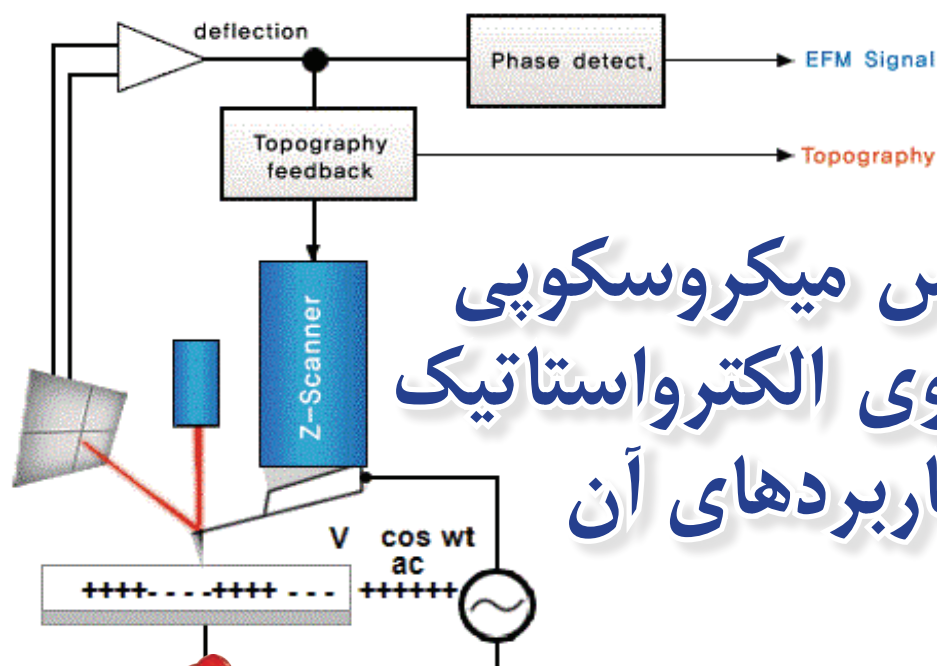


روش میکروسکوپی نیروی الکترواستاتیک و کاربردهای آن

چکیده

میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک (EFM) یکی از اعضای خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی است. در این میکروسکوپ با اندازه‌گیری برهم‌کنش الکترواستاتیکی موضعی بین نوک سوزن رسانا و نمونه، نقشه ویژگی‌های الکتریکی نمونه به تصویر کشیده می‌شود. برای این منظور، یک ولتاژ بایاس بین نوک سوزن و نمونه اعمال می‌شود. از این ولتاژ برای ایجاد میدان الکترواستاتیک بین نوک سوزن و پایه و نیز برای میزان کردن این میدان استفاده می‌شود. فاز و فرکانس رزونانس تیرک با شیب شدت میدان الکتریکی تغییر کرده و برای ساخت تصویر EFM مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین EFM می‌تواند برای تشخیص مناطق عایق و رسانا در نمونه استفاده شود. تصاویر EFM حاوی اطلاعات سودمندی درباره خواص الکتریکی نمونه مانند پتانسیل و توزیع بار در سطح نمونه بوده و یک ابزار سودمند برای آزمایش ترشه‌های ریزپردازنده زنده در مقیاس زیر میکرون است.

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک، میکروسکوپ پروبی روبشی، نیروی الکترواستاتیک، EFM.

مقدمه

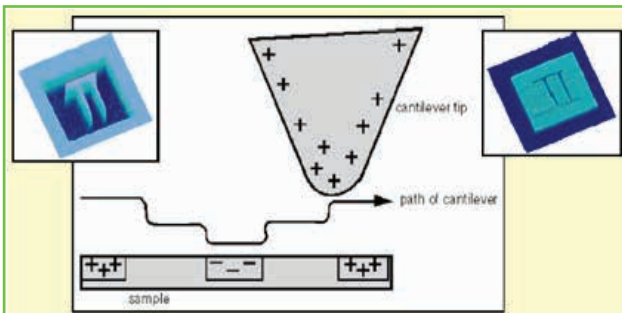
میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک^۱ (EFM) یکی از اعضای خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی است که می‌تواند توزیع پتانسیل الکتریکی، توزیع بار و اختلاف پتانسیل تماسی^۲ (CPD) را به کمک تعیین نیروی الکترواستاتیک بین سوزن و نمونه به تصویر درآورد. نخستین تلاش برای تعیین نیروی الکترواستاتیک و مشاهده بارهای سطحی در لایه‌های پلیمری توسط مارتین^۳ و استرن^۴ و همکاران آنها صورت پذیرفت که منجر به هدایت فعالیت‌ها به سوی روش اخیر EFM شده است [۱]. در این روش، با اندازه‌گیری نیروی الکترواستاتیکی بین سطح نمونه و سوزنی که تحت اعمال ولتاژ بایاس قرار گرفته، نقشه ویژگی‌های الکتریکی سطح نمونه به تصویر کشیده می‌شود. به هر حال، علاوه بر نیروی الکترواستاتیکی، همواره نیروهای واندروالسی نیز بین نوک سوزن و سطح نمونه وجود دارند. بزرگی این نیروهای واندروالسی با توجه به فاصله نوک سوزن از نمونه تغییر می‌کند، بر این اساس برای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح استفاده می‌شود. بنابراین، سیگنال‌های دریافتی می‌تواند به‌طور هم‌زمان شامل اطلاعات مربوط به توپوگرافی سطح (سیگنال توپوگرافی) و اطلاعات مربوط به خواص الکتریکی سطح (سیگنال EFM) باشد که به‌ترتیب به‌وسیله نیروهای واندروالسی و الکترواستاتیکی به‌وجود می‌آیند. نکته کلیدی در تصویربرداری موفقیت‌آمیز EFM، جداسازی سیگنال EFM از سیگنال کل است. می‌توان حالت‌های مختلف EFM را بر اساس روش‌های مورد استفاده برای جداسازی سیگنال EFM طبقه‌بندی نمود [۲].

نویسندگان:

زهرا ثبات^۱، مرضیه کشاورزی^۲، صدیقه
صادق حسنی^۳، ندا عبودزاده رویس^۴

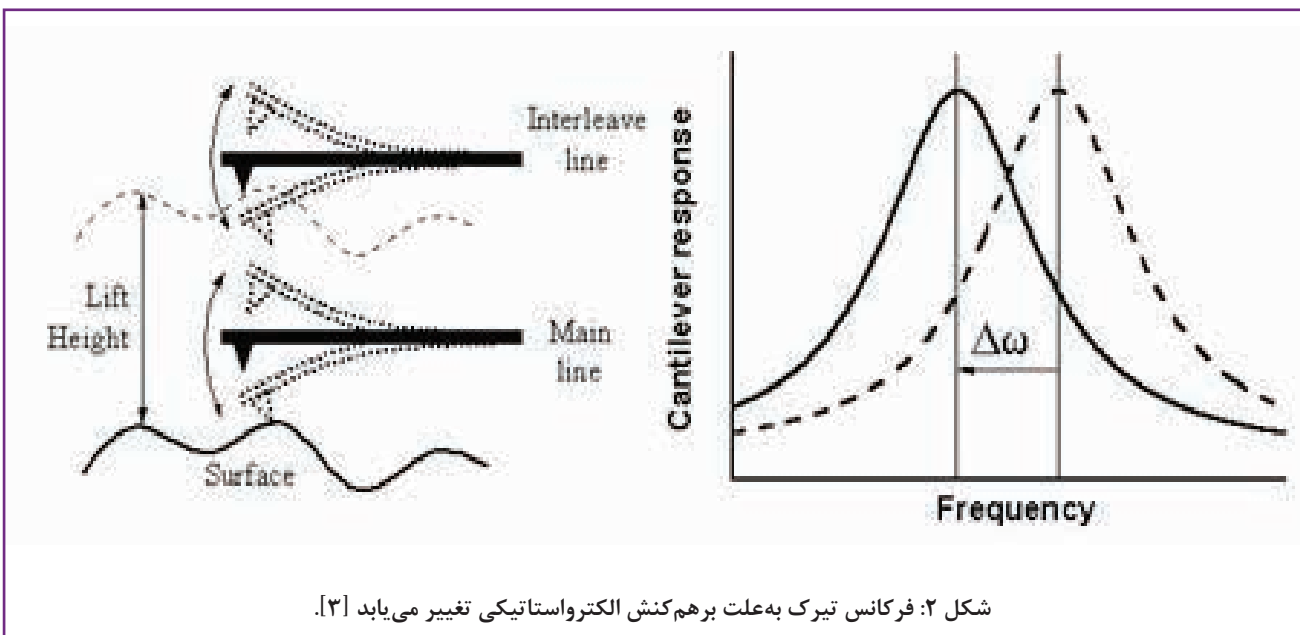
SadeghS@ripi.ir

۱. کارشناس ارشد شیمی فیزیک، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانوفناوری
۲. کارشناس ارشد بیوتکنولوژی کشاورزی، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، آزمایشگاه نانوتکنولوژی
۳. کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانوفناوری
۴. کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مواد
۵. عضو کارگروه تخصصی دستگاه‌های SPM شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو



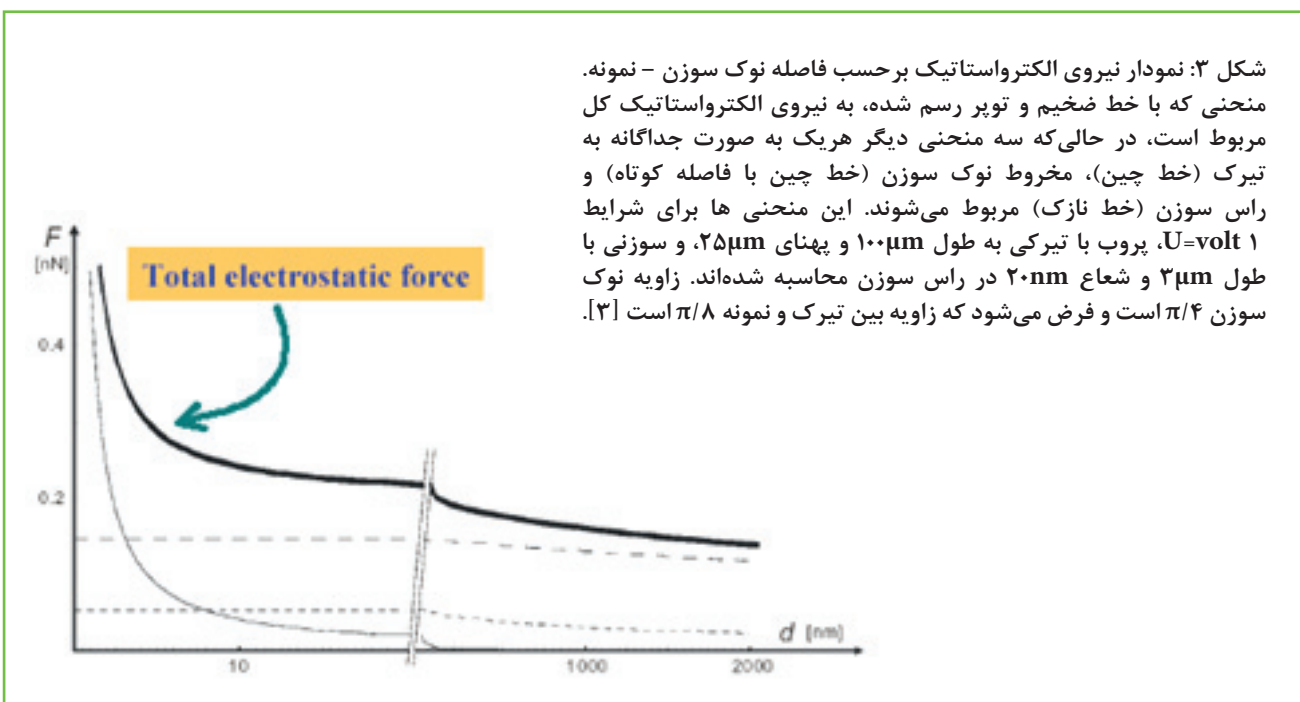
شکل ۱: شمای روبش سطح در روش میکروسکوپی نیروی الکترواستاتیک (EFM) [۳].

در روش EFM، در حالی که تیرک روی سطح نمونه و بدون تماس با آن قرار دارد، ولتاژی بین نوک سوزن و نمونه اعمال می‌شود. در شکل (۱) و (۲) چگونگی حرکت تیرک بر فراز بارهای استاتیک به‌هنگام عمل روبش و نیز چگونگی تغییر فرکانس تیرک بر اثر برهم‌کنش نیروهای الکترواستاتیک نشان داده شده‌است.



شکل ۲: فرکانس تیرک به‌علت برهم‌کنش الکترواستاتیکی تغییر می‌یابد [۳].

در شکل (۳) نیز نمودار نیروی الکترواستاتیک برحسب فاصله نمونه - نوک سوزن به تصویر کشیده شده‌است.



شکل ۳: نمودار نیروی الکترواستاتیک برحسب فاصله نوک سوزن - نمونه. منحنی که با خط ضخیم و توپر رسم شده، به نیروی الکترواستاتیک کل مربوط است، در حالی که سه منحنی دیگر هریک به صورت جداگانه به تیرک (خط چین)، مخروط نوک سوزن (خط چین با فاصله کوتاه) و راس سوزن (خط نازک) مربوط می‌شوند. این منحنی‌ها برای شرایط $U=1\text{ volt}$ ، پروب با تیرکی به طول $100\mu\text{m}$ و پهنای $25\mu\text{m}$ ، و سوزنی با طول $2\mu\text{m}$ و شعاع 20 nm در راس سوزن محاسبه شده‌اند. زاویه نوک سوزن $\pi/4$ است و فرض می‌شود که زاویه بین تیرک و نمونه $\pi/8$ است [۳].

هنگامی که ولتاژ AC (V_{AC}) با فرکانس زاویه‌ای ω_m بین نمونه و پروب اعمال می‌شود، پروب به وسیله نیروی الکترواستاتیک و با فرکانس ω_m شروع به نوسان می‌کند. با استفاده از ظرفیت بین پروب و نمونه (C)، که تابع فاصله نمونه - پروب است، نیروی الکترواستاتیک F_z^{el} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_z^{el} = -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_s + V_{DC} + V_{AC} \cos \omega_m t)^2$$

$$= -\frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} \{ (V_s + V_{DC})^2 + 2(V_s + V_{DC}) V_{AC} \cos \omega_m t \cos^2 \omega_m t \} + V_{AC}^2$$

که در آن V_{DC} ولتاژ بایاس خارجی اعمال شده بر پروب است. نیروی الکترواستاتیک با مجذور ولتاژ متناسب است و نوسان شامل مؤلفه‌های ω_m ، DC و $2\omega_m$ است که به ترتیب عبارتند از: نیروی جاذبه استاتیک بین الکترودهای سازنده خازن، نیروی وارد شده از سوی میدان الکتریکی AC به بارها و نیروی القا شده از سوی ولتاژ AC به خازن‌ها هستند. هنگامی که برای حذف اختلاف پتانسیل تماسی، ولتاژ بایاس مناسبی به پروب اعمال می‌شود؛ مؤلفه ω_m از بین خواهد رفت یعنی، $V_s + V_{DC} = 0$. بنابراین می‌توان با کنترل بازخورد V_{DC} به منظور صفر نگه داشتن مؤلفه ω_m ، مقدار پتانسیل تماسی یا CPD را اندازه‌گیری نمود [۱].

در شکل (۵)، اجزای مختلف دستگاه EFM و نمودار گردش کار این دستگاه نشان داده شده است.

تقریباً هر ویژگی سطحی که به وسیله AFM اندازه‌گیری می‌شود، براساس فرآیندی که در شکل (۷) نشان داده شده است، تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌های EFM نیز روند مشابهی را دنبال می‌کند.

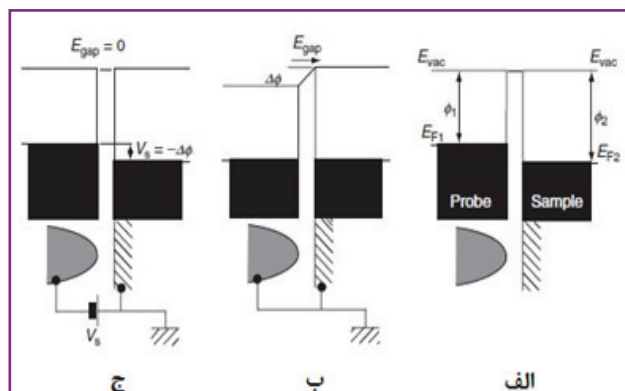
در جایی که از میکروسکوپ نیروی اتمی غیرتماسی برای تصویربرداری در مقیاس اتمی استفاده می‌شود، باید در مورد اصل نیروی تعیین شده بیشتر بحث شود؛ زیرا جاد کردن کامل نیروی الکترواستاتیک از نیروهای واندروالس یا شیمیایی غیرممکن است. از طرفی، تصویر EFM در مقیاس اتمی به میزان تیز بودن نوک سوزن بسیار حساس است؛ از این رو چگونگی تهیه سوزن با ویژگی‌های مطلوب موضوع مهمی است. از آنجایی که نیروی الکترواستاتیک دوربردترین نیروی موجود در SPM است، شکل سوزن خصوصاً در خانواده EFM از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین نه تنها نوک سوزن بلکه شکل کلی تیرک در نتیجه تاثیرگذار است.

در سال ۲۰۰۲ دستگاه EFM با تیرکی مجهز به حسگر پیزوالکتریکی انکساردهنده ساخته شد. از آنجایی که اثر فتولتائیک تعیین دقیق پتانسیل سطح را در سطوح نیمه‌رسانا برهم می‌زند، این روش می‌تواند در EFM مطلوب باشد [۱].

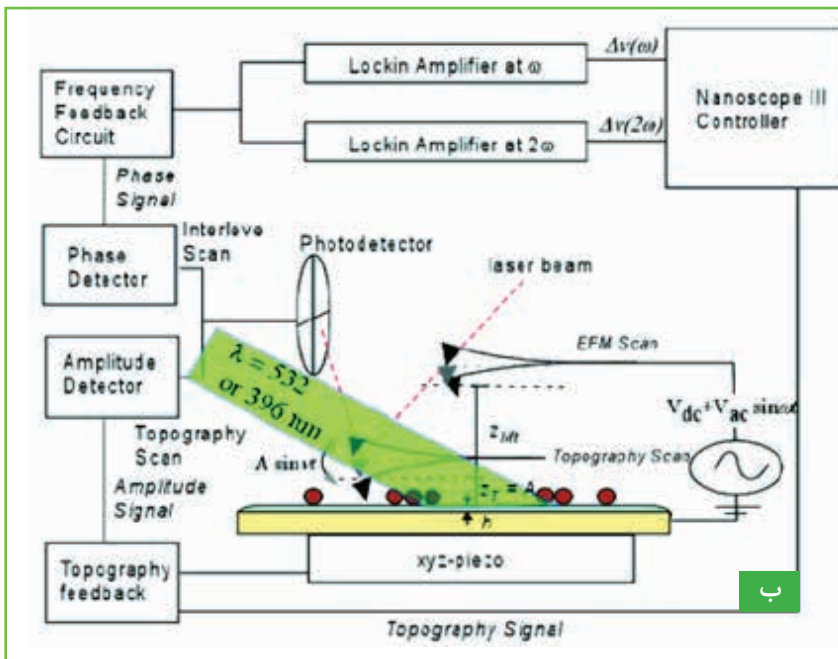
در واقع روش EFM، حالت تصویربرداری ثانویه‌ای از AFM است که با اندازه‌گیری برهم‌کنش الکترواستاتیکی موضعی بین نوک سوزن رسانا و نمونه، توزیع شیب میدان الکتریکی روی سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور، یک ولتاژ بایاس بین نوک سوزن و نمونه اعمال می‌شود. از این ولتاژ برای ایجاد میدان الکترواستاتیک بین نوک سوزن و پایه و تنظیم این میدان استفاده می‌شود. فاز و فرکانس رزونانس تیرک با شیب شدت میدان الکتریکی تغییر کرده که برای تهیه تصویر EFM مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین EFM می‌تواند برای تشخیص مناطق عایق و رسانا در نمونه استفاده شود [۳]. تصاویر EFM حاوی اطلاعاتی درباره خواص الکتریکی نمونه، مانند پتانسیل و توزیع بار در سطح نمونه است. میزان انحراف تیرک، متناسب با چگالی بار است. بنابراین، EFM می‌تواند برای مطالعه تغییرات فضایی سطح حامل بار مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، EFM می‌تواند نقشه میدان‌های الکتریکی مدارهای الکترونیکی را در حالتی که دستگاه خاموش یا روشن است، رسم کند. این روش با نام ردیابی ولتاژ^۵ شناخته شده که یک ابزار سودمند برای آزمایش تراشه‌های ریزپردازنده در مقیاس زیر میکرون است [۲].

اصول روش EFM

برای تشریح اصول روش EFM، ساده‌ترین سامانه، شامل پروب فلزی و نمونه صاف فلزی با سطوح فرمی به ترتیب EF_1 و EF_2 در نظر گرفته می‌شود. با فرض آن که سطوح خلاء برای این دو سطح یکسان است، سطوح فرمی مربوط در شکل (۴) نشان داده شده است. هنگامی که هردو سطح فرمی از نظر الکتریکی کوچک می‌شوند تا به سطح فرمی یکسانی برسند، اختلاف تابع کار (V_s) بین دو ماده، یک میدان الکتریکی بین دو رسانا ایجاد می‌کند. منبع این میدان الکتریکی، بارهای القا شده در سطوح پروب و نمونه است که می‌تواند به عنوان یک لایه مضاعف الکتریکی در نظر گرفته شود. اگر در این فاصله، مولکولی وجود داشته باشد، پلاریزاسیون مولکولی را نیز باید در نظر گرفت [۱].

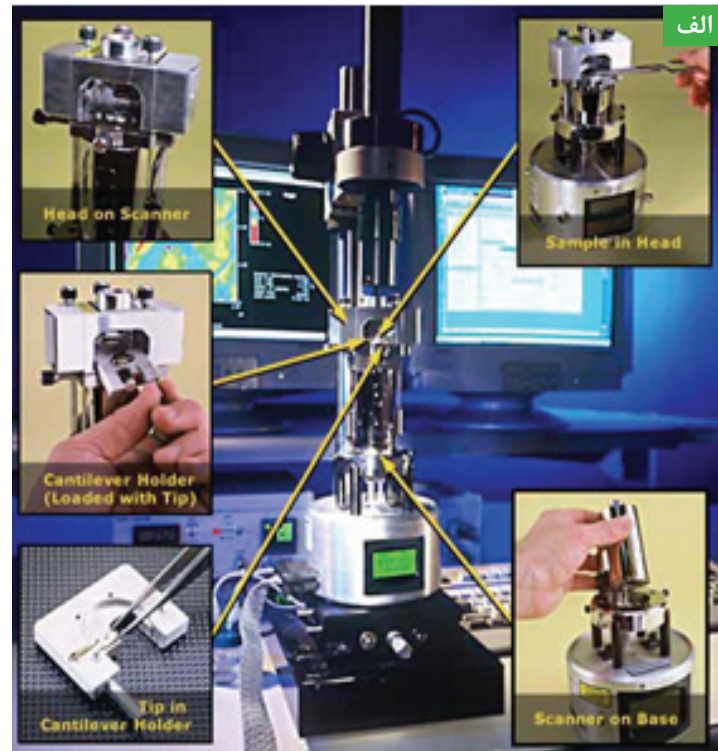


شکل ۴: دیگرام انرژی برای سامانه نمونه - پروب هنگامی که (الف) ایزوله هستند، (ب) هر دو متصل به زمین هستند و (ج) سطوح خلاء به وسیله بایاس خارجی یکسان شده است [۱].



شکل ۵: الف) دستگاه آزمایشگاهی FM، ب) نمودار گردش کار، نشان می‌دهد که اطلاعات توپوگرافی در حالت نوسانی در نخستین مسیر روبش به‌دست می‌آید. در دومین مسیر روبش، تیرک بر فراز فاصله‌ای از سطح قرار گرفته و در ارتفاع ثابتی از سطح و در حالی که هم به صورت مکانیکی و هم به صورت الکتریکی لرزانده می‌شود، عمل روبش را انجام می‌دهد. جابه‌جایی فرکانس سوزن به‌وسیله حلقه فاز - قفل تعیین شده و به دو تقویت‌کننده قفل‌شونده^۶ که در آنها سیگنال با فرکانس‌های ω و 2ω از یکدیگر جدا می‌شوند، فرستاده شده و سپس به کنترل‌کننده نانواسکوپ برای ساخت تصویر، هدایت می‌شود [۳].

ب



الف

تغییر ویژگی‌های سطح در طول خط روبش

تغییر نیروهای برهم‌کنش بین نوک سوزن و سطح نمونه

انحراف تیرک (حالت تماسی) یا تغییر دامنه نوسان و تغییر فاز تیرک (حالت غیر تماسی)

تغییر سیگنال لیزر به PSPD

سیگنال الکتریکی به SPM

سیگنال پردازشگر به تولید تصویر

شکل ۶: شمایی از مراحل اندازه‌گیری ویژگی‌های سطح به‌وسیله حالت‌های مختلف EFM [۲]

در آن سویی که سوزن قرار دارد، باعث ارتقا هدایت سوزن شده و اتصالات الکتریکی را فراهم می‌نماید و در آن سویی که حسگر قرار دارد، باعث افزایش تقریباً ۲ برابری قابلیت بازتاب پرتوهای لیزر شده و از مزاحمت نوری با تیرک ممانعت می‌کند.

فرآیند پوشش دادن به‌گونه‌ای بهینه می‌شود که تنش داخلی در ساختار پروب را خنثی کرده و باعث بوجود آمدن مقاومت در برابر ساییدگی شود. میزان خمیدگی ناشی از تنش کمتر از $3/5$ درصد طول تیرک است. از ویژگی‌های خاص این نوع پروب می‌توان به رسانایی فلزی سوزن و بالا بودن فاکتور مکانیکی Q برای حساسیت‌های بالا اشاره کرد [۴].

انواع پروب‌های مورد استفاده در میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک

پروپ‌های پیشنهادی برای میکروسکوپی نیروی الکترواستاتیک، دارای پوشش کامل فلزی (PtIr) در هر دو سوی تیرک است که باعث افزایش هدایت الکتریکی سوزن می‌شود. ثابت نیروی این نوع پروب برای میکروسکوپی نیروی الکترواستاتیک به‌گونه‌ای خاص تنظیم می‌شود تا پروب، دارای حساسیت نیروی بسیار بالایی شده که بتواند به‌صورت همزمان در حالت نوسانی و بالارونده عمل کند. معمولاً پوشش PtIr با ضخامت تقریبی ۲۵ نانومتر شامل دولایه کروم و پلاتین ایریدیوم است که روی هر دو وجه تیرک قرار دارد. پوشش

■ بایاس متغیر، انحراف ثابت

در این روش، اندازه‌گیری پتانسیل سطح (بار) روی نمونه به وسیله تنظیم ولتاژ روی نوک سوزن انجام می‌شود. برای حفظ بازخورد، باید ولتاژ اعمال شده روی تیرک به گونه‌ای تنظیم شود که میزان انحراف یا بزرگی دامنه در حد ثابتی حفظ گردد. تصاویر می‌توانند در وضعیت DC (حالت تماسی^{۱۲}) با ثبت انحراف تیرک و یا در وضعیت AC (حالت نوسانی) هنگامی که تیرک روی سطح نوسان کرده و فاز یا دامنه تیرک ثبت می‌شود، جمع‌آوری شوند [۳].

■ نیروی کل بین نوک سوزن و نمونه

نیروی کل = نیروی خازنی + برهم‌کنش کولنی + نیروی واندروالسی + دافعه کره سخت^{۱۳}

$$F_{EFM} = \frac{1}{\gamma} \frac{dC}{dz} (V_b + \phi)^2 - E_z C (V_b + \phi) + F_{VDW} + F_{hs}$$

هنگامی که ولتاژ بایاس اعمال شده $V_b = -\phi$ ، همه برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک بی‌اثر می‌شوند.

▲ ظرفیت خازنی نوک سوزن - نمونه است.

▲ V_b ولتاژ بایاس اعمال شده روی نمونه است.

▲ ϕ اختلاف پتانسیل سطحی بین نوک سوزن و پایه است.

▲ E_z میدان استاتیکی است که به خاطر بار یا

چندقطبی‌های موجود در نمونه، به استثنای میدان بارهای تجمع یافته در صفحات خازن، یعنی نوک سوزن و پایه تحت ولتاژ بایاس، ایجاد شده است.

▲ F_{VDW} نیروی واندروالسی است.

▲ F_{hs} دافعه کره سخت، نیرویی است که هنگام تماس

بسیار نزدیک نوک سوزن و نمونه ایجاد می‌شود [۳].

■ انواع روش‌های EFM

در تقسیم‌بندی دیگر، روش‌های EFM براساس روشی که اطلاعات الکتریکی سطح به دست می‌آیند، طبقه‌بندی می‌شوند که شامل حالت‌های زیر هستند:

■ میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک استاندارد

روش EFM استاندارد از سری EFM‌های پیشرفته بر مبنای دو واقعیت بنا نهاده شده است. نخست این که، روند حاکم بر نیروهای واندروالسی و الکترواستاتیک از هم متفاوت است. نیروهای واندروالسی با $1/r^6$ و نیروهای الکترواستاتیک با $1/r^2$ متناسب هستند [۲].

بنابراین، هنگامی که نوک سوزن به نمونه نزدیک می‌شود نیروهای واندروالسی غالب می‌شوند و هنگامی که نوک سوزن از نمونه دور می‌شود، نیروی واندروالسی به سرعت کاهش یافته و نیروهای الکترواستاتیک حاکم می‌شوند. در حقیقت، مسیر توپوگرافی خط سیر نوک سوزن است که در فاصله ثابتی از

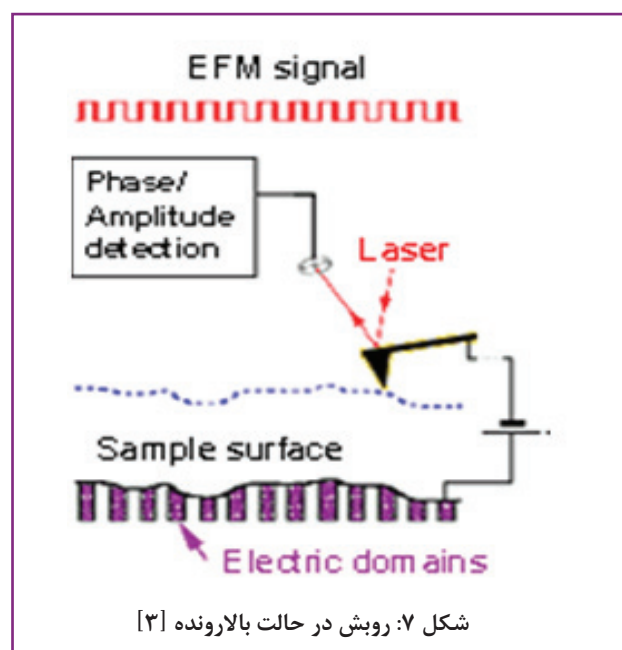
■ انواع حالت‌های EFM

■ حالت بالارونده^۷، ارتفاع ثابت

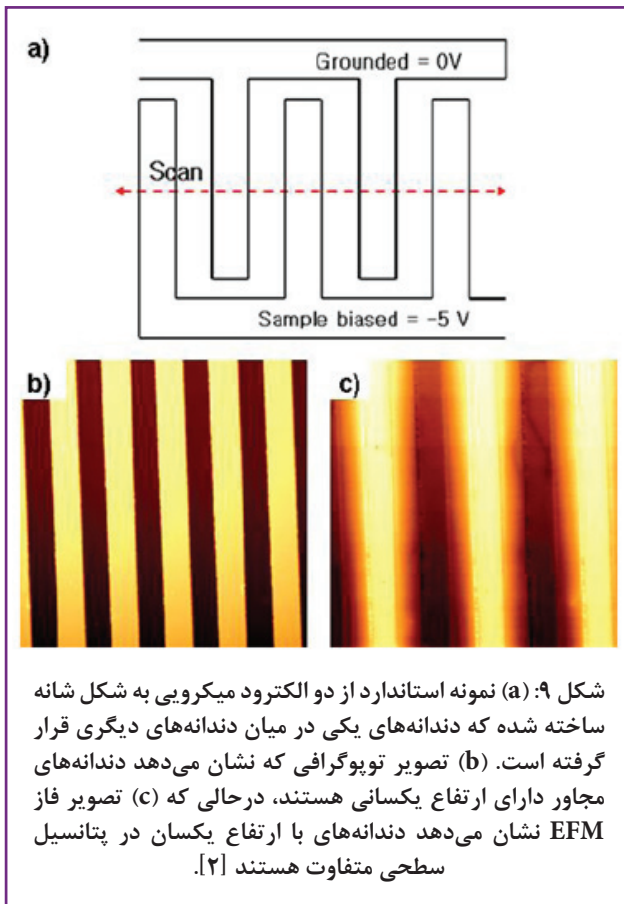
از آنجایی که برهم‌کنش نیروهای الکترواستاتیکی بین سوزن و سطح در مقایسه با نیروهای واندروالسی در فاصله‌های دورتر آشکار می‌شوند، بنابراین می‌توان اطلاعات مربوط به نیروی الکتریکی را به سادگی و با دور کردن نوک سوزن و افزایش فاصله نوک سوزن - نمونه از اطلاعات مربوط به توپوگرافی سطح جدا نمود.

در این وضعیت، ابتدا نوک سوزن، سطح نمونه را در حالت ضربه‌ای^۸ روبش نموده و توپوگرافی سطح به دست می‌آید و سپس روبش بعدی بدون نوسان مکانیکی انجام می‌شود به طوری که سوزن از سطح دور شده و با حفظ فاصله ثابت میان سوزن و سطح، نقشه سطح ترسیم می‌شود. در طول دومین روبش، نوک سوزن به صورت مکانیکی و با بازوی محرک پیژو^۹ رانده نمی‌شود و به سامانه بازخورد^{۱۰} هم نیازی نیست. بنابراین، روبش سریع‌تر فراهم می‌شود. در طی روبش دوم، ولتاژ بایاس پروب به وسیله ولتاژ AC با فرکانس رزونانس مدوله می‌شود تا نیروی الکترواستاتیکی به صورت دقیق تعیین شود. با این روش، تداخل بین سیگنال‌های الکترواستاتیکی و توپوگرافی خنثی می‌شود.

برای ایجاد میدان الکتریکی، ولتاژ ثابتی روی نوک سوزن برقرار می‌شود. هنگامی که نوک سوزن از شیب میدان الکتریکی در ناحیه جذبی عبور می‌کند، به سوی نمونه کشیده می‌شود و هنگامی که نوک سوزن از شیب میدان الکتریکی در ناحیه دافعه گذر می‌نماید، از سوی نمونه رانده می‌شود. انحراف تیرک (یا تغییر فرکانس آن) با دانسیته بار متناسب است که می‌تواند به وسیله سامانه استاندارد نور-آهرم^{۱۱} اندازه‌گیری شود. همچنین برهم‌کنش الکترواستاتیک به فاصله بستگی دارد. برای ترسیم توزیع بار سطحی (پتانسیل)، بسیار ضروری است که نوک سوزن روبشگر در فاصله ثابتی از سطح نگه داشته شود تا بدین ترتیب، اثر نوسانات سطح (توپوگرافی) برطرف شود [۳].



شکل ۷: روبش در حالت بالارونده [۳]



پیشرفته از سری XE ارائه شده که در مقایسه با EFM استاندارد، از نظر کارایی برتری دارد [۲]. در EFM پیشرفته، ولتاژ بین نوک سوزن و نمونه را می‌توان با معادله‌های زیر بیان نمود:

$$V(t) = V_{dc} - V_s + V_{ac} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$F = q \times E = q \times V/d = C \times V^{\frac{1}{2}}/d \quad (2)$$

$$F(t) = (C/d) \times V(t)^{\frac{1}{2}}$$

$$F(t) = \left\{ (C/d) \times \left[(V_{dc} - V_s)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{ac}^{\frac{1}{2}} \right] + \left\{ \frac{1}{2} \times (C/d) \times (V_{dc} - V_s) \times V_{ac} \sin(\omega t) \right\} - \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} (C/d) \times V_{ac}^{\frac{1}{2}} \cos(\sqrt{2} \omega t) \right\} \right\}$$

عبارت $F(t)$ خود شامل سه عبارت است:

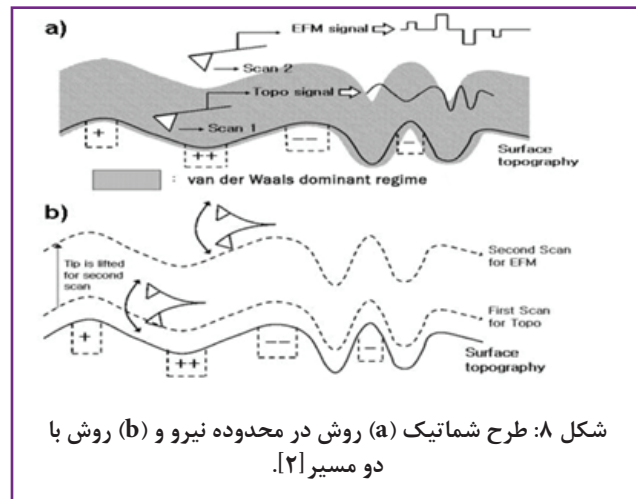
$$a: (C/d) \times \left[(V_{dc} - V_s)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{ac}^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$b: \frac{1}{2} \times (C/d) \times (V_{dc} - V_s) \times V_{ac} \sin(\omega t)$$

$$c: \frac{1}{\sqrt{2}} (C/d) \times V_{ac}^{\frac{1}{2}} \cos(\sqrt{2} \omega t)$$

که در آن V_{dc} پتانسیل جبران‌کننده DC است، V_s پتانسیل سطحی روی نمونه، V_{ac} و ω به ترتیب بزرگی و فرکانس سیگنال ولتاژ AC اعمال شده هستند [۲].

نمونه قرار دارد و معادل خط نیروی واندروالسی ثابت است [۲]. در روش‌های براساس نیرو، نخستین روبش برای تهیه تصویر توپوگرافی سطح و به‌وسیله روبش نوک سوزن در محدوده‌ای که نیروهای واندروالسی غالب است، انجام می‌شود. سپس فاصله نوک سوزن - نمونه تغییر داده می‌شود تا نوک سوزن در منطقه‌ای قرار بگیرد که نیروی الکترواستاتیک حاکم است و برای تهیه تصویر EFM، سطح روبش می‌شود (شکل ۸-ا) [۲].



در روش دو مسیر، نخستین روبش در نزدیکی سطح، به منظور تهیه توپوگرافی و مشابه روش میکروسکوپی اتمی غیرتماسی در ناحیه‌ای که نیروهای واندروالسی حاکم است، انجام می‌شود. در دومین روبش، برای این که نوک سوزن در ناحیه‌ای قرار گیرد که نیروهای الکترواستاتیکی غالب هستند، نوک سوزن را بلند کرده و فاصله بین نوک سوزن و نمونه افزایش می‌یابد. سپس نوک سوزن تحت اعمال ولتاژ با یاس قرار گرفته و عمل روبش بدون سامانه بازخورد، موازی با خط توپوگرافی که از روبش نخست به‌دست آمده و در شکل (۸-ب) نیز نشان داده شده است، انجام می‌شود و بدین ترتیب فاصله ثابت بین نمونه و نوک سوزن حفظ می‌شود [۲].

از آنجایی که مسیر توپوگرافی در یک خط با نیروی واندروالسی ثابت است، پس نیروهای واندروالسی اعمال شده بر نوک سوزن در طول دومین روبش ثابت خواهد بود. بنابراین تنها منبع تغییر سیگنال، تغییر نیروی الکترواستاتیک خواهد بود. پس سیگنال EFM مستقل از توپوگرافی می‌تواند از دومین روبش به‌دست آید. در شکل (۹) به‌عنوان نمونه تصویر توپوگرافی و فاز یک مجموعه الکتروود که با استفاده از روش EFM به‌دست آمده، نشان داده شده است [۲].

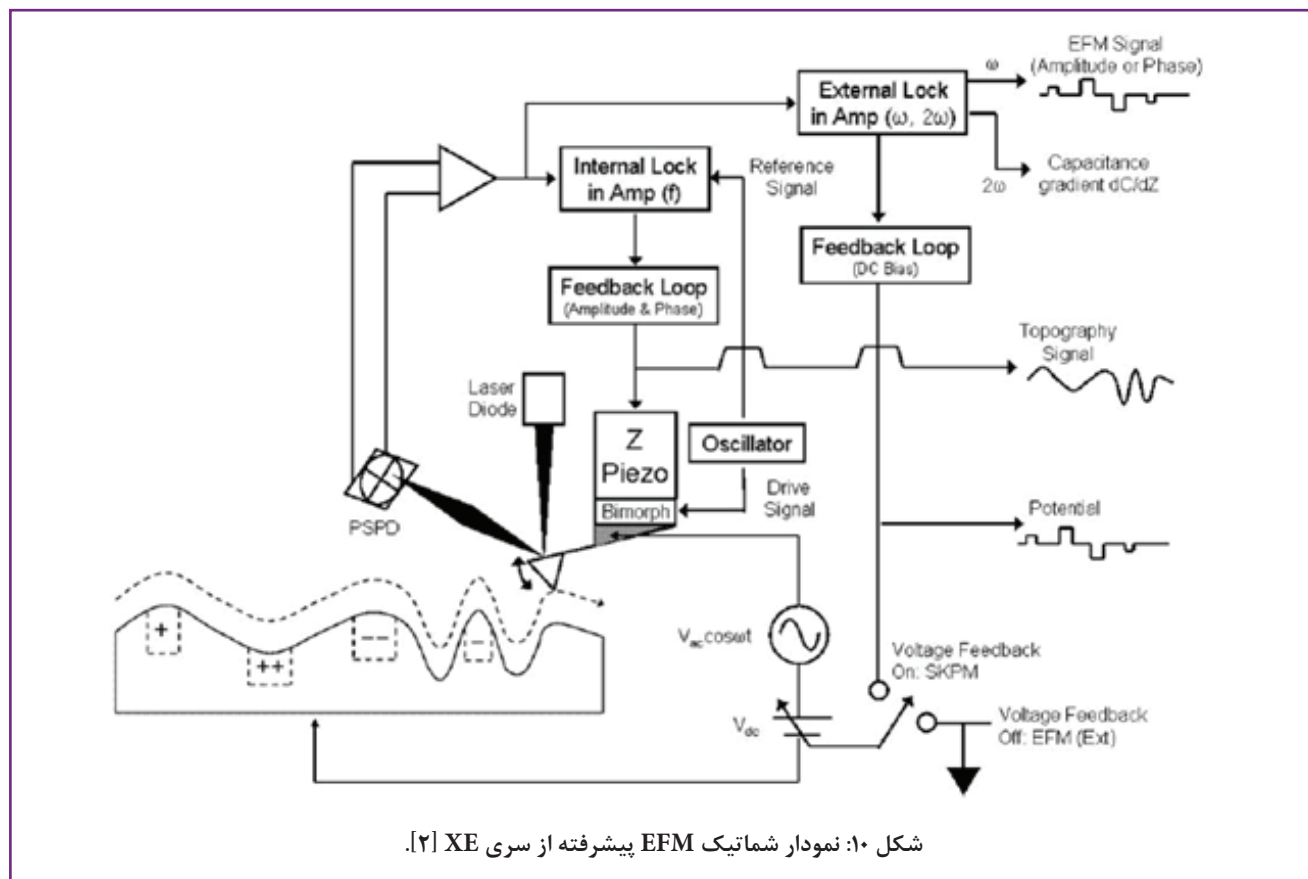
■ میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک پیشرفته

در EFM پیشرفته که نمودار شماتیک آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است، یک تقویت‌کننده قفل شونده^{۱۴} با دو هدف به AFM سری XE متصل می‌شود. هدف نخست این که، علاوه بر ولتاژ با یاس DC که به‌وسیله کنترل‌کننده XE اعمال می‌شود، ولتاژ با یاس AC با فرکانس ω نیز بر نوک سوزن وارد شود. هدف دیگر این است که اجزای فرکانس ω از سیگنال خروجی جدا شود. این توانمندی منحصربه‌فرد بوسیله EFM

این عبارت‌ها می‌توانند به ترتیب به جمله‌های (a) عبارت DC، (b) عبارت ω و (c) عبارت 2ω ارجاع داده شوند. سیگنال انحراف کل تیرک که معرف نیروی بین نمونه و نوک سوزن است، می‌تواند در عبارت‌های بخش‌های جداگانه AC، DC، با فرکانس ω و AC با فرکانس 2ω مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. سیگنال انحراف DC تیرک می‌تواند از طریق نرم‌افزار در دسترس قرار گیرد. بخش‌های AC سیگنال انحراف تیرک، اعم از سیگنال مربوط به فرکانس ω و سیگنال با فرکانس 2ω نیز می‌توانند با ارسال سیگنال به تقویت‌کننده قفل‌شونده، خوانده شود.

اگر بتوان شکل هندسی نوک سوزن و نمونه را تخمین زد، معادله (۱) مناسب خواهد بود. معادله (۲) می‌تواند برای استنتاج عبارتی برای نیروی الکترواستاتیکی بین نوک سوزن و نمونه استفاده شود.

در اینجا، F نیروی الکترواستاتیکی است که روی نوک سوزن اعمال می‌شود، q بار، E میدان الکتریکی، V پتانسیل الکتریکی، C ظرفیت و d فاصله نوک سوزن و نمونه است. هنگامی که هر دو ولتاژ بایاس AC و DC بین نمونه و سوزن اعمال می‌شود، سه عبارت در بیان نیروی بین سوزن و نمونه بوجود می‌آید.



شکل ۱۰: نمودار شماتیک EFM پیشرفته از سری XE [۲].

■ میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک EXT

این حالت، نوعی EFM پیشرفته است که در وضعیت غیرتماسی اجرا می‌شود که در آن برای تهیه تصویر توپوگرافی AFM در حالت غیرتماسی، نوک سوزن با فرکانس نوسان ω ، سراسر سطح نمونه را روبش می‌کند. در همان زمان، ولتاژ بایاس AC با فرکانس ω از طریق تقویت‌کننده قفل‌شونده به سوزن اعمال می‌شود و ولتاژ بایاس DC نیز اعمال شده تا یک کنترل الکترونیکی بوجود آید. این وضعیت سبب می‌شود که نیروی بین سطح باردار شده و نوک سوزنی که تحت اعمال ولتاژ بایاس AC قرار گرفته است، بوجود آید. با استفاده از تقویت‌کننده قفل‌شونده خارجی، سیگنال به‌دست آمده از حرکت نوک سوزن تحت نیرو، می‌تواند به بخش‌های DC، فرکانس ω ، فرکانس 2ω تجزیه شده و مورد تحلیل قرار گیرد. بخش ω سیگنال شامل اطلاعاتی در مورد بار سطحی، و بخش 2ω سیگنال شامل اطلاعاتی درباره شیب ظرفیت الکتریکی سطحی بین نوک سوزن

سه سیگنال باهم می‌توانند برای کسب اطلاعاتی درباره خواص الکتریکی نمونه مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال، در معادله، ظرفیت به‌صورت نسبت ظرفیت الکتریکی به فاصله نمونه - نوک سوزن (d/C) ظاهر می‌شود. هنگامی که فاصله نمونه - نوک سوزن به‌وسیله حلقه بازخورد Z ثابت نگه داشته شود، نسبت d/C با ظرفیت متناسب می‌شود. سیگنال ω در معادله (۲) قسمت (b)، مشارکت d/C و پتانسیل سطحی V_s را در بر دارد. با فرض معلوم بودن پتانسیل‌های V_{dc} و V_{ac} ، هنوز نمی‌توان سهم ظرفیت الکتریکی و پتانسیل سطحی را در سیگنال ω اندازه‌گیری شده، جدا نمود. به هر حال، سیگنال 2ω در عبارت (c)، تنها مشارکت ظرفیت الکتریکی را در بردارد. بنابراین، سیگنال 2ω می‌تواند برای نرمال‌سازی سیگنال ω و جدا نمودن سهم پتانسیل سطحی مورد استفاده قرار گیرد. تصاویر می‌توانند از هریک از سیگنال‌های نام برده شده، ساخته شوند ولی باید توجه داشت که تجزیه و تحلیل هر تصویر باید با درک مشارکت سیگنال مورد استفاده در ایجاد تصویر، همراه باشد [۲].

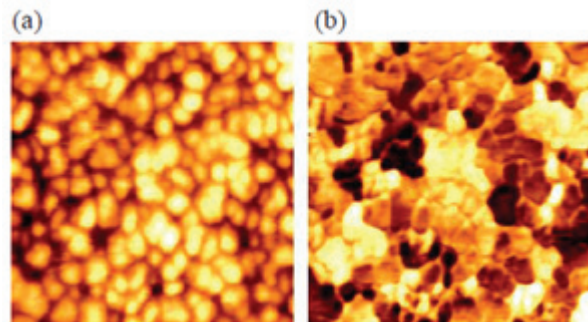
روش قدیمی EFM با روبش غیرضروری و ناکارآمد در دو مسیر، اجرا می‌شود که یک عامل بازدارنده و محدودکننده در توان تفکیک فضایی برای تهیه نقشه پتانسیل سطحی محسوب می‌شود. از این رو، EFM پیشرفته برای فراهم نمودن یک روبش تک مسیره کارآمد که بتواند توپوگرافی و پتانسیل سطح را با توان تفکیک فضایی به‌صورت هم‌زمان اندازه‌گیری کند، طراحی شده‌است [۲].

میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک تماسی دینامیک (DC-EFM)

حالتی از میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک پیشرفته است که در حالت تماسی اجرا می‌شود و از همان روش EFM (Ext) استفاده می‌کند ولی این حالت در وضعیت غیرتماسی اجرا می‌شود. در شکل (۱۳)، تصویر توپوگرافی و بار سطحی کریستال

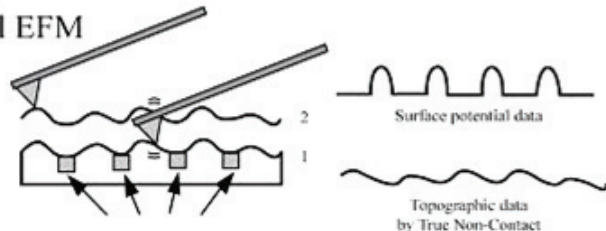
منفرد TGS که به دو روش DC-EFM و EFM (بالا) و EFM (پایین) به‌دست آمده‌اند، مقایسه شده‌اند. تصویر توپوگرافی به‌دست آمده به روش قدیمی EFM، اثر جفت‌شدگی^{۱۵} قوی را نشان می‌دهد، در حالی که در تصویر تهیه شده به روش DC-EFM، جدایی کامل توپوگرافی مشاهده می‌شود. روش DC-EFM علاوه بر تصویربرداری EFM، می‌تواند برای اندازه‌گیری سختی سطح نیز مورد استفاده قرار گیرد [۲].

و نمونه (dC/dz) است. ω به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که بسیار بزرگتر از f باشد تا دو سیگنال با هم مخلوط نشوند [۲].

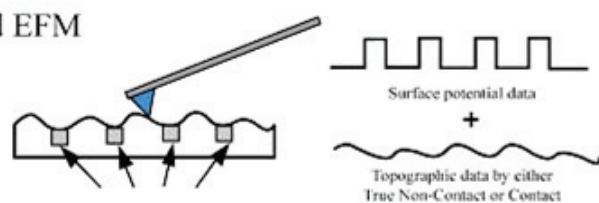


شکل ۱۱: (a) تصویر توپوگرافی و (b) تصویر فاز EFM لایه نازک PZT تهیه شده به‌وسیله میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک ext پیشرفته [۲].

Conventional EFM



XE Enhanced EFM



شکل ۱۲: مقایسه روش EFM قدیمی و پیشرفته [۲].

کاربردهای میکروسکوپی نیروی الکترواستاتیک

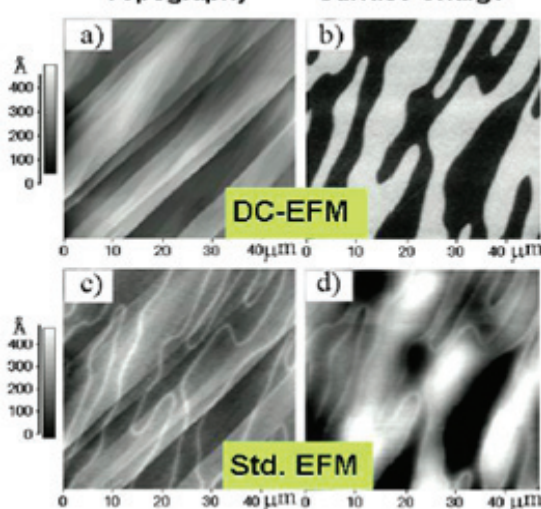
میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک پیشرفته دارای کاربردهایی به شرح زیر است:

- ▶ تهیه تصویر از توزیع بار سطحی و پتانسیل؛
- ▶ تجزیه و تحلیل خرابی مدارهای الکترونیکی میکروبی؛
- ▶ اندازه‌گیری سختی مکانیکی؛
- ▶ چگالی‌سنجی بار برای نواحی فروالکتریک؛
- ▶ افت ولتاژ در مقاومت‌های میکروبی؛
- ▶ تابع کار نیمه‌هادی‌ها [۲].

به‌طور کلی از انواع مختلف این روش میکروسکوپی در موارد زیر می‌توان استفاده نمود:

- ▶ تعیین ویژگی‌های الکتریکی سطح؛
- ▶ تعیین ویژگی‌های الکتریکی نانوبلورها (ذخیره بارالکتریکی و غیره)؛
- ▶ تشخیص نقص‌ها در مدارهای مجتمع (سطح سیلیکونی)؛
- ▶ اندازه‌گیری توزیع مواد خاص روی سطوح کامپوزیتی.

Topography Surface Charge



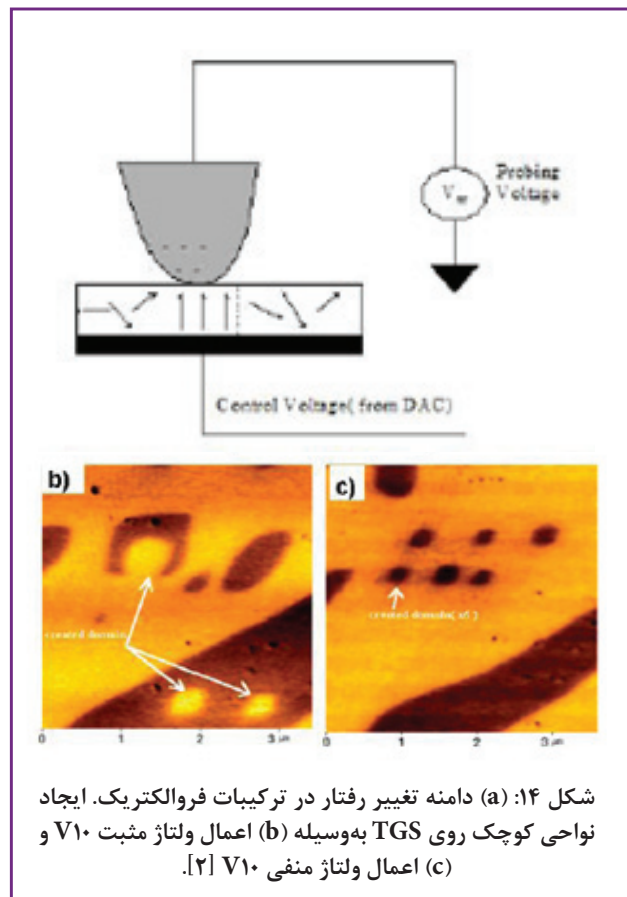
شکل ۱۳: (a) تصویر توپوگرافی و (b) تصویر بار سطحی کریستال منفرد TGS تهیه شده به‌وسیله DC-EFM و (c) تصویر توپوگرافی و (d) تصویر بار سطحی تهیه شده به‌وسیله روش قدیمی EFM [۲].

در بسیاری از نیمه‌هادی‌های معدنی مانند TFT، LED، LCD و سلول‌های خورشیدی، انتقال بار در لایه میانی، نشان‌دهنده مرحله نهایی فرایند انتقال حامل‌های بار است. شکل (۱۵) به‌عنوان نمونه، نحوه مهاجرت بار در مخلوط‌های PPV/TiO₂ را نشان می‌دهد [۳].

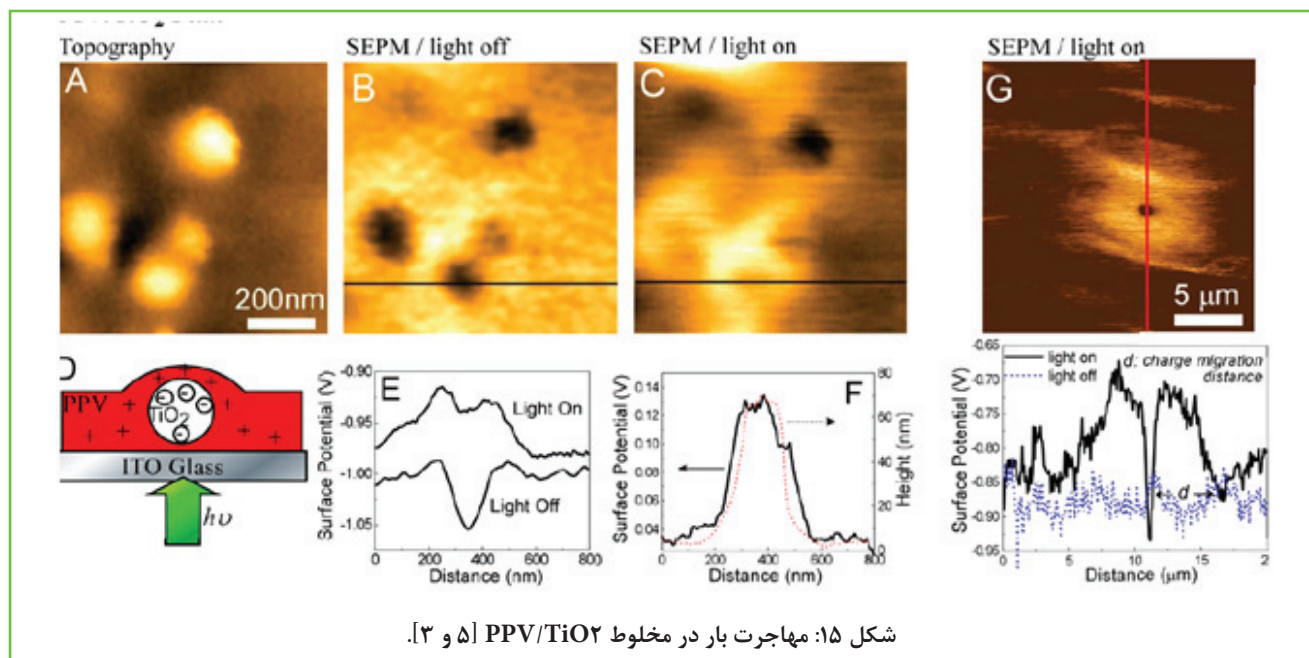
یکی دیگر از کاربردهای EFM، بررسی توزیع دوباره بار و تراز فرمی^{۱۶} در لایه میانی ترکیبات آلی/معدنی است. از آنجایی که انتقال بار یا جدایی بار در لایه میانی، عملکرد کلی دستگاه را تعیین می‌کند، از اندازه‌گیری‌های EFM، برای تهیه نقشه مستقیمی از دانسیته بار موضعی با توان تفکیک فضایی بالا استفاده می‌شود. در این جا ماده مورد استفاده پنتاسن است که یکی از محبوب‌ترین نیمه‌هادی‌های معدنی است که دارای تحرک بار تقریباً برابر $1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ است [۳].

در شکل (۱۷) تصاویر EFM، ترکیب پنتاسن روی Si/SiO₂ را در ولتاژهای بایاس مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۱۸) نیز تغییرات ولتاژ تقویت‌کننده قفل‌شونده در برابر ولتاژ بایاس رسم شده است. مشاهده می‌شود، پتانسیل سطحی در پنتاسن از دی‌اکسید سیلیسیم مثبت‌تر است که ممکن است به خاطر بازآرایی سطح تراز فرمی باشد [۳].

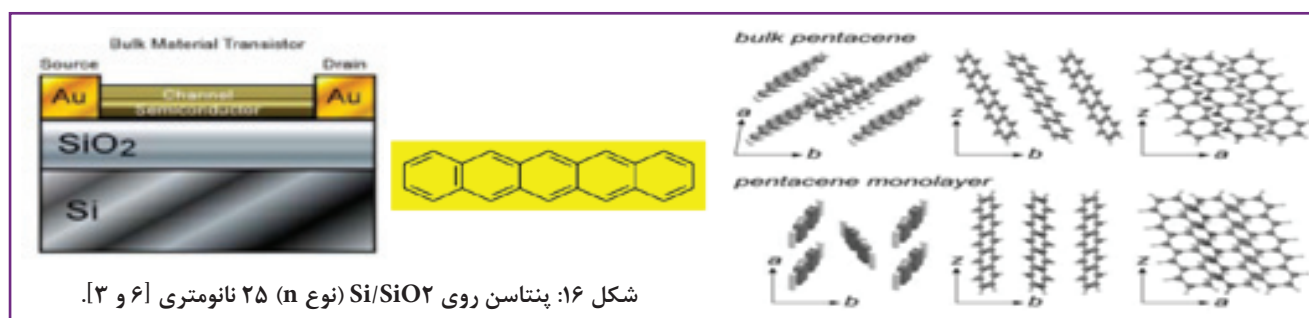
با ظهور نانوذرات، پدیده انتقال بار میان لایه‌ای در نانوبلورها که کاربرد گسترده‌ای در ابزارهای نوری و الکتریکی دارند، مطرح شد. انتقال بار میان لایه‌ای در درک و طراحی دستگاه‌هایی که بر پایه نانوبلورها ساخته می‌شوند، بسیار تعیین‌کننده است. مدل‌سازی دقیق و تجزیه و تحلیل‌های نظری اندازه‌گیری‌های EFM نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۷].



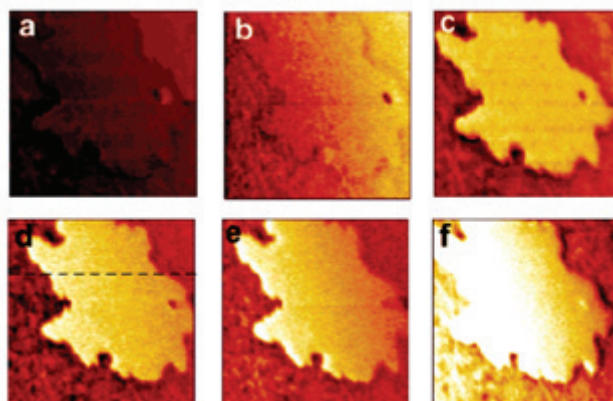
شکل ۱۴: (a) دامنه تغییر رفتار در ترکیبات فروالکتریک. ایجاد نواحی کوچک روی TGS به وسیله (b) اعمال ولتاژ مثبت ۱۰V و (c) اعمال ولتاژ منفی ۱۰V [۲].



شکل ۱۵: مهاجرت بار در مخلوط PPV/TiO₂ [۳ و ۵].



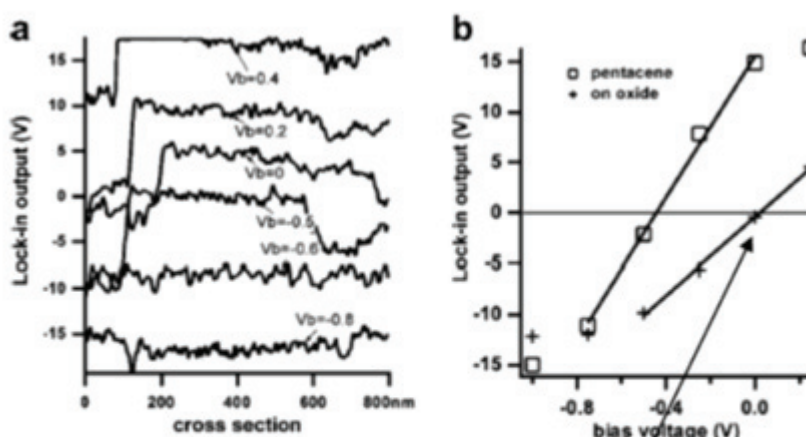
شکل ۱۶: پنتاسن روی Si/SiO₂ (نوع n) ۲۵ نانومتری [۳ و ۶].



شکل ۱۷: تصاویر EFM جزیره‌های پنتاسن روی Si/SiO_2 ۲۵ نانومتری در ولتاژهای بایاس مختلف

0.4 V (f) 0.2 V (e) 0 V (d) -0.6 V (b) -0.8 V (a)

اندازه روبش برای همه تصاویر ۸۰۰ نانومتر است [۳ و ۶].



از محل تقاطع می‌توان اختلاف پتانسیل بین پنتاسن و دی اکسید سیلیسیم را استخراج کرد، (0.5 V)

شکل ۱۸: (a) نیم‌رخ‌های نیروی الکتریکی از میان جزیره پنتاسن در سطح مقطع نشان داده شده در شکل d-۱۷. انحراف در موقعیت جزیره پنتاسن ناشی از انحراف روبشگر در طول فرایند روبش است. (b) متوسط شیب نیروی الکتریکی در طول مدت زمان طولانی اعمال ولتاژ روی پنتاسن و اکسید سیلیکون در ولتاژهای بایاس مختلف [۳ و ۶].

نتیجه‌گیری

از سال ۲۰۰۰، مقالاتی که در آنها از روش EFM به عنوان روش اصلی اندازه‌گیری استفاده شده بود، انتشار یافتند. در این مطالعات برای بررسی پدیده‌های فیزیکی، اندازه‌گیری تابع کار جزئی مدنظر قرار گرفت. از سوی دیگر، بررسی پلاریزاسیون مولکول‌های جذب شده در زیرلایه‌ها و نیز توزیع پتانسیل سطحی در تجهیزات الکترونیکی نیز مورد توجه قرار گرفتند. نمونه‌های مورد اندازه‌گیری، علاوه بر نمونه‌های استاندارد مثل سطوح نیمه‌رسانای تمییز به تجهیزات نیمه‌رسانا، مواد دی الکتریک/فروالکتریک، لایه‌های نازک و لایه‌هایی از مولکول‌های آلی گسترش یافتند. به تازگی نیز چگونگی تهیه تصاویر با توان تفکیک بالا در محیط‌های مایع و گاز با بازدهی مورد توجه واقع شده‌است. فرآیندهای مورد انتظار در مدت زمان کوتاهی، اصلاح شده و به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل تجهیزات الکترونیکی کوچک و پلاریزاسیون‌های جزئی مورد استفاده قرار گرفتند. با پیشرفت روش غیرتماسی AFM، اندازه‌گیری‌های EFM در مقیاس اتمی امکان‌پذیر شده و حساسیت تعیین نیروی الکترواستاتیکی افزایش یافت که نتیجه آن، گسترش کاربرد آن در شرایط محیطی مختلف و انواع گسترده‌تر مواد بود و در آینده نزدیک حتی اندازه‌گیری در محیط‌های مایع نیز ممکن گردید. برای دستیابی به توان تفکیک بالاتر نیازمند جداسازی نیروی الکتریکی از دیگر نیروها است. هم‌اکنون در خلاء، تصاویر EFM واضحی در مقیاس اتمی از ساختارهای مختلف به‌دست می‌آید. وضعیت ایده‌آل برای این مطالعات، طیف‌سنجی سه‌بعدی نیرو است که در آن گرادینان نیرو با روبش ولتاژ نمونه - پروب، ساختار سه‌بعدی را در هر نقطه محاسبه می‌نماید [۱].

1. Electrostatic Force Microscopy (EFM)
2. Contact Potential Difference (CPD)
3. Martin
4. Stern
5. Voltage probing
6. Lock-in amplifier
7. Lifted mode
8. Tapping mode
9. piezoactuator
10. feedback
11. Light-lever system
12. Contact mode
13. hard-sphere repulsion
14. Lock-in amplifier
15. coupling
16. Fermi level

- [1] M. Nakamura and H. Yamada, "Road map of Scanning probe microscopy", 2006, Springer.
- [2] www.parkafm.com "Park Systems, mode note".
- [3] www.eng.utah.edu Lecture 15: "Two special modes for AFM: Electrostatic Force Microscopy (EFM) and Magnetic Force Microscopy (MFM)".
- [4] www.amplegoal.com.
- [5] J. Liu, "Phys. Chem." C 2009, 113, 9368-9374.
- [6] L. Chen, L. Brus, et al. J. "Phys. Chem". B 2005, 109, 1834-1838.
- [7] O. Cherniavskaya, L. Brus, et al. J. "Phys. Chem." B 2004, 108, 4946-4961.
- [8] Y. Hirata, F. Mizutani, H. Yokoyama, "Surf. Int. Anal." 27, 317 (1999).
- [9] G. E. Bridges et. al., J. Vac. Sci. "Technol." A 16, 830 (1998).
- [10] V. Wittpahl et. al., "Microelectron". Reliab. 39, 951 (1999).
- [11] S. Kitamura, K. Suzuki, M. Iwatsuki, "Appl. Surf. Sci." 140, 265 (1999).
- [12] N. Satoh et. al. "Appl. Surf. Sci." 188, 425 (2002).
- [13] T. Ohta, Y. Sugawara, S. Morita, Jap. J. "Appl. Phys." 35, L1222 (1996).
- [14] D. Gekhtman et. al., "Mater. React. Soc. Proc." 545, 345 (1999).
- [15] M. Nakamura et. al., "Synth. Metals" 137, 887 (2003).
- [16] M. Nakamura et. al., "Appl. Phys. Lett." 86, 122112 (2005).
- [17] M. Nakamura et. al., "Proceedings of International Symposium on Super Functionality Organic Devices. IPAP Conference Series" 6, 130 (2005).