

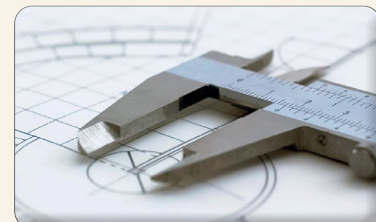
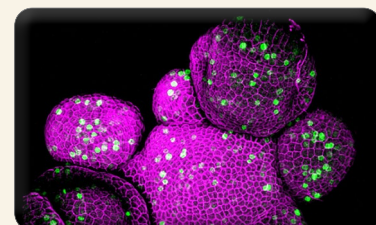
# دانش آزمایشگاهی ایران

سال یازدهم ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۲ ■ شماره پیاپی ۴۲

ISSN 2538-3450

کاربرد میکروسکوپ  
الکترونی عبوری در زمینه  
توسعه، تحلیل و تشخیص  
نقایص دستگاهها و  
قطعات صنعت نیمه‌هادی

توسعه شبکه‌سازی آزمایشگاهها

تعیین خلوص مواد با استفاده از دستگاه  
گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC)تعیین و ارزیابی منابع عدم قطعیت در  
آزمون ضربه شارپیانواع نشانگرها در میکروسکوپ روبشی  
لیزری هم‌کانون (بخش دوم)

عدم قطعیت در فرآیند نمونه‌برداری

اعتباربخشی به نتایج در آزمایشگاه تشخیص  
و آنالیز مواد مخدر؛ شناسایی کانابینوئیدها  
به روش کروماتوگرافی لایه نازک

## نویسنده

ساناز شبیکه<sup>۱\*</sup>

۱. لیسانس الکترونیک، کارشناس آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری دانشگاه شیراز  
 ۲. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ الکترونی عبوری

\*researchers4u@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

## واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ الکترونی عبوری، نیمه‌هادی، تحلیل عنصری، آماده‌سازی نمونه.

# کاربرد میکروسکوپ الکترونی عبوری در زمینه توسعه، تحلیل و تشخیص نقایص دستگاه‌ها و قطعات صنعت نیمه‌هادی

## چکیده

در سال‌های اخیر، صنعت نیمه‌هادی به‌طور چشمگیری فناوری‌های جدیدی را معرفی نموده و به سرعت در حال کاهش اندازه تولیدات خود است که در نتیجه این امر، کارکرد دستگاه‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافته‌اند. در این بین، میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۱</sup> نقش بسیار مهمی در فرآیند توسعه، کنترل تولید و تحلیل نقایص قطعات نیمه‌هادی داشته است. از طرف دیگر، پیشرفت‌های دست یافته در زمینه چگونگی مشاهده نمونه‌های نیمه‌هادی درون TEM موجب شده که دیگر از آن به‌عنوان دستگاهی مختص عملیات تحقیقاتی در مؤسسات علمی و دانشگاه‌ها یاد نشود و به‌عنوان منبعی قابل اطمینان به‌منظور فرآیندهای ارزیابی و تحلیل نقایص نیمه‌هادی‌ها در نظر گرفته شود. روش‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری علاوه بر قدرت تفکیک‌پذیری مکانی برتر، قابلیت‌های تحلیل عنصری بسیار حساس را نیز برای به کارگیری در فرآیند سنج‌شناسی و مشخصه‌یابی مواد دستگاه‌ها/قطعاتی با اندازه زیر نانومتر مورد استفاده در فناوری‌های نیمه‌هادی پیشرفته ارائه می‌نماید. کاربرد TEM برای مواردی نظیر ارزیابی جزئیات سطحی، ابعاد ساختارهای دستگاه/قطعه و نقایص و عیوب به وقوع پیوسته در طول فرآیند تولید بسیار مؤثر است. در این مقاله، کاربردهای TEM در زمینه مشخصه‌یابی فیزیکی، تحلیل ترکیبی و تحلیل نقایص ساختارهای قطعات نیمه‌هادی بررسی می‌شود. همچنین در این مقاله، علاوه بر شرح تفصیلی روش‌های مختلف آماده‌سازی نمونه‌های متنوع نیمه‌هادی، مزایا و معایب (به‌عنوان مثال: آسیب و صدمه القاء شده با پرتو یونی متمرکز و آرایش گالیم<sup>۲</sup>) آنها و روش‌های کنترل هر یک شرح داده شده‌اند و چالش‌های به وجود آمده به دلیل افزودن ساختارهای جایگزین گیت<sup>۳</sup>، ویژگی‌های اندازه نانو، دی الکتریک‌های<sup>۴</sup> گیت<sup>۵</sup> K-بالا و نیازمندی‌های مواد جدید در زمینه یکپارچگی ساختارهای قطعات نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

شرکت‌های پیشرو در زمینه تولید نیمه‌هادی به سرعت در حال تغییر خط تولید خود برای ارائه محصولاتی با مقیاس زیر یک چهارم میکرون هستند. قطعات با اندازه  $0.18 \mu\text{m}$  در حال تولید بوده و فناوری تولید قطعات با اندازه  $0.13 \mu\text{m}$  نیز در راه است. از آنجایی که اندازه ترانزیستور به چنین ابعاد کوچکی تقلیل یافته، لذا تمام ویژگی‌ها نظیر عرض گیت پلی سیلیکون<sup>۶</sup> و ضخامت اکسید گیت<sup>۷</sup> نیز باید در مقیاس اتمی تنظیم شوند. در این بین، دستیابی به اتصال قابل اطمینان بین ده‌ها میلیون ترانزیستور با اتصالات میانی چند لایه‌ای (که بیش از ۸۰ درصد از مراحل فرآیند تولید قطعات نیمه‌هادی را پوشش داده) به چالشی عظیم برای مهندسان فرآیند تبدیل شده‌است. به‌منظور دستیابی به چنین اتصالات میانی، بسیاری از روش‌های پردازش پیشرفته باید به‌صورت صحیح پیاده‌سازی و برای توزیع اندازه دقیقی از مواد مورد نظر در موقعیت‌های ایده‌آل نیز شرایط پردازش باید بدون کوچکترین خطایی کنترل شود. هم‌اکنون تغییر جنس اتصالات میانی از آلومینیوم به مس نیازمند پیاده‌سازی فرآیندهای بی‌شماری نظیر سد تانتالم<sup>۸</sup>، دانه مس، پردازش ساختارهای دمشقی دوگانه و آبکاری الکترولیتی است. تاکنون تولید نیمه‌هادی تا این حد به انجام مشخصه‌یابی دقیق در هر مرحله از فرآیند کلی وابسته و همچنین عملکرد قطعات نیمه‌هادی نیز هرگز تا این اندازه به کیفیت فیلم/غشاء، ساختار رابط/واسط، ناخالصی‌ها و آرایش حساس نبوده است. به‌طور واضح انتظار می‌رود که میکروسکوپ الکترونی عبوری به دلیل ارائه قدرت تفکیک‌پذیری مکانی و قابلیت تحلیلی بسیار بالا، نقش مهم و مؤثری در زمینه تولید و توسعه قطعات نیمه‌هادی با اندازه زیر یک چهارم میکرون بر عهده داشته باشد. با وجودی که TEM در مقابل دیگر روش‌های تحلیلی، مزایای بسیار زیادی را ارائه نموده، اما پیش از اینکه صنعت نیمه‌هادی آن را به‌عنوان ابزاری جدایی‌ناپذیر و ضروری در این حوزه به کار گیرد، این میکروسکوپ باید سه نیازمندی مورد نظر صنعت مذکور را برطرف نماید. نیازمندی نخست، قابلیت بررسی تعداد زیادی از ویژگی‌ها با استفاده از TEM است. با توجه به این امر که امکان دارد یک قطعه نیمه‌هادی مدرن مرسوم شامل چند میلیون ترانزیستور باشد، بنابراین، بررسی تنها چند ویژگی محدود کافی نیست و در برخی مواقع، گمراه کننده است؛ در نتیجه، نمی‌توان ادعا نمود که این چند ویژگی، نماینده شرایط پردازش کل قطعه هستند. بنابراین، باید شرایط به‌گونه‌ای فراهم شود که نمونه نیمه‌هادی برای بررسی در TEM به‌صورت لایه‌ای نازک با وسعت زیاد تهیه شود. نیازمندی دوم، دسترس‌پذیر بودن قابلیت انتخاب ویژگی خاص برای انجام فرآیند تحلیل نقایص به‌طور اختصاصی در TEM است. این امکان وجود دارد که نقص در یکی از چند میلیون ویژگی همچون اتصال، حفره اتصال یا گیت پلی سیلیکون قطعه نیمه‌هادی پدیدار شود. در این صورت، نمونه TEM باید به‌طور دقیق با توجه به همان ویژگی تهیه شود تا اطلاعات مفیدی ارائه دهد. نیازمندی سوم، دسترسی به زمان بازگشت/گردش سریع در TEM است. هر قدر هم تصویر TEM بی‌نظیر باشد، اما تا زمانی که سرعت این دستگاه، هم‌تای سرعت پیشرفت صنعت نیمه‌هادی نباشد، قابلیت‌های TEM به خوبی در این حوزه مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. سرعت این صنعت چند میلیارد دلاری را نمی‌توان برای هیچ دستگاهی کندتر یا متوقف نمود. یکی از مهمترین نیازمندی‌ها در این صنعت که TEM باید آن را برآورده سازد، دسترسی به زمان بازگشت/گردش سریع است. بیشتر مشکلات اصلی مرتبط با کاربرد TEM، به مرحله آماده‌سازی نمونه آن مربوط می‌شود. با وجود اینکه دستگاه‌ها و روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی کیفیت و کارایی مرحله آماده‌سازی نمونه TEM ارائه شده‌اند، اما این مرحله هنوز به‌عنوان چالش برانگیزترین بخش تحلیل TEM برای صنعت نیمه‌هادی محسوب می‌شود [۱].

تحلیل اضافی به‌منظور حمایت از فرآیندهای تولید محصولات با فناوری نسل بعدی است. ویژگی‌های قطعات با اندازه کوچک به فرآیندهای اندازه‌گیری و تحلیل نیازمند بوده که محدودیت قدرت تفکیک‌پذیری میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱۰</sup> از ارائه آنها معذور است. TEM ابزاری قدرتمند برای تحلیل ریزساختار در قدرت تفکیک‌پذیری مکانی بالا است، اما کاربرد آن در صنعت نیمه‌هادی به دلیل چالش‌های موجود، مربوط به آماده‌سازی منطقه معینی از نمونه برای مدتی محدود شده بود. نقش TEM در صنعت نیمه‌هادی با ظهور ابزار آماده‌سازی منطقه معینی از نمونه با نام دستگاه پرتو یونی متمرکز<sup>۱۱</sup> به‌طور مطلوبی تغییر

کوچک شدن مداوم مقیاس ساختارهای ترانزیستور اثر میدان نیمه‌هادی اکسید فلز<sup>۹</sup> نیز به‌عنوان چالشی جدی برای تعیین دقیق لایه‌های فوق نازک، زبری سطحی و توزیع شیمیایی کنترل کننده مشخصات الکتریکی نظیر قابلیت اطمینان و جریان نشتی محسوب می‌شود. ویژگی‌های با اندازه نانومتری و همچنین معرفی مواد جدید از جمله دی الکتریک‌های گیت با ضریب K بالا، گیت‌های فلزی، مهندسی باندا/نوار، سیلیسید-نیکل و دی الکتریک‌های جداسازی با ضریب K پایین مشوق اصلی تلاش برای بهینه‌سازی کارایی روش‌های سنج‌شناسی موجود و همچنین کشف و پیاده‌سازی روش‌های

نیمه‌هادی، در سال‌های اخیر، تقاضا برای به‌کارگیری TEM در حوزه تحلیل نقایص قطعات نیمه‌هادی نیز به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. مهمترین مرحله در فرآیند تحلیل نقایص، مشخصه‌یابی فیزیکی و شیمیایی عیب و نقص مورد نظر است. علت ریشه‌ای نقص مورد نظر از طریق بررسی و بازرسی فیزیکی مکان نقص تعیین شده با تحلیل الکتربیکی شناسایی می‌شود. مشخصه‌یابی شیمیایی و بازرسی فیزیکی را می‌توان با SEM انجام داد. در SEM یک پرتو الکترونی در طول سطح تراشه پویش/پیمایش داده می‌شود و تصویر نهایی نیز از طریق ثبت الکترون‌های (ثانویه یا برگشتی) منعکس شده، شکل می‌گیرد. تغییرات کنتراست مشاهده شده در تصویر ذکر شده، به‌طور معمول مربوط به تغییرات/نوسانات به وقوع پیوسته در مکان‌نگاری سطح یا تفاوت در وزن اتمی عناصر مستقر روی سطح پویش شده است. در بیشتر موارد، اطلاعات مفیدی در رابطه با نقصی که هیچ‌گونه تغییری در مکان‌نگاری سطح ایجاد نکرده (به‌عنوان مثال، نقص بلور نظیر نابجایی‌ها) یا نقصی که زیر سطح مربوطه رخ دهد، به‌دست نخواهد آمد. در بیشتر موارد، هنگام استفاده از SEM می‌توان با اعمال فرآیند زدایش تزئینی بسیار حساس، مکان‌نگاری نقص را برای انجام عملیات تشخیص تغییر داد. زدایش تزئینی، فرآیندی مخرب بوده که مانع از انجام تحلیل شیمیایی بیشتر می‌شود. حتی پس از اعمال فرآیند زدایش تزئینی نیز SEM قادر به بررسی بیشتر ویژگی‌ها و لایه‌های سطحی (با ابعادی در حدود چند نانومتر) شکل گرفته با فناوری‌های پیشرفته نیست. چنین نقایص و لایه‌های سطحی که بررسی آنها از محدوده SEM خارج بوده را می‌توان به‌منظور تشخیص علت ریشه‌ای وقوع عیب مورد نظر با استفاده از TEM مشخصه‌یابی نمود. در این مقاله، روش‌های مبتنی بر TEM و رویه‌های آماده‌سازی نمونه که در صنعت نیمه‌هادی کاربرد داشته است، بررسی شده‌اند [۲].

### پیش زمینه‌ای درباره روش‌های مختلف تصویربرداری TEM و کاربرد آنها برای نیمه‌هادی‌های متفاوت

در TEM، تصویر نهایی با عبور دادن پرتو الکترونی با انرژی بالا (۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV) از برشی نازک از نمونه مورد نظر به‌دست می‌آید. هم‌زمان با عبور کردن پرتو الکترونی از برش نازک مورد نظر، برهم‌کنش‌های متغیری میان نمونه و پرتو ایجاد شده که منجر به تولید الکترون‌های عبوری، الکترون‌های پراکنده الاستیک و غیر الاستیک، فوتون‌های اشعه X و الکترون‌های اوژه می‌شود. از بیشتر الکترون‌های عبور کرده و به‌صورت الاستیک پراکنده شده و از مقداری از الکترون‌های پراکنده شده به‌صورت غیر الاستیک، برای تشکیل تصویر نهایی استفاده می‌شود. فوتون‌های اشعه X و برخی از الکترون‌های پراکنده شده به‌صورت غیر الاستیک، مختص تشخیص ترکیب شیمیایی حجم پراکندگی هستند. در صورت به‌کارگیری طیف‌سنجی پراکندگی انرژی<sup>۲۱</sup> و طیف‌سنجی افت انرژی الکترون<sup>۲۲</sup> از این فوتون‌های اشعه X

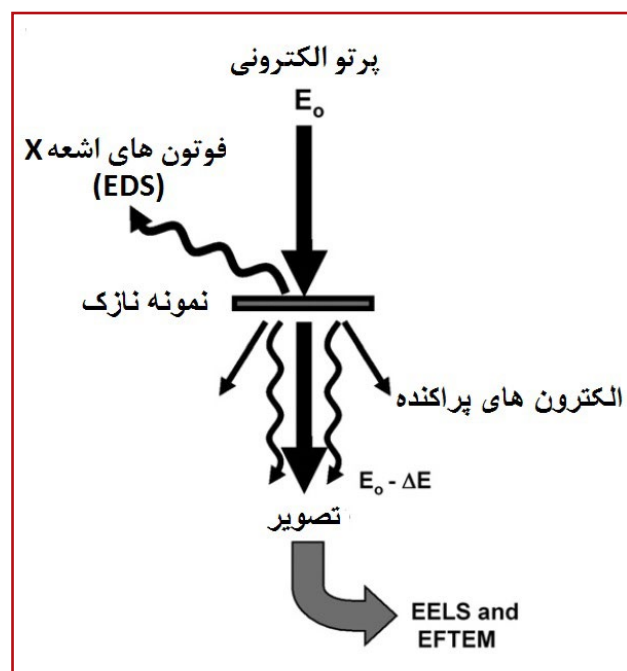
کرد. دسترس‌پذیر بودن ابزارهای پیشرفته در برگیرنده دو ستون با یون‌عاری از رانش و قدرت تفکیک‌پذیری بالا و ستون‌های پرتو الکترونی قابلیت تصویربرداری هم‌زمان از برش مورد نظر درون حالت پرتو الکترونی و انجام عملیات برش‌برداری درون حالت پرتو-یون را فراهم می‌آورد. در نتیجه، هم‌اکنون از TEM به‌منظور تحلیل مدارهای مجتمع<sup>۱۲</sup> برای توسعه قدرت پردازش، ارتقاء بهره‌وری/کارایی و تحلیل نقایص استفاده می‌شود. در TEM پرتو الکترونی انرژی بالا (بین ۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV)، از بالای ستون بر برش نازک نمونه تابیده شده و پس از عبور از آن، تصویر نهایی شکل می‌گیرد. تصویر TEM برخلاف SEM شامل اطلاعات سه بعدی از برش نازک نمونه مورد نظر است. متغیر بودن کنتراست در طول تصویر، به دلیل برهم‌کنش‌های پیچیده میان پرتو-نمونه بوده که مختص دستگاه TEM است. کنتراست به تغییرات کوچک در ویژگی‌های شیمیایی، ساختاری و مکان‌نگاری/توپوگرافی نمونه ذکر شده نیز حساس است. از این مشخصه به‌طور مداوم برای نمایش و تحلیل اثرات نامحسوس لایه‌های سطحی و نقایص بلور استفاده می‌شود. در ضمن، قدرت و توان تفکیک ارائه شده با TEM به دلیل طول موج کوچکتر (۰/۰۲۵ ~ ۲۰۰ keV) پرتو الکترونی با انرژی بالا نسبت به SEM به‌طور ذاتی مطلوب‌تر است. لایه‌های نازک از دی اکسید سیلیکون<sup>۱۳</sup> به‌طور گسترده به‌عنوان ماده دی‌الکتریک گیت به‌منظور عایق کردن الکتروود گیت از کانال سورس/درین درون ترانزیستورهای اثر میدانی اکسید فلز نیمه‌هادی<sup>۱۴</sup> استفاده می‌شود. امروزه ضخامت این ماده دی‌الکتریک گیت (SiO<sub>2</sub>) یا اگزینیتید سیلیکون<sup>۱۵</sup> دارای ابعادی در حدود ۱/۵ الی ۲ nm است. اندازه‌گیری دقیق ضخامت اکسید گیت از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، زیرا حتی وقوع کاهش ۰/۱ nm ضخامت اکسید، منجر به افزایش چشمگیر مرتبه بزرگی جریان نشتی می‌شود. عایق‌های به نسبت ضخیم‌تر با ثابت‌های دی‌الکتریک بالا (K بالا) در حال گذراندن مرحله آزمایشی بوده تا پس از دستیابی به ظرفیت خازنی بالای گیت و جلوگیری از وقوع فرآیند تونل‌زنی جایگزین SiO<sub>2</sub> در ترانزیستورهای MOSFET شوند. TEM با قدرت تفکیک‌پذیری بالا<sup>۱۶</sup> روشی بسیار مطلوب برای اندازه‌گیری دقیق لایه‌های نازک محسوب می‌شود، زیرا حاشیه‌های شبکه توری موجود در زیرلایه (Si)، استاندارد لازم برای عملیات کالیبراسیون را فراهم می‌آورد. کاربرد سیلیکون (Si) کرنشی برای قطعات MOSFET مرسوم را می‌توان با فناوری اصلی پردازش<sup>۱۷</sup> موجود مقایسه نمود، اما نظارت بر کیفیت ویفر<sup>۱۸</sup> و نیازمندی‌های دقیق برای ریخت‌شناسی فیلم/لایه و کرنش یکنواخت، همگی نیازهای جدیدی را در زمینه مشخصه‌یابی مواد تحمیل می‌کنند. کرنش را می‌توان با به‌کارگیری روش پراش الکترون پرتو همگرا<sup>۱۹</sup> یا اندازه‌گیری تغییرات/جابجایی‌های کوچک در موقعیت قله‌های ماکسیمم/بیشینه تابع تبدیل فوریه سریع<sup>۲۰</sup> دو بعدی به‌دست آمده از تصویر HRTEM تعیین نمود. علاوه بر کاربرد ضروری TEM در زمینه برآورده ساختن نیازمندی‌های مشخصه‌یابی

دراپوارانه‌های خارجی برای حرکت دادن روزنه ذکر شده، به‌منظور عبور کردن الکترون‌های مستقیم یا برخی از الکترون‌های پراکنده، از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورت انتخاب الکترون‌های مستقیم، تصویر ثبت شده نهایی با عنوان تصویر میدان روشن و در صورت گزینش پرتو پراکنده، آنگاه تصویر نهایی با نام تصویر میدان تاریک شناخته می‌شود. بیشتر قطعات نیمه‌هادی روی ویفر سیلیکونی تک بلوری دربرگیرنده ویفر عادی موازی با جهت [۰۰۱] ساخته شده‌اند. در چنین ویفری، جهت [۱۱۰] موازی با سطح صاف یا فرورفتگی ویفر مربوطه روی صفحه (۱۱۱) (صفحه تورق) و جهت عمود [۰۰۱] (عمود بر سطح ویفر) مستقر است. با ثبت تصویر سطح مقطع از طریق به کارگیری پرتو الکترونی دارای جهت‌گیری موازی با جهت [۱۱۰] زیرلایه سیلیکون از عمود بودن ویژگی‌های قطعه مورد نظر اطمینان حاصل شده و همچنین از وقوع پدیده همپوشانی ویژگی‌های مختلف قطعات درون تصویر به‌دست آمده از نمونه نازک، جلوگیری به عمل می‌آید. به همین دلیل است که بیشتر تصاویر سطح مقطعی مربوط به قطعات سیلیکونی در امتداد جهت [۱۱۰] تهیه می‌شوند. به‌طور اصولی، کنتراست در تصویر TEM با سه سازوکار متفاوت به نام‌های کنتراست پراش، کنتراست ضخامت-جرم و کنتراست فاز، شکل می‌گیرد. یک تحلیل‌گر مجرب TEM برای تهیه تصویری واضح از جزئی‌ترین اثرات نقص به وقوع پیوسته، قادر است سهم هر یک از این سازوکارهای کنتراست را بهینه‌سازی نماید. سازوکارهای کنتراست ذکر شده در قسمت ذیل شرح داده می‌شوند.

### ● کنتراست پراش

کنتراست پراش در عمل، از طریق رهگیری الگوی پراش با استفاده از روزنه شیئی در صفحه کانونی پشتی عدسی شیئی مورد استفاده (که تنها به پرتو عبوری اجازه شکل‌دهی تصویر را داده) به‌دست می‌آید. این تصویر، نوسان‌هایی را در شدت پرتو الکترونی گزینشی/منتخب هم‌زمان با عبور آن از نمونه مربوطه نمایش می‌دهد. کنتراست پراش به شدت نسبت به جهت‌گیری بلورشناسی/بلورنگاری و نوسان‌های ضخامت درون نمونه مورد نظر حساس است. در مواد بلوری، پراش حاصل شده از مناطق حول نقص بلور نسبت به پراش مناطق بی‌عیب و نقص متفاوت است. دلیل این امر، وجود کرنش‌های الاستیکی حول نقایص بوده که منجر به وقوع نوسانات کنتراست در تصویر نهایی می‌شود. نابجایی‌ها، نقایص چیدمان و دیگر نقص‌های بلور باعث خمیدگی صفحات بلور شده و با کمک کنتراست پراش به‌صورت واضح درون تصویر نهایی نمایش داده می‌شوند. کنتراست پراش درون مواد چند بلوری نظیر: پلی سیلیکون یا نیتريد تیتانیوم<sup>۲۴</sup> به دلیل نوسانات به وقوع پیوسته در جهت‌گیری دانه‌های مجاور و نزدیک به یکدیگر در اثر تابش پرتو الکترونی افزایش می‌یابد. به‌کارگیری کنتراست پراش

و الکترون‌های پراکنده شده به‌صورت غیرالاستیک می‌تواند برای تحلیل عنصری استفاده کرد. نمایی از موقعیت فیزیکی صفحه تصویربرداری، EDS و EELS درون میکروسکوپ الکترونی عبوری در شکل (۱) نمایش داده شده‌است. در یک نمونه با ساختار بلوری در معرض روشنایی پرتو الکترونی موازی، پرتو الکترونی پراکنده شده به‌صورت الاستیک به یک پرتو عبوری و چند پرتو پراشیده تقسیم می‌شود. تصویر این نوع پرتوها را می‌توان به آسانی با انتخاب حالت پراش درون TEM ثبت نمود که به‌عنوان الگوی پراش، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پراش الکترونی ناحیه گزینشی<sup>۲۳</sup> با انتخاب ناحیه‌ای از نمونه با استفاده از روزنه ناحیه منتخب حاصل می‌شود. اگر پرتوی همگرا جایگزین پرتوی موازی حاوی الکترون‌های فرودی شود، آنگاه نقاط پراش، بزرگ شده و به‌صورت قرص/دیسک‌های پراش الکترون پرتو همگرا (CBED) ظاهر می‌شوند. الگوی پراش نقطه‌ای و الگوی پراش حلقه‌ای به ترتیب از مواد تک بلوری و مواد چند بلوری به‌دست می‌آیند. هر نقطه یا حلقه، نماینده مجموعه‌ای از صفحات بلورشناسی درون نمونه است. فاصله‌گذاری هر یک از نقاط یا حلقه‌ها از نقطه مرکزی (۰۰۰)، رابطه‌ای معکوس با فاصله‌گذاری «d» یا بین صفحه‌ای بلورشناسی متناظر با نقطه یا حلقه مورد نظر دارد. الگوهای نقطه‌ای و حلقه‌ای به‌طور مداوم برای تعیین ساختار بلوری فازهای مختلف در نمونه، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این شرایط، تصویر TEM را می‌توان با استفاده از پرتو عبوری (نقطه مرکزی) یا پرتو پراکنده ثبت نمود. روزنه‌ای به درون صفحه کانونی پشتی عدسی شیئی وارد شد که در نتیجه آن، بیشتر الگوی پراش به غیر از مقداری که از طریق روزنه مذکور قابل رؤیت است، مسدود می‌شود.



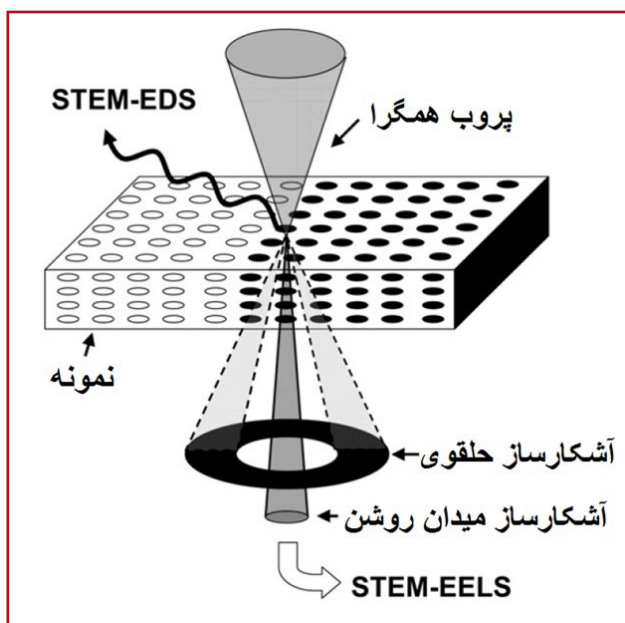
شکل (۱): نمایی از راهنمای موقعیت فیزیکی صفحه تصویربرداری، EDS و EELS درون میکروسکوپ الکترونی عبوری [۲].

امر از طریق مقایسه الگوی پراش مورد نظر با الگوی پراش عناصر شناخته شده و همچنین اندازه‌گیری فاصله‌گذاری بین صفحه‌ای انجام می‌شود.

### ● میکروسکوپ الکترونی عبوری-رویشی

میکروسکوپ الکترونی عبوری-رویشی<sup>۲۶</sup> گونه‌ای بسیار کارآمد از روش‌های تصویربرداری مرسوم TEM بوده که به شرح آن خواهیم پرداخت. در STEM، پرتو الکترونی روی نقطه کوچکی از نمونه متمرکز می‌شود. سپس با استفاده از پرتو ناحیه‌ای، از نمونه پویش می‌شود. آشکارساز مستقر زیر نمونه، الکترون‌های عبوری را جمع‌آوری می‌کند. سپس تصویر نهایی روی صفحه‌ای از جنس لامپ اشعه کاتدی<sup>۲۷</sup> نمایش داده می‌شود. بزرگنمایی، با در نظر گرفتن نسبت اندازه ناحیه پویش شده به اندازه صفحه CRT محاسبه می‌شود. مزایای STEM نسبت به TEM مرسوم عبارتند از: تفسیر آسان‌تر و دستیابی به قابلیت به کارگیری نمونه‌های ضخیم‌تر.

مزایای STEM در مقایسه با TEM مرسوم در حوزه تحلیل نقایص نیمه‌هادی نیز عبارتند از: تفسیر آسان‌تر و دستیابی به قابلیت به کارگیری نمونه‌های ضخیم‌تر به دلیل حساسیت کمتر نسبت به ابیراهی‌های فامی/رنگی. در شکل (۲) نمایی از اجرای عملیات STEM درون یک TEM نمایش داده شده‌است.



شکل (۲): نمایی از اجرای عملیات حالت STEM درون یک TEM. الکترون‌های پراکنده شده در زوایای بالا، با آشکارساز حلقوی جمع‌آوری شده تا یک تصویر در بزرگنمایی Z تهیه شود. فوتون‌های اشعه X نیز به‌منظور تهیه نقشه عنصری STEM-EDS جمع‌آوری می‌شوند. آشکارساز میدان روشن برای انجام عملیات نگاشت STEM-EELS از مسیر پرتو عبوری خارج می‌شود [۲].

تصویر نهایی در اصل، یا از طریق جمع‌آوری الکترون‌های عبوری (روش مشهور به تصویربرداری STEM میدان روشن<sup>۲۸</sup>) و یا با جمع‌آوری الکترون‌های پراکنده با استفاده از آشکارساز حلقوی (روش مشهور به تصویربرداری میدان تاریک حلقوی<sup>۲۹</sup>)

در زمینه تحلیل نقایص نیمه‌هادی برای مواردی مانند تعیین ریزساختار مؤلفه‌های مختلف قطعه مورد نظر همچون رگه‌ها و لایه‌های پلی سیلیکون، یا شناسایی ویژگی‌های سطحی که به احتمال زیاد منجر به وقوع اتصال کوتاه یا باز شده بسیار مؤثر است. یکی دیگر از ویژگی‌های کارآمد اپتیک/فیزیک نور TEM، ترکیب پراش با فرآیند تصویربرداری از طریق به کارگیری روش پراش الکترونی ناحیه گزینشی است. قابلیت ذکر شده، به دلیل امکان تغییر دادن ساده و سریع طول کانونی عدسی‌های الکترومغناطیسی دسترس‌پذیر است. روش پراش الکترونی ناحیه گزینشی به‌منظور حصول اطمینان از همخوانی داشتن کنتراست تصویر با شرایط پراش (به‌خصوص برای نمونه‌های بلوری) کاربرد مهمی دارد.

### ● کنتراست ضخامت-جرم

الکترون‌ها با توجه به وجود میزان ضخامت متفاوت در کل نمونه، پراکنده، پراشیده و جذب می‌شوند؛ این امر، موجب نوسان در کنتراست شده که این پدیده با عنوان کنتراست ضخامت شناخته می‌شود. در شرایط کنتراست جرمی، نوسان شدت، در اصل، نقشه‌ای از قدرت پراکندگی عنصرهای موجود در نمونه مورد نظر را ارائه می‌کند. با کنتراست جرمی در میکروسکوپ الکترونی، تهیه تصاویری با حساسیت ترکیبی و قدرت تفکیک‌پذیری اتمی امکان‌پذیر است. عناصر سبک‌تر و سنگین‌تر به ترتیب الکترون‌های کمتر و بیشتری را جذب می‌کنند. کنتراست جرمی از ساختار بلوری قطعه مستقل است؛ به همین دلیل، برای بررسی چند لایه‌های نازک آمورف<sup>۲۵</sup> نظیر اکسید سیلیکون، نیتريد سیلیکون و اکسی نیتريد سیلیکون کاملاً مطلوب است.

### ● کنتراست فاز

کنتراست فاز برای تهیه تصاویر TEM با قدرت تفکیک‌پذیری بالا با هدف اندازه‌گیری دقیق ابعاد مهم و بحرانی قطعه مربوطه نظیر ضخامت اکسید گیت بسیار نازک مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصاویر شبکه توری با قدرت تفکیک‌پذیری بالا در نتیجه تداخل پرتوهای پراشیده و عبوری شکل می‌گیرند. اگر یک یا چند پرتو پراشیده قوی غیر هم خط با پرتو عبوری به‌منظور شکل‌گیری تصویر نهایی به‌صورت متقارن درون روزنه شیئی (شکل (۹)) قرار گیرند، آنگاه دو یا چند مجموعه از لبه/حاشیه‌های موازی قابل مشاهده خواهد بود. چنین تصویری در واقع ارائه دهنده تصویر متناوب دو بعدی متناظر با فاصله‌گذاری بین صفحه‌ای مربوط به پرتوهای پراشیده مورد نظر بوده که در برخی موارد به تصویر ساختاری بلور بسیار نازک شکل گرفته در امتداد جهت‌گیری معین، شباهت دارد. در مقابل، تبدیل فوریه الگوی دو بعدی تصویر به‌دست آمده، تصویری حاوی نقاط الگوی پراش را ارائه می‌کند. از نقاط موجود درون تصویر حاصل شده از اعمال تبدیل فوریه می‌توان برای شناسایی مواد استفاده کرد. این

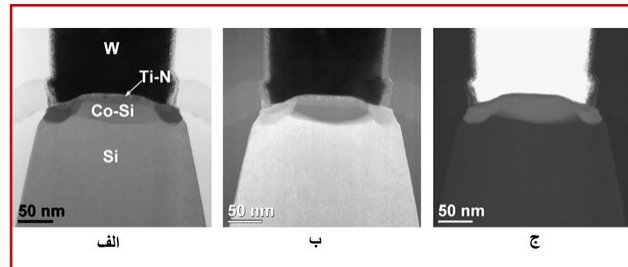
### ● طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS)

در روش EDS، هنگام تایید شدن الکترون‌ها بر نمونه و جمع‌آوری شدن آنها با طیف‌سنج مورد نظر، اشعه‌های X مشخصه‌یاب با استفاده از عنصرهای مختلف، ساطع/منتشر می‌شوند. اشعه‌های X مشخصه‌یاب تولید شده با یک عنصر، به سادگی می‌تواند توسط عنصری متفاوت موجود در حجم یکسان جذب شود. بنابراین، حساسیت روش مورد نظر به‌عنوان تابعی از عنصر، آشکار شده و ترکیب حجمی که عنصر مذکور در آن حضور داشته، در نظر گرفته می‌شود. استفاده از نمونه مرجع با ترکیب از پیش شناخته شده برای تحلیل کمی کاربردی و مؤثر، الزامی است. در صورت به کارگیری عناصر آشکار ساز فوق نازک یا بدون پنجره، اگر کمیت مناسبی درون حجم مورد تحلیل وجود داشته باشد، آنگاه دستیابی به وزن اتمی به کوچکی وزن بورون امکان‌پذیر است. در فرآیند تحلیل نقایص و فرآیند توسعه پردازش نیمه‌هادی به‌منظور تعیین عناصر مختلف حاضر در نقص مربوطه و در نتیجه، شناسایی منبع مشکل مورد نظر از تحلیل EDS استفاده می‌شود.

### ● طیف‌سنجی افت انرژی الکترون (EELS)

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، پرتو الکترونی (۳۰۰ keV) - هنگام عبور از نمونه مورد نظر، به‌صورت غیر الاستیکی پراکنده می‌شود. در طول فرآیند پراکندگی غیر الاستیکی بسته به مشخصه عنصر مورد استفاده، الکترون‌ها مقداری انرژی از دست می‌دهند. در نتیجه، پرتو عبوری شامل الکترون‌هایی با دامنه‌ای گسترده از انرژی‌ها است. در روش طیف‌سنجی افت انرژی الکترون (EELS) یک طیف‌سنج زیر ستون TEM مستقر می‌شود تا الکترون‌هایی با افت انرژی مشابه مشخصه عنصر شناسایی شده را آشکار کند. این طیف‌سنج شامل آهن‌ربای قوسی و یک سیستم آشکار سازی می‌شود. آهن‌ربای قوسی (شکل (۴)) پرتوی الکترونی عبوری را با زاویه ۹۰ درجه منحرف می‌سازد. در طول این فرآیند، الکترون‌ها با انرژی‌های مختلف توسط میدان مغناطیسی حاضر تا حدود متفاوتی منحرف می‌شوند. سرانجام، از اجرای این فرآیند، یک طیف افت انرژی الکترون به‌دست می‌آید. EELS در مقایسه با EDS، قدرت تفکیک‌پذیری بالاتر (۱ nm) و قابلیت آشکار سازی عناصر سبک (نظیر: کربن، اکسیژن، و نیتروژن) را ارائه می‌نماید. به‌منظور دستیابی به نتایجی دقیق، توصیه شده که ضخامت نمونه  $\leq 50$  و منبع الکترونی، همدوس، عاری از رانش (نظیر: تفنگ الکترونی گسیل/نشر میدانی) باشد. از TEM در حالت STEM می‌توان برای ثبت تصویر مبتنی بر انرژی نمونه استفاده کرد. اطلاعات انرژی به‌عنوان انرژی اشعه‌های X حاصل شده از نواحی مختلف نمونه یا افت انرژی در الکترون‌های عبوری از نواحی مختلف نمونه مورد نظر نمایان می‌شود. روش‌های STEM-EDS (STEM جفت شده با EDS)، STEM-EELS (STEM جفت شده با EELS)، و TEM با قابلیت فیلتر کردن انرژی<sup>۳۱</sup> همگی قابلیت تصویربرداری از نمونه در حوزه انرژی را فراهم می‌آورند. هر یک از این روش‌ها به‌طور خلاصه شرح داده شده‌اند.

ثبت می‌شود. به‌طور معمول، آشکار ساز حلقوی در درگاه معینی از ستون TEM نصب شده و دارای ارتفاع ثابتی است. در صورت بررسی نمونه‌های چند بلوری، اثرات پراش الکترونی کنتراست تصاویر BF و ADF را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. عدسی‌های اپتیک/نوری الکترونی TEM را می‌توان به‌گونه‌ای تنظیم نمود که به‌طور گزینشی، الکترون‌های پراکنده در زوایای بالا (بیشتر از ۵۰ mrad) به سمت آشکار ساز حلقوی افکنده شوند. این روش با عنوان تصویربرداری میدان تاریک با زاویه حلقوی بالا STEM<sup>۳۰</sup> شناخته می‌شود. کنتراست در تصویر HAADF STEM، به نوسانات جرمی اتم‌های پایین پروب الکترونی کوچک درون ستون مورد نظر حساس است. در میکروسکوپ الکترونی عبوری پیشرفته مجهز به منبع گسیل/نشر میدانی، به‌منظور حصول یک پروب کوچک برای تهیه تصاویری با قدرت تفکیک‌پذیری اتمی می‌توان عدسی‌های الکترون بالای نمونه را به‌طور دقیق تنظیم کرد. تصویربرداری HAADF STEM با عنوان تصویربرداری با کنتراست Z نیز شناخته شده که در آن، Z نماینده عدد اتمی است. هم‌زمان با عبور کردن پرتو الکترونی از نمونه مورد نظر، عناصر با وزن اتمی سنگین، الکترون‌های بیشتری را پراکنده نموده و در تصویر HAADF STEM روشن‌تر نمایان می‌شوند. نمونه‌هایی از تصاویر ADF، BF و HAADF STEM در شکل (۳) ارائه شده‌اند.

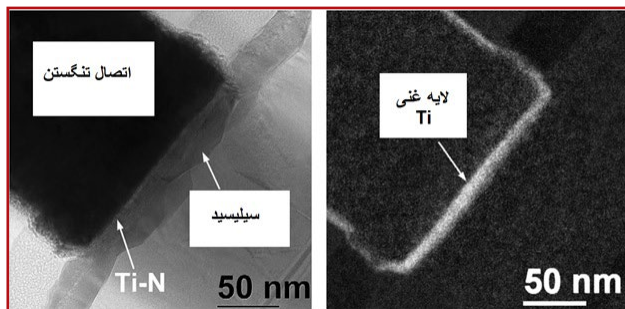


شکل (۳): تصاویر STEM از پشته/توده‌ای از جنس تنگستن/نیتريد تیتانیوم/کبالت-سیلیکون/اسیلیکون (W/TiN/Co-Si/Si). (الف): میدان روشن (BF)، (ب): میدان تاریک حلقوی (ADF) و (ج): میدان تاریک با زاویه حلقوی بالا (HADDF) [۲].

### تحلیل عنصری TEM و کاربرد روش‌های مختلف موجود برای صنعت نیمه‌هادی

پروپ باریک موجود درون TEM مجهز به منبع گسیل/نشر میدانی، با شدت بالا، اجرای فرآیند تحلیل عنصری با قدرت تفکیک‌پذیری بالا (۱ nm) از مناطقی با ضخامت کمتر از چند صد آنگستروم را امکان‌پذیر می‌سازد. روش‌های تحلیل عنصری مبتنی بر TEM از رویدادهای پراکندگی غیر الاستیکی (اتلاف انرژی) حاصل شده در زمان عبور پرتو الکترونی از نمونه مورد نظر استفاده می‌کنند. دو روش مرسوم در این حوزه عبارتند از: طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) و طیف‌سنجی افت انرژی الکترون (EELS). نمای از پیاده‌سازی روش‌های EDS و EELS در دستگاه TEM در شکل (۱) نمایش داده شده‌است.

ساختار قطعات نیمه‌هادی ایده‌آل هستند. نمونه‌ای از تصاویر عملیات EFTEM در شکل (۵) ارائه شده‌است.



شکل (۵): تصاویر EFTEM از اتصال تنگستن (W). (الف): تصویر انرژی فیلتر شده شکل گرفته با استفاده از الکترون‌های عبوری با افت انرژی برابر با صفر. (ب): نقشه EFTEM تیتانیوم ثبت شده از لایه سد/مانع نیتريد تیتانیوم (TiN) تولید شده با روش سه پنجره‌ای [۳].

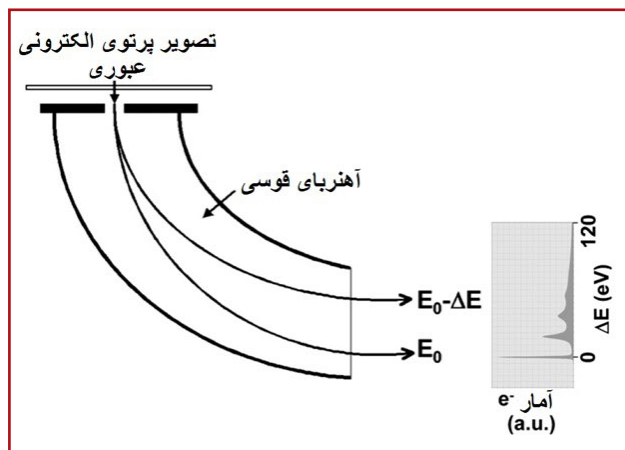
### روش‌های پیشرفته مورد استفاده به‌منظور تصویربرداری از نقایص نیمه‌هادی‌ها با کمک TEM

#### ● توموگرافی الکترونی

توموگرافی الکترونی به‌منظور ترکیب مجدد تصاویر STEM یا EFTEM ثبت شده در زوایای انحرافی مختلف با هدف بازسازی ساختار یا ترکیب سه بعدی قطعات یا نقایص از نرم‌افزار استفاده می‌شود. کاربرد این روش برای مشخصه‌یابی پشته لایه سد/مانع دانه‌ای Ta/Cu توسط استگمان<sup>۳۲</sup> و همکاران [۴] شرح داده شده‌است.

#### ● تمام‌نگاری/هولوگرافی الکترونی

آگاهی از توزیع مکانی یون‌های کاشت (As، P و B) درون ساختارهای ترانزیستور برای بهینه‌سازی عملکرد آنها از اهمیت بسزایی برخوردار است. روش موجود برای نگاشت دو بعدی فرآیندهای کاشت فوق کم عمق در قدرت تفکیک‌پذیری مکانی بالا، تمام‌نگاری الکترونی خارج از محور نام دارد. حصول مقطع عرضی در برگزیده آرایش دو بعدی کیفی در برخی از مقالات [۵ تا ۹] گزارش شده، اما دستیابی به مقطع عرضی کمی به هیچ عنوان ساده نیست. هنگام تابیدن پرتوی الکترونی هم‌دوس یا یک موج الکترونی تخت روی نمونه نازک عبور دهنده الکترون، پتانسیل الکترواستاتیک حاصل شده از آرایش مورد نظر باعث وقوع جابجایی/تغییر فاز محلی در موج الکترونی مذکور می‌شود. مدولاسیون فاز، تابعی از فرآیند توزیع پتانسیل الکترواستاتیک در طول اتصال/پیوند p-n بوده که می‌توان آن را با تمام‌نگاری الکترونی ثبت نمود. مثال‌هایی از تمام‌نگاری الکترونی در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده‌است.



شکل (۴): نمایی از فرآیند EELS درون TEM.  $E_0$  نماینده انرژی پرتوی فرودی تابیده شده و  $\Delta E$  نیز نشان دهنده افت انرژی است [۲].

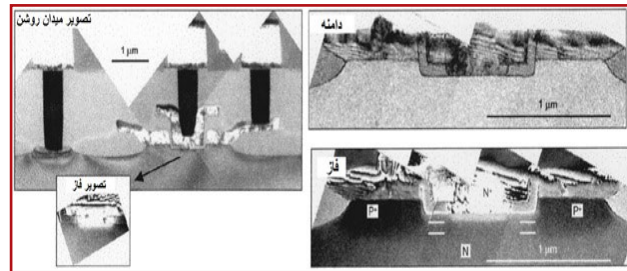
در روش STEM-EDS، سیگنال‌های اشعه X از نواحی پویش شده با استفاده از STEM جمع‌آوری می‌شوند. ناحیه پویش شده مورد نظر می‌تواند به شکل یک خط (پویش خطی) یا مستطیل (پویش ناحیه‌ای) باشد. سیستم EDS، داده‌ها را پردازش و ذخیره می‌کند. خروجی آن به‌طور معمول یا به‌صورت نمودارهای شدت سیگنال‌های اشعه X یا در قالب تصویر نقشه عنصری ارائه می‌شود. در روش STEM-EELS، الکترون‌های عبوری با طیف‌سنج EELS جمع‌آوری می‌شوند. در این روش نیز می‌توان به‌صورت خطی یا ناحیه‌ای، عملیات پویش را انجام داد. سیستم EELS، داده‌ها را پردازش و ذخیره می‌کند. خروجی نیز به‌صورت نمودارهای شدت یا نقشه‌های عنصری ارائه می‌شود.

#### ● TEM با قابلیت فیلتر کردن انرژی (EFTEM)

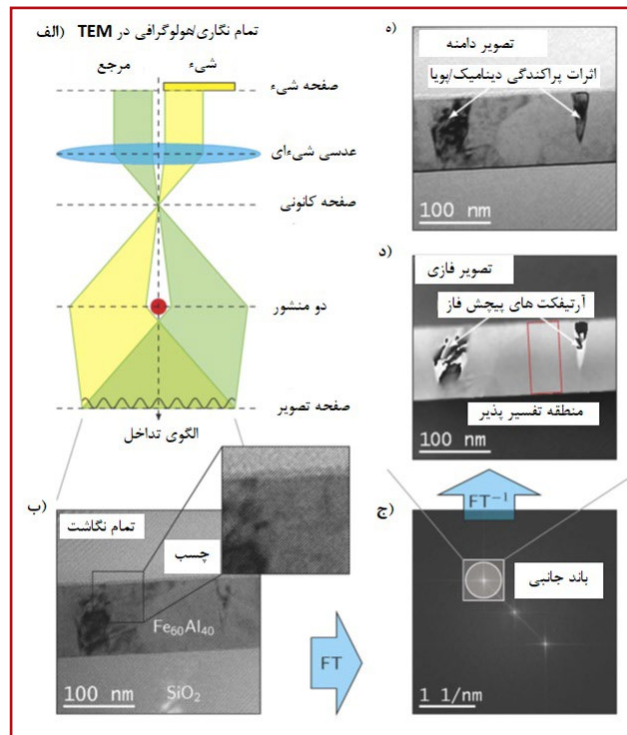
EFTEM را می‌توان به‌عنوان روشی برای تصویربرداری با TEM در نظر گرفت. TEM مرسوم قادر به استفاده از الکترون‌هایی که به‌صورت غیر الاستیکی پراکنده شده‌اند و انرژی خود را در اثر برهم‌کنش با نمونه از دست داده‌اند، نیست. لازم به ذکر است این نوع الکترون‌ها برای فعالیت‌های تحلیلی در مقیاس میکرو و نانو به دلیل شکل‌دهی طیف افت انرژی (EELS) که حاوی اطلاعاتی درباره ترکیب شیمیایی، مشخصات الکترونیکی، و پیوند شیمیایی بوده از اهمیت بسزایی برخوردار هستند. در EFTEM، تصویر نهایی تنها با الکترون‌هایی شکل گرفته که انرژی آنها قادر به عبور از فیلتر انرژی باشد. در این صورت، الکترون‌های دارای انرژی که اجازه عبور از فیلتر انرژی را نداشته از تصویر نهایی حذف می‌شوند. محتویات اطلاعات EELS تنها در صورتی قابل استفاده است که یک طیف‌سنج EEL به دستگاه TEM افزوده شود. فیلترهای انرژی به‌صورت تجاری در انواع مختلف (درون ستونی) یا (بعد از ستون) در بازار موجود هستند. عوامل فیلتر همچون: مقدار انرژی، پنجره انرژی و غیره توسط اپراتور تنظیم می‌شوند. EFTEM‌ها برای تحلیل



اصلی در روش آماده‌سازی نمونه‌ها، دستیابی به لایه‌های نازک‌تر از ۲۵۰ nm از ناحیه مورد نظر یا ناحیه وقوع نقص به‌منظور حصول اطمینان از عبور مقدار کافی الکترون‌ها برای تهیه تصویر نهایی است. در صورت استفاده از روش تصویربرداری در برگزیده کنتراست فاز با قدرت تفکیک‌پذیری بالا، ضخامت نمونه باید کمتر از ۱۰۰ nm باشد. در گذشته، روش‌های بسیاری برای آماده‌سازی نمونه‌های TEM برای دستیابی به فرآیند تصویربرداری از نمای بالایی/سطحی و نمای سطح، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۲] تا [۱۵] که محبوب‌ترین آنها پرداخت/اصیل دادن مکانیکی مرسوم و سایش یون آرگون (Ar) در شرایط وجود نمونه‌های بزرگ همگن/متجانس به کار برده می‌شوند. نمای سطح مقطعی مرسوم حاصل شده از TEM را تنها زمانی می‌توان برای مدارهای مجتمع (IC) ها به کار برد که ناحیه مورد نظر  $35^{\circ}$  به دفعات بالا درون نمونه مذکور تکرار شده باشد، در ضمن این روش به ندرت در تحلیل نقایص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حال حاضر، ابزار با نام پرتوی یونی متمرکز (FIB) به‌عنوان ابزاری برتر، برای آماده‌سازی نمونه‌ها به‌منظور اجرای تصویربرداری از نمای بالایی/سطحی و نمای سطح مقطعی درون TEM در دسترس است. به‌منظور آماده‌سازی سطح مقطعی از ناحیه معینی از نمونه‌ها، سه رویکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رویکرد نخست، ابتدا فرآیند پرداخت مکانیکی و سپس نازک‌سازی نهایی نیز با استفاده از سایش با ابزار FIB انجام می‌شود. یانگ  $36^{\circ}$  و همکاران [۱۶] برای آماده‌سازی نمونه‌های مسطح و حصول سطح مقطعی از نمونه‌ها از رویکرد ذکر شده استفاده کردند. موریس  $37^{\circ}$  و همکاران [۱۷]، کرک  $38^{\circ}$  و همکاران [۱۸] و شراب  $39^{\circ}$  و رای  $40^{\circ}$  [۱۹] نیز در تحقیقات خود از رویکرد نخست استفاده کرده‌اند. رویکرد دوم با عنوان «برداشت» نیز در مقالات اوربیچک  $41^{\circ}$  و همکاران [۲۰]، هرلینگر  $42^{\circ}$  و همکاران [۲۱] و جیانوتزی  $43^{\circ}$  و همکاران [۲۲] برای آماده‌سازی نمونه TEM مورد استفاده قرار گرفته است. در این رویکرد، مرحله پرداخت مکانیکی حذف شده و همین امر، مدت زمان آماده‌سازی نمونه را تا میزان زیادی کاهش می‌دهد. در این رویکرد، نمونه نهایی TEM با حداقل آسیب ممکن از زیرلایه مورد نظر جدا شده و ابتدا به‌گرید پوشیده شده با غشاء بسیار نازک و سرانجام به درون نگهدارنده نمونه TEM منتقل می‌شود. رویکرد سوم، برداشت درجا/پهنگام نام داشته و تمام فرآیند آماده‌سازی نمونه TEM را می‌توان درون FIB انجام داد. در این رویکرد می‌توان نمونه نهایی را به اشکال مختلف هندسی تهیه نمود و به دلیل استفاده از یون‌های گالیم و آرگون با انرژی پایین قابلیت‌هایی نظیر نازک‌سازی هر چه بیشتر نمونه و حذف آسیب‌های القاء شده از ابزار FIB نیز در دسترس است. دو روش برای آماده‌سازی نمونه‌های مسطح TEM توسط آندرسون  $44^{\circ}$  و کلیپس  $45^{\circ}$  [۲۳] و سابرامانیا  $46^{\circ}$  و همکاران [۲۴] ارائه شده‌است. آندرسون و کلیپس برای پرداخت نمونه از روش سه پایه استفاده کردند، در صورتی که سابرامانیا و همکاران بدون کمک گرفتن از روش سه پایه، ابتدا مرحله پرداخت پشت و سپس مرحله پرداخت سطح مقطع را برای نمونه به کار بردند. هر دو روش فوق برای تهیه نمونه نهایی TEM از ابزار FIB استفاده می‌کنند. روش



شکل (۶): تصویر TEM ترانزیستور دو قطبی (سمت چپ). بزرگنمایی تصویر تمام‌نگاری الکترونی از منطقه امیتر-بیس  $33^{\circ}$  (سمت راست). فرآیند نفوذ زیر امیتر به‌طور واضح انجام شده‌است، در صورتی که لایه ذاتی بیس آلیایده با p قابل رؤیت نیست (پایین سمت راست) [۱۰].

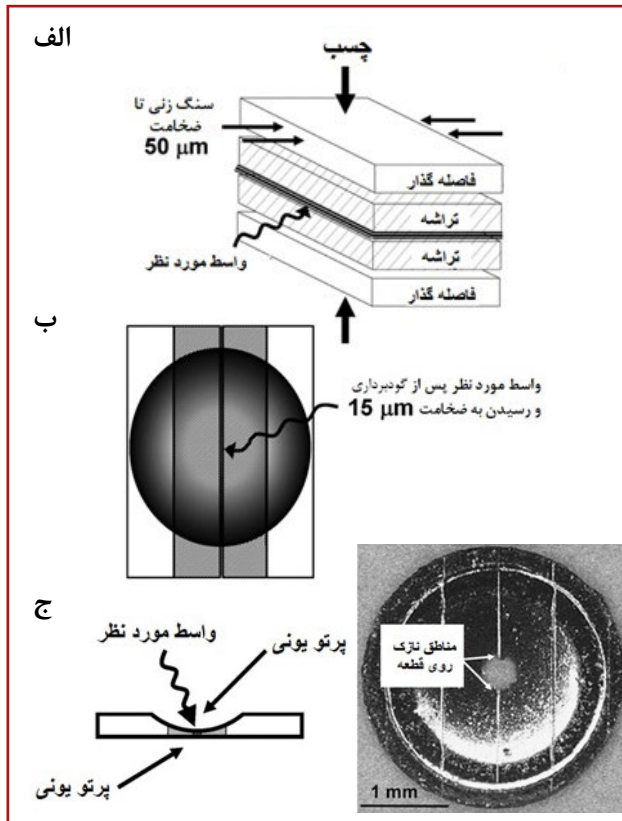


شکل (۷): تهیه و بازسازی تمام نگاشت الکترونی. (الف): چگونگی دستیابی انجام تمام‌نگاری الکترونی درون TEM. (ب): تمام نگاشت تهیه شده از فیلم/غشاء نازک  $Fe_{60}Al_{40}$  با ضخامت 100nm رشد داده شده روی زیرلایه  $SiO_2$  و پوشش یافته با چسب برای اجرای مراحل آماده‌سازی نمونه TEM. (ج): طیف فوریه از تمام نگاشت مورد نظر که دو باند جانی و یک باند مرکزی را نمایش می‌دهد. تبدیل فوریه باند جانبی بالایی پایین گذر فیلتر شده با روزنه عددی منجر به حصول موج تصویر نمایش داده شده توسط فاز (د) و دامنه (ه) می‌شود [۱۱].

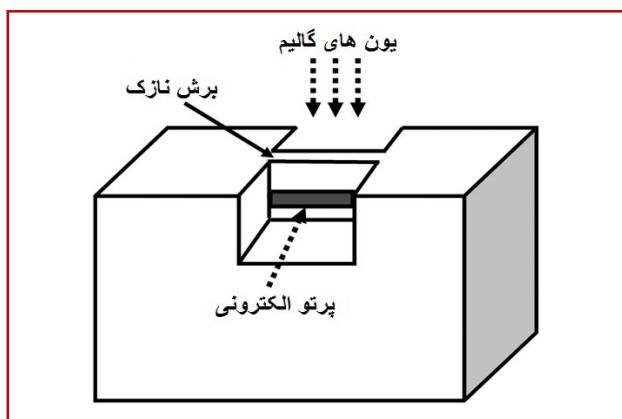
### روش‌های مختلف آماده‌سازی نمونه‌های نیمه‌هادی برای تصویربرداری با کمک TEM

آماده‌سازی نمونه، کلید اصلی موفقیت در هر فرآیند تحلیلی انجام پذیرفته با کمک TEM است. با استفاده از TEM می‌توان تصویربرداری از نمای بالایی/سطحی و نمای سطح مقطعی را برای نمونه اجرا کرد. روند آماده‌سازی نمونه برای TEM به نوع نمونه مورد نظر بستگی دارد. در انتها، نمونه به اندازه یک دیسک/قرص یا میله با قطر ۳ mm تهیه می‌شود. یکی از نیازمندی‌های

مقدماتی پیچیده‌ای نیازمند هستند. این مراحل مقدماتی شامل سنگ‌زنی یا ااره‌کاری دقیق برای دستیابی به ضخامت از نمونه در محدوده ۷۵-۲۰  $\mu\text{m}$  و همچنین چسباندن نمونه مورد نظر روی حلقه پشتیبان به‌منظور تسهیل موارد انتقال نمونه تراشیده و نازک شده به مکان‌های مختلف است. این مراحل بنا بر هندسه نمونه مورد نظر (یعنی ناحیه سطح مقطعی یا سطحی) متغیر هستند.



شکل (۸): نمایشی از روش آماده‌سازی ناحیه‌ای کلی از نمونه. (الف): دو تکه ویفر رو در رو مقابل یکدیگر به هم چسبانده شده‌اند (ویفرهای اضافی نیز برای کنترل آسان‌تر اضافه می‌شوند) و از جهت سطح مقطع، سنگ‌زنی شده تا به ضخامت کمتر از  $50 \mu\text{m}$  برسد. (ب): نمای از بالا به پایین پس از گودبرداری و رسیدن به ضخامت  $15 \mu\text{m}$  در مرکز نمونه. (ج): نمای سطح مقطعی از نمونه گودبرداری شده که برای حصول قابلیت عبور دادن الکترون پرتو یون آرگون ساییده می‌شود. (د): نمای از بالا به پایین تصویر نمونه نهایی به‌دست آمده از میکروسکوپ نوری، مناطق نازک عبور دهنده الکترون با پیکان مشخص شده‌اند [۲].



شکل (۹): نمایشی از روش سایش پرتو یونی متمرکز برای آماده‌سازی ناحیه‌ای گزینشی از نمونه TEM [۲].

برداشت برای نمونه TEM مسطح توسط استیوی<sup>۴۷</sup> و همکاران [۲۵] و رای و همکاران [۲۶] مورد استفاده قرار گرفته است. در قسمت ذیل روندهای مرسوم آماده‌سازی نمونه TEM به‌طور تفصیلی شرح داده شده‌است.

### ● آماده‌سازی ناحیه‌ای کلی از نمونه

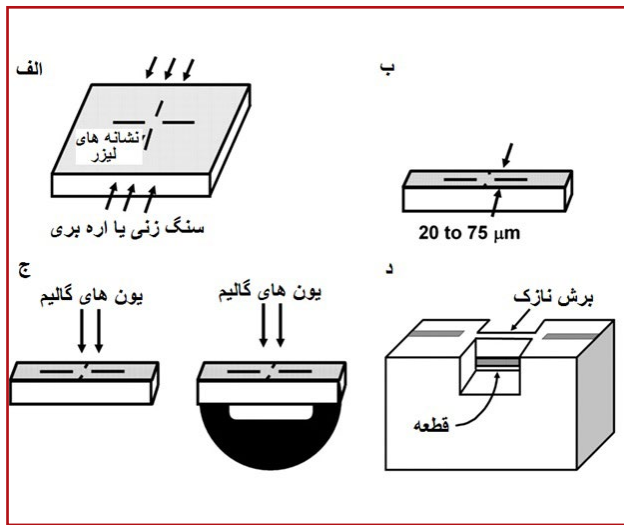
در صورت تکرارپذیر بودن ویژگی مورد نظر یا بالا بودن چگالی نقص مربوطه در فرآیند تحلیل نقایص قطعات نیمه‌هادی، آنگاه می‌توان از روش‌های آماده‌سازی ناحیه کلی در TEM استفاده کرد. نمایشی از سطح مقطع ناحیه کلی در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ج) به نمایش گذاشته شده‌است. دو تکه/بخش از یک تراشه معین (با ابعاد  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ) به‌طور دائم با قرار گرفتن مدار در میانشان به‌صورت رو در رو به یکدیگر چسبانده شده‌اند. دو تکه سیلیکون اضافی نیز برای پشتیبانی به پشت آنها چسبانده می‌شوند. سپس پشت مورد نظر از هر طرف به ضخامت  $50 \text{ mm}$  تراشیده می‌شود. ضخامت مرکز نمونه مذکور نیز با استفاده از دستگاه گودی ساب به  $15 \text{ mm}$  تقلیل می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۸-ب) نیز نمایش داده شده، یک حلقه مسی (که می‌تواند از جنس نیکل<sup>۴۸</sup> یا مولیبدن<sup>۴۹</sup> نیز باشد) حفره‌دار با قطر  $3 \text{ mm}$  که به‌صورت تجاری در دسترس است، به نمونه چسبانده می‌شود. در پایان، ضخامت نمونه مورد نظر با استفاده از اشعه یون-آرگون به کمتر از  $0.25 \text{ mm}$  می‌رسد. این رویه آماده‌سازی نمونه را می‌توان به راحتی با تغییر دادن مراحل گودبرداری و پرداخت سطح مقطعی به گودبرداری و پرداخت سطح پشتی برای تحلیل سطحی ناحیه کلی به کار برد.

### ● آماده‌سازی ناحیه‌ای گزینشی یا معین از نمونه

به‌طور معمول، به دلیل اینکه نقص(ها) یا ویژگی مورد نظر در اصول مربوط به تعداد معدودی از ترانزیستورها درون یک تراشه است، بنابراین، از روش ناحیه کلی TEM به ندرت در صنعت نیمه‌هادی استفاده می‌شود. در این روش جدید، ضخامت ناحیه‌ای از نمونه مربوطه در برگیرنده ویژگی مورد نظر یا نقص به وقوع پیوسته به‌صورت گزینشی به‌منظور دسترسی به قابلیت عبور الکترون‌ها از آن ناحیه به کمتر از  $0.25 \text{ mm}$  کاهش می‌یابد. به همین دلیل، نام «TEM ناحیه گزینشی» برای این روش انتخاب شده‌است. چالش اصلی در این روند، تقلیل دادن ضخامت همان ناحیه گزینشی بدون تخریب یکپارچگی کل نمونه مورد نظر است. برای دستیابی به این هدف، می‌توان از روش FIB استفاده کرد که اصول کلی آن در شکل (۹) به نمایش گذاشته شده‌است. در این روش، به‌منظور نازک ساختن هر چه بیشتر ناحیه گزینشی نمونه و تسهیل نمودن عبور پرتو الکترونی از آن ناحیه، از پرتو حاوی یون‌های گالیم متمرکز با انرژی بالا استفاده می‌شود. روش‌های آماده‌سازی نمونه مبتنی بر FIB پیش از عملیات نهایی نازک‌سازی نمونه‌ها، به‌طور معمول به مراحل

## ● آماده‌سازی سطح مقطعی نمونه

حاصل شده از نرخ سایش متفاوت مؤلفه‌های دیگر از قطعه مورد نظر می‌شود. در دنیای واقعی همیشه دسترسی به تنظیم و همترازسازی دقیق امکان‌پذیر نیست.



شکل (۱۰): نمایی از رویه‌های پیش از FIB برای آماده‌سازی سطح مقطعی از ناحیه گزینشی نمونه TEM. (الف): ناحیه مورد نظر با پرتو لیزر نشانه‌گذاری شده است. (ب): تراشه مورد نظر به صورت سطح مقطعی برای حصول ضخامت بین ۲۰ mm الی ۷۵ mm صیقل داده می‌شود، از یک اره دقیق با سرعت بالا به منظور دستیابی به ضخامت مورد نظر می‌توان استفاده نمود. (ج): برش مربوطه به درون FIB انتقال یافته و ساییده می‌شود و حتی در صورت نیاز می‌توان برای دستیابی به قابلیت کنترل بهتر یک نیم حلقه ۳ mm حفره‌دار از جنس مس را به نمونه چسباند و سپس با استفاده از FIB ناحیه مورد نظر ساییده می‌شود. (د): نمای نزدیک از منطقه برش خورده که الکترون می‌تواند از آن عبور کند [۲].

## ● روش بلند کردن و بالا آوردن

رویه‌های نازک‌سازی پیش از استفاده از FIB شرح داده شده در قسمت‌های فوق، به‌طور معمول زمان‌بر و گران قیمت هستند. با به کارگیری روشی نوین با عنوان بلند کردن و بالا آوردن، دیگر نیازی به آماده‌سازی پیش از FIB ناحیه معینی از نمونه TEM نیست. در این روش با استفاده از FIB، برشی نازک از ناحیه مورد نظر نمونه تهیه و آن برش به‌عنوان نمونه نهایی TEM بلند شده و بالا آورده می‌شود. سپس این برش نازک به گریدی با قطر ۳ mm که سطح آن با کربن حفره‌دار پوشش داده شده، انتقال می‌یابد. مزایای روش مورد نظر عبارتند از: تقلیل زمان آماده‌سازی نمونه و امکان‌پذیر بودن آماده‌سازی ناحیه‌ای گزینشی از بیشتر مؤلفه‌های مدار مجتمع نمونه TEM بدون هیچ گونه محدودیت هندسی یا بعدی. در حوزه تحلیل نقص، انعطاف‌پذیری هندسی و بعدی ارائه شده در صورت استفاده از روش بلند کردن و بالا آوردن، منجر به حصول روش‌هایی نوین برای به کارگیری TEM به‌منظور حل کردن مسائل پیچیده می‌شود. نمونه‌هایی از کاربردهای جدید روش بلند کردن و بالا آوردن عبارتند از: تهیه نمونه TEM از ذرات کوچک، مدارهای از پشت

هدف از این رویه، حصول یک سطح مقطع نازک (با ضخامتی کمتر از ۰/۲۵ um) از قطعه در برگیرنده ناحیه معیوب است. این روش زمانی مؤثر واقع می‌شود که موقعیت افقی دقیق عیب مورد نظر قابل شناسایی بوده و درون چند لایه تکرار شده باشد. نمایی از مراحل الزامی، پیش از اعمال روش آماده‌سازی نمونه FIB در شکل (۸) نمایش داده شده است. در این رویه، ناحیه مورد نظر با استفاده از لیزر یا خود FIB به‌طور دائم علامت‌گذاری می‌شود. نمونه مورد نظر در راستای جهت موازی با سطح مقطع نهایی با ضخامتی تقریباً برابر با ۲۰-۷۵ um تراشیده یا اره می‌شود. نمونه مد نظر به‌طور معمول در مرحله سنگ‌زنی یا اره‌کاری برای تسهیل فرآیند نگه داشتن و حمل و نقل، با استفاده از چسب پلاستیکی حرارتی انحلال‌پذیر در استون<sup>۵۰</sup> به یک لام/اسلاید<sup>۵۱</sup> شیشه‌ای چسبانده می‌شود. سپس نمونه ذکر شده از لام شیشه‌ای جدا و به درون FIB منتقل و در آنجا به ضخامت دلخواه، نازک می‌شود. به‌منظور کار کردن راحت‌تر با نمونه می‌توان یک نیم حلقه حفره‌دار (با قطر ۳ mm و ضخامت ۵۰ mm) را به‌طور دائم روی آن چسباند.

## ● آماده‌سازی نمونه مسطح

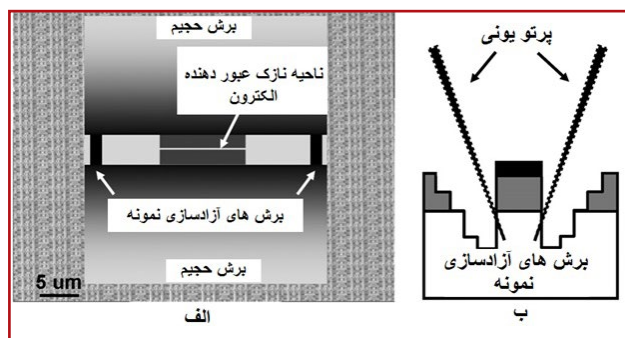
رویه آماده‌سازی نمونه مسطح برای TEM یک مزیت هندسی منحصر‌بفرد را نسبت به روش سطح مقطعی برای موارد تحلیل نقص را در بر داشته که محدود به قطعات سیلیکونی یا لایه‌های معینی از قطعات می‌شود. در روش سطح مقطعی، یک برش نازک (با ضخامتی کمتر از ۰/۲۵ mm) از قطعه مورد نظر برای فرآیند تحلیل نقص تهیه می‌شود، اما در رویه آماده‌سازی نمونه مسطح می‌توان به ناحیه ۲۰ سانتی‌متری مربعی از هر لایه (با ضخامتی کمتر از ۰/۲۵ mm) از قطعه مورد نظر دسترسی پیدا کرد. بنابراین، می‌توان زمانی که نقص مورد نظر به لایه‌ای با ضخامتی تقریباً برابر با ۲۵۰ nm محدود شود و همچنین شرایط عدم قطعیت در مورد موقعیت افقی نقایص وجود داشته باشد، آنگاه بهتر است از روش آماده‌سازی نمونه مسطح استفاده کرد. نمونه‌هایی از این نوع نقایص عبارتند از: ناهنجاری‌ها در رابط/سطح مشترک قطعه سیلیکونی، نقایص اکسید گیت و واکنش‌های بین سطحی. جزئیات مربوط به رویه آماده‌سازی نمونه مسطح پیش‌تر ارائه شده است. در شکل (۱۰)، نمایی از رویه‌های پیش از FIB برای آماده‌سازی سطح مقطعی از ناحیه گزینشی نمونه TEM ارائه شده است.

هدف اصلی از تحلیل نمای از بالا/سطحی با TEM، دستیابی به قابلیت بررسی هر لایه‌ای از قطعه مورد نظر در مکان وقوع نقص است. این امر نیازمند تنظیم و همتراز ساختن دقیق لایه مورد نظر موازی با پرتو یونی است. هرگونه اشتباه در فرآیند تنظیم و همترازسازی، منجر به بزرگنمایی اثر آبخاری

نمونه TEM نهایی از تراشه به گرید نگهدارنده نمونه است. رویکرد معمول به این صورت است که با استفاده از یک سوزن شیشه‌ای حاوی بار استاتیک/ساکن در نوکش که همانند چسب عمل کرده، نمونه را از تراشه بلند می‌کنند. سپس نمونه نهایی به گرید نگهدارنده نمونه غشاءدار منتقل می‌شود. نرخ موفقیت مرحله انتقال نمونه نهایی را می‌توان با بهینه‌سازی شاخص‌های تاثیرگذار بر مرحله بلند کردن و بالا آوردن را به سادگی به ۱۰۰ درصد رسانید. تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه نهایی TEM استقرار یافته روی گرید نگهدارنده نمونه در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. عملیات بلند کردن و بالا آوردن زیر یک میکروسکوپ نوری در شرایط فاصله کاری دوردست با حداقل بزرگنمایی  $\times 200$  انجام می‌شود. به‌طور معمول، سوزن مورد نظر به یک بازوی پروب مانند متصل می‌شود. این بازوها که سوزن در انتهای آنها متصل شده و قابلیت کنترل هیدرولیکی آنها نیز برای انجام حرکات دقیق فراهم است، به‌صورت تجاری در دسترس هستند. به کارگیری یک نگاه دارنده سوزن میکروپروپ کنترل شده با استفاده از میکرومتر دقیق ساده نیز برای دستیابی به هدف مورد نظر کافی است. میزان موفقیت عملیات انتقال به شارژ/بار استاتیک در نوک سوزن ذکر شده، به مهارت و صبر بالای اپراتور دستگاه بستگی دارد. برخی از عواملی که در مرحله بلند کردن و بالا آوردن موثر بوده عبارتند از: شارژ استاتیک در نوک سوزن، وزن نمونه TEM نسبت به شارژ استاتیک و میزان دقت بازویی که سوزن مربوطه به آن متصل شده است.

شارژ استاتیک به عواملی نظیر سطح رطوبت در اتاق، قطر نوک سوزن و ترکیبات نمونه و سوزن شیشه‌ای بستگی دارد. در صورت بالا بودن میزان شارژ استاتیک، به‌طور معمول، نمونه از سوزن بالا رفته و در این شرایط، انتقال آن روی گرید TEM غیر ممکن خواهد بود. در صورت پایین بودن میزان شارژ استاتیک، نمونه به سوزن مذکور نخواهد چسبید. میزان بهینه‌ای از شارژ استاتیک برای حصول عملیات موفق بلند کردن و بالا آوردن و انتقال نمونه مورد نیاز است. از طریق پوشش‌دهی سوزن و بهینه‌سازی قطر نوک سوزن مذکور نسبت به وزن نمونه مورد نظر می‌توان میزان شارژ استاتیک در نوک سوزن را کنترل کرد. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، در روش بلند کردن و بالا آوردن، عملیات نازک‌سازی درون FIB تنها یک مرتبه انجام می‌شود. هنگامی که برش نهایی از تراشه بلند و جدا شود و روی گرید قرار گیرد، دیگر انجام عملیات نازک‌سازی اضافی امکان‌پذیر نخواهد بود. می‌توان با نصب یک پروب یا بازوی دستکاری کننده درون FIB بر این محدودیت روش بلند کردن و بالا آوردن غلبه نموده و بر پیشرفت فرآیند آماده‌سازی نمونه TEM نیز از ابتدا تا انتها به‌صورت مرحله به مرحله نظارت

نازک شده و مدارهای از پشت زدایش شده، چندین مکان روی یک تراشه، قسمتی از تراشه پردازش نشده و نقایص آشکار و لایه لایه‌ای. چند تن از مؤلفان مشهور، چند نسخه از روش بلند کردن و بالا آوردن را که نیازمند به هیچ‌گونه آماده‌سازی نمونه پیش از مرحله FIB نداشته را برای آماده‌سازی ناحیه‌ای مورد نظر از نمونه TEM معرفی کردند. در یکی از این نسخه‌های رویه بلند کردن و بالا آوردن با استفاده از FIB، برشی با ضخامت  $2\ \mu\text{m}$ ، عرض  $30\ \mu\text{m}$  و عمق  $15\ \mu\text{m}$  تهیه شد که ناحیه مورد نظر، در مرکز این برش قرار می‌گیرد. سپس ناحیه‌ای به عرض  $10\ \mu\text{m}$  و عمق  $10\ \mu\text{m}$  برای عبور دادن پرتو الکترونی حول ناحیه مورد نظر اولیه، نازک می‌شود. در این هنگام، نمونه نهایی با بریدن قسمت زیرین و سایش لبه‌های نمونه از تراشه جدا می‌شود. نمای نشان‌دهنده مرحله بریدن قسمت زیرین نمونه نهایی و بلند کردن آن در شکل (۱۱) و تصویر SEM از مرحله برش و بلند کردن نمونه نیز در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱۱): روش آماده‌سازی نمونه با عنوان «بلند کردن و بالا آوردن» برای تهیه سطح مقطعی از ناحیه‌ای معین برای بررسی در دستگاه TEM. در این روش، دو طبقه برش دو پله‌ای در دو طرف ناحیه مورد نظر ایجاد می‌شود. نمونه نهایی با بریدن مناطق اطراف و زیر نمونه مورد نظر از تراشه اصلی جدا می‌شود. (الف): نمای بالا به پایین هندسه فرآیند سایش. (ب): نمای سطح مقطعی از هندسه فرآیند سایش و رویه بریدن و برداشتن نمونه مورد نظر [۲].



شکل (۱۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از برش نمونه TEM با FIB [۲].

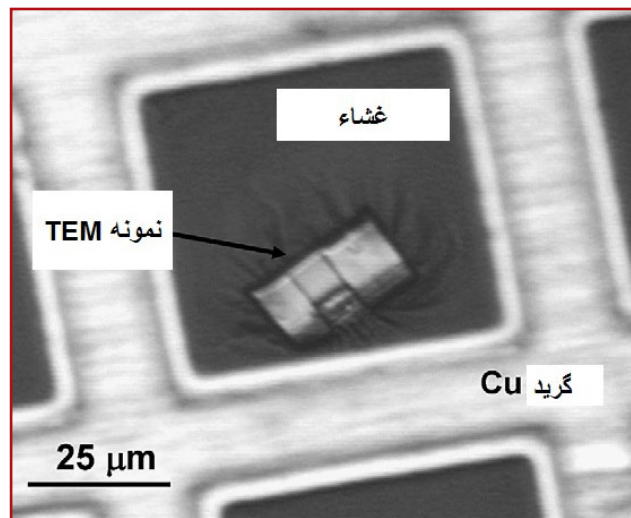
سخت‌ترین بخش روش بلند کردن و بالا آوردن، انتقال

عملیات نازک‌سازی نهایی آن انجام شود، آنگاه ضخامت لایه صدمه/آسیب به ۱۸ nm و در صورت انجام عملیات ذکر شده نهایی با انرژی ۵ KeV نیز ضخامت لایه مربوطه به ۱۰ nm تقلیل می‌یابد. روش‌های کنترل کردن آرتیفکت/ناخالصی‌های FIB ایجاد شده در طول مرحله آماده‌سازی نمونه در قسمت ذیل شرح داده شده‌اند.

### ● صدمه/آسیب یون به سطح رویی

به‌منظور جلوگیری از وقوع صدمه/آسیب به سطح رویی و ایجاد «اثر پرده‌ای»، لایه‌ای نازک از جنس پلاتینیوم یا دیگر فلزات برای ایجاد سطح مسطح و کاهش میزان گرد کردن بالای نمونه پیش از شروع هر گونه عملیات سایش با استفاده از ابزار FIB روی منطقه و ناحیه مورد نظر رسوب داده می‌شود. رسوبدهی فلز مورد نظر مکان‌نگاری نمونه را که احتمالاً منجر به حصول نتایج ناهموار از فرآیند سایش شده را مسطح نموده و یک لایه قربانی ایجاد می‌کند. به‌طور معمول، صدمه/آسیب سطح رویی به دلیل کاشت زودهنگام یون‌های پلاتینیوم در مرحله رسوبدهی/لایه‌نشانی رخ می‌دهد. در طول مراحل نهایی نازک‌سازی، پرتو یونی به جای تاثیرگذاری روی ناحیه مورد نظر، مقداری از فلز قربانی را حذف می‌کند. در صورت عدم استفاده از لایه قربانی، یون‌های گالیم مورد استفاده برای فرآیند سایش، صدمه و آسیب بسیار بیشتری به سطح مورد نظر وارد می‌کند. اگر برش نازک مربوطه با پرتو یونی در زاویه‌ای بیش از چند درجه موازی با سطح مورد نظر پوشش شده یا حتی اگر از برش مذکور با استفاده از پرتو یونی تصویربرداری شود، آنگاه به سطح مورد نظر صدمه/آسیب وارد می‌شود. چنین صدمه/آسیبی به سطح مورد نظر، منجر به آمورف شدن سطح نمونه شده که همین امر موجب ایجاد اختلال در فرآیند تصویربرداری با قدرت تفکیک‌پذیری بالا می‌شود. در شرایط وقوع صدمه/آسیب بسیار شدید، هر چقدر سطح برش نازک مورد نظر، مدت زمان بیشتری در موقعیت خارج از محور موازی تعیین شده در معرض پرتو یونی قرار گیرد، آرتیفکت‌ها/نقایص نابهنجار بیشتری پدیدار می‌شوند. لزلی<sup>۵۲</sup> و همکاران اثر صدمه/آسیب پرتو با زاویه‌های انحراف مختلف را از طریق ثبت الگوهای پراش الکترونی ناحیه منتخب به‌دست آمده از چندین نمونه Si آماده‌سازی شده در شرایط یکسان با اعمال فرآیند سایش نهایی اجرا شده در زوایای پرتو فرودی مختلف بررسی کرده‌اند. آنها به این نتیجه دست یافته‌اند که زاویه انحراف  $\pm 2^\circ$  درجه از موقعیت عمودی، بهینه‌ترین شرایط را برای عاری بودن نمونه از تغییر فاز/آمورف شدن فراهم می‌آورد. با توجه به عمق ویژگی‌ها و ناحیه مورد نظر، این امکان وجود دارد که صدمه/آسیب وارد شده بر سطح نمونه از اهمیت

داشت. این روش با عنوان «بلند کردن و بالا آوردن درجا/بهنگام» شناخته شده و مزیت آن در برابر روش بلند کردن و بالا آوردن معمولی این است که حتی پس از بررسی نمونه در TEM می‌توان آن را از روی گرید به FIB برگرداند و دوباره عملیات نازک‌سازی را روی آن اعمال نمود. تنها تفاوت این دو روش در این زمینه است که در روش بلند کردن و بالا آوردن درجا/بهنگام برش به نسبت نازک شده به‌صورت درجا/بهنگام درون FIB بلند شده و با استفاده از رسوبدهی/لایه‌نشانی Pt روی گرید TEM قرار می‌گیرد. برش بلند شده که روی گرید قرار می‌گیرد، برای حصول ضخامت مناسب به‌منظور عبور الکترون، با استفاده از FIB نازک‌تر می‌شود.



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپ نوری از برش حاصل شده از روش بلند کردن و بالا آوردن قرار گرفته روی گرید با پوشش غشاء کربنی آماده برای تحلیل درون TEM [۲].

### آرتیفکت‌های عملیات نازک‌سازی FIB

تاثیر یون بر سطح نمونه تنها منجر به انجام عملیات سایش FIB نشده بلکه باعث شکل‌گیری یک لایه آسیب دیده نیز می‌شود. صدمه حاصل شده در صورت استفاده از یون‌های گالیم ۵ KeV تا ۵۰ KeV شامل کاشت یون‌های گالیم، آمورف‌سازی ساختارهای بلورین، ترکیب مؤلفه‌ها و از بین رفتن جزئیات ظریف ساختار مورد نظر می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های گوناگون، این نتیجه حاصل شد که این نوع از صدمات در قالب لایه‌ای نازک در سطح نمونه ظاهر می‌شوند. ضخامت این لایه صدمه/آسیب دیده به زاویه برخورد پرتو و انرژی یون بستگی دارد. مشاهده شده که عملیات آماده‌سازی نمونه TEM با سایش FIB در صورت به کارگیری انرژی ۳۰ KeV قادر است لایه صدمه/آسیب دیده‌ای با ضخامت ۴۰ nm را ایجاد نماید. از طرف دیگر، اگر برش حجیم و بزرگی از نمونه با انرژی ۳۰ KeV جدا شده و سپس با انرژی ۱۰ KeV

کندوپاشی گالیم برقرار می‌شود. ایشیتا<sup>۵۳</sup> و همکاران [۲۷] هنگام فرآیند کندوپاشی حالت پایدار نگهداشت یونی را مدل‌سازی نموده و همبستگی خوبی را بین مدل خود و نتایج آزمایشی تجربی گزارش کردند. آنها برای تعیین غلظت/تراکم گالیم در سطح مقاطع مورد نظر از تحلیل EDX استفاده کردند. با به کارگیری فرض تعبیه شدن گالیم درون ۱۰ نانومتر ابتدایی از دیواره‌های جانبی/کناری، مؤلفان مذکور غلظت گالیم درون لایه‌های تنگستنی و سیلیکونی (با توجه به انجام فرآیند نازک‌سازی با پرتو یونی ۳۰ KeV) را به ترتیب برابر با ۴ و ۹ درصد درون لایه‌های مورد نظر برآورد کردند. لنگفورد<sup>۵۴</sup> و همکاران [۲۸] تاثیر شرایط مختلف سایش با پرتو یونی بر غلظت گالیم حالت پایدار تعبیه شده درون نمونه‌های سطح مقطعی سیلیکون را بررسی نمودند. آنها گزارش کردند که گالیم نمونه‌های سطح مقطعی سیلیکونی ساییده شده با استفاده از پرتو یونی ۵ KeV در حدود ۲/۵ برابر کمتر از نمونه‌های سطح مقطعی سیلیکونی ساییده شده با پرتو یونی ۳۰ KeV است. در عین حال، نمونه‌های ذکر شده ساییده شده با زدایش/لایه‌برداری با استفاده از گاز ید<sup>۵۵</sup> با پرتوهای یونی ۵ KeV و ۳۰ KeV در مقایسه با نمونه‌های هم‌تای ساییده شده خود با استفاده از پرتو یونی ۳۰ KeV به ترتیب حاوی ۲/۷ و ۳ برابر کمتری هستند. بسیاری از محققان درباره عمق صدمات به دیواره‌های جانبی نمونه‌های سطح مقطعی تحقیق‌های جامعی انجام داده‌اند. در این راستا، کاهش شکل‌گیری لایه آمورف درون دیواره جانبی سیلیکون در صورت به کارگیری انرژی‌های یون برابر با ۳۰ KeV، ۵ KeV و KeV ۲ گزارش شده که در این موارد، صدمه دیواره جانبی مورد نظر به ترتیب برابر است با: ۲۲ nm ~، ۲/۵ nm ~ و ۱/۵-۰/۵ nm ~.

کاتو<sup>۵۶</sup> و همکاران [۲۹] عمق صدمات وارد شده به سیلیکون بلوری با استفاده از فرآیند سایش را با پرتو گالیم ۳۰ KeV بررسی نموده و لایه آمورفی تقریباً برابر با ۲۰ nm به‌دست آورده و گزارش کردند که ضخامت مورد نظر در محدوده ۱۰۰ pA - ۵۰۰ pA از جریان پرتو به کار برده شده مستقل است. واکر<sup>۵۷</sup> و همکاران [۳۰]، با استفاده از تحلیل پراش میزان گزارش کردند که در صورت به کارگیری پرتو گالیم ۳۰ KeV، صدمه آمورف شدن در گالیم آرسناید کمتر از ۸ nm خواهد بود. روش‌های بسیاری نظیر کاهش انرژی پرتو یونی تابیده شده، استفاده از سایش پرتو یونی پهن<sup>۵۸</sup> برای پاک‌سازی نمونه‌های سطح مقطعی آماده شده با FIB و همچنین به کارگیری GAE برای کاهش ضخامت لایه آسیب/صدمه دیده مورد نظر توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های FIB تجاری کنونی، اپتیک یونی برای انجام فعالیت در ۳۰-۲۰ KeV بهینه‌سازی شده‌است. اگر انرژی تابشی FIB

بالایی برخوردار نباشد. به‌طور معمول، ناحیه مورد نظر به‌عنوان لایه‌ای که ۳۰ nm الی ۶۰ nm از سطح رویی نمونه کلی فاصله داشته، انتخاب می‌شود. اما اگر نواحی مورد نظر به سطح نزدیک باشند، آنگاه حتی رسوبدهی لایه محافظتی پلاتینیوم نیز منجر به وقوع آرتیفکت‌های غیرقابل قبول خواهد شد. البته استفاده از فرآیند رسوبدهی انرژی پایین پلاتینیوم (۵ KeV) به احتمال زیاد از میزان صدمه/آسیب می‌کاهد. در این شرایط، برای محافظت از نمونه در طول فرآیند رسوبدهی، لایه فلزی ضخیم‌تر با استفاده از پرتو یونی با انرژی کامل که در مراحل بعدی اعمال شده، بهتر است ابتدا لایه‌ای نازک از پلاتینیوم را در حالت اعمال پرتو الکترونی رسوب داد. از طرف دیگر، می‌توان لایه‌ای نازک از طلا یا کربن را پیش از وارد کردن نمونه مورد نظر درون سیستم FIB روی سطح آن نمونه رسوبدهی کرد. پس از آن، این لایه از نمونه در برابر فرآیند رسوبدهی القاء شده توسط پرتو یونی محافظت می‌کند. یکی از مشکلات دیگر در قالب رسوبدهی مجدد لایه آمورف زمانی رخ می‌دهد که منطقه‌ای نزدیک به برش نازک مورد نظر ساییده شده باشد. می‌توان با عدم انجام هرگونه فرآیند سایش نزدیکی ناحیه برش نازک مورد نظر پس از نمایان شدن آن به‌عنوان سطح رویی نهایی یا انجام فرآیند سایش تمیزکاری از وقوع این مشکل جلوگیری به عمل آورد. لازم به ذکر است که نمونه‌های آماده شده با فرآیند سایش سیستم FIB گوه شکل است، بدین معنی که بالای آنها باریک و پایین آنها عریض‌تر است. در صورت نیاز به حصول ضخامت یکسان در کل نمونه، می‌توان از ترکیب فرآیند سایش قسمت جلویی و پشتی نمونه مذکور در مرحله نهایی با منحرف ساختن مناسب پایه نگهدارنده نمونه و به کارگیری جریان پرتو پایین استفاده نمود.

### ● آسیب/صدمه دیواره جانبی

احتمال وارد آمدن آسیب/صدمه به دیواره‌های جانبی نمونه‌ها نیز وجود دارد. البته به دلیل تابیده شدن پرتو/اشعه با زاویه خراش پایین، آسیب وارده به دیواره‌های جانبی کمتر از آسیب مربوط به سطح است. اما به هر صورت، آسیب/صدمه دیدن دیواره‌های جانبی روی کل نمونه تاثیر می‌گذارد. برای جلوگیری از وقوع چنین آسیبی می‌توان انجام مرحله بازرسی و بررسی نمونه با حالت تصویربرداری پرتو یونی پس از اجرای مرحله آخر نازک‌سازی و عملیات پاک‌سازی/تمیزکاری را حذف کرد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور به حداقل رسانیدن چنین آسیبی، نمونه نهایی را با پرتو الکترونی بازرسی کرد. در طول مرحله نازک‌سازی سطح مقطع نمونه TEM شرایطی با عنوان حالت پایدار کندوپاشی پدیدار شده که در آن توازنی میان نرخ فرآیند کاشت گالیم با نرخ

BIB بر نمونه‌های سطح مقطعی سیلیکون آماده شده برای TEM توسط دستگاه FIB را مورد بررسی قرار دادند. مزیت‌های فرآیند سایش BIB در مقایسه با سیستم‌های FIB، نخست فعال نمودن انرژی‌های فرودی کمتر و دوم حصول زوایای سایش کوچکتری است. کاتو و همکاران [۲۹] گزارش دادند که سایش BIB سطح مقاطع سیلیکونی آماده شده توسط سیستم FIB با به کارگیری پرتو ۴ KeV در زاویه ۴۰° منجر به حصول صدمه‌ای ۸ نانومتری در دیواره‌های جانبی می‌شود. لنگفورد و همکاران رویه‌های را پیشنهاد کردند که در آن، هر دو طرف نمونه‌های سطح مقطعی با استفاده از روش بلند کردن و بالا آوردن آماده‌سازی شده و سپس با BIB می‌توان آنها را سایید. در این رویه، ابتدا یک طرف نمونه سطح مقطعی ساییده شده و سپس با استفاده از یک سوزن و یک بازوی مکانیکی ریز، نمونه مذکور را برگردانده و طرف دیگر آن را سایید. آنها در این رویه موفق شدند هم از گریدهای مسی و هم از گریدهای سیلیکونی استفاده کنند. علاوه بر کاهش یافتن ضخامت لایه صدمه دیده در دیواره‌های جانبی، یکی دیگر از مزیت‌های اجرای سایش BIB برای نمونه‌های سطح مقطعی از پیش آماده شده با سیستم FIB این است که با به کارگیری نرخ‌های آهسته‌تر سایش، کنترل بیشتری بر تعیین ضخامت نهایی نمونه سطح مقطعی برای کاربر فراهم می‌آورد [۲].

تنها به چند KeV کاهش یابد، آنگاه قدرت تفکیک پذیری فرآیند تصویربرداری نیز به دلیل افزایش به وقوع پیوسته در اندازه نقطه و کاهش در نسبت سیگنال به نویز تقلیل خواهد یافت. در نتیجه این امر، ساییدن سطح مقطع با استفاده از زاویه‌های برخورد کم عمق دشوار می‌شود. کاتو و همکاران [۲۹] گزارش کردند که در صورت منحرف شدن سطح مقاطع سیلیکونی به اندازه ۱۰ درجه و سپس ساییدن آنها با استفاده از FIB با انرژی ۵ KeV، آنگاه ضخامت لایه آمورف در دیواره‌های جانبی برابر با ۱۰ nm خواهد بود. در روش GAE منطقه در حال ساییده شدن در معرض گاز واکنش‌پذیر نیز قرار می‌گیرد. در این صورت، نرخ زدایش افزایش یافته از فرآیند رسوب‌دهی مجدد مواد، کاسته شده، تعداد نقایص بلور کاهش یافته و میزان گالیم استفاده شده برای نمونه نیز تقلیل می‌یابد. سوگیموتو<sup>۵۹</sup> و همکاران به منظور کاهش صدمه در نمونه‌های GaAs خود، GAE کلرین/کلر را به کار بردند، در حالی که یاماگوچی و همکاران به منظور بهینه‌سازی نمونه‌های سطح مقطعی InP خود برای HREM از GAE آلوداین/ید استفاده کردند. یاماگوچی<sup>۶۰</sup> و همکاران گزارش نمودند که استفاده از GAE ضخامت لایه صدمه را از ۳۱ nm به ۲ nm الی ۵ nm کاهش داده و همچنین از به وجود آمدن آرتیفکت‌های FIB که قادر به شکل‌دهی ریزبلورها بوده نیز جلوگیری به عمل می‌آورد. کاتو و همکاران و همچنین لنگفورد و همکاران اثر انجام فرآیند سایش

## نتیجه‌گیری

میکروسکوپ الکترونی عبوری به منظور تعیین ویژگی‌های دستگاهها و قطعات با اندازه زیر نانومتر به ابزاری ضروری برای تشخیص و آشکارسازی نقایص، سنج‌شناسی و تحلیل مواد در صنعت نیمه‌هادی تبدیل شده است. سایش FIB به دلیل قابلیت مطلوب آن در زمینه آماده‌سازی منطقه‌ای معین از نمونه برای تحلیل در TEM، روشی محبوب میان محققان این حوزه است. صدمه وارد شده با روش FIB به نمونه را می‌توان از طریق به کارگیری فرآیند سایش با انرژی پایین در مرحله نهایی روند آماده‌سازی نمونه TEM کنترل نمود. پس از تحقیقات فراوان دانشمندان به این نتیجه رسیدند که می‌توان لایه‌های نازک (اکسید گیت، ضخامت فیلم/غشاء K-بالا، لایه سطحی) را با استفاده از HRTEM با دقت بسیار مطلوب اندازه‌گیری کرد اما هنوز باید بر چالش‌هایی همانند ضخامت نمونه، نمونه‌های عاری از آسیب پرتو یونی و مقطع برداری دقیق از نمونه برای نمونه‌هایی که منطقه معینی از آنها مد نظر بوده، غلبه نمود. تحلیل فاز و ریخت‌شناسی نمونه‌های صنعت مذکور را می‌توان با دستگاه TEM مرسوم (میدان روشن، میدان تاریک و پراش الکترونی ناحیه گزینشی)، CBED و FFT دستگاه HRTEM انجام داد. مزیت اصلی تصویربرداری STEM با استفاده از کنتراست Z تشخیص کوچکترین نقایصی است که شناسایی آنها با روش‌های مرسوم تصویربرداری نظیر تصویربرداری فاز-کنتراست و الگوی پراش دشوار است. به دلیل اینکه همواره ساختار قطعات و دستگاه‌های صنعت نیمه‌هادی در حال کوچک و پیچیده‌تر شدن هستند، لذا تحلیل و تشخیص نقایص آنها در بیشتر موارد تنها با استفاده از روش‌های مختلف TEM امکان‌پذیر است. به همین منظور، غلبه بر چالش‌های موجود در رابطه با آماده‌سازی و تصویربرداری از نمونه‌های نیمه‌هادی با استفاده از TEM از اهمیت بالایی برخوردار است.

1. Transmission Electron Microscope (TEM)
2. Gallium
3. Gate
4. Dielectrics
5. kappa
6. Polycrystalline Silicon
7. Gate Oxide
8. Tantalum
9. Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)
10. Scanning Electron Microscopy (SEM)
11. Focused Ion Beam (FIB)
12. Integrated Circuit (IC)
13. Silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>)
14. The metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET)
15. Silicon oxynitride (SiON)
16. High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM)
17. Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)
18. Wafer
19. Convergent Beam Electron Diffraction (CBED)
20. Fast Fourier Transform (FFT)
21. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
22. Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS)
23. Selected Area Electron Diffraction (SAED)
24. Titanium nitride
25. Amorphous layers
26. Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM)
27. Cathode Ray Tube (CRT)
28. Bright Field (BF)
29. Annular Dark Field (ADF)
30. High Angle Annular Dark Field (HAADF)
31. Energy Filtered TEM (EFTEM)
32. Stegmann
33. Emitter–Base
34. Argon
35. Region Of Interest (ROI)
36. Young
37. Morris
38. Kirk
39. Schraub
40. Rai
41. Overwijk
42. Herlinger
43. Giannuzi
44. Anderson
45. Klepeis
46. Subramanian
47. Stevie
49. Nickel (Ni)
50. Molybdenum (Mo)
51. Acetone
52. Slide
53. Leslie
54. Ishita
55. Langford
56. Gas Assisted Etching (GAE)
57. Kato
58. Walker
60. Broad Ion Beam (BIB)
61. Sugimoto
62. Yamaguchi



- [1] Transmission electron microscopy for the semi-conductor industry, by: Hong Zhang. February 2002. *Micron* 33(6):515-21.
- [2] Role of transmission electron microscopy in the semiconductor industry for process development and failure analysis, by: Raghav S. Rai, Swaminathan Subramanian. September 2009. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* 55(3-4):63-97.
- [3] R. Brydson, *Electron Energy Loss Spectroscopy*. Taylor & Francis, 2001.
- [4] H. Stegmann, H.-J. Engelmann, E. Zschech, *Microscopy and Microanalysis* 9 (Suppl. 3) (2003) 270.
- [5] W.D. Rau, P. Schwander, F.H. Baumann, W. Hoppner, A. Ourmazd, *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999) 2614.
- [6] W.D. Rau, P. Schwadner, A. Ourmazd, *Phys. Stat. Sol. B222* (2000) 213.
- [7] M.G.Han, P. Fejes, Q.Xie, S.Bagchi, B.Taylor, J.Conner, M.R.McCartney, *IEEE Trans. Electron Dev.* 54 (2007) 3336.
- [8] U. Muehle, A. Lenk, M. Lehmann and H. Lichte, *Proceedings of the 28th International symposium for Testing and Failure Analysis* (2002) 39.
- [9] K. Vogel, A. Lenk, H. Lichte, H.J. Engelmann, U. Muhle, B. Breitag, *Microscopy and Microanalysis* 9 (Suppl. 3) (2003) 240.
- [10] Assessing the performance of two-dimensional dopant profiling techniques, by: Natasja Duhayon, P. Eyben, Marc Fouchier, and Trudo Clarysse. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 22, 385 (2004).
- [11] Direct Depth- and Lateral- Imaging of Nanoscale Magnets Generated by Ion Impact, by: Falk Röder, Gregor Hlawacek, Sebastian Wintz, René Hübner, Lothar Bischoff, Hannes Lichte, Kay Potzger, Jürgen Lindner, Jürgen Fassbender & Rantej Bali. *Scientific Reports* volume 5, Article number: 16786 (2015).
- [12] R. Anderson, *Proceedings of the 49th Annual Meeting of Electron Microscopy Society of America*, edited by G.W. Bailey and E.L Hall, San Francisco Press, California (1991) 828.
- [13] H. Oppolzer, *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 76, Sect. 11* (1985) 461.
- [14] S.J. Klepeis, J.P. Benedict, R.M. Anderson, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 5 (1987) 179.
- [15] J. Szot, D. Yong, A. Bourdillon, K.E. Easterling, *Phil. Mag. Lett.* 55 (1987) 109.
- [16] R.J. Young, E.C.G. Kirk, D.A. Williams, H. Ahmed, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (1990) 271.
- [17] S. Morris, S. Tatti, E. Black, N. Dickson, H. Mendez, B. Schwiesow, and R. Pyle, *Proceedings of the 17th International Symposium for Testing and Failure Analysis* (1991) 417.
- [18] E.C.G. Kirk, D.A. Williams, and H. Ahmed, *Inst Phys. Conf. Ser. No. 100 Section 7* (1989) 501.
- [19] D.M. Schraub, R.S. Rai, *Prog. Cryst. Growth Character. Mater.* 36 (1998) 99.
- [20] M.H.F. Overwijk, F.C. Van den Henvel, C.W.T. Bulle-Lieuwma, *J. Vac. Sci Technol. B11* (1993) 2021.
- [21] L.R. Herlinger, S. Chevachorenkul, D.C. Erwin, *Proceedings of the 22nd International Symposium for Testing and Failure Analysis* (1996) 199.
- [22] L.A. Giannuzzi, L.L. Drown, S.R. Brown, R.B. Irwin, F.A. Stevie, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 480 (1997) 19.
- [23] R. Anderson, S.J. Klepeis, *Specimen Preparation for Transmission Electron Microscopy of Materials IV*, vol. 480, Materials Research Society, Pittsburgh, 1997, 187.
- [24] S. Subramanian, P. Schani, E. Widener, J. Moss and V. Soorholtz, *Proceedings of the 24th International symposium for Testing and Failure Analysis* (1998) 131.
- [25] F.A. Stevie, R.B. Irvin, T.L. Shofner, S.R. Brown, J.L. Drown and L.A. Giannuzzi *Characterization and Metrology for ULSI Technology: 1998 Conference*, editors: Seiler et al., AIP (1998) 868.
- [26] R. Rai, S. Subramanian, S. Rose, J. Conner, P. Schani, and J. Moss, *Proceedings of the 26th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, (2000) 415.
- [27] T. Ishitani, H. Koike, T. Yaguchi, T. Kamino, *J. Vac. Sci. Technol. B16* (1998) 1907.
- [28] R.M. Langford and A.K. Petford-Long, *Proceedings of the 12th EUREM, Brno Czech Republic, July 9e14(2000)*.
- [29] N.I. Kato, N. Miura, N. Tsutsui, *J. Vac. Sci. Technol A16* (1998) 1127.
- [30] J.F. Walker, J.C. Reiner, and C. Solenthaler, *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 146* (1995) 473.

## Author

Sanaz Shobikheh<sup>1,2\*</sup>

\*researchers4u@yahoo.com

1. B.Sc. of Electronic Engineering, SHIRAZ University Transmission Electron Microscope laboratory Specialist
2. TEM Experts workgroup member



## Utilization of Transmission Electron Microscopy for development, analysis, and failure detection in semiconductor industry

Abstract

In recent years, advanced technologies were applied to semiconductor industry and as a result the size of its features is scaling down drastically. In order to improve its devices performance, this industry needs to keep reducing the size of the parts that it manufactures even more. Meanwhile transmission electron microscopy (TEM) plays an important part in development, manufacturing and fault analysis of the semiconductor industry devices. After witnessing recent advances in TEM field in respect to preparing and imaging of semiconductor specimens, we can no longer limit the utilization of TEM in just academic fields and should apply TEM techniques to thoroughly assess and analyze semiconductor faults that cannot be revealed or examined by any other available methods. TEM techniques not only provide the superior spatial resolution in comparison to other advanced methods, but they also offer ultra-sensitive elemental analysis ability to characterize sub-nanometer materials in semiconductor industry. In this field TEM can be used for applications such as: examining semiconducting devices defects, evaluating surface and interfacial features, identifying device dimensions, and etc. in this article, different types of techniques for semiconductor specimen preparation, analyzing and imaging using TEM have been presented.

## Keywords

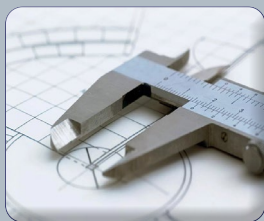
Transmission electron microscope; Semiconductor; Elemental analysis; Specimen preparation.



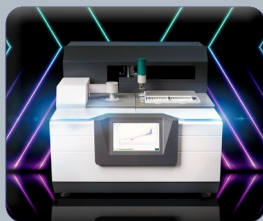
## Utilization of Transmission Electron Microscopy for development, analysis, and failure detection in semiconductor industry



Uncertainty in the sampling process



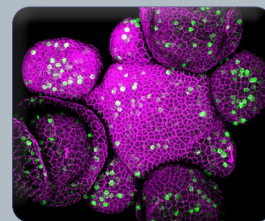
Determining and evaluating sources of uncertainty in the Charpy impact test



Determining the purity of materials using a differential calorimetry device



Determination of modulus of elasticity based on plate load test (PLT) results – case study



Fluorophores for Confocal Microscopy (part 2)