

نویسندگان

آیدا اعظمی^{۱*}داود قرایلو^۲

AidaAzami20@yahoo.com

مروری بر روش‌های آماده‌سازی نمونه‌های TEM

[بخش دوم]



چکیده

در بخش اول این مقاله، روش‌های آماده‌سازی برای نمونه‌های فلزات و آلیاژها و همچنین پوشش‌های چندلایه‌ای به‌منظور تصویربرداری TEM ارائه شد. در بخش دوم این مقاله، به‌طور اجمالی روش‌های آماده‌سازی نمونه TEM سایت خاص^۴ با استفاده از فرز با پرتو یون متمرکز^۵ نیز ارائه می‌شود. آماده‌سازی نمونه شامل نازک‌کاری نمونه به ضخامت گذرا در برابر الکترون است که این کار موجب دیده شدن ساختارهای غیرواقعی یا آرتیفکت^۶ در نمونه می‌شود که به‌طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی

TEM، آماده‌سازی نمونه، فویل‌های TEM، الکتروپولیشینگ^۷، فریز یونی، FIB، آرتیفکت.

مقدمه

آماده‌سازی نمونه‌ها در تصویربرداری TEM از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل گردآوری روش‌های مختلف آماده‌سازی نمونه‌ها ضروری است. در بخش اول این مقاله به بررسی روش‌های آماده‌سازی نمونه‌های فلزی، آلیاژها و پوشش‌ها پرداخته شد. در بخش دوم، روش‌های آماده‌سازی نمونه‌های TEM برای مواد مختلف نظیر نانومواد؛ ریبون‌ها (نوارها)؛ پودرهای آسیاب شده مکانیکی (بند ۱)؛ کامپوزیت‌ها (بند ۲)؛ مواد متفرقه از جمله مواد شکننده و آماده‌سازی نمونه TEM سایت خاص (بند ۳) با مثال‌های گویا توضیح داده می‌شود. آماده‌سازی نمونه TEM به فرآیندی گفته می‌شود که نمونه در آن به قدری نازک می‌گردد که عبور الکترون از آن امکان‌پذیر باشد. از این رو، این کار باعث ایجاد آرتیفکت‌های احتمالی می‌شود که برخی از آنها در بند (۴) شرح داده شده‌است.

فیلتر و زیر لامپ مادون قرمز، خشک می‌شود. این کار را تا جایی که مجموعه رضایت‌بخشی به دست آید، می‌توان تکرار کرد.

○ نانوذرات با خاصیت مغناطیسی

آماده‌سازی نمونه‌های TEM از پودرهای مغناطیسی بنا به دلایل زیر بسیار دشوار است. اول این که ذرات مغناطیسی به صورت توده‌ای هستند. آنها را می‌توان در یک محلول با امواج فراصوت غوطه‌ور کرد. با این حال به محض این که امواج قطع شود به آسانی متراکم می‌شوند. این انباشتگی برای تحقیقات TEM نامناسب است. دوم این که برای مطالعات میکروساختار، نمونه میان قطعات قطب‌های لنز شیئی TEM قرار می‌گیرد. لنزهای الکترومغناطیس از مواد الکترومغناطیسی نرم ساخته شده‌اند و جریان‌ات القایی بزرگی را حمل می‌کنند. در نتیجه، ذرات در اثر ورود به دستگاه مغناطیسی می‌شوند که این کار موجب اثرات زیر می‌گردد:

الف ذرات می‌توانند توسط لنزها جذب شوند؛

ب ذرات می‌توانند زیر پرتو الکترونی، جریان آهسته‌ای را نشان دهند، از این رو برای مطالعات با وضوح بالا مناسب نیستند؛

ج امکان دارد طی یک دوره زمانی، لنزها با ذرات آلوده شوند.

با توجه به دلایل ذکر شده، بنابراین بهتر است ذرات مغناطیسی پیش از تصویربرداری درون یک ماتریکس غوطه‌ور شوند.

آماده‌سازی نانوذرات دارای دو بخش است: رزین و هاردنر (سفت کننده). این مواد به نسبت ۱:۱۰ در یک پتری دیش و با استفاده از همزن مخلوط می‌شوند. این مخلوط زرد رنگ است. مقدار کمی از نمونه، در قالب پودر به آن اضافه و با خلال دندان کاملاً مخلوط

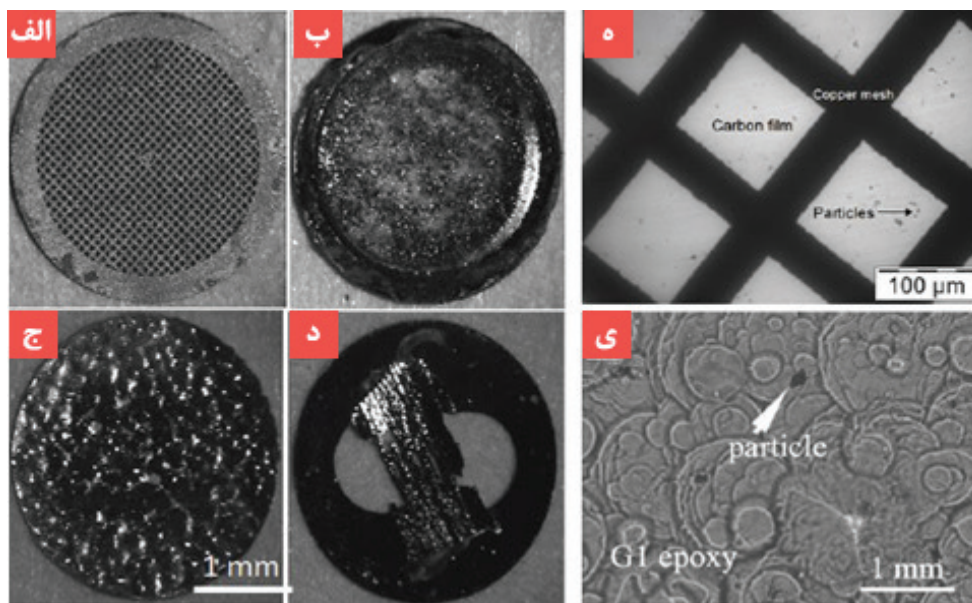
نانومواد

نانومواد اشاره به دسته‌ای از مواد دارد که دارای ذراتی با اندازه حدود ۱۰۰ نانومتر یا کمتر هستند. برخی از ساختارها و مواد شرح داده شده در بخش‌های قبلی، ممکن است در این مجموعه باشند. در این بخش، روش‌هایی برای آماده‌سازی نمونه‌هایی از قبیل نانولوله‌ها، نانوذرات، ریبون‌ها و پودرهای حاصل از فرز مکانیکی شرح داده شده‌است.

○ نانوذرات با طبیعت غیر مغناطیسی

نمونه (حاوی نانوذرات) در یک محلول با استفاده از امواج فراصوت به مدت ۵ دقیقه متفرق می‌شود. محلول مورد استفاده باید (الف) از نظر شیمیایی بی‌اثر باشد، (ب) نباید منجر به آگلومره شدن نانوذرات شود، (ج) نباید بقایای کربن بر جای گذارد و (د) باید در یک چارچوب زمانی مناسب (حدود ۱۰ تا ۲۰ دقیقه) و در دمای اتاق تبخیر شود.

روش ساده برای بررسی اینکه آیا محلول باقی‌مانده، کربن دارد یا نه این است که چند قطره از محلول را روی لام شیشه‌ای تمیز ریخته و بعد از تبخیر، اثر آن روی لام مشاهده شود؛ اگر لام شیشه‌ای شفاف نباشد، پس حلال مناسب نخواهد بود. هگزان یک محلول مناسب است؛ در صورت در دسترس نبودن، متانول را می‌توان امتحان کرد. ذرات معلق موجود روی گرید مسی به آرامی باید برداشته شود. برای این کار گرید دارای پوشش کربن (با اندازه مش ۲۰۰ یا ۳۰۰) (برای مثال، شکل (۱-الف)) یا گرید کربن هولی^۸، با استفاده از انبرک به آرامی درون محلول فرو برده می‌شود. گرید روی کاغذ



شکل ۱: (الف) تصاویر نوری نشان‌دهنده نمونه‌هایی از مواد نانوساختار قرار داده شده در گرید کربن پوشش‌دار (شکل (۱-ه) دارای بزرگنمایی بیشتر)، (ب) پودرهای مغناطیسی SmCoFe فرز شده مکانیکی که در اپوکسی G1 غوطه‌ور شده‌اند، (ج) نوارهای آزاد که در معرض فرآیند استحکام‌سازی سریع قرار گرفته‌است، (د) قطعه کوچک نوار متصل شده به گرید مسی شکاف‌دار، (ه) تصویر TEM نشان‌دهنده ذرات پودری روی گرید مسی حاوی فیلم نگهدارنده. (ی) تصویر نوری نشان‌دهنده ذرات پودری آهن که در اپوکسی G1 غوطه‌ور شده‌اند.

ملاحظه‌ای متفاوت است؛

ب برخی کامپوزیت‌ها دارای پوشش‌های عاملی بوده که از نقطه نظر کارایی چیزی بین تقویت‌کننده و ماتریکس هستند، نقطه تلاقی آنها می‌تواند برای مطالعه جالب باشد؛

ج سرامیک‌ها مقاومت الکتریکی بسیار بالایی از خود نشان می‌دهند، از این رو نمی‌توان آنها را الکتروپولیش کرد. بنابراین نازک‌سازی با پرتو یونی روشی مناسب خواهد بود.

آماده‌سازی دیسک‌های TEM از کامپوزیت‌ها بستگی به خواص مکانیکی آنها دارد. به احتمال زیاد کامپوزیت‌های ماتریکس فلزی دارای مقداری انعطاف‌پذیری هستند. اگر کامپوزیت شکننده باشد، دیسک‌ها را می‌توان بعد از سمباده‌کاری و سوراخ‌کاری با پرتو یونی آرگون، با استفاده از دیسک کاتر اولتراسونیک سوراخ کرد.

آماده‌سازی نمونه‌های ورقه‌ای از کامپوزیت‌ها دشوار است، چرا که آنها را نمی‌توان به شکل دیسک برش داد. همچنین، در زمان پولیش کردن به آسانی می‌شکنند. به عنوان مثال، برای نمونه کامپوزیت فیبر سرامیکی تقویت شده با ماتریکس سرامیک، قطعه کوچکی از نمونه را می‌توان در سیم مولیبدن شکاف‌دار نصب کرد و دیسک‌ها را می‌توان با استفاده از روش شرح داده شده برای مقاطع چند لایه در بند (۱-۳) بخش اول این مقاله آماده کرد.

مواد شکننده

برخی از مواد شکننده‌اند و در مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه، قطعه قطعه می‌شوند. ساماریوم کبالت از این دسته مواد است. نمونه‌های TEM این مواد را می‌توان با استفاده از روش شرح داده شده در بند (۱-۳) بخش اول این مقاله آماده کرد. در این مورد، یک قطعه کوچک مستطیلی با ابعاد $10 \times 3/5 \times 2/5$ میلی‌متر از نمونه با استفاده از اره الماسی با سرعت کم بریده می‌شود. در صورتی که جهت موردنظر روی ورقه وجود دارد، باید آن را در مرحله برش نمونه در نظر گرفت. با توجه به هندسه آماده‌سازی دیسک، نمونه باید در امتداد مسیر طولی برای شرایط چرخش صفر^۹ نمونه قرار گیرد. از این رو، طول قطعه مستطیل باید در امتداد جهت قابل مشاهده باشد.

نمونه‌های TEM سایت خاص با استفاده

از فرزکاری با پرتو یون متمرکز (FIB)

فواید زیادی در آماده‌سازی نمونه TEM از سایت خاص وجود دارد. برای مثال، بررسی یک منطقه خاص از یک مدار یکپارچه^{۱۰}، بررسی میکروساختار نوک ترک در آزمایش‌های شکستگی و فرسودگی و بررسی تغییر شکل در اطراف نانوندانه از جمله مواردی است که می‌توان از این روش برای آماده‌سازی نمونه‌های آن استفاده کرد. برای این مواد، FIB یک ابزار بسیار مناسبی خواهد بود. همچنین نمونه‌هایی را که دارای شکل سوزنی بوده و برای مطالعات توموگرافی معین مورد نیاز هستند را می‌توان با استفاده از FIB آماده کرد.

در FIB عادی، پرتو یونی گالیوم که از یک منبع یون فلزی

می‌شود. یک قطعه ورقه آلومینیومی (10×10 سانتی‌متر) روی هات‌پلیت قرار داده و وزنه‌های کوچکی در چهار طرف آن گذاشته می‌شود تا از تا خوردن و جمع شدن آن جلوگیری شود. سپس مخلوط اپوکسی روی آن ریخته می‌شود و با استفاده از یک خلال دندان به‌صورت لایه نازکی پخش می‌گردد. دمای هات‌پلیت 120 درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌شود و بعد از چند دقیقه، اپوکسی به صورت یک لایه جامد پایدار به رنگ قهوه‌ای شکل می‌گیرد. اتصال بین لایه اپوکسی و ورق آلومینیومی ضعیف است و به همین دلیل به راحتی کنده می‌شود. سپس لایه اپوکسی ایجاد شده، پرداخت می‌شود. با استفاده از پولیش مکانیکی، ضخامت آن به حدود 100 میکرومتر کاهش می‌یابد. سپس دیسک‌های TEM با استفاده از دستگاه دیسک‌پانچ سوراخ می‌شوند (شکل ۱-ب). دیسک‌ها زیر میکروسکوپ نوری در حالت عبوری مشاهده می‌شوند و یکی از آنها که دارای ذراتی نزدیک به بخش مرکزی است، انتخاب می‌گردد. چنین منطقه‌ای در دیسک، در شکل (۱-۱) نشان داده شده‌است. سپس دیسک با استفاده از پرتو یون آرگون در معرض سوراخ شدن از هر دو طرف قرار می‌گیرد تا اینکه ضخامت آن در بخش مرکزی به حدود 20 میکرون برسد.

نوارها

نوارها از طریق فرآیند استحکام‌سازی سریع و به‌طور کلی با ضخامت 50 میکرون آماده می‌شوند. دیسک‌های TEM با استفاده از دستگاه دیسک‌پانچ به‌دست می‌آیند. برای داشتن یک سطح صاف، دیسک‌ها پولیش می‌شوند و اگر دارای استحکام مکانیکی خوبی باشند، می‌توان آنها را مستقیماً در دست گرفت (شکل ۱-ج). اما اگر شکننده باشند، می‌توان نمونه را با اپوکسی ترکیب کرده، روی گرید سه میلی‌متری قرار داد (شکل ۱-د). در زمان اتصال، نباید اپوکسی در سطح نمونه پخش شود. نمونه‌ها را براساس هدایت الکتریکی آنها، یا می‌توان الکتروپولیش کرد و یا با پرتو یونی نازک کرد.

برای بررسی میکروساختار در سراسر ضخامت نوار، باید نمونه‌های TEM مقطعی آماده شوند. در این مورد، یک تکه کوچک از نوار (طول 10 و عرض $2/5$ میلی‌متر) را می‌توان به جای ساختار ساندویچی شرح داده شده در بند (۱-۳) بخش اول این مقاله استفاده کرد و نمونه‌های ورقه‌ای از سطح مقطع را می‌توان با استفاده از نازک‌سازی با یون آرگون آماده کرد.

کامپوزیت‌ها

یک کامپوزیت متشکل از یک ماتریکس همراه با تقویت‌کننده است. ماتریکس می‌تواند سرامیک یا پلیمر یا فلز/آلیاژ باشد. تقویت‌کننده‌ها می‌توانند فیبرها یا ذرات باشند. برخی از نمونه‌ها عبارتند از: کامپوزیت ذرات SiC تقویت شده با ماتریکس آلومینیوم و کامپوزیت الیاف سیلیکا تقویت شده با ماتریکس سیلیکا.

برای آماده‌سازی نمونه‌های TEM از کامپوزیت‌ها، استفاده از روش‌های الکتروپولیش به دلایل زیر دشوار است:

الف میزان اچ‌کردن ممکن است متفاوت باشد؛ به ویژه میزان نازک شدن نمونه در مقایسه با ماتریکس فلزی به‌طور قابل

کیلوولت) برای کاربر مناسب نباشد (به دلیل ابزار بصری). بنابراین، پاک کردن نمونه آماده شده با FIB در یک پیپس با یون‌های آرگون کم انرژی (۲-۱ کیلوولت، $\pm 0.3^\circ$ زاویه تفنگ، به مدت چند دقیقه) با استفاده از حالت مدولاسیون منفرد (فرز از کنار زیرلایه) گزینه خوبی به نظر می‌رسد (شکل ۳). در این حالت، امکان دارد نمونه به صورت عمود بر گرید مسی قرار گیرد (شکل ۲-ب).

اگرچه هر دو پرتو یونی و پرتو الکترونی برای تصویربرداری مورد استفاده قرار می‌گیرند اما پرتو یونی، سطح را کندوپاش می‌کند. بنابراین پرتو الکترونی ارجح بوده، عکس‌های فوری را با پرتو یونی هر زمان که لازم باشد می‌توان گرفت. همچنین، برای لایه پلاتین، در ابتدا پرتو الکترونی و پس از آن پرتو یونی پیشنهاد می‌شود (شکل ۳). اتصال دقیق لایه به گرید مسی با پلاتین نیز مهم است. در غیر این صورت لایه در طول زمان بررسی و پاک کردن آن در پیپس از بین می‌رود. در این زمینه، مطالعات ذیل مورد نیاز است:

الف مقدار نسبی پلاتین در لایه رسوب پلاتین به عنوان تابعی از انرژی پرتو الکترون برخوردی^{۱۴} و منبع الکترون (میدان گسیل‌ها در برابر گرمای یونی)؛

ب استحکام اتصال پلاتین در گرید مسی در موارد مربوطه.

نمونه‌های TEM و آرتیفکت‌ها

آماده‌سازی نمونه‌های TEM شامل آسیاب مکانیکی، الکتروپولیش کردن و یا نازک‌سازی با پرتو یونی است. در نتیجه آرتیفکت‌هایی در مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه ایجاد می‌شود. آرتیفکت‌های گزارش شده در آماده‌سازی نمونه‌های TEM توده‌ای، شیشه‌های فلزی [۲] و آسیب در آماده‌سازی FIB [۳-۵] پیش از این گزارش شده‌است. برخی از آرتیفکت‌های رایج مشاهده شده به علت فرز یونی عبارتند از:

الف فرز ترجیحی (شکل ۴-الف)؛

ب تبدیل شدن لیه‌های نمونه از تبلور واحد به نانوتبلور به علت آسیب پرتو یونی (شکل ۴-ب)؛

ج رسوب مجدد؛ یعنی موارد پراکنده حاصل از نمونه به علت فرز با زاویه کم (۲ درجه)، مجدداً روی نمونه TEM رسوب می‌کند (شکل ۴-ج) در حالی که مواد پراکنده هولدر^{۱۵} مسی (نگه

مایع نشات می‌گیرد، استفاده می‌شود. پرتو، شتاب داده شده (تا ۳۰ کیلوولت) بر سطح نمونه تابیده می‌شود تا اینکه فرزکاری انجام شود [۱].

FIBهای مدرن دارای ستون پرتو دوگانه (هر دو پرتو الکترونی و یونی)، سیستم تزریق گاز^{۱۱} و یک امینوپروپ^{۱۲} (یا میکروکنترلر) هستند که می‌تواند برای تصویربرداری در حین برش دادن با پرتو یونی به لایه نازک و انتقال آن به گرید استفاده شود.

مراحل رایج آماده‌سازی نمونه‌های TEM عبارتند از:

الف شناسایی منطقه مورد نظر؛

ب شرایط آوردن نمونه به ارتفاع هم‌مرکز^{۱۳}؛

ج رسوب پلاتین روی این منطقه با استفاده از GIS (در ابتدا با استفاده از پرتو الکترون، سپس با پرتو یون گالیوم) به طول ۱۵ میکرون، پهنای ۲ میکرون و ضخامت ۰/۳ تا ۱ میکرون (ضخامت را می‌توان با زمان رسوب و زمان ماندگاری کنترل کرد)؛

د فرز یونی (با یون‌های گالیوم در ۳۰ کیلوولت) برای ایجاد یک لایه از طریق تشکیل یک حفره در مجاورت منطقه پوشش‌دار شده با پلاتین، با استفاده از حالت تمیز کردن مقطع عرضی استفاده می‌شود (شکل ۲-الف)؛

ه خارج کردن لایه با استفاده از یک امینوپروپ؛

ی انتقال لایه به گرید و جوشکاری آن با فلز پلاتین (شکل ۲-ب)؛

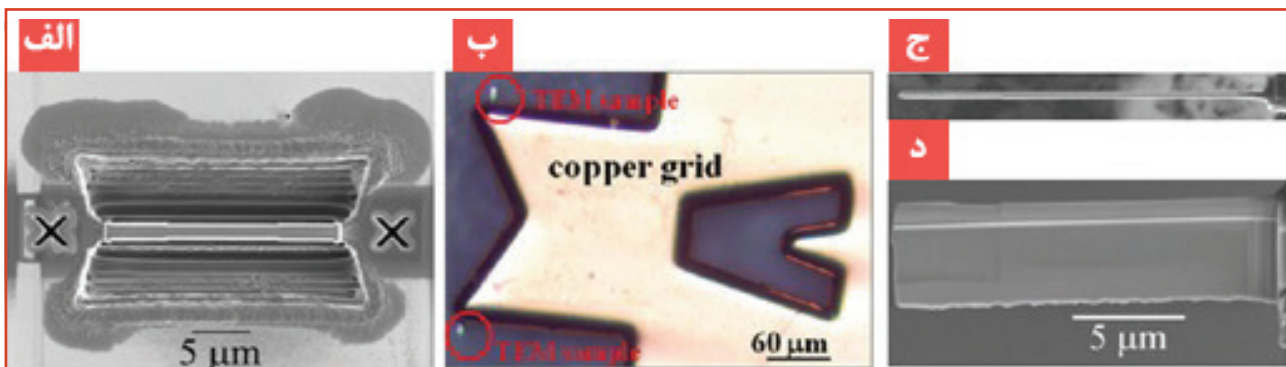
ز پاک کردن سطح نمونه با پرتو گالیوم کم انرژی (در ۵ کیلوولت یا کمتر) از طریق کج کردن سطح فرز شده نمونه حدود ۱ تا ۲ درجه نسبت به پرتو تا این‌که ضخامت نهایی لایه به حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر برسد.

FIB به آماده‌سازی سریع نمونه‌های TEM کمک می‌کند، با این حال توجه به موارد زیر ضروری است:

الف یون‌های گالیوم، سنگین‌تر (عدد اتمی ۷۰ Ga) و سطح انرژی بالاتری (حدود ۳۰ کیلوولت) نسبت به یون‌های آرگون دارند (عدد اتمی آرگون ۱۸ و انرژی آن حدود ۴-۵ کیلوولت یا پایین‌تر است)، بنابراین آسیب القایی شبکه در FIB بیشتر از پیپس خواهد بود؛

ب آرتیفکت‌ها می‌توانند ظاهر شوند (مانند اثرات قطرات یا مانع روی سطوح فرز شده)؛

ج ممکن است کار با پرتو یون گالیوم کم انرژی (حدود ۲-۱



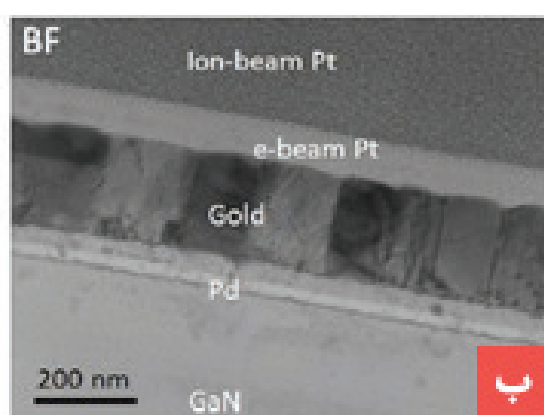
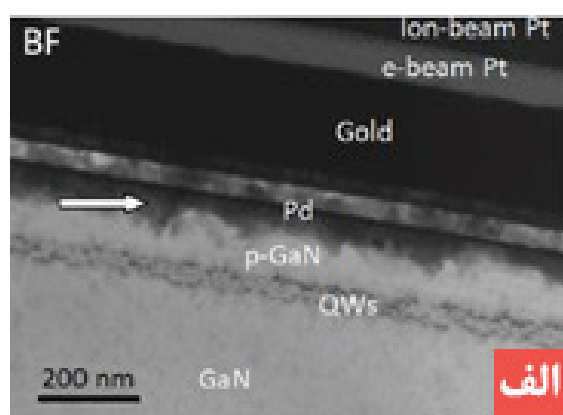
شکل ۲: آماده‌سازی نمونه‌های TEM: (الف) لایه نازک آماده شده با فرز یون گالیوم، (ب) لایه نازک پلاتین متصل به گرید TEM با استفاده از یک امینوپروپ بعد از لایه‌برداری، (ج) نمونه TEM در امتداد سطح مقطع، (د) تصویر سطحی (نمای مقطعی)

آرتیفکت‌های رایج مشاهده شده در الکتروپولیش مواد چند فاز، از اچ کردن نشات گرفته است. همچنین این کار منجر به ترسیب برخی باقی‌مانده از مواد پولیش شده نیز می‌شود. برای مثال، در شکل (۴-ه) میکروساختاری از یک نوار Ni-Fe-Al که با الکتروپولیش آماده شده، نشان داده شده است. این میکروساختار ویژگی‌های کروی شکل را نشان می‌دهد، با این حال این‌ها آرتیفکت هستند و پاک‌سازی با پرتو یونی به‌طور کامل آنها را حذف خواهد کرد.

برخی اوقات، ممکن است تشخیص آرتیفکت‌ها از میکروساختار واقعی مشکل باشد که در نانومواد این مشکل حادثتر است. در این حالت، می‌توان از نتایج آنالیزی دیگر ابزارها و روش‌ها استفاده کرد. همچنین، اطلاعات قبلی درباره این مواد ممکن است در شناسایی آرتیفکت‌ها کمک کند.

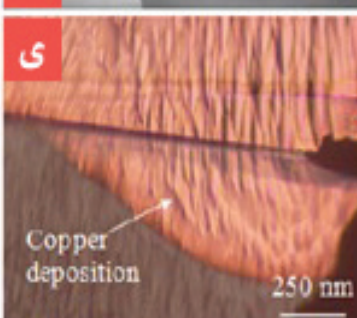
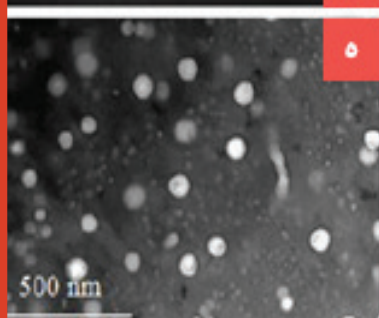
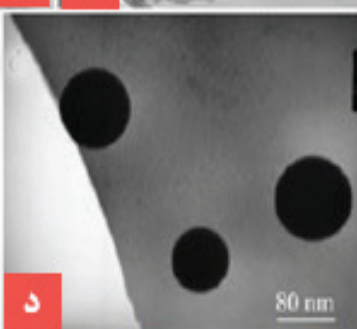
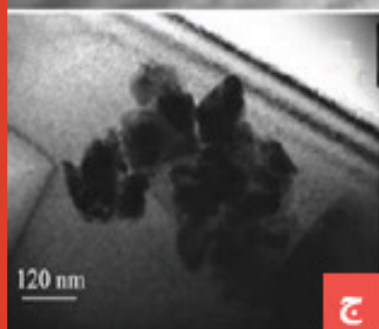
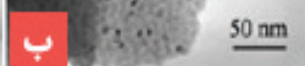
دارنده) روی نمونه TEM در شکل (۴-ی) رسوب می‌کند. فرز یونی می‌تواند باعث ایجاد گرما در محل فرز نمونه شود، از این رو اگر نمونه حساس به گرما باشد آرتیفکت‌ها ظاهر می‌شوند. به‌عنوان مثال، قطرات ایندیوم ناشی از فرز یونی InP که در شکل (۴-د) نشان داده شده است، تشکیل می‌شود که با به کارگیری یک مرحله نیتروژن مایع می‌توان مقدار آنها را کاهش داد.

ممکن است فرز یونی باعث صدمه به نمونه شود که به‌ویژه برای نمونه‌های هولوگرافی الکترونی نامطلوب است. آماده‌سازی می‌تواند به سطوح و برش‌های باقی‌مانده Ga (گالیوم) آسیب برساند که تا حدی می‌توان با تمیز کردن پلاسما [۴] و یا پولیش شیمیایی (برای مثال، یک لایه GaN آماده شده از طریق FIB در محلول پتاس تمیز می‌شود [۶]) برطرف کرد.



شکل ۳: (الف) میکروساختار، ساختار GaN LED

که با FIB و همچنین با استفاده از پرتو یونی گالیوم ۳۰ کیلوولت آماده شده است. سپس نمونه در یک پیپس به مدت ۳ دقیقه و در ۲ کیلوولت تمیز می‌شود که در تصویر (ب) نشان داده شده است. به تکمیل ویژگی‌های میکروساختار توجه نمایید؛ برای مثال، لایه پخش شده که با فلش در تصویر (الف) نشان داده شده است یک آرتیفکت بوده و بعد از این مرحله باید حذف شود. پرتو یونی، لایه پلاتین را تهنشین کرده است که در شکل نشان داده شده است. وجود کنتراست متفاوت به دلیل تراکم‌های متفاوت است.



شکل ۴: میکروگراف TEM BF

آرتیفکت‌هایی را نشان می‌دهند: (الف) خط‌های مشاهده شده در زاویه ۴۵ درجه به دلیل توقف چرخش نگهدارنده نمونه در زمان فرزکاری به‌وجود می‌آید. (ب) لایه‌های نمونه GaAs آسیب دیده با پرتو یونی را نشان می‌دهد. (ج) رسوب مجدد به دلیل زاویه پایین فرز، قطرات تشکیل شده در ایندیوم فسفات به دلیل فرز پرتو یونی در فرز دوگانه، (ه) آرتیفکت‌های کروی شکل تشکیل شده در دانه‌های Ni-Fe-Al به علت الکتروپولیش، که توده فرز پرتو یونی به مدت ۱۰ دقیقه حذف می‌شود (شکل نشان داده نشده) و (ی) رسوب مس در سطح مقطع نمونه TEM در طول زمان فرز یونی.

مراجع

- [1] <http://www.imec.be/efug/EFUG10.html>
- [2] Sun BB, Wang YB, Wen J, Hang H, Sui ML, Wang JQ, and Ma E. Scripta. Mat. 2005; 53(7): 805-809
- [3] Joachim Mayer, Lucille A. Giannuzzi, Takeo Kamino, and Joseph Michael, MRS Bulletin, 2007; 32: 400-407
- [4] Dong-Su Ko, Young Min Park, Sung-Dae Kim, and Young-Woon Kim, Ultramicroscopy, 2007; 107(4-5): 368-373
- [5] David Cooper, Robert Truche, Jean-Luc Rouviere, Ultramicroscopy, 2008(5); 108: 488-493
- [6] Jinschek JR, Radmilovic V, Kisielowski Ch, Microsc. Microanal. 10(Suppl.2), 2004; 1142-1143

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد شیمی، مرکز تحقیقات علوم کاربردی دارویی تبریز
۲. کارشناس ارشد فناوری‌نانو، آزمایشگاه فناوری‌نانو کفا
۳. عضو کارگروه تخصصی دستگاه‌های TEM شبکه آزمایشگاهی فناوری‌نانو
4. site-specific TEM specimen
5. focused ion beam (FIB)
6. artifacts
7. electropolishing
8. holey
9. zero-tilt conditions
10. (IC)integrated circuit
11. gas-injection systems (GIS)
12. Omni Probe
13. Eucentric
14. incident
15. holder