



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standard Organization



استاندارد ملی ایران

۱۶۵۲۳

چاپ اول

مرداد ۱۳۹۲

INSO

16523

1st. Edition

Aug.2013

فناوری نانو - راهنمای اثرهای ناخواسته
در تصویر مربوط به سوزن و روبش گر در
میکروسکوپی تونل زنی روبشی (STM) و
میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)

**Nanotechnology-Guide to scanner and tip
related artifacts in scanning tunneling
microscopy and atomic force microscopy**

ICS:17.040.20

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادات در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

" فناوری نانو- راهنمای اثرهای ناخواسته در تصویر مربوط به سوزن و روبش گر در میکروسکوپی
تونل زنی روبشی (STM) و میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM) "

رئیس:

میرکاظمی، سید محمد
(دکترای مهندسی مواد)

سمت و/یا نمایندگی

عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت

دبیر:

صادق حسنی، صدیقه
(کارشناس ارشد شیمی)

پژوهنده ارشد پژوهشگاه صنعت نفت

اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اسلامی پور، الهه
(کارشناس ارشد زیست شناسی)

کارشناس ستاد ویژه فناوری نانو

پوی پوی، حسن
(کارشناس ارشد شیمی)

کارشناس ستاد ویژه فناوری نانو
و دبیر کمیته فنی متناظر فناوری نانو

چوخاچی زاده مقدم، امین
(کارشناس ارشد نانومواد)

کارشناس ستاد ویژه فناوری نانو

خانلری، محمد رضا
(دکترای مواد)

عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام
خمینی (ره) قزوین

سیفی، مهوش
(کارشناس مدیریت دولتی)

نایب رئیس کمیته فنی متناظر فناوری نانو

عزیزی، روح الله
(کارشناس ارشد نانومواد)

کارشناس شرکت کفا

مرعشی، پیروز
(دکتری مهندسی مواد)

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مسروری، حسن
(دکترای شیمی)

عضو هیئت علمی پژوهشگاه سازمان ملی
استاندارد ایران

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ب	آشنایی با سازمان ملی استاندارد
ج	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
و	پیش گفتار
ز	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات، تعاریف و اختصارات
۲	۱-۳ اصطلاحات
۲	۱-۳-۱ اثرهای ناخواسته در تصویر
۲	۲-۱-۳ تصویر پستی و بلندی
۲	۱-۱-۳ سوزن
۳	۴-۱-۳ تیرک یا اهرم
۳	۵-۱-۳ روبش‌گر
۳	۶-۱-۳ زاویه روبش
۳	۷-۱-۳ تعیین کننده مشخصات سوزن
۳	۲-۳ اختصارات
۳	۲-۳ میکروسکوپ نیروی اتمی
۴	۲-۲-۳ میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی
۴	۴ اهمیت و کاربرد
۴	۵ اثرهای ناخواسته تصویر در STM و AFM
۴	۱-۵ اثرهای ناخواسته ناشی از حرکت روبش‌گر
۵	۱-۱-۵ غیرخطی بودن
۷	۲-۱-۵ حلقه پسماند
۷	۳-۱-۵ خزش
۹	۴-۱-۵ محدوده دینامیک
۹	۵-۱-۵ حرکت ترکیبی
۹	۱-۵-۱-۵ خمیدگی
۹	۲-۵-۱-۵ خطای انحراف ابه
۱۰	۶-۱-۵ هشدار صوتی
۱۰	۲-۵ اثرهای ناخواسته ایجاد شده به‌وسیله سوزن
۱۴	۱-۲-۵ آمیختگی هندسی شکل سوزن و مشخصه‌های تصویری سطح
۱۵	۱-۱-۲-۵ پهن شدگی مشخصه‌های تصویری سطح
۱۶	۲-۱-۲-۵ تصویربرداری از مشخصه تصویری سطح که از زیر برش خورده
۱۷	۳-۱-۲-۵ تصویربرداری از حفره‌ها، فرورفتگی‌ها و سوراخ‌ها

۲۰	۴-۱-۲-۵ از دست دادن اطلاعات یا مناطق غیرقابل دسترس
۲۱	۵-۱-۲-۵ اثرهای زاویه‌ای
۲۲	۶-۱-۲-۵ اثرهای تقارن محوری
۲۲	۲-۲-۵ سوزن‌های غیرایده‌آل
۲۵	۳-۲-۵ آلودگی سوزن‌ها
۲۶	۵ رهیافت‌هایی برای مشکلات آمیختگی-بازسازی شکل سوزن
۲۷	۶ کلمات کلیدی
۲۸	پیوست الف- (اطلاعاتی) کتابنامه

پیش‌گفتار

استاندارد " فناوری نانو- راهنمای اثرهای ناخواسته در تصویر مربوط به سوزن و روبش‌گر در میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی (STM) و میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)" که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط ستاد توسعه فناوری نانو تهیه و تدوین شده و در سومین اجلاس کمیته ملی فناوری نانو مورخ ۱۰/۴/۹۲ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ASTM E 2382:2004(2012), Nanotechnology - Guide to scanner and tip related artifacts in scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy

مقدمه:

ابزار و تجهیزات نقش مهمی در فناوری نانو ایفا می‌کنند، به طوری که امروزه توسعه دنیای نانو، مرهون پیشرفت و تکامل ابزارهای شناسایی ریزساختارها و خواص موضعی مواد است. دستیابی و ساخت دستگاه‌های پیشرفته و ابداع روش‌های نوین سبب می‌شود تا ما بتوانیم رفتار مواد را به دقت شناسایی نموده و از این طریق آن‌ها را با ظرافت خاصی دستکاری کنیم. محققان با استفاده از روش‌ها و ابزارهای جدید بر محدودیت‌های نور مرئی، فائق آمدند به گونه‌ای که امروزه بزرگنمایی‌های بزرگتر از یک میلیون برابر (در مقیاس (سه بعدی) تا حد تفکیک اتمی)، امکان‌پذیر است

میکروسکوپ پروبی روبشی¹ (SPM) یکی از این دستاوردها است که سطح ماده را با قدرت تفکیکی در مقیاس نانومتر روبش کرده و امکان تهیه تصاویر توپوگرافی یا نقشه‌هایی از یک خاصیت فیزیکی یا شیمیایی سطح ماده را فراهم می‌کند. این میکروسکوپ، دارای یک سوزن با قطری در مقیاس نانومتر است که در فاصله بسیار کوچکی از اتم‌های سطح نمونه قرار گرفته و سطح را روبش می‌کند. این فاصله می‌تواند آن قدر کم باشد که الکترون‌های اتم‌های سوزن و سطح با هم تعامل داشته باشند و این تعاملات هم می‌توانند آن قدر قوی باشند که اتم‌ها را از جا کنده و به جای دیگری منتقل کنند. گروه SPM، شامل روش‌های مختلف تهیه تصویر و مطالعه سطح از جمله میکروسکوپی نیروی اتمی² (AFM) و میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی³ (STM) است.

در حوزه میکروسکوپی پروبی روبشی اثرهای ناخواسته⁴ تصویری متعددی وجود دارند که می‌تواند از عوامل متعدد ناشی شوند. اثرهای ناخواسته بر کیفیت تصویر تأثیرگذار هستند و شناسایی سطح واقعی نمونه را مختل می‌کنند. توانایی تشخیص اثرهای ناخواسته در تصویر و روش حذف آن، به ارزیابی قابل اعتماد عملکرد دستگاه و گزارش نتایج کمک می‌کند. در این استاندارد به اثرهای ناخواسته تصویری ناشی از سوزن و روبش‌گر پرداخته شده است.

1- Scanning Probe Microscope (SPM)
2- Atomic Force Microscopy (AFM)
3- Scanning Tunneling Microscopy (STM)
4 -Artifacts

فناوری نانو- راهنمای اثرهای ناخواسته در تصویر مربوط به سوزن و روبش گر در میکروسکوپی تونل زنی روبشی (STM) و میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد توصیف اثرهای ناخواسته مشاهده شده در میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ (AFM) و میکروسکوپ تونل زنی روبشی^۲ (STM) است که به حرکت پروب^۳ و برهم کنش بین سطح و سوزن، با در نظر گرفتن شکل هندسی آن مرتبط است. این استاندارد در بردارنده مراجعی است که در برخی از آنها تفاسیری پیرامون منابع این اثرهای ناخواسته آمده است. از آنجایی که حوزه میکروسکوپی پروبی روبشی^۴ (SPM) در حال رشد است، بنابراین مطالب این استاندارد به عنوان یک راهنمای عملی برای کاربرها جهت رفع مشکلات اثرهای ناخواسته در تصویر است. توانایی تشخیص اثرهای ناخواسته در تصویر به ارزیابی قابل اعتماد عملکرد دستگاه و گزارش نتایج کمک می کند.

اصطلاح شناسی کامل مربوط به توصیف و عملکرد و کالیبراسیون میکروسکوپ های STM و AFM خارج از دامنه کاربرد این استاندارد است. در این استاندارد، مقادیر در واحد SI در نظر گرفته می شوند. این استاندارد شامل واحدهای دیگر اندازه گیری نیست.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن استاندارد به آنها ارجاع شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد محسوب می شوند. در مورد مراجع دارای تاریخ چاپ و/یا تجدید نظر، اصلاحیه ها و تجدید نظرهای بعدی این مدارک مورد نظر نیست، معهذنا بهتر است کاربران ذی نفع این استاندارد، امکان کاربرد آخرین اصلاحیه ها و تجدید نظرهای مدارک الزامی زیر را مورد بررسی قرار دهند. در مورد مراجع بدون تاریخ چاپ و/یا تجدید نظر، آخرین چاپ و/یا تجدید نظر آن مدارک الزامی ارجاع داده شده، مورد نظر است.

استفاده از مرجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

2-1 ASTM E 1813, Practice for Measuring and Reporting Probe Tip Shape in Scanning Probe Microscopy

1 - Atomic Force Microscope
2 - Scanning Tunneling Microscope
3 - Probe
4 - Scanning Probe Microscopy

اصطلاحات ، تعاریف و اختصارات

در این استاندارد اصطلاحات، تعاریف و اختصارات زیر به کار می‌رود:

۱-۳ اصطلاحات

۱-۱-۳ اثرهای ناخواسته در تصویر

به هر مشخصه تصویری^۱ ایجاد شده در تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ‌های AFM و STM اطلاق می‌شود که بیانگر سطح واقعی نباشد. منشاء این اثرهای ناخواسته می‌تواند آماده سازی نمونه، سخت افزار یا نرم افزار دستگاه، نحوه کار با دستگاه، عملیات تکمیلی روی تصاویر و غیره باشد.

۲-۱-۳

تصویر پستی و بلندی

نمایش پستی و بلندی^۲ سطح که در آن مقدار Z برای ارتفاع برحسب موقعیت X و Y ترسیم شده باشد. ارتفاع (Z) ناشی از ولتاژ اعمال شده به روبش‌گر^۳ در راستای ارتفاع بوده و این امکان را فراهم می‌کند که در طول تصویربرداری مقدار بازخورد^۴، ثابت باقی بماند. بنابراین تصویر، شامل طرحی از سطح تحت مطالعه است که با استفاده از مقدار ثابت یک خاصیت از سطح، ترسیم شده است (مانند: جریان تونل‌زنی در STM یا انحراف اهرم در AFM).

۳-۱-۳

سوزن

یک پروب فیزیکی است که در میکروسکوپ‌های AFM و STM استفاده می‌شود. سوزن^۵ در میکروسکوپ STM از سیم فلزی رسانای الکتریسیته (نظیر تنگستن، پلاتین / ایریدیم)^۶ ساخته می‌شود. در حالی که در AFM این سوزن می‌تواند رسانا (مانند سیلیسیم آلاینده)^۷ یا نارسانا (مانند سیلیسیم نیتريد)^۸ باشد. مهمترین پارامترهای عملکرد سوزن عبارتند از نسبت منظر^۹، شعاع انحنای نوک سوزن، زاویه دهانه^{۱۰}، شکل شکل هندسی سوزن و جنس سوزن.

-
- 1- Feature
 - 2 -Topography
 - 3 - Scanner
 - 4 - Feedback
 - 5 -Tip
 - 6 - Pt/Ir
 - 7 - Doped silicon
 - 8 - Silicon nitride
 - 9- Aspect ratio
 - 10- Opening angle

تیرک یا اهرم

قطعه‌ای با قابلیت انعطاف است که پرتو لیزر به آن برخورد می‌کند و در یک سر آن سوزن میکروسکوپ AFM قرار دارد و سر دیگر آن به صورت صلب^۱ به میکروسکوپ متصل است. مهمترین پارامترهای عملکردی عملکردی تیرک^۲، ثابت نیرو (برحسب نیوتون بر متر) و بسامد تشدید (برحسب کیلو هرتز) هستند. این مقادیر به شکل هندسی و خواص ماده‌ای که اهرم^۳ از آن ساخته شده، بستگی دارد.

یادآوری - بسامد تشدید مربوط به حالت کلی دینامیک است.

روبش‌گر

وسيله‌ای است که برای تعیین موقعیت نمونه و سوزن نسبت به یکدیگر استفاده می‌شود. معمولاً در میکروسکوپ‌های AFM یا STM سوزن یا نمونه روبش می‌شود. روبش‌گرها به طور معمول از سرامیک‌های پیزوالکتریک ساخته می‌شوند. روبش‌گرهای سه‌تایی از سه عنصر پیزوالکتریک مستقل تشکیل شده که امکان حرکت در سه جهت طول، عرض و ارتفاع (x، y و z) را فراهم می‌کند. روبش‌گرهای لوله‌ای از مواد پیزوالکتریک تک عنصری تشکیل شده و حرکت جفت شده (همزمان) در سه جهت طول، عرض و ارتفاع (x، y و z) را فراهم می‌کند. پارامترهای مهم عملکردی روبش‌گرها عبارتند از: فاصله جابجایی نسبت به ولتاژ اعمالی (برحسب نانومتر بر ولت) و محدوده‌های روبش عمودی و جانبی^۴ (برحسب میکرون).

۶-۱-۳ زاویه روبش

زاویه چرخش در راستای x روبش نسبت به محور x نمونه استاندارد است (به بند ۳-۱-۷ رجوع شود).

تعیین کننده مشخصات سوزن

تعیین کننده مشخصات^۵ سوزن یک نمونه خاصی است که برای تعیین شکل هندسی سوزن استفاده می‌شود. با سوزن مورد بررسی از این نمونه تصویر گرفته می‌شود. سپس این تصویر به عنوان ورودی یک الگوریتم برای تعیین شکل هندسی سوزن استفاده می‌شود.

۲-۳ اختصارات

۱-۲-۳ میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) که در این استاندارد به حالت تماسی^۶ میکروسکوپ در مقابل حالت غیرتماسی^۷ اشاره می‌نماید.

-
- 1 - Rigid
 - 2 - Cantilever
 - 3 - Lever
 - 4 - Lateral
 - 5 - Tip characterizer
 - 6 - Contact mode
 - 7 - Non-contact techniques

یادآوری - حالت دینامیک، بسته به میزان نیروی تنظیم شده، می تواند تماسی یا غیرتماسی باشد.

۲-۲-۳ میکروسکوپ تونل زنی روبشی (STM)

۳-۳-۳ میکروسکوپ الکترونی روبشی تفنگ گسیل میدانی (FEGSEM)

۴ اهمیت و کاربرد

این استاندارد به بررسی اثرهای ناخواسته تصویری مشاهده شده در میکروسکوپ تونل زنی روبشی و حالت تماسی میکروسکوپ نیروی اتمی می پردازد. این استاندارد به طور ویژه ای به اثرهای ناخواسته حاصل از حرکت پروب و ملاحظات هندسی برهم کنش سوزن و سطح متمرکز است. بسیاری از اثرهای ناخواسته توضیح داده شده در این استاندارد قابل تعمیم به دیگر SPM های دارای روبش گر پیزوالکتریک برای تنظیم مؤلفه های مکانی بوده و همچنین می تواند برای سوزن های دارای شکل هندسی مشابه نیز به کار گرفته شود. این موارد تمامی اثرهای ناخواسته تصویری ایجاد شده در میکروسکوپ های AFM و STM نبوده و اثرهای ناخواسته تصویری دیگری هم وجود دارد که می تواند از موارد ذیل ناشی شود: الکترونیک کنترل (بهره^۱ بازخورد نادرست)، نوفه^۲ (مکانیکی، صوتی و الکترونیکی)، انحراف (گرمایی یا مکانیکی)، مشکلات مربوط به روش های شناسایی سیگنال (مانند: سرریز پرتو لیزر^۳ از تیرک)، استفاده نامناسب از پردازش تصویر (حین انجام کار یا پس از تصویربرداری)، آماده سازی نمونه، اثرهای محیطی (مانند: رطوبت، تغییر دما، لرزش و غیره)، برهم کنش سوزن با سطح (مانند: نیروی های قوی الکترواستاتیکی، چسبندگی، برشی و فشاری).

۵ اثرهای ناخواسته تصویر در STM و AFM

۱-۵ اثرهای ناخواسته ناشی از حرکت روبش گر

رویش گرها از مواد سرامیکی پیزوالکتریک ساخته می شوند که برای قرار دادن سوزن در موقعیتی بسیار دقیق (در مقیاس نانومتر) روی سطح نمونه مورد استفاده قرار می گیرند. زمانی که این مواد در اثر اعمال میدان الکتریکی دچار تغییر ابعادی می شوند، اثر پیزوالکتریکی معکوس از خود نشان می دهند. هنگام استفاده از این روبش گرها در میکروسکوپ های STM و AFM، اغلب فرض می شود که رفتار آنها ایده آل است. رفتار ایده آل به این معناست که:

الف- در اثر اعمال ولتاژ، پاسخ به تغییرات ابعادی به صورت خطی است

ب- تغییر ابعاد به تغییر جهت، مقدار تغییر و سرعت تغییر ولتاژ وابسته نباشد (شکل ۱).

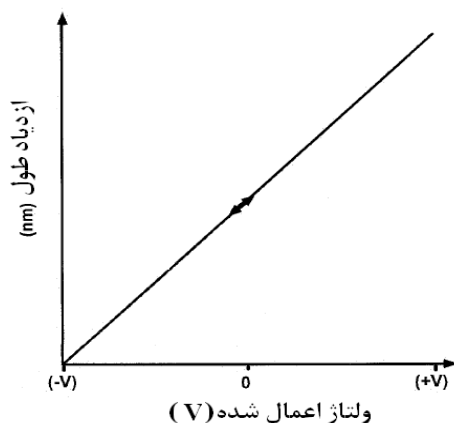
حرکات این قطعه ها می تواند منشاء انحرافات نظیر رفتار غیرخطی، حلقه پسماند^۴ و خزش^۱ باشد (به پیوست پیوست الف مراجع ۱ تا ۵ مراجعه شود). علاوه بر این حرکات های غیرایده آل که مشخصه محورهای مستقل

1- Gain
2 - Noise
3 - Laser beam spillover
4 - Hysteresis

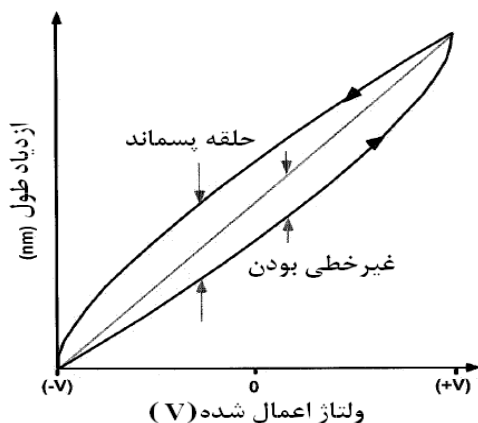
رویش گر هستند، اثرهای ناخواسته تصویری می‌تواند در نتیجه جفت شدن میان این محورها نیز به وجود آیند.

۱-۱-۵ غیرخطی بودن

غیرخطی بودن به این معنی است که پاسخ رویش گر (پیکومتر بر ولت) تابعی از ولتاژ اعمالی باشد. غالباً این انحراف در ولتاژهای مثبت و منفی بالا، نسبت به ولتاژهای اعمالی نزدیک صفر، بزرگتر است (شکل ۲). (به پیوست الف مرجع ۲ مراجعه شود).



شکل ۱- رفتار ایده‌آل رویش گر پیزوالکتریک در یک بعد (x، y و z).



یادآوری - ازدیاد غیرخطی طول در پاسخ به ولتاژ خطی اعمال شده و حلقه پسماند در حالی که حساسیت آن با جهت و میدان ولتاژ اعمالی تغییر می‌کند.

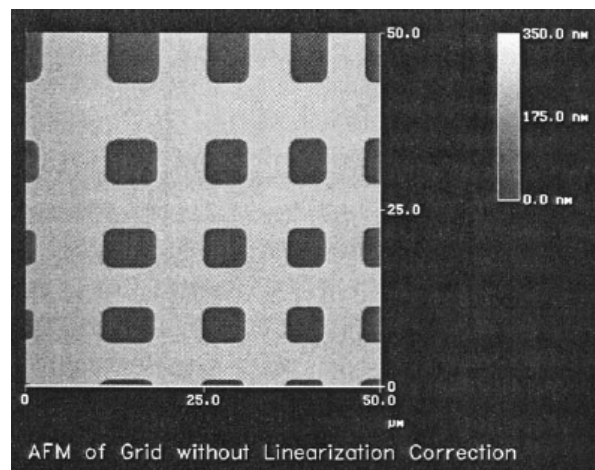
شکل ۲ - رفتار غیرایده‌آل در رویش گر پیزوالکتریک.

هنگام رویش در یک ساختار دوره‌ای با تناوب مکانی مشخص مانند توری پراش^۲، اثرهای غیرخطی در جهت جانبی (x و y) می‌تواند به وضوح دیده شود. از آنجایی که رویش گر قادر نیست به صورت خطی با اعمال ولتاژ

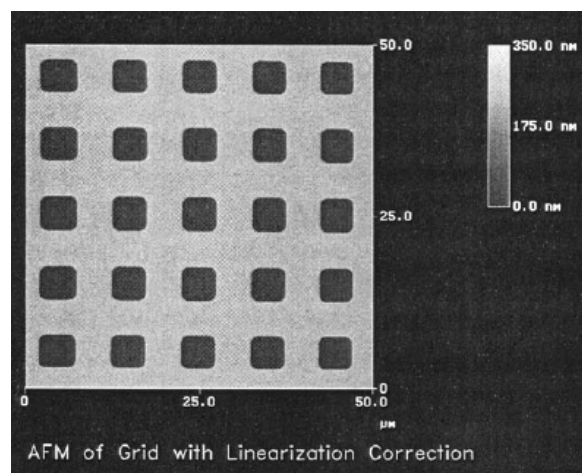
1 - Creep

1 - Diffraction grating

حرکت کند، فاصله‌های اندازه‌گیری شده به صورت مساوی نخواهد بود. فاصله‌های مشاهده شده در سراسر تصویر متفاوت خواهد بود و برخی از مشخصه‌های تصویری خطی به صورت منحنی دیده خواهد شد. این اثر برای ساختارهای مورد بررسی آشکار است ولی در سطوحی که مشخصه‌های تصویری با ساختار یکنواخت ندارند، مشهود نیست. این اثر را می‌توان به وسیله نرم‌افزار و با اعمال ولتاژ غیر خطی حین روبش تصحیح کرد. این کار با کالیبره کردن دستگاه پیش از تصویربرداری (روش حلقه باز) یا اندازه‌گیری مستقل موقعیت روبش‌گر با استفاده از یک حسگر موقعیت‌یاب اضافی مانند صفحه خازنی (روش حلقه بسته)، انجام می‌شود (به پیوست الف، مرجع ۵ مراجعه شود). مثالی از تصحیح با روش حلقه باز در شکل ۳ آمده است.



الف- بدون تصحیح خطی نرم افزاری.



ب- پس از تصحیح حلقه باز.

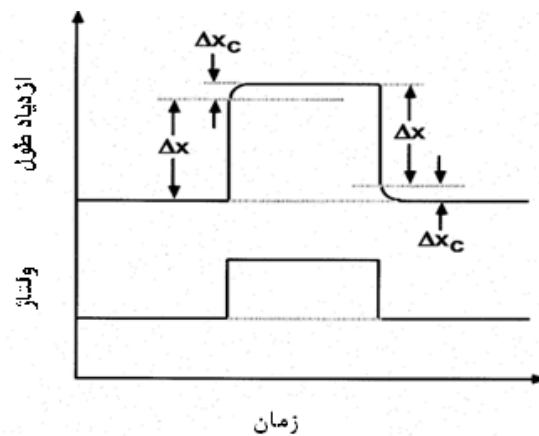
شکل ۳- تصویر AFM از یک شبکه دو بعدی.

اثرهای غیرخطی در z یا اندازه‌گیری‌های ارتفاع، کمتر مشاهده می‌شود اما می‌توان آن را با استفاده از نمونه‌های استاندارد ارتفاع عمودی شناسایی کرد (به پیوست الف، مرجع ۴ مراجعه شود). این اثرها در حالتی

که یک مشخصه تصویری کوچک (تغییر کم در ولتاژ) و یک مشخصه تصویری بزرگ (تغییر بزرگ در ولتاژ) به طور همزمان در یک روبش اندازه‌گیری می‌شوند، بسیار قابل ملاحظه هستند. تصحیح چنین اشکالی به دلیل ترکیب پیچیده حرکت محورهای X و Y با Z در یک روبش گر لوله‌ای، بسیار دشوار است.

۵-۱-۲ حلقه پسماند

حلقه پسماند در مواد پیزوالکتریک زمانی ایجاد می‌شود که رفتار متفاوتی وابسته به جهت اعمال ولتاژ، مشاهده شود (شکل ۲). مقدار این اثر به ولتاژ DC آغازین، میزان تغییر ولتاژ، سرعت تغییر ولتاژ و زاویه روبش بستگی دارد. اثر حلقه پسماند می‌تواند با استفاده از تصحیح نرم‌افزاری اصلاح شود. با این حال دقت این تصحیح محدود است زیرا نیاز به ارائه مدلی با تعداد بسیار زیادی متغیر دارد. مواقعی که ولتاژ با شیب به روبش‌گر اعمال شود، مانند روبش خطی^۱ در محور X و Y برای تصویربرداری STM یا AFM و یا در مواقعی که شیب در جهت Z است برای ترسیم نمودار نیرو بر حسب فاصله در AFM، سوزن یا نمونه به صورت غیریکنواخت حرکت می‌کند. حلقه پسماند می‌تواند توضیح دهد که چرا فاصله میان دو مشخصه تصویری یکسان در یک تصویر ممکن است با هم متفاوت باشد و این تفاوت به جهت روبش (رفت^۲ و برگشت^۳)، اندازه روبش و سرعتی که سوزن سطح را روبش می‌کند، بستگی دارد. حلقه پسماند همچنین می‌تواند عدم دقت در ارتفاع پله مشخصه‌های تصویری بزرگ را (زمانی که جاروب بزرگی از ولتاژ در جهت Z لازم است)، توضیح دهد (به پیوست الف، مرجع ۵ مراجعه شود).



یادآوری - روبش‌گر تأخیری در پاسخ به تغییرات ناگهانی ولتاژ نشان می‌دهد.

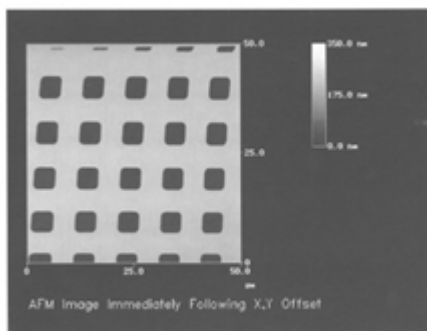
شکل ۴- خزش در روبش‌گر پیزوالکتریک، نوع دیگری از رفتار غیر ایده‌آل.

۵-۱-۳ خزش

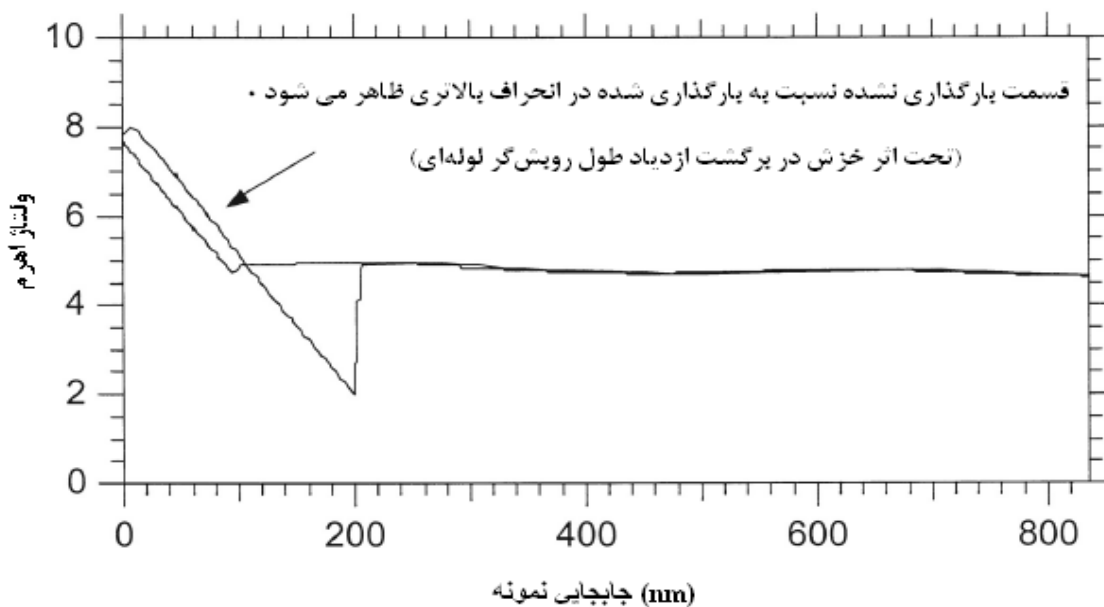
- 1- Rastering
- 2 - Trace
- 3- Retrace

به حرکت مستمر روبش گر بعد از یک تغییر سریع در ولتاژ اطلاق می‌شود، مانند هنگامی که روبش گر حین روبش با یک پله بزرگ روبرو می‌شود. در این حالت با تغییر علامت ولتاژ یا ثابت ماندن آن، روبش گر به راه خود ادامه می‌دهد. این پدیده وابسته به زمان است و مقدار آن به میزان تغییر ولتاژ و سرعت تغییر ولتاژ بستگی دارد (شکل ۴).

خزش، انحراف جانبی اولیه‌ای که پس از افزایش دادن بزرگنمایی یا حرکت به سوی یک منطقه جدید در تصویر ظاهر می‌شود، را توضیح می‌دهد. این مشکل پس از ثبت روبش خط‌های متعدد، رفع می‌شود (شکل ۵ الف).



الف- خزش در جهت‌های X و Y پس از تصحیح سریع انحراف از راستای X که در تصویرگیری دوبعدی توری، دیده شده است.



ب- خزش و حلقه پسماند در جهت Z برای نمودار یک نیروی واحد بر حسب فاصله دیده می‌شود.

شکل ۵ - مثال‌هایی از خزش و حلقه پسماند در روبش گر پیزوالکتریک.

همچنین در نیم‌رخ‌های^۱ خطی تناوبی رسم شده بر قسمت‌های مرتفع و زمینه (هنگام ثبت روبش سریع مشخصه‌های تصویری بلند)، خزش می‌تواند موجب شیب و خطای زیاد از حد^۲ را توضیح می‌دهد. این مسئله هنگام ترسیم نمودار نیرو برحسب فاصله در AFM، که روبش‌های x و y غیرفعال است و ولتاژ z اعمال می‌شود، بسیار قابل توجه است. حلقه پسماند و خزش نیروی بیشتری را که در قسمت بارگذاری شده در مقایسه با قسمت بدون بارگذاری نمودار جابجایی همان نمونه مشاهده می‌شود، توضیح می‌دهند. این پدیده اثر مسیر معکوس^۳ نامیده و در شکل ۵ ب مشاهده می‌شود (به پیوست الف مرجع ۳ مراجعه شود).

۴-۱-۵ محدوده دینامیک

بیشترین ازدیاد طول یک روبش‌گر پیزوالکتریک (در سه جهت x ، y و z)، به چگونگی پاسخ ماده پیزوالکتریک، اندازه و شکل روبش‌گر و بیشترین ولتاژی که می‌توان به الکترودهای پیزوالکتریک اعمال کرد، بستگی دارد. هر روبش‌گر یک محدوده حرکتی در سه جهت x ، y و z دارد. اگر پستی و بلندی بخش‌هایی از نمونه بیشتر از محدوده حرکتی z تعریف شده برای روبش‌گر مورد استفاده باشد، آنگاه ممکن است مشخصه تصویری به‌خوبی در تصویر دیده نشود. اگر سطح نمونه نسبت به روبش‌گر کج باشد، ممکن است با انبساط و انقباض روبش‌گر در محدوده دینامیکی آن، قسمت‌هایی از تصویر مسطح دیده شود (پستی و بلندی مشاهده نمی‌شود). این مسئله بیشتر به روبش‌گرهایی با گستره روبشی بزرگ، که نسبت گستره جانبی به عمودی آن‌ها بیش از ۱۰ باشد، ارتباط دارد.

۵-۱-۵ حرکت ترکیبی

۵-۱-۵-۱ خمیدگی

در هر دو نوع روبش‌گرهای لوله‌ای یا سه طرفه، حرکت z با حرکت x و y جفت می‌شود. نتیجه این جفت شدن در روبش‌گرهای لوله‌ای آن است که روبش‌گر هنگام روبش سطوح انحنادار، در جهت x یا y خم می‌شود. اگر این مشکل برطرف نشود، می‌تواند در یک سطح صاف، خمیدگی (فرورفتگی در وسط یا مقعر) دیده شود. برخی سیستم‌ها با استفاده از تصحیح خط به خط^۴ نتایج، بی‌درنگ این اشکال را رفع می‌کنند. البته یک راه دیگر نیز وجود دارد که پس از تهیه تصویر، یک صفحه می‌تواند تصحیح شده و از سری نتایج حذف شود. از آنجایی که محدوده دینامیکی روی اثرهای ناخواسته خمیدگی تأثیرگذار است، لذا این مشکل برای روبش‌گرهای با گستره روبشی بزرگ رایج‌تر است.

1 - Profiles
2- Overshoot
3- Reverse path
4 - Platefit

۵-۱-۲ خطای انحراف ابه

اثر ناخواسته تصویری دیگری که به جفت شدن حرکت‌ها با هم مربوط است، خطای انحراف ابه^۱ می‌باشد. زمانی که محل واقعی اندازه‌گیری شده با محل مورد نظر تصویربرداری روی سطح نمونه متفاوت باشد (محور Z لوله روبش‌گر منحرف نشده) یک خطای زاویه‌ای در سیستم مکان‌یابی ایجاد شده و بنابراین محل تصویربرداری تغییر کرده است. مقدار این خطا به‌طور مستقیم متناسب است با حاصل ضرب طول بازوی تیرک در میزان تصحیح انحراف زاویه‌ای^۲ بر حسب رادیان. در یک نمونه روبش شده، طول تیرک با استفاده از حاصل جمع طول لوله با فاصله آن از سطح نمونه برآورد می‌شود. این حاصل جمع چیزی در حد چند ده میلی‌متر است این در حالی است که میزان جابه‌جایی روبش، در حد چند میکرون است. بنابراین انحراف زاویه‌ای $<< 0.001$ رادیان است. بهترین مثال برای این اثر، اندازه‌گیری فاصله‌های شبکه در میکای ورقه‌ای^۳ با استفاده از روبش‌گر لوله‌ای در حالت تماسی است (به پیوست الف مرجع ۶ مراجعه شود). با افزایش ارتفاع نمونه، فاصله‌های شبکه‌ای اندازه‌گیری شده در گستره روبشی با x و y یکسان، کاهش می‌یابد.

۵-۱-۶ هشدار صوتی

هشدار صوتی^۴ زمانی اتفاق می‌افتد که بهره تقویت کننده سیستم بازخورد یا بسامد فیلتر بسیار بالا باشد. این مسئله موجب می‌شود لوله روبش‌گر در فرکانس‌های بالا نوسان کرده یا صدا دار باشد. در نتیجه نوفه در تصویر بوجود می‌آید. اگر این اشکال شدید باشد صدا به وضوح قابل شنیدن است. گاهی اوقات در شرایط بهینه با تنظیمات PID، تصویربرداری دقیقاً زیر نقطه شروع هشدار صوتی انجام می‌شود هرچند در این حالت اگر یکی از پارامترها تغییر کند، مثلاً سرعت یا گستره روبش، آنگاه ممکن است مشکل هشدار صوتی دوباره دیده شود. هشدار صوتی افقی، می‌تواند اثر برگشتی در لبه تصاویر، جایی که روبش‌گر طی روبش تغییر جهت می‌دهد، توجیه کند.

۵-۲ اثرهای ناخواسته ایجاد شده به وسیله سوزن

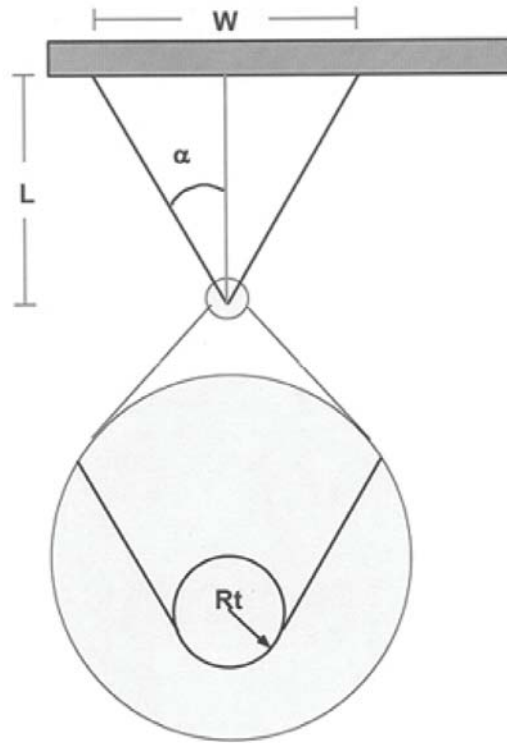
اثرهای ناخواسته‌ای که به وسیله سوزن در میکروسکوپ‌های STM و AFM ایجاد می‌شود یکی از متداول‌ترین اثرهای ناخواسته در SPMها است. دلیل بروز چنین مشکلاتی می‌تواند شکل هندسی سوزن، جنس آن، وجود نقص یا آلودگی در سوزن باشد. ارتفاع و عمق مشخصه‌های تصویری موجود در سطح نمونه تعیین می‌کند که چه بخشی از سوزن با سطح تماس داشته باشد (در واقع کدام بخش از سوزن لازم است به عنوان منبع بروز اثر ناخواسته قلمداد شود). شکل ۶ یک سوزن ایده‌آل را به همراه زاویه α ، نیم زاویه دهانه (که در این مثال 30° است)، نشان می‌دهد.

1 - Abbe offset error

2 - Angular offset

3 - Cleaved mica

4 - Ringing



شکل ۶- پارامترهای مهم سوزن مخروطی ایده‌آل با شعاع انتهایی کروی.

همچنین در این تصویر می‌توان نسبت منظر^۱ (طول به پهنای مقطع، که در این مثال $L/W=1$ است) و شکل کروی را در انتهای این سوزن مشاهده کرد. شکل کروی انتهایی سوزن در این تصویر بسیار ایده‌آل بوده و تنها یکی از احتمالات بسیار زیاد ممکن یا توصیف واقعی برای شکل سوزن می‌باشد. جدول ۱ پارامترهای عملکردی مهم را در سوزن‌های STM و AFM که به صورت تجاری موجود است نشان می‌دهد. توضیح جزییات درباره شکل سوزن‌ها و وسایلی که با آن شکل واقعی سوزن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، در استاندارد ASTM E1813 آمده است.

جدول ۱- پارامترهای مهم در سوزن های تجاری موجود

شعاع انحنای اسمی سوزن	نسبت منظر ^A (نیم زاویه)	شکل خام	جنس	استفاده عمومی	نوع
$\leq 40 \text{ nm}$	$0.7:1$ (35°)	هرم قاعده مربعی	Si_3N_4 (اسمی)	AFM	سیلیسیم نیتريد هرمی
$\leq 20 \text{ nm}$	$0.7:1$ ($<35^\circ$ ^B)	هرم قاعده مربعی ^B	Si_3N_4 (اسمی)	AFM	سیلیسیم نیتريد
$\leq 10 \text{ nm}$	$3:1$ (17° یا 10° / 25°) ^C	شکل کایت ^C	Si	AFM	سیلیسیم حکاکی شده
$\leq 10 \text{ nm}$	$5:1$ (5°)	مخروطی ^D	Si_3N_4 (اسمی)	AFM	سیلیسیم نیتريد آسیاب شده یونی
$\leq 5 \text{ nm}$	$>10:1$ ($2-3^\circ$)	مخروطی ^E	تعریف نشده بیشتر معمولاً کربن	AFM-STM	سوزن ساخته شده به روش لایه نشانی با پرتو الکترونی
$\leq 50 \text{ nm}$	$\sim 5:1$ ($8-10^\circ$)	مخروطی	W, Au, Pt آلیاژ Pt/Ir	STM	حکاکی الکتروشیمیایی سیم
$\leq 5 \text{ nm}$	$\sim 5:1$ (5°)	مخروطی	آلیاژ Pt/Ir	STM	سیم آسیاب یونی شده ^۱
$\leq 50 \text{ nm}$ (متغیر)	دشوار است ^F	تعریف نشده	آلیاژ Pt/Ir	STM	برش مکانیکی سیم

A- نسبت منظر به صورت $L_{tip}:W_{tip}$ تعریف می شود (شکل ۶).

B- نوک سوزن با شعاع بیرونی 0.1 میکرون (R_T) که منجر به نوک تیزتر و نیم زاویه کوچک تر می شود.

C- مقطع عرضی نیم زاویه (به شکل کایت) از یک سمت به سمت دیگر متقارن و از جلو به عقب ساق^۲ نامتقارن است. مقطع عرضی سوزن مثلثی است.

D- با آسیاب کردن به وسیله پرتو یونی متمرکز^۳ سوزن سیلیسیم نیتريد هرمی تجاری ایجاد شده است.

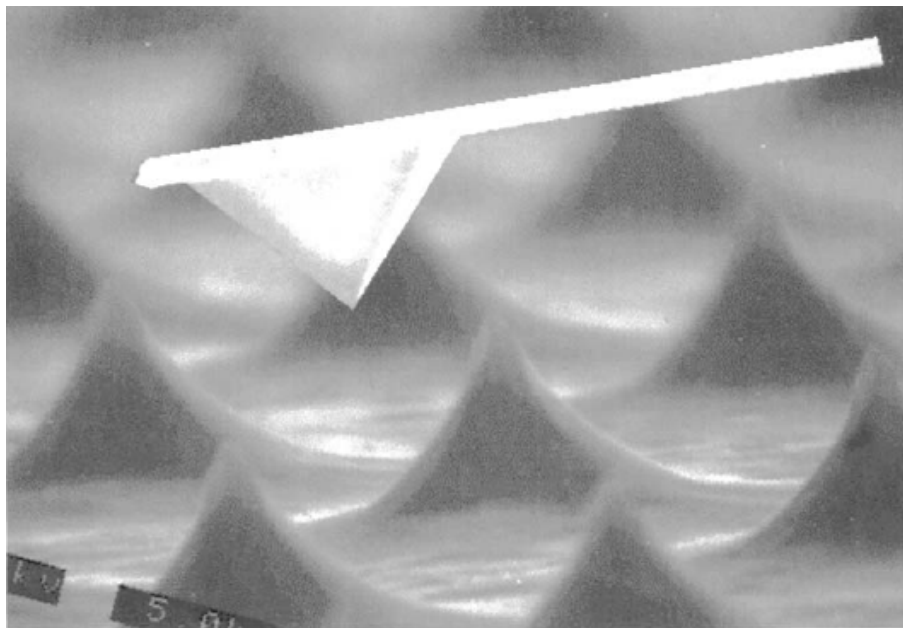
E- تولید شده به روش نشان دادن آلودگی ناخواسته با پرتو الکترونی بر نوک سوزن سیلیسیم نیتريد هرمی تجاری در SEM یا FEGSEM.

F- به علت طبیعت برش زنی، ناهمواری در مقیاس نانو ایجاد می شود که در تصویربرداری مؤثر است.

- 1 - Ion milled wire
- 2 - Shank
- 3 - Focused ion beam milling

برای تفسیر نتایج تصاویر بدست آمده با AFM یا STM باید برخی مشخصات اولیه سوزن‌های تجاری موجود در نظر گرفته شود (به پیوست الف، مرجع ۷ مراجعه شود). برای مثال، حالتی را در نظر بگیرید که در آن سوزن AFM سطح دارای برآمدگی (طوری که رأس برآمدگی موجود در سطح، تیزتر از سوزن میکروسکوپ باشد)، را روبش کند (شکل ۷ الف). در این صورت با روبش سطح، تصویر ایجاد شده، تصویر سوزن است نه تصویر برآمدگی سطح (شکل‌های ب و پ).

در این مثال، برآمدگی سطح بیش از ۲ میکرون ارتفاع داشته و شعاع انحناء آن کوچکتر از سوزن هرمی بکار رفته برای روبش سطح است. این برآمدگی به قدری است که نه تنها می‌تواند سوزن را روبش کند بلکه قادر است بخشی از تیرکی را که سوزن روی آن سوار است، نیز روبش نماید. در تصویر "پ"، حتی می‌توان زاویه‌ای که تیرک با سطح می‌سازد را مشاهده کرد. توجه داشته باشید که وقتی نمونه، سوزن را روبش می‌کند، تصویر بوجود آمده از نظر جهت‌گیری فیزیکی، کاملاً معکوس موقعیت واقعی سوزن است. به بیانی دیگر، x به $-x$ و y به $-y$ و z به $-z$ تغییر کرده است. این مثال بارزی از اثر درآمیختن شکل هندسی سوزن و سطح نمونه است (به پیوست الف مراجعه شود). در بیشتر اوقات این اثر بسیار ناچیز است. در ذیل مثال‌های ویژه‌ای توضیح داده می‌شود.

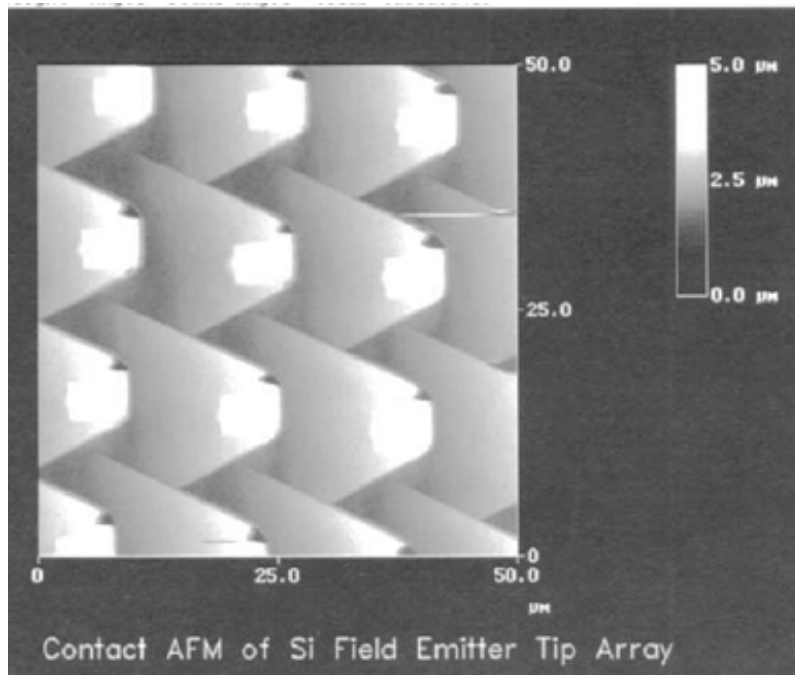


الف - آرایه گسیلنده میدانی سیلیسیمی با سوزن AFM

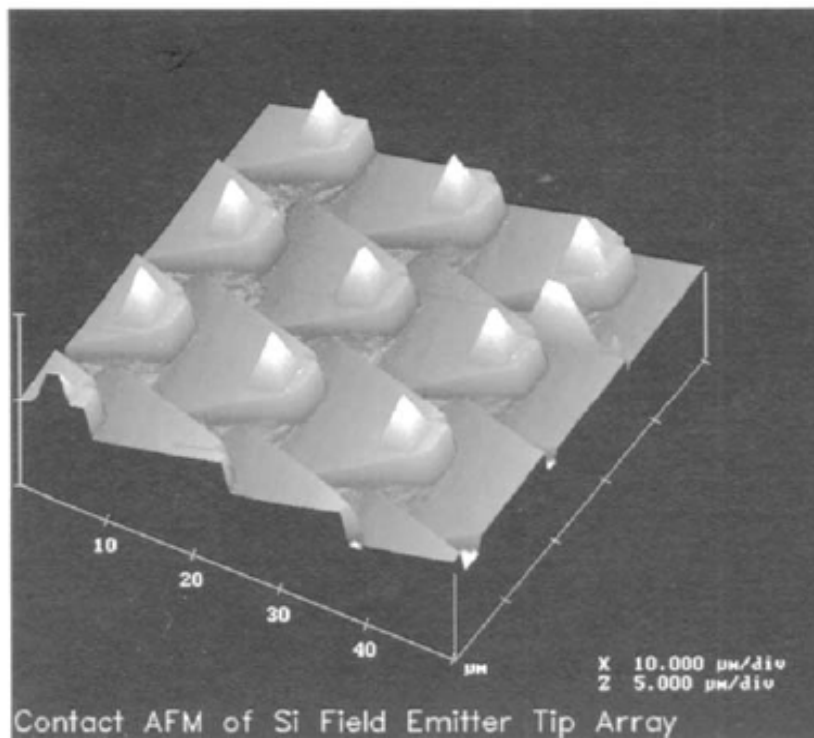
یادآوری- در این آرایه، گسیلنده‌ها روی توری مربعی با ضلع ۱۰ میکرون قرار گرفته است. تصویر FEGSEM یک سوزن تیرک نیز نشان داده شده است. سوزن 10° چرخیده تا موقعیت آن در میکروسکوپ شبیه‌سازی شود. سوزن‌های گسیلنده تیزتر و بلندتر از سوزن میکروسکوپ هستند.

شکل ۷ - الف - تصویر FEGSEM از یک آرایه گسیلنده میدانی سیلیسیمی^۱ (نمونه 85° چرخیده است).

1 -Silicon field emitter array



ب- نمایش از بالا.



پ- نمایش سه بعدی.

شکل ۷ - تصاویر AFM آرایه‌ای از مشخصه‌های تصویری سطحی که تیزتر از سوزن میکروسکوپ هستند

۵-۲-۱ آمیختگی هندسی شکل سوزن و مشخصه‌های تصویری سطح

آمیختگی هندسی شکل سوزن و سطح ذاتاً غیر خطی است. نوک سوزن همواره با سطح نمونه در تماس نیست. نقطه مجاور نوک یا نزدیک‌ترین نقطه به نوک سوزن تعیین کننده ارتفاع سوزن است. این نقطه می‌تواند روی نوک سوزن نباشد و روی بدنه سوزن یا حتی روی تیرک باشد (به پیوست الف مراجع ۹ و ۱۰ مراجعه شود). در حالت کلی اگر سوزن T، نمونه S و با شکل دلخواه باشد، تصویر I با رابطه زیر بدست می‌آید (به پیوست الف مراجع ۱۱ و ۱۲ مراجعه شود):

(۱)

$$I=S[\oplus](-T)$$

در معادله بالا، نماد \oplus نشان‌دهنده عملگر پهن‌شدگی^۱ ریخت‌شناسی^۲ ریاضی است، جزئیات بیشتر این تعریف در مراجع آمده است.

۵-۲-۱-۱ پهن‌شدگی مشخصه‌های تصویری سطح

یکی از متداول‌ترین نتایج این پهن‌شدگی زمانی اتفاق می‌افتد که سوزن میکروسکوپ AFM یا STM برای روبش سطحی استفاده شود که برآمدگی‌های آن سطح دارای شعاع انحناء برابر یا کوچکتر از شعاع انحنای سوزن باشد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که به عنوان مثال از یک مولکول زیستی تثبیت‌شده روی بستری صاف (به پیوست الف مرجع ۱۳ مراجعه شود)، یا از یک ساختار دانه‌های ستونی در لایه‌های نازک تصویربرداری شود (به پیوست الف مرجع ۱۴ مراجعه شود). شکل ۸ این وضعیت را نشان می‌دهد. شعاع انحنای سوزن R_t اندکی بزرگتر از شعاع انحنای مشخصه R_s ایده‌آل سطح "R_s" است. فرض می‌شود که سوزن و سطح هیچکدام حین تصویربرداری تغییر شکل ندهند، در این صورت ارتفاع مشخصه سطح به وسیله میکروسکوپ دقیقاً مشخص شده اما پهنای آن، W_{image} ، بیشتر می‌شود. این پهن‌شدگی از طریق هندسی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

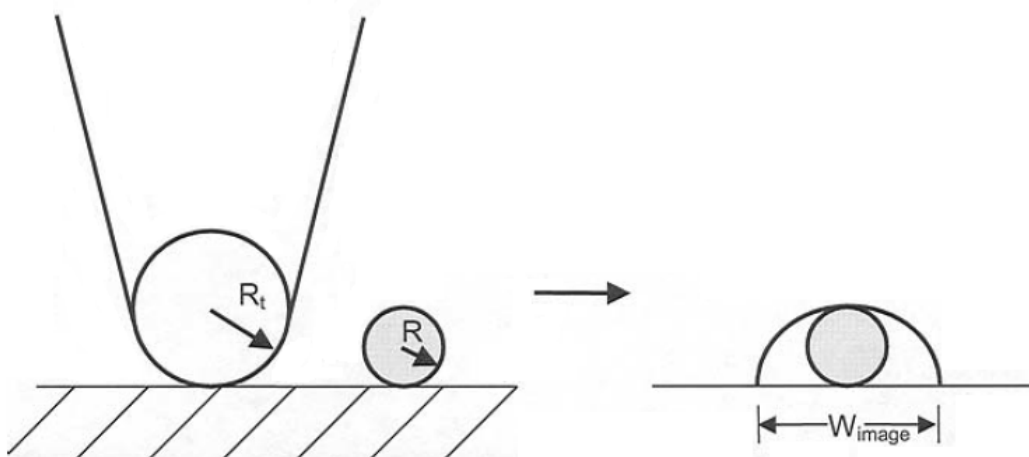
(۲)

$$W_{image} = 4(R_t \times R_s)$$

این معادله، حالت ویژه‌ای از معادله ۱ است که برای سوزن کروی و مشخصه روی سطح اعمال شده است. دیگر حالت‌های ویژه مورد نظر عبارتند از: حالتی که در آن سوزن و مشخصه روی سطح هر دو کروی هستند (شکل ۸) یا حالتی که سهمی‌وار هستند ($y = \pm 0.5x^2 / r$) که شعاع تصویر از مجموع شعاع سوزن و سطح بدست می‌آید (به پیوست الف مرجع ۱۰ مراجعه شود):

$$R_i = R_t + R_s \quad (۳)$$

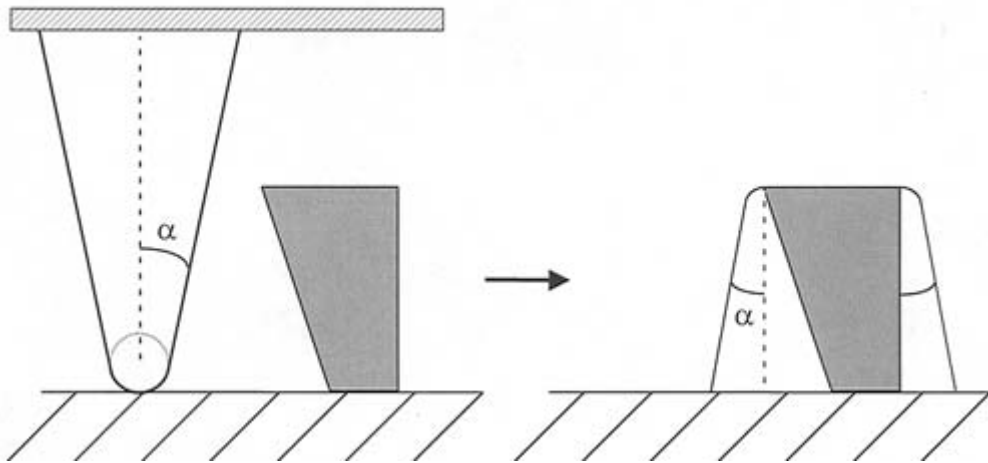
در اینجا، R_x به عنوان مقدار شعاع تصویر، سوزن و نمونه (بدون علامت) است. زمانی که سوزن و مشخصه روی سطح دارای سطح مقطع مستطیلی هستند، همین رابطه صادق است با این تفاوت که به جای شعاع از عرض استفاده می شود.



شکل ۸- طرح شماتیک از اثر پهن شدگی برای یک سوزن کروی ایده آل (با شعاع R_t) و یک سطح دارای مشخصه کروی (با شعاع R_s)

۵-۲-۱-۲ تصویربرداری از مشخصه تصویری سطح که از زیر برش خورده^۱ هنگام تصویربرداری از ساختارهای دیواره‌های شیب‌دار یا مشخصه روی سطح که از زیر برش خورده، آمیختگی غیرخطی مشخصه روی سطح و سوزن به راحتی دیده می‌شود. در این موارد، زاویه دیواره جانبی مشخصه روی سطح بزرگ‌تر از زاویه ساق سوزن است. طرح شماتیک این موضوع در شکل ۹ آمده است.

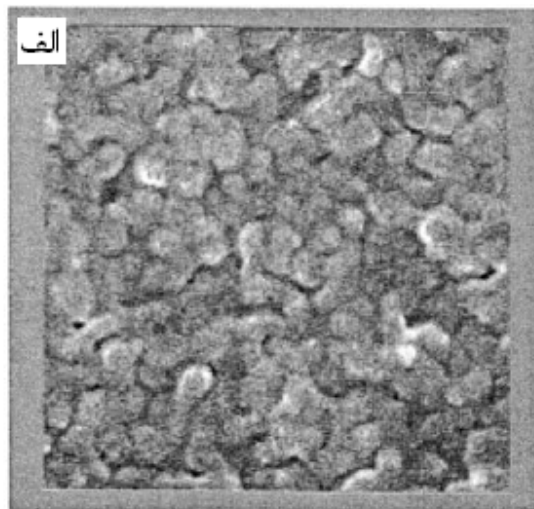
یادآوری- سطح از زیر برش خورده، سطحی است که عرض قسمت بالای آن بزرگ‌تر از قسمت پایین آن است.



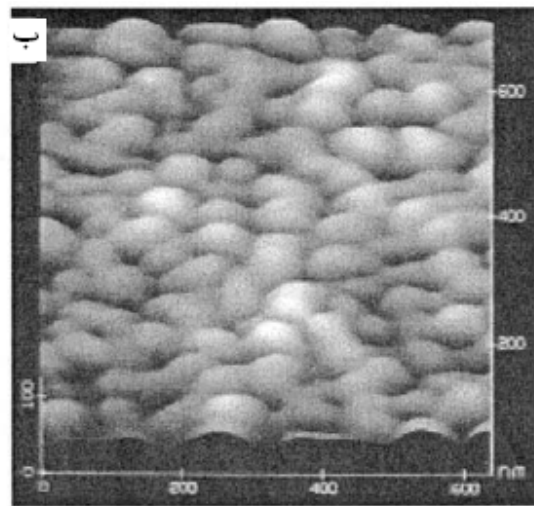
یادآوری - تصویر حاصل دارای دیوارهای کناری^۱ است که به نیمرخ عرضی سوزن مربوط بوده و تصویر طرح اصلی روی سطح نیست.

شکل ۹- طرح شماتیک اثر پهن‌شدگی مشخصه روی سطح، که از زیر برش خورده است.

در این حالت دیوارهای مشخصه تصویری روی سطح، حاوی اطلاعاتی پیرامون ساق‌های سوزن به کار رفته در روبش است. در تصویر بدست آمده، پهنای مشخصه روی سطح در بخش پایینی به نسبت نیم زاویه دهانه سوزن (که می‌تواند متقارن یا نامتقارن باشد) و ارتفاع مشخصه، افزایش می‌یابد. بخش بالایی مشخصه به اندازه شعاع سوزن، همان‌طور که در بالا توضیح داده شد، پهن‌تر خواهد شد. شکل ۱۰، تصاویر AFM سطح زیرپایه غشای پلیمری را نشان می‌دهد که در کنار آن تصویر تهیه شده به وسیله SEM با همان بزرگنمایی آورده شده است.

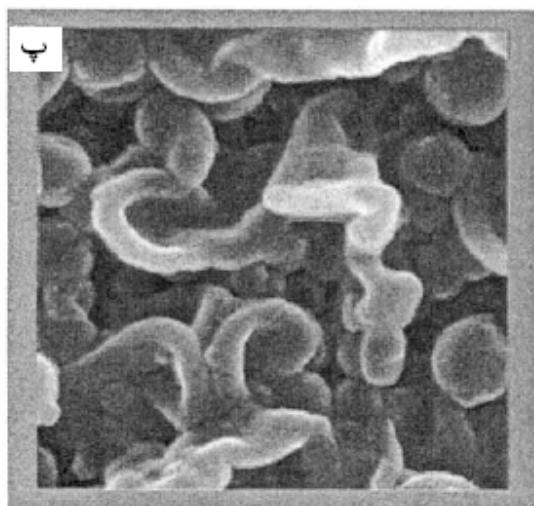


FEGSEM

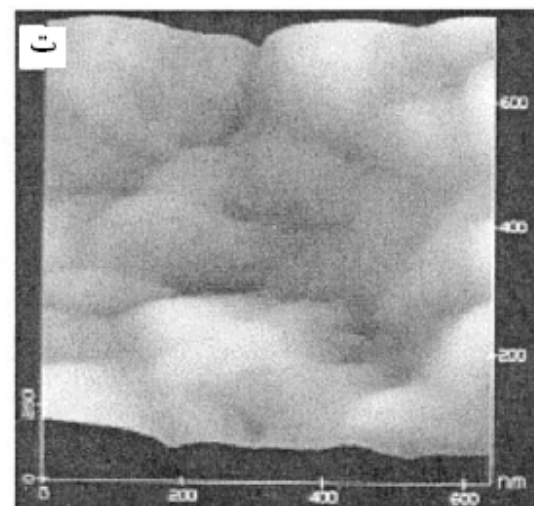


AFM

پایه غشا



FEGSEM



AFM

سطح غشا

یادآوری - جدا از پهن‌شدگی مشخصه در تصویر AFM تهیه شده از پایه غشاء، تصویر مشخصه در همان بزرگنمایی با SEM نیز بازتولید شده است. (مقایسه شکل الف و ب). تصویر SEM سطح غشا، بهم پیچیده و از زیر برش خورده است. تصویر AFM تصویر سطح واقعی را نشان نمی‌دهد (مقایسه شکل پ و ت).

شکل ۱۰- مثالی از اثرهای ناخواسته که در شکل ۹ توضیح داده شد.

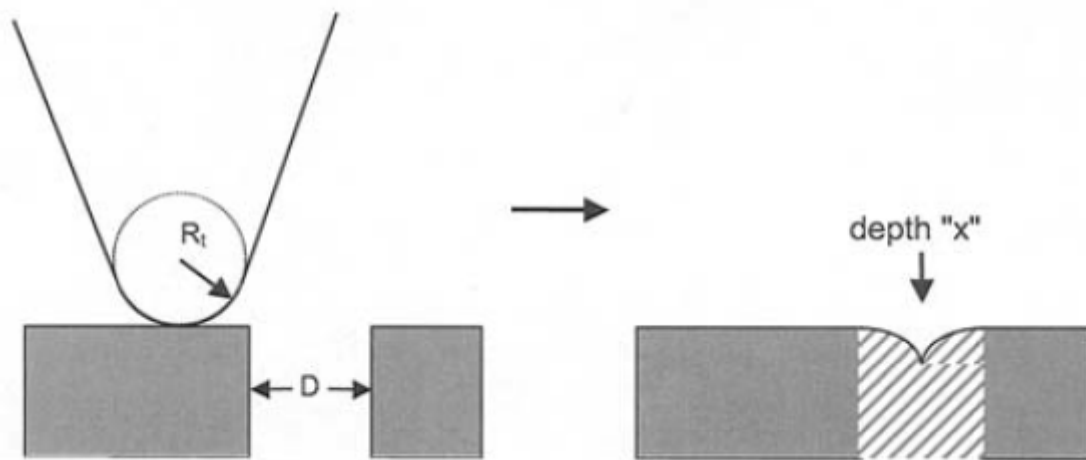
در مقایسه تصاویر مشخص می‌شود که ساختار بهم پیچیده و تاخوردگی که در تصویر SEM مشاهده می‌شود به هیچ عنوان در تصویر AFM دیده نمی‌شود زیرا حتماً این مشخصه‌های تصویری درهم پیچیده پنهان شده است.

۵-۲-۱-۳ تصویربرداری از حفره‌ها، فرورفتگی‌ها و سوراخ‌ها

زمانی که سطح دارای فرورفتگی‌هایی نسبت به صفحه سطحی است، نظیر حفره‌ها، فرورفتگی‌ها و سوراخ‌ها، مشابه همین استدلال می‌تواند برای آمیختگی هندسی شکل سوزن مطرح شود. در چنین حالتی، این آمیختگی هندسی می‌تواند منجر به کاهش اندازه مشخصه تصویری روی سطح شود.

زمانی که سوزن میکروسکوپ سطحی را روبش می‌کند که قطر حفره موجود در سطح تقریباً برابر قطر سوزن میکروسکوپ است، سوزن نمی‌تواند به‌طور کامل حفره را روبش کند زیرا سوزن با لبه حفره تماس دارد. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۱۱ دیده می‌شود.

در سوزن‌های کروی، مقدار عمقی که سوزن می‌تواند در آن نفوذ کند (برای عمق کمتر از شعاع انحنا سوزن، R_t) با توان دوم قطر حفره، D ، رابطه دارد. از آنجایی که سوزن نمی‌تواند به‌طور کامل در یک حفره فرو رود، بنابراین عمق رصد شده، عمق صحیحی نیست. این اثر ناخواسته، موجب می‌شود که سنجش مقدار عمق یک حفره کوچک بسیار دشوار شود و یا اینکه تشخیص یک حفره واقعی از یک فرو رفتگی ساده در سطح مشکل باشد. شکل ۱۱ این اثر ناخواسته را به تصویر می‌کشد. نتایج دقیق‌تر این اثر زمانی اتفاق می‌افتد که سطح مورد مطالعه دارای ساختارهای حاوی آرایه‌های فشرده^۱ با شعاع انحناء کوچکتر از سوزن باشد. از آنجایی که حفره‌های بین طرح به شکل برآمدگی‌های کم عرض دیده می‌شوند، در نتیجه تبدیل فوریه تصاویر ممکن است حاوی اجزای تکراری باشد که به لحاظ فیزیکی غیرواقعی هستند (به پیوست الف، مراجع ۱۶، ۲۰، ۵ مراجعه شود).

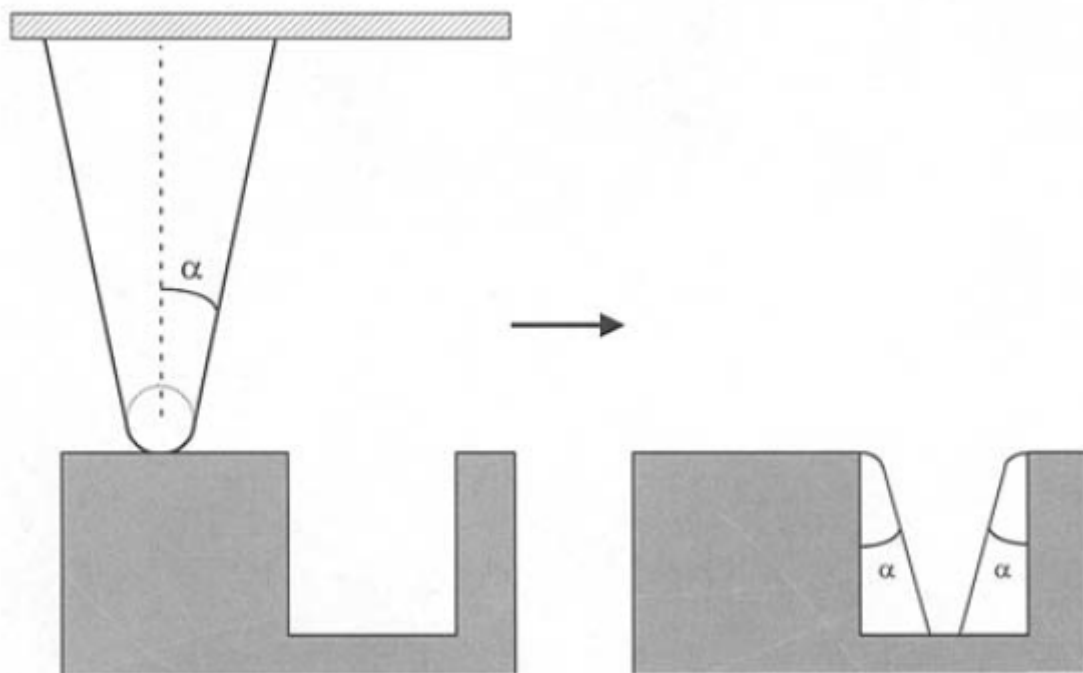


یادآوری- برای سوزن کروی عمق نفوذ به توان دوم عرض حفره اولیه و شعاع سوزن بستگی دارد.

شکل ۱۱- طرح شماتیک اثر کاهش اندازه حفره ناشی از قرار گرفتن در محدوده تماس در مجاورت دیوارهای حفره ناشی از قرار گرفتن در محدوده تماس.

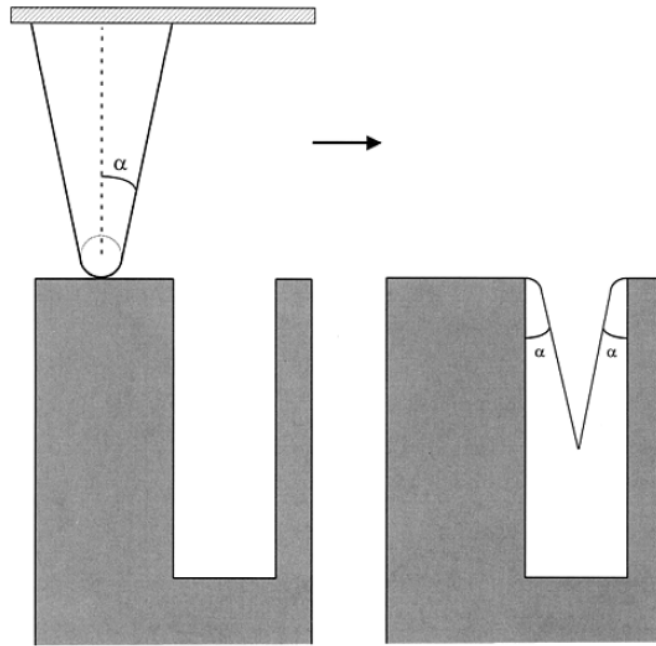
آمیختگی هندسی سوزن با ساختارهای بزرگتر نظیر فرورفتگی‌ها و شیارهایی که تقریباً هم اندازه سوزن هستند موجب اثر ناخواسته دیوار کناری می‌شود. این مسئله در شکل ۱۲ به صورت شماتیک دیده می‌شود. پهنای ظاهری فرورفتگی کوچک‌تر از مقدار واقعی آن دیده می‌شود زیرا بدنه سوزن به وسیله دیواره‌های فرورفتگی به تصویر کشیده شده است.

وضعیت‌های دیگری هم وجود دارد که ارزش بررسی دارند. برای مثال اگر پهنای فرورفتگی کوچکتر از پهنای سوزن بوده و عمق آن نیز بیشتر از طول سوزن باشد، در این صورت سوزن نمی‌تواند به انتهای فرورفتگی دسترسی پیدا کرده و در نهایت شکل انتهای فرورفتگی در تصویر نخواهد بود (شکل ۱۳). اگر پهنای فرورفتگی بیشتر از قطر سطح مقطع سوزن و فرورفتگی عمیق‌تر از طول سوزن باشد، تصویر ایجاد شده به اشتباه دارای انتهای صاف خواهد بود زیرا در این حالت تیرک به لبه فرورفتگی گیر کرده و نمی‌تواند عمق فرورفتگی را رصد کند (تصویر ۱۴). یک مثال خوب برای نشان دادن این حالت در شکل ۱۵ آمده است. در این تصویر سوزن برای روبش یک فرورفتگی روی فولاد زنگ نزن مورد استفاده قرار گرفته است. قسمت زیرین مسطح^۱ مشاهده شده، یک اثر ناخواسته تصویری است.



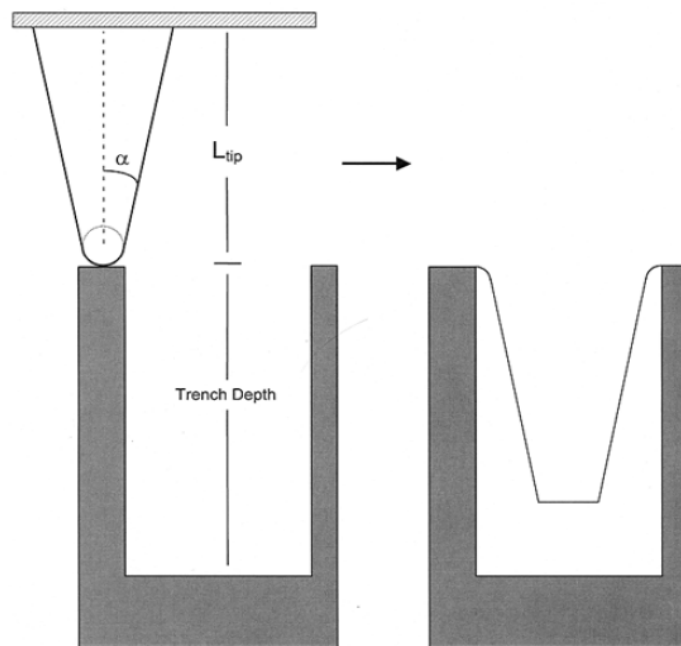
شکل ۱۲- طرح شماتیک اثر کاهش پهنای حفره.

1 -Flat bottom



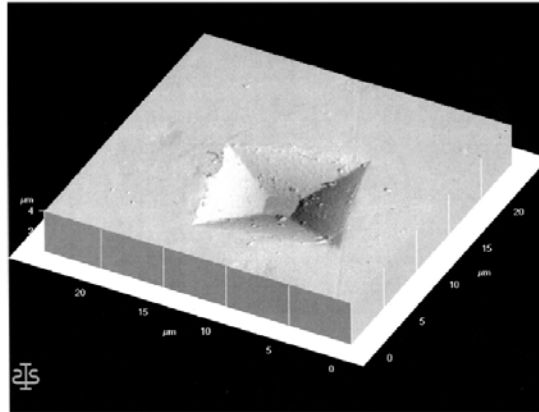
یادآوری - قسمت زیرین مسطح هرگز با این سوزن دیده نمی‌شود.

شکل ۱۳ - اثر دیده نشدن قسمت زیرین حفره^۱ به وسیله سوزن به دلیل گیر کردن سوزن به دیواره.



یادآوری - قسمت زیرین مسطح دیده می‌شود ولی قسمت زیرین واقعی حفره نیست.

شکل ۱۴ - اثر دیده نشدن قسمت زیرین حفره با سوزن به دلیل تماس تیرک با سطح حفره عمیق.



یادآوری - قسمت زیرین مسطح در حفره موجود در سطح فولاد زنگ نزن 440°C با استفاده از حالت تماسی دیده می‌شود.

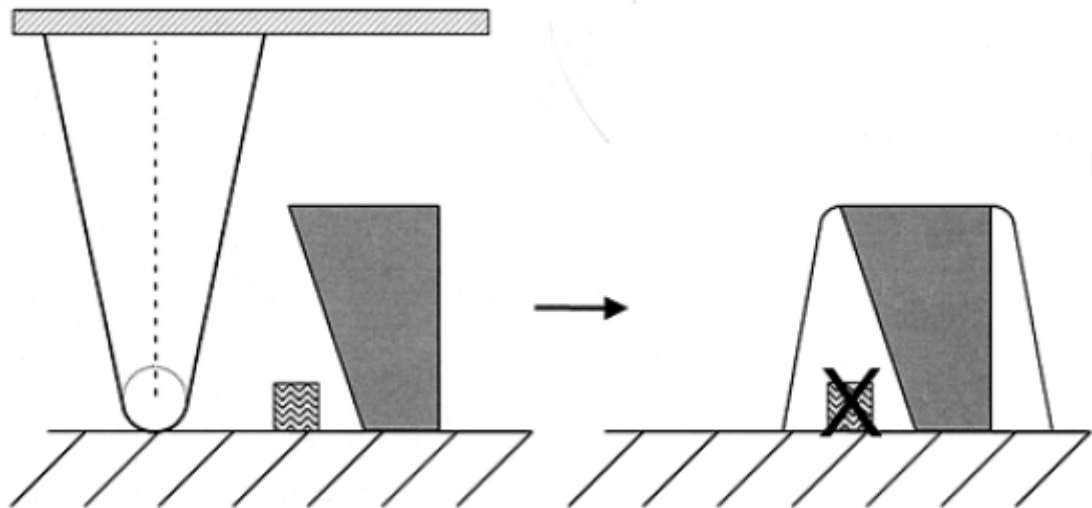
شکل ۱۵- مثالی از اثر ناخواسته توصیف شده در شکل ۱۴.

۵-۲-۱-۴ از دست دادن اطلاعات یا مناطق غیرقابل دسترس

یکی از نتایج آمیختگی هندسی شکل سوزن با ساختار واقعی سطح این است که امکان دارد در برخی از قسمت‌های تصویر بدست آمده، تمام اطلاعات ساختاری آشکار نشده باشد (به پیوست الف، مراجع ۱۷، ۱۸، ۱۰، ۹ و ۷ مراجعه شود).

مشخصه برش خورده از ناحیه زیر که پیش از این بحث شد را در نظر بگیرید. اگر مشخصه دیگری در مجاورت مشخصه اول باشد، سوزن قادر به دیدن آن نیست. در شکل ۱۶ دیده می‌شود که دیواره بلند مشخصه مانع از دیده شدن مشخصه کوچک‌تر می‌شود. این دیواره بلند موجب می‌شود که اطلاعات ساق سوزن در تصویر ثبت شده و مشخصه کوچک‌تر دیده نشود. به همین دلیل، توضیحاتی که پیرامون آمیختگی هندسی شکل سوزن و سطح گفته شد همیشه صادق نیست، در غیر این صورت می‌توانستیم ایراد بوجود آمده در تصویر را با دانستن شکل سوزن، رفع کنیم. در مثال شکل ۱۶، در مثال شکل ۱۶، هرگونه تلاشی در سطح اصلی برای به دست آوردن نیم‌رخ مشخصه دوم دیده نشده، از روی تصویر به دست آمده و نیم‌رخ واقعی سوزن، بی نتیجه خواهد بود.

بررسی این نواحی که حاوی مشخصه‌های سطحی غیرقابل دسترس هستند، بیشترین اهمیت را در تصویربرداری‌های AFM یا STM خواهند داشت.

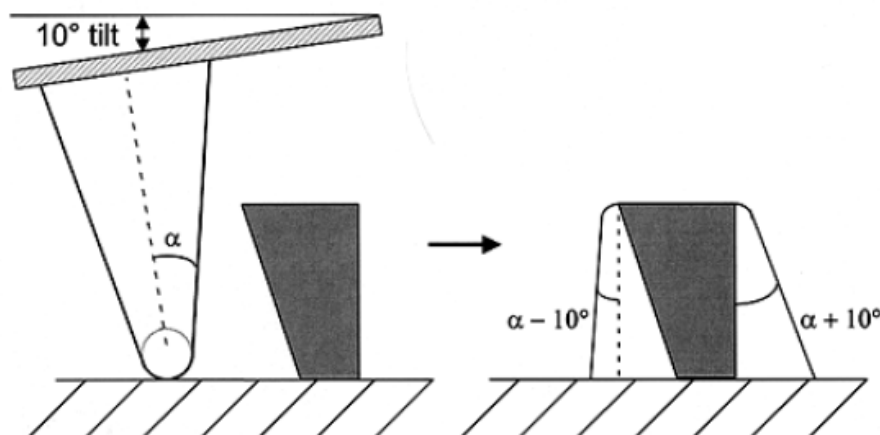


یادآوری - در این مورد مشخصه مربعی کوچک اگرچه قسمتی از شکل واقعی است، نمی‌تواند تصویرگیری شود.

شکل ۱۶- نواحی غیرقابل دسترسی از سطح ناشی از آمیختگی شکل هندسی سوزن و مشخصه تصویری روی سطح می‌باشند

۵-۱-۲-۵ اثرهای زاویه‌ای

تاکنون چنین فرض شده است که سوزن روبش‌کننده در محور Z عمود بر سطح مورد مطالعه است. اما در عمل، محور Z سوزن تیرک‌های مورد استفاده در دستگاه‌های تجاری، دارای چرخش 10° تا 15° نسبت به خط عمود بر سطح هستند. کاربر میکروسکوپ باید این موضوع را در کار خود لحاظ کند. برای مثال، به طرح برش خورده از زیر در شکل ۹ توجه کنید. اگر محور سوزن 10° نسبت به محور عمود بر سطح بچرخد، آنگاه وضعیت آمیختگی جدیدی رخ خواهد داد که در شکل ۱۷ نشان داده می‌شود.



یادآوری - با شکل ۹ مقایسه شود.

شکل ۱۷- طرح شماتیک اثر چرخش محور Z سوزن بر پهن‌شدگی تصویر مشخصه‌ای که از زیر برش خورده است

۵-۲-۱-۶ اثرهای تقارن محوری

سوزن‌های تجاری موجود که دارای سطح مقطع مخروطی هستند، عبارتند از سوزن‌های STM که به روش حکاکی الکتروشیمیایی ساخته می‌شوند، سوزن‌های AFM و STM که به روش تبخیر با پرتو الکترونی تولید می‌شوند، سوزن‌های AFM و STM که به روش آسیاب یونی ساخته می‌شوند و این سوزن‌ها با دهانه دارای دو نیم زاویه متقارن محوری هستند. سوزن‌های سیلیسیم نیتريد مورد استفاد در AFM دارای شکل هرمی با سطح مقطع مربعی هستند.

در این سوزن‌ها، نیم زاویه دهانه بستگی به این دارد که زاویه روبرو یا زاویه لبه‌ها مورد توجه باشد یا خیر. سوزن سیلیسیم حکاکی شده دارای نیم زاویه متقارن در یک سمت و نیم زاویه نامتقارن در سمت دیگر است. هنگام اندازه‌گیری ابعاد بحرانی، که می‌تواند شامل آمیختگی هندسی ساق سوزن با سطح نمونه باشد (برای مثال هنگام اندازه‌گیری شیب دیواره‌های کناری یک مشخصه میکرولیتوگرافی)، دانستن اطلاعاتی پیرامون شکل اسمی^۱ سوزن اهمیت دارد. اگر نمونه بچرخد، مشخصه سطحی آن در تماس با بخش دیگری از سوزن خواهد بود. برای سوزن‌هایی که تقارن محوری ندارند، نیم زاویه ممکن است به شدت تغییر کند. مقدارهای نیم زاویه‌های دهانه در برخی سوزن‌های تجاری STM و AFM در جدول ۱ ارائه شده است.

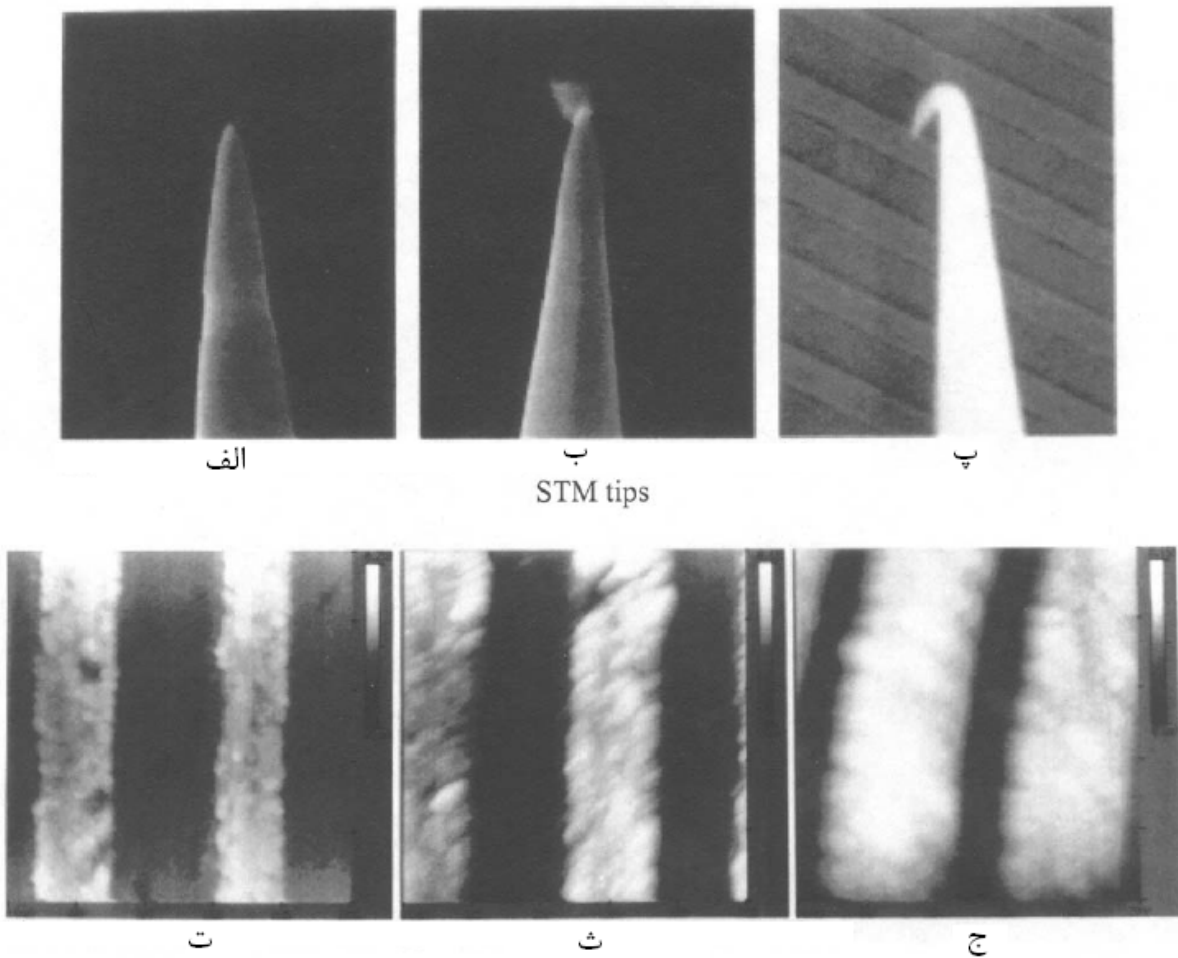
۵-۲-۲ سوزن‌های غیرایده‌آل

سوزن‌های واقعی دارای شکل هندسی ایده‌آل نیستند. بخشی از عیوب سوزن ذاتی است که مربوط به فرآیند تولید می‌شوند و بخشی دیگر عارضی (غیر ذاتی) است که حین استفاده ایجاد می‌شود. از عیوب ذاتی رایج در سوزن می‌توان به شکل گوه‌ای سوزن‌های سیلیسیم نیتريد حکاکی شده اکسیدی اشاره کرد. اخیراً تولیدکنندگان، فرآیندهای خود را به نحوی بهبود داده‌اند که این مشکلات کمتر به چشم می‌خورد. در تمام موارد، استفاده از این سوزن‌ها منجر به اعوجاج^۲ در تصویر می‌شود زیرا شکل هندسی جدید و ناخواسته‌ای ایجاد می‌کنند که از حالت ایده‌آل فاصله دارد (به پیوست الف مرجع ۷ مراجعه شود).

شکل ۱۸ نمونه‌ای از سوزن‌های STM را نشان می‌دهد که با SEM از آنها تصویر تهیه شده است. این تصویرها سوزن‌ها را بعد از روبش سطح آزمون نشان می‌دهد. در این شکل علاوه بر تصویر SEM سوزن، تصویر STM سطح را که با آن سوزن تهیه شده است، نیز نشان می‌دهد. شکل ۱۹ مثال‌هایی از نقص‌های ذاتی ایجاد شده در سوزن‌های تجاری سیلیسیم نیتريدی AFM را نشان می‌دهد. شکل ۲۰ تصاویر AFM حالت تماسی یک سطح سرامیکی کندوپاش شده^۳ با یون را که با استفاده از یک سوزن خوب و یک سوزن با نوک چندتایی^۴ روبش شده مقایسه می‌کند. در حالتی که از سوزن چندتایی استفاده شده، تصاویر دارای

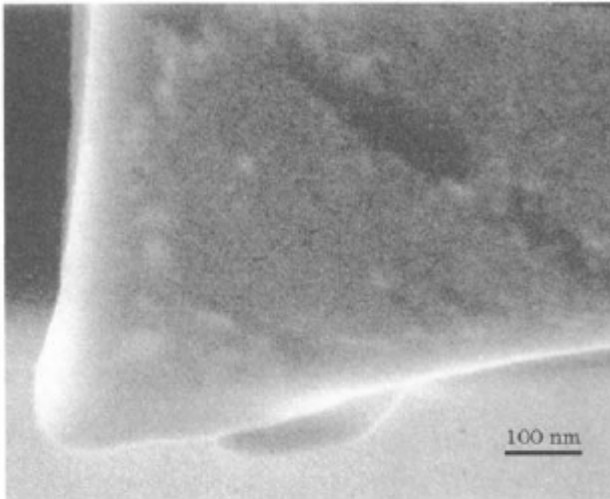
1 -Nominal
2 -Distortion
3 -Sputtered
4 -Multiple Tip

مناطق محوشده (غیرواقعی)^۱ هستند. سوزن‌های چندتایی در طول روبش، به دلیل سایش، ممکن است موجب محو شدن بخش‌های میانی تصویر شوند.

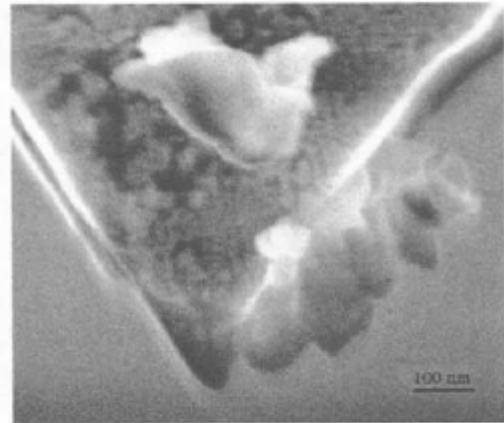


یادآوری - تصاویر تهیه شده مرتبط با هر سوزن نشان شده است. در این مثال، اعوجاج در اثر عوامل غیرذاتی یا آلودگی سوزن یا آسیب آن در اثر استفاده مشاهده می‌شود. اگر چه ابعاد واقعی سوزن و مشخصه‌های تصویری نشان داده نشده است، اثر شکل سوزن روی تصاویر حاصله به خوبی نمایان است.

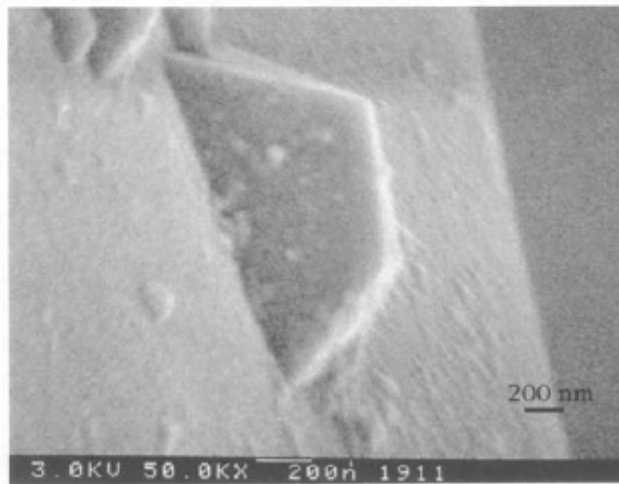
شکل ۱۸- میکروگراف SEM درجا از سوزن‌های مورد استفاده در STM برای روبش ساختارهای خطی آزمون



الف) سوزن مناسب



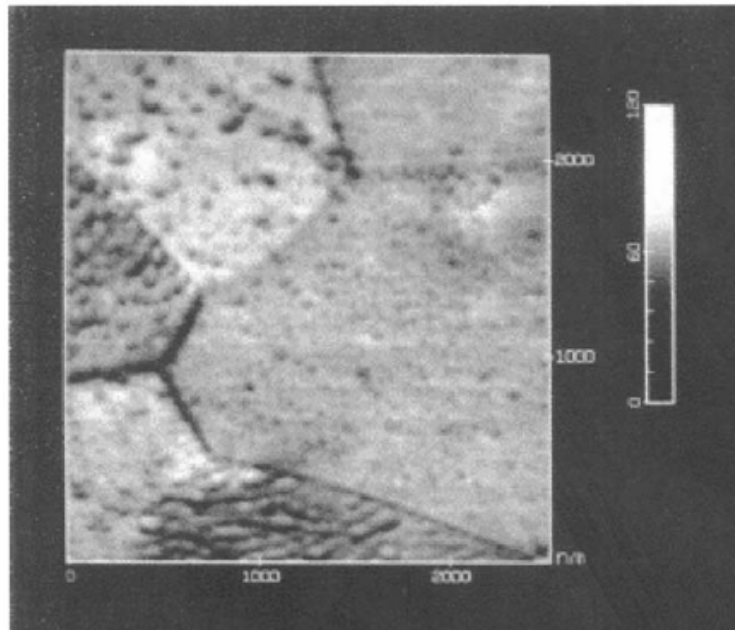
ب) سوزن چندتایی



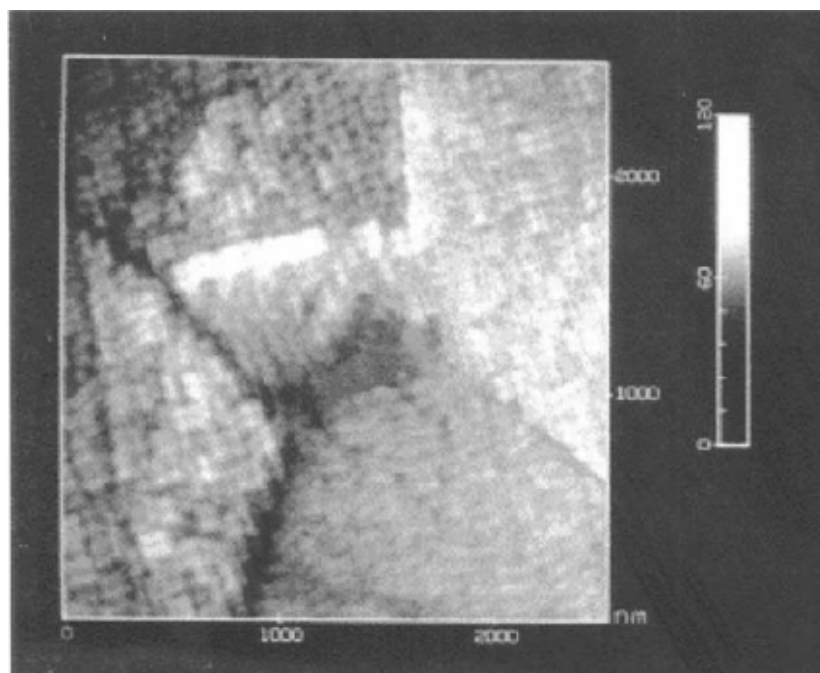
پ) گوه بریده شده

یادآوری- الف) یک سوزن خوب با شعاع انحنای ۴۰ نانومتر، ب) نقص ساختاری نزدیک نوک سوزن که از آن تصاویر سوزن چندتایی حاصل می‌شود. پ) فرایند ساخت غیریکنواخت منجر به چندشاخه شدن هرم سوزن می‌شود. هر سه سوزن از یک پایه ویفر به دست آمده‌اند.

شکل ۱۹- تصاویر FEGSEM از نقص‌هایی که ممکن است روی سوزن AFM سیلیسیم نیتریدی باشد



الف) تصویر به دست آمده با سوزن خوب



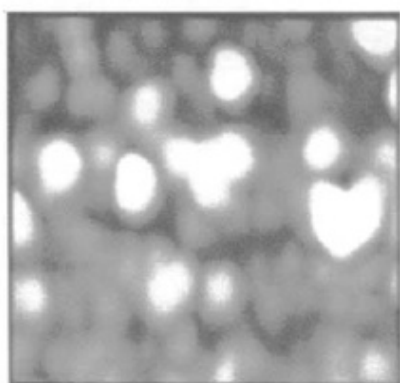
ب) تصویر به دست آمده با سوزن چندتایی

یادآوری- الف، تصویر تهیه شده با یک سوزن مناسب است که جزئیات ساختار دانه^۱ را می‌دهد. ب، تصویر تهیه شده با سوزن چندتایی شبیه شکل ۱۹ ب، به دلیل نقاط تماس چندتایی حین تصویربرداری، دارای ظاهری ناواضح است.

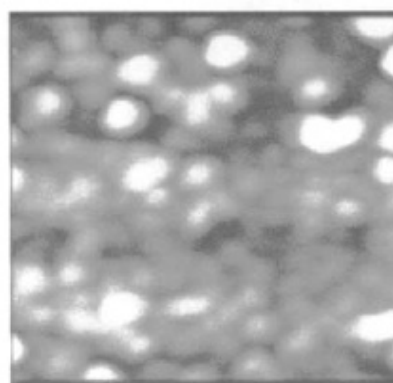
شکل ۲۰- مثالی از اثر سوزن چندتایی روی تصویر AFM سطح سرامیک کندوپاش شده با یون

۵-۲-۳ آلودگی سوزن‌ها

سوزن‌ها حین استفاده ممکن است آلوده شده یا آسیب ببینند. اگر چیزی از روی سطح نمونه به وسیله سوزن برداشته شود، شکل هندسی سوزن تغییر کرده و در نتیجه موجب تغییر و اعوجاج در تصویر می‌شود. همچنین اگر سوزن حین فرآیند روبش ساییده شود، باز هم شکل هندسی آن دستخوش تغییر شده و اعوجاج در تصویر ایجاد می‌شود. در شکل ۲۱ سوزن سیلیسیم نیتریدی مورد استفاده برای تصویربرداری AFM در حالت تماسی، تصویرهایی تهیه می‌شود که در جهت روبش به سمت بالا تکرارپذیرند ولی متفاوت از تصاویر تکرارپذیر بدست آمده در جهت پایین است. علت این اعوجاج آلودگی ایجاد شده روی سوزن است. تمیز کردن سوزن با حلال‌ها می‌تواند به حفظ تقارن بین تصاویر روبش شده در جهت‌های بالا و پایین کمک کند.

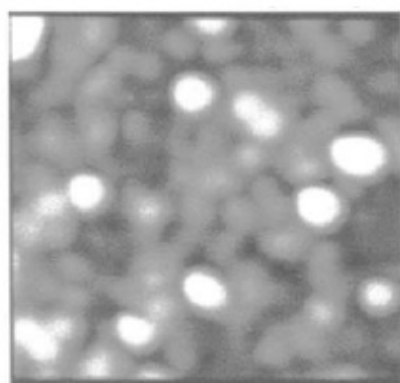


رویش به بالا

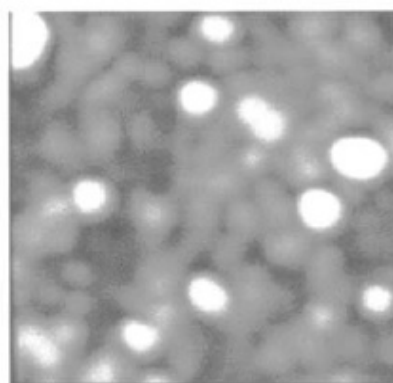


رویش به پایین

الف) قبل از شستشوی سوزن



رویش به بالا



رویش به پایین

ب) پس از شستشوی سوزن

یادآوری - الف - اعوجاج را در جهت‌های روبش به سمت بالا و پایین نشان می‌دهد (تصویر ۵۰۰ نانومتر در ۵۰۰ نانومتر سطح اکسیدفلزی کندوپاش شده از بالا). **ب** - پس از تمیز کردن سوزن در متانول، کیفیت بهبود یافته و روبش در جهت‌های روبش بالا و پایین یکسان است.

شکل ۲۱ - مثالی از اثر حذف آلودگی از نوک سوزن

۵-۲-۴ رهیافت‌هایی برای مشکلات آمیختگی-بازسازی شکل سوزن

پیشرفت‌های زیادی برای درک مشکل آمیختگی هندسی انجام شده است. برخی محققان پیشنهاد می‌دهند که از اثر پهن‌شدگی که در بخش ۵-۲-۱-۱ توضیح داده شد، استفاده شود تا اطلاعات لازم در مورد سوزن، به‌وسیله تصویربرداری از مشخصه‌های کوچکی با سطح مقطع منظم و مشخص بدست آید.

این رهیافت شامل استفاده از ذرات کلوئیدی طلا (به پیوست الف، مراجع ۱۹ و ۲۰ مراجعه شود)، کره‌های لاستیکی^۱ (به پیوست الف، مرجع ۲۱ مراجعه شود)، پلیمرهای ستاره‌ای^۲ (به پیوست الف، مرجع ۲۲ مراجعه شود) و مولکول‌های زیستی میله‌ای شکل (به پیوست الف، مرجع ۱۳ مراجعه شود) است. برخی از شکل‌های سوزن‌ها مانند: سوزن‌های سهمی‌وار (به پیوست الف، مرجع ۱۳ مراجعه شود)، رفتار مشخصی دارند. البته سوزن‌های واقعی نمی‌توانند شکل هندسی سوزن‌های ایده‌آل را داشته باشند و انواع نقص در نیم‌رخ دیده می‌شود (به پیوست الف، مرجع ۲۰ مراجعه شود).

بیشتر رهیافت‌ها از تعیین‌کننده‌های مشخصات سوزن با اشکال مشخص استفاده می‌کنند (به پیوست الف، مراجع ۲۷-۲۳، ۱۸، ۱۱-۱۲ مراجعه شود). تصویر AFM یا STM این ساختارها از قبل تهیه شده است. از روی تصویر و شکل هندسی مدل تعیین‌کننده، می‌توان لبه‌های خارجی سوزن و جهت‌گیری آن را نسبت به سطح به‌دست آورد. از تعیین‌کننده‌های مشخصات سوزن با اندازه‌های مختلف می‌توان برای تعیین مشخصات نوک سوزن یا نوک سوزن به همراه بدنه آن استفاده کرد. با دانستن شکل سوزن و جهت‌گیری آن، تصویر یک نمونه می‌تواند پردازش شود، تا بسیاری از اثرهای ناخواسته حاصل از سوزن رفع شود، با این کار در برآورد شکل هندسی نمونه بهبود حاصل می‌شود. همان‌طور که در بخش ۵-۲-۱-۴ گفته شد، برخی اطلاعات تصویر ممکن است محو شود، دانستن شکل سوزن لزوماً نمی‌تواند به بازگشت کامل این اطلاعات کمک کند. البته می‌توان مشخص کرد که اطلاعات کدام بخش قابل بازیابی و کدام بخش غیرقابل بازیابی است (به پیوست الف، مراجع ۱۸ و ۱۱ مراجعه شود). با این حال، در حال حاضر "نقشه‌های اطمینان بخش"^۳ به شدت به نوبه در تصویر حساس هستند (به پیوست الف، مرجع ۱۲ مراجعه شود).

روش دیگری که برای تعیین شکل سوزن مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش کور^۴ نام دارد. در این روش، حتی زمانی که شکل سطح و تعیین‌کننده مشخصات سوزن به‌طور مستقل مشخص نیست، شکل سوزن می‌تواند از روی اطلاعات تصویری برآورد شود (به پیوست الف مراجع ۲۹-۲۷، ۱۲، ۱۱ مراجعه شود).

بازسازی^۵ مبتنی بر این حقیقت است که بعضی از سوزن‌ها با تصویر مشاهده شده تناقض دارند برای مثال موردی که ممکن است از سوزنی دارای نوک کندتر از برجستگی‌های مشاهده شده روی سطح نمونه است، استفاده نشود. سوزن واقعی باید با تمام مشخصه‌های تصویری مشاهده شده سازگار باشد. این روش ترسیم شکل هندسی سوزن را فراهم می‌کند. تعیین‌کننده‌های مناسب سوزن، باید بتوانند شکل سوزن را به خوبی تخمین بزنند. اگر شرایط برای هر دو به‌کار رود، یعنی تعیین‌کننده سوزن هم دارای بخش‌هایی با ویژگی‌های

1- Latex
2 - Starbrust
3 - Certainty maps
4 - Blind method
5 - Reconstruction

مشخص و هم بخش‌هایی با ویژگی‌های نامشخص باشند، آنگاه می‌توان دو روش "کور و استفاده از تعیین کننده" در پاراگراف قبل را با هم ترکیب کرد (به پیوست الف، مراجع ۲۹ و ۱۲ مراجعه شود).

پیوست الف

(اطلاعاتی)

کتابنامه

- (1) van de Leemput, L.E.C., Rongen, P.H.H., Timmerman, B.H., and van Kempen, H., *Review of Scientific Instruments*, Vol 62, No. 4, 1991, p.989.
- (2) Howland, R.S., *Atomic Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy*, S.H. Cohen, M.T. Bray, and M.L. Lightbody, eds., Plenum Press, New York, 1994, pp. 347 .
- (3) Hues, S.M., Draper, C.F., Lee, K.P., and Colton, R.J., *Review of Scientific Instruments*, Vol 65, No. 5, 1994, p. 1561.
- (4) Fu, J. *Review of Scientific Instruments*, Vol 66, No. 7, 1995, p. 3785.
- (5) Griffith, J.E., and Grigg, D.A., *Journal of Applied Physics*, Vol 74, 1993, pp. R83–R109.
- (6) Snevity, D., and Vancso, J., *Langmuir*, Vol 9, No. 9, 1993, p. 2253.
- (7) Schwarz, U.D., Haefke, H., Reimann, P., and Guntherodt, H.-J., *Journal of Microscopy*, Vol 173, No. 3, 1994, p. 183.
- (8) Montelius, L., Tegenfeldt, J.O., *Applied Physics Letters*, Vol 62, No. 21, 1993 , p. 2628.
- (9) Reiss, G., Schneider, F., Vancea, J., and Hoffman, H., *Applied Physics Letters*, Vol 57, No. 9, 1990, p. 867.
- (10) Keller, D., *Surface Science*, Vol 235, 1991, p. 353.
- (11) Villarrubia, J.S., *Surface Science*, Vol 321, 1994, p. 287.
- (12) Villarrubia, J.S., *Journal of Research of NIST* , Vol 102, 1997, p. 425.
- (13) Thundat, T., Zheng, X.-Y., Sharp, S.L., Allison, D.P., Warmack, R.J., Joy, D.C., and Ferrell, T.L., *Scanning Microscopy*, Vol 6, No. 4, 1992, p. 903.
- (14) Westra, K.L., and Thompson, D.J., *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol 12, No. 6, 1994, p. 3176.
- (15) Butt, H.-J., Guckenberger, R., and Rabe, J.P., *Ultramicroscopy*, Vol 46, 1992, p. 375.

- (16) Martin, D.C., Ojeda, J.R., Anderson, J.P., and Pingali G., *Atomic Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy*, S.H. Cohen, M.T. Bray, and M.L. Lightbody, eds., Plenum Press, New York, 1994, p. 217.
- (17) Gallarda, H., and Jain, R., "Proceedings of Conference on Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control, V," SPIE, Vol 1464, 1991, p. 459.
- (18) Pingali, G.S., and Jain, R., *Proceedings IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 1992, p. 282.
- (19) Vesenska, J., Manne, S., Giberson, R., Marsh, T., and Henderson, E., *Biophysical Journal*, Vol 65, 1993, p. 992.
- (20) Xu, S., and Arnsdorf, M.F., *Journal of Microscopy*, Vol 173, No. 3, 1994, p. 199.
- (21) Odin, C., and Aime, J.P., *Surface Science* , Vol 317, No. 3, 1994, p. 321.
- (22) Allen, M.J., Hud, N.V., Balooch, M., Tench, R.J., Siekhaus, W.J., and Balhorn, R., *Ultramicroscopy* , Vol 42, 1992, p. 1095.
- (23) Markiewicz, P., and Goh, C., *Langmuir*, Vol 10, 1994, p. 5.
- (24) Keller, D.J., and Francke, F.S., *Surface Science*, Vol 294, 1993, p. 409.
- (25) Bonnet, N., Dongmo, S., Vautrot, P., and Troyon, M., *Microscopy Microanalysis Microstructures*, Vol 5, 1994, p. 477.
- (26) Wilson, D.L., Kump, K.S., Eppell, S.J., and Marchant, R.E., *Langmuir*, Vol 11, 1995, p 265.
- (27) Williams, P.M., Shakesheff, K.M., Davies, M.C., Jackson, D.E., Roberts, C.J., and Tendler, S.J.B., *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol 14, 1996, p. 1557.
- (28) Villarrubia, J.S., *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol 14, 1996, p. 1518.
- (29) Dongmo, S., Troyon, M., Vautrot, P., Delain, E., and Bonnet, N., *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol 14, 1996, p. 1552.