آستیگماتیسم می تواند رخ دهد (شکل (۶)). زمانی که نسبت شناوری بالاتر و لنز کاتدی قوی تر است، محدودیت های نمونه بیشتر اهمیت پیدا می کند. خوشبختانه در بیشتر کاربردهای عملی، توانایی لنز کاتدی محدود نشده است. برای مثال، با مانع کردن مناسب نمونه حتی نمونه های کوچک می توان تصویربرداری موفق انجام داد [۳].



شکل (۶): مثالی از تصویری با اعوجاج زیاد با استفاده از لنز کاتدی با قدرت زیاد در ترکیب با یک نمونه زاویه دار (توپ های ظریف روی کرین). توپک ها به طور نرمال گرد و متقارن هستند اما بعضی از آن ها نقص تصویر را نشان می دهند که به دلیل عدم بهینه تنظیمات تصویر ایجاد شده است [۴].

بهبود آشکارسازی سیگنال الکترون ها با واشتابی پرتو

بررسی محدودیت های تصویربرداری در انرژی های فرودی خیلی پایین:

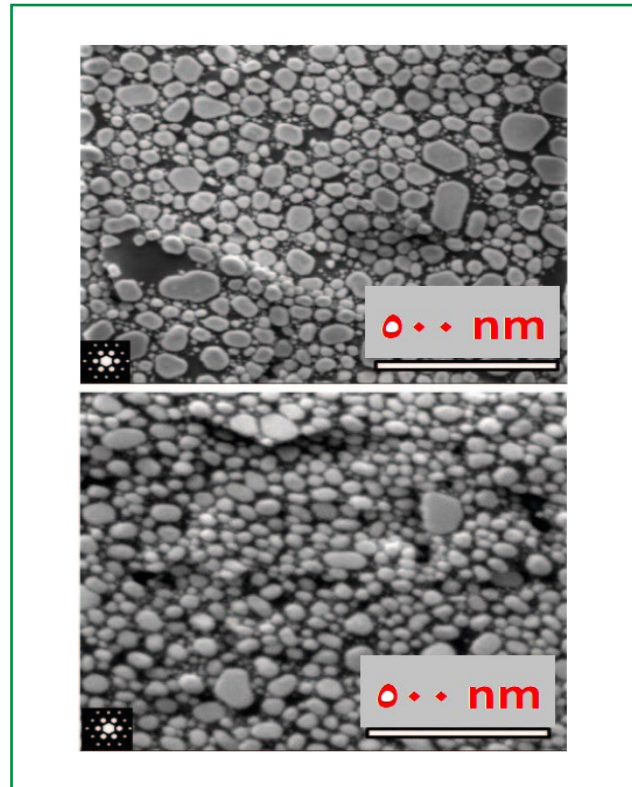
معمولاً دامنه ولتاژ بالا در SEM های رایج از ۲۰۰ ولت شروع می شود. تنظیم تصویربرداری با ولتاژهای تسریع کننده پایین تر، برخی مشکلات فنی زیر را به وجود می آورد:

- پایداری ولتاژ بالا؛
- کالیبراسیون و تنظیم ستون؛
- برهم کنش های کولومب در پرتو و غیره.

همه این عوامل طوری عمل می کنند که قطر پرتو را افزایش داده و قدرت تفکیک را کاهش دهند. واشتابی پرتو نیز روشی به نسبت ساده برای کاهش محدودیت های انرژی فرودی قابل استفاده است در حالی که تمامیت^{۱۷} پرتو را نیز حفظ می کند.

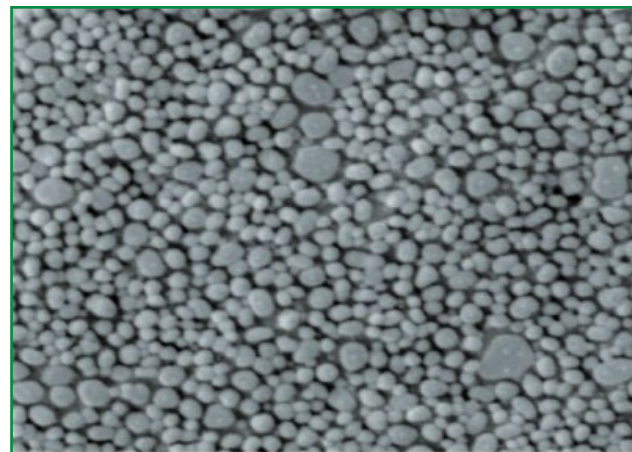
اثر واشتابی بر الکترون های برگشتی (BSE):

در غیاب واشتابی پرتو، الکترون های برگشتی با همان انرژی که هنگام ترک سطح نمونه داشتند، نزدیک به انرژی فرودی الکترون های اولیه به آشکارساز می رسند. ساده ترین و بیشترین



شکل (۴): بهبود قدرت تفکیک تصویر با استفاده از لنز کاتدی در تصویر بالا (واشتابی پرتو). انرژی فرودی $LE = 1 \text{ keV}$ تصویر حاصل بدون استفاده از واشتابی پرتو ($k=1$) در شکل پایین و بایاس پایه نگهدارنده نمونه $[4]. (k=4), SB = -3 \text{ kV}$

قابل ذکر است، با افزایش نسبت شناوری در انرژی های فرودی پایین تر امکان دستیابی به قدرت تفکیک بالاتر ($< 50\%$ درصد) نیز فراهم می شود (شکل (۵)).



شکل (۵): قدرت تفکیک تصویر با لنز کاتد و نسبت بالای شناوری. انرژی فرودی $LE = 100 \text{ eV}$ و بایاس پایه نگهدارنده نمونه $[4]. (K = 41), SB = -4 \text{ kV}$

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 ویژگی های سطح نمونه از جمله محدودیت های آن است: با واشتابی پرتو، سطح نمونه بخشی از سیستم الکترو اپتیکی می شود. این سیستم در صورتی

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

پایه‌سازی 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 کاملاً 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 شرایط ایده‌آل 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 تیرانس^{۱۹} بالاتری برای شارژ قسمتی از ستون و کیفیت درجه^{۲۰} دارد.

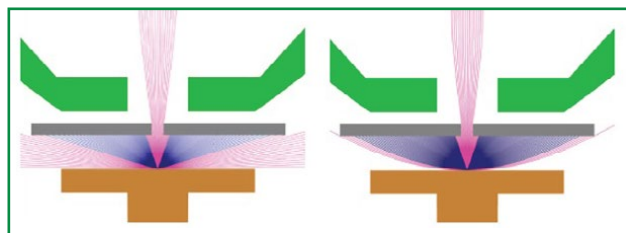
امکان تصویربرداری‌های غیرممکن با به

کارگیری روش واشتابی پرتو

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

استفاده از روش آشکارسازی الکترون برگشتی در بیشتر دستگاه‌های 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، الکترون‌های 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.

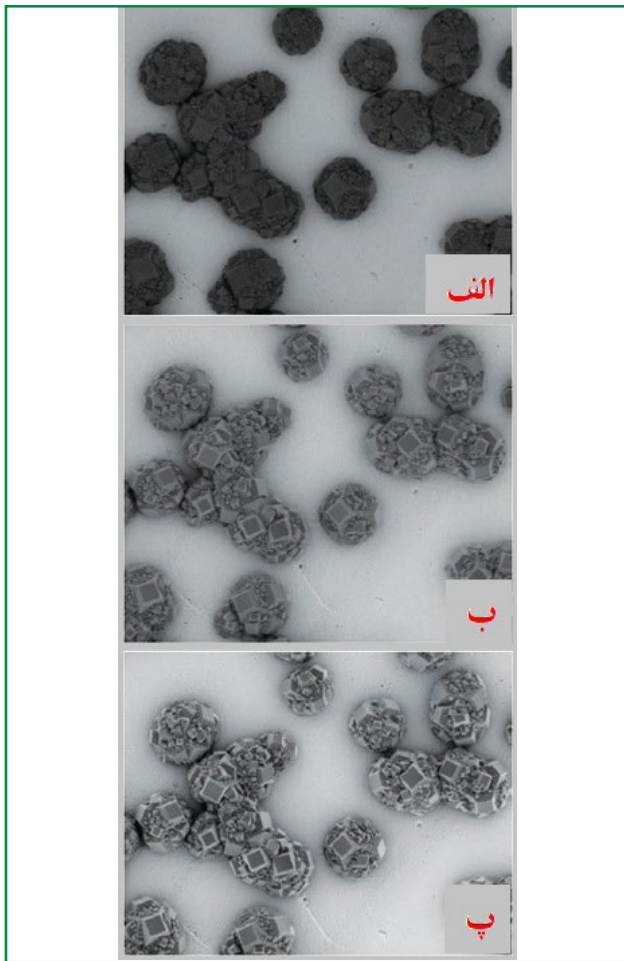


شکل (۷): مسیرهای تشخیص داده شده (رنگ آبی) و تشخیص داده نشده (رنگ ارغوانی) الکترون‌های برگشتی بدون (چپ) و با (راست) واشتابی پرتو. جمع‌آوری پرتو با آشکارساز الکترون برگشتی (رنگ طوسی) با واشتابی پرتو بهتر انجام شده است [۴].

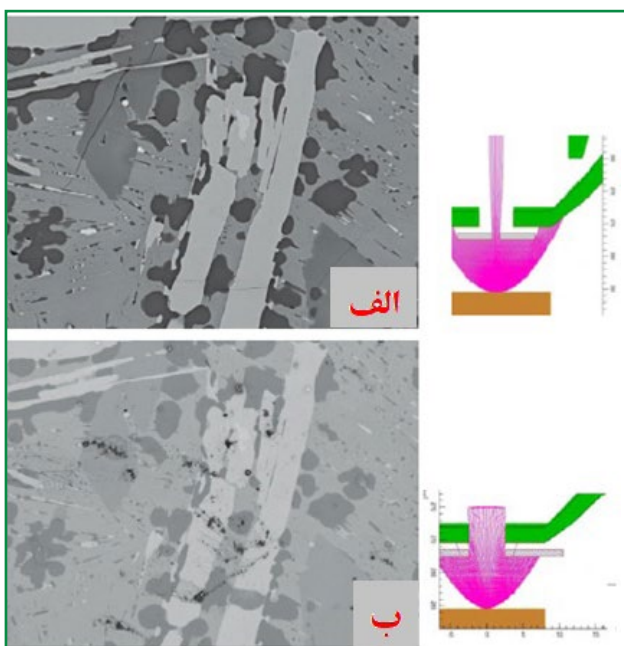
همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌کنید (شکل سمت چپ) بدون اثر واشتابی پرتو هیچ بایاس نمونه‌ای به کار نرفته است و مسیرهای BSE مستقیم هستند. توزیع زاویه‌ای الکترون برگشتی به‌صورت هندسی مشخص شده است و با واشتابی پرتو به‌عنوان نتیجه فوکوس لنز کاتدی، بیشتر الکترون‌های برگشتی با توزیع زاویه‌ای پهن‌تر جمع‌آوری شده‌اند (شکل سمت راست). علاوه بر 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 پایین‌تر 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 الکترون‌ولت) نشر می‌کنند و به‌طور معمول توسط یک آشکارساز جرقه‌زن در محفظه نمونه جمع‌آوری می‌شود (بدون سیستم لنز شناور). به علت

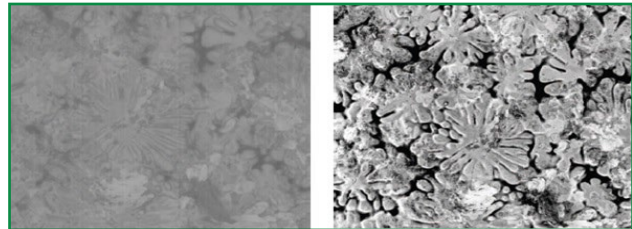


شکل (۹): تصاویر میکرو بلور ذرات الماس قرار گرفته روی بستر سیلیکونی است که با استفاده از آشکارساز الکترون برگشتی جمع آوری شده است. انرژی فرودی $LE = 3 \text{ keV}$ با نسبت‌های شناوری متنوع است. (الف) $k = 1$ ، (ب) $k = 1/33$ ، (پ) $k = 2$ [۴].



شکل (۱۰): سرباره‌ی کوره بلند مشاهده شده با استفاده از آشکارساز الکترون برگشتی در (الف) انرژی پرتو اولیه $PE = 10 \text{ keV}$ و (ب) با واشتابی پرتو در انرژی فرودی $LE = 1 \text{ keV}$ [۶-۳].

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 مسیره‌های BSE، شناسایی شده که نمایی از آن در شکل (۷) نشان داده شده است.



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 $k = 3$ [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 مسیره‌های 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 شده است. در این شکل، یک سری از تصاویر با کنتراست متفاوت از ترکیب تا توپوگرافی (شکل (۹-پ)) با افزایش نسبت شناوری نشان داده شده است.

تصویربرداری از جزئیات سطح

برای مشاهده مشخصه‌های 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 $BSE, keV = 10$ (انرژی الکترون‌های اولیه) بدون واشتابی پرتو و با واشتابی پرتو در انرژی فرودی ۱ کیلو الکترون‌ولت مشاهده شده است. 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 می‌ماند در حالی که جزئیات اضافی سطح نیز قابل مشاهده هستند (شکل (۱۰-ب)).

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. علاوه بر 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.

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.

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