

روش میکروسکوپی نیروی الکتروستاتیک و کاربردهای آن

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

zsobat@gmail.com

۱- کارشناس ارشد شیمی فیزیک، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانو فناوری

۲- کارشناس ارشد بیوتکنولوژی کشاورزی، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، آزمایشگاه نانو تکنولوژی

۳- کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانو فناوری

۴- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مواد

۵- شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو، کارگروه تخصصی دستگاه SPM

چکیده: میکروسکوپ نیروی الکتروستاتیک (EFM) یکی از اعضای خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی است. در این میکروسکوپ با اندازه‌گیری برهم‌کنش الکتروستاتیکی 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 الکتروستاتیک 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 تراشه‌های ریزپردازنده زنده در مقیاس زیر میکرون است.

واژه‌های کلیدی: میکروسکوپ نیروی الکتروستاتیک، میکروسکوپ پروبی روبشی، نیروی الکتروستاتیک، EFM.

۱- مقدمه

میکروسکوپ نیروی الکتروستاتیک^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 الکتروستاتیک بین سوزن و نمونه

1- Electrostatic Force Microscopy(EFM)

2 -Contact Potential Difference(CPD)

به تصویر درآورد. نخستین تلاش برای تعیین نیروی الکترواستاتیک و مشاهده بارهای سطحی در لایه‌های پلیمری توسط مارتین^۱ و استرن^۲ 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 به ترتیب به وسیله نیروهای واندروالسی و الکترواستاتیکی به وجود 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 طبقه بندی نمود [۲].

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 شده است.

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

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

در شکل (۳) نیز نمودار نیروی الکترواستاتیک بر حسب فاصله نمونه - نوک سوزن به تصویر کشیده شده است.

شکل ۳: نمودار نیروی الکترواستاتیک بر حسب 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 هر یک 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 $U=1$ volt، پروب با تیرکی به طول $100\ \mu\text{m}$ و پهنای $25\ \mu\text{m}$ ، و سوزنی با طول $3\ \mu\text{m}$ و شعاع $20\ \text{nm}$ در راس سوزن محاسبه شده‌اند. زاویه نوک سوزن $\pi/4$ است و فرض می‌شود که زاویه بین تیرک و نمونه $\pi/8$ است [۳].

در واقع روش EFM، حالت تصویربرداری ثانویه‌ای از AFM است که با اندازه‌گیری برهم‌کنش الکتروستاتیکی 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 الکتروستاتیک 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. به‌عنوان 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^۱ شناخته شده که یک ابزار سودمند برای آزمایش تراشه‌های ریزپردازنده در مقیاس زیر میکرون است [۲].

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 شده‌است. هنگامی که هر دو 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: دیاگرام 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 شده‌است [۱].

هنگامی که ولتاژ AC (V_{AC}) با فرکانس زاویه‌ای ω_m بین نمونه و پروب اعمال می‌شود، پروب به وسیله نیروی الکتروستاتیک 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 الکتروستاتیک 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 الکتروستاتیک با مجذور ولتاژ متناسب است و نوسان شامل مؤلفه‌های DC، ω_m 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 نگه‌داشتن 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 شده‌است.

شکل ۵: الف) دستگاه آزمایشگاهی EFM، ب) نمودار گردش کار، نشان می‌دهد که اطلاعات توپوگرافی در حالت نوسانی در نخستین مسیر روبش به دست 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 به وسیله حلقه فاز - قفل تعیین شده و به دو تقویت‌کننده قفل‌شونده^۱ که در آنها آنها سیگنال با فرکانس‌های ω و 2ω از یکدیگر جدا می‌شوند، فرستاده شده و سپس به کنترل‌کننده نانواسکوپ برای ساخت تصویر، هدایت می‌شود [۲].

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

¹ Lock-in amplifier

شکل ۷: شمایی از مراحل اندازه‌گیری ویژگی‌های سطح به وسیله حالت‌های مختلف EFM [۲].

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 جداکردن کامل نیروی الکتروستاتیک 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 الکتروستاتیک 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].

۳- انواع پروب‌های مورد استفاده در میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک

پروب‌های 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 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 ۳/۵ 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].

۴- انواع حالت‌های EFM

۴-۱-۱ حالت بالارونده^۱، 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^۲ 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^۳ رانده نمی‌شود و به سامانه بازخورد^۴ 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 - اهرم^۵ 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].

۴-۲-۲ بایاس متغیر، انحراف ثابت

-
- 1 -Lifted mode
 - 2- Tapping mode
 - 3- piezoactuator
 - 4- feedback
 - 5- Light-lever system

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^۱) 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].

۵- نیروی کل بین نوک سوزن و نمونه

نیروی کل = نیروی خازنی + برهم‌کنش کولنی + نیروی واندروالسی + دافعه کره سخت^۲

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

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

- C 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].

۶- انواع روش‌های EFM

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

۶-۱- میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک استاندارد

1- Contact mode
2-hard-sphere repulsion

روش EFM استاندارد از سری EFM های 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 می شود نیروهای واندروالسی غالب می شوند و هنگامی که نوک سوزن از نمونه دور می شود، نیروی واندروالسی به سرعت کاهش یافته و نیروهای الکترواستاتیکی حاکم می شوند. در حقیقت، مسیر توپوگرافی خط سیر نوک سوزن است که در فاصله ثابتی از نمونه قرار دارد و معادل خط نیروی واندروالسی ثابت است [۲].

در روش های براساس نیرو، نخستین روبش برای تهیه تصویر توپوگرافی سطح و به وسیله روبش نوک سوزن در محدوده ای که نیروهای واندروالسی غالب است، انجام می شود. سپس فاصله نوک سوزن - نمونه تغییر داده می شود تا نوک سوزن در منطقه ای قرار بگیرد که نیروی الکترواستاتیک حاکم است و برای تهیه تصویر EFM، سطح روبش می شود (شکل ۸-a) [۲].

شکل ۸: طرح شماتیک (a) روش در محدوده نیرو و (b) روش با دو مسیر [۲].

در روش دو مسیره، نخستین روبش در نزدیکی سطح، به منظور تهیه توپوگرافی و مشابه روش میکروسکوپی اتمی غیر تماسی در ناحیه ای که نیروهای واندروالسی حاکم است، انجام می شود. در دومین روبش، برای این که نوک سوزن در ناحیه ای قرار گیرد که نیروهای الکترواستاتیکی غالب هستند، نوک سوزن را بلند کرده و فاصله بین نوک سوزن و نمونه افزایش می یابد. سپس نوک سوزن تحت اعمال ولتاژ بایاس قرار گرفته و عمل روبش بدون سامانه بازخورد، موازی با خط توپوگرافی که از روبش نخست به دست آمده و در شکل (۸-b) نیز نشان داده شده است، انجام می شود و بدین ترتیب فاصله ثابت بین نمونه و نوک سوزن حفظ می شود [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 می تواند از دومین روبش به دست آید. در شکل (۹) به عنوان نمونه تصویر توپوگرافی و فاز یک مجموعه الکتروود که با استفاده از روش EFM به دست آمده، نشان داده شده است [۲].

شکل ۹: (a) نمونه استاندارد از دو الکتروود میکرووی به شکل شانه ساخته شده که دندان‌های یکی در میان دندان‌های دیگری قرار گرفته است. (b) تصویر توپوگرافی که نشان می‌دهد دندان‌های مجاور دارای ارتفاع یکسانی هستند، در حالی که (c) تصویر فاز EFM نشان می‌دهد دندان‌های با ارتفاع یکسان در پتانسیل سطحی متفاوت هستند [۲].

۶-۲ - میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک پیشرفته

در EFM پیشرفته که نمودار شماتیک آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است، یک تقویت‌کننده قفل شونده^۱ با دو هدف به AFM سری XE متصل می‌شود. هدف نخست این که، علاوه بر ولتاژ بایاس DC که به وسیله کنترل‌کننده XE اعمال می‌شود، ولتاژ بایاس 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 منحصر به فرد بوسیله EFM 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:

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

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

$$F(t) = (C/d) \times V(t)^2$$

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

عبارت $F(t)$ خود شامل سه عبارت است:

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

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

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

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].

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. 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 DC ، AC 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.

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

سه سیگنال باهم می‌توانند برای کسب اطلاعاتی درباره خواص الکتریکی نمونه مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال، در معادله، ظرفیت به صورت نسبت ظرفیت الکتریکی به فاصله نمونه - نوک سوزن (C/d) ظاهر می‌شود. هنگامی که فاصله نمونه - نوک سوزن به وسیله حلقه بازخورد Z ثابت نگه داشته شود، نسبت C/d با ظرفیت متناسب می‌شود. سیگنال ω در معادله (۲) قسمت (b)، مشارکت C/d و پتانسیل سطحی V_s را در بر دارد. با فرض معلوم بودن پتانسیل‌های V_{ac} و V_{dc} ، 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].

۶-۳- 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 نیرویی بین سطح باردار شده و نوک سوزنی که تحت اعمال ولتاژ

بایاس AC قرار گرفته است، بوجود آید. با استفاده از تقویت کننده قفل شونده خارجی، سیگنال به دست آمده از حرکت نوک سوزن تحت نیرو، می تواند به بخش های 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 و نمونه (dc/dz) است. ω به گونه ای تنظیم می شود 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 به وسیله میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک ext پیشرفته [۲].

روش قدیمی EFM با روبش غیر ضروری و ناکارآمد در دو مسیر، اجرا می شود که یک عامل بازدارنده و محدودکننده در توان تفکیک فضایی برای تهیه نقشه پتانسیل سطحی محسوب می شود. از این رو، EFM پیشرفته برای فراهم نمودن یک روبش تک مسیره کارآمد که بتواند توپوگرافی و پتانسیل سطح را با توان تفکیک فضایی به صورت هم زمان اندازه گیری کند، طراحی شده است [۲].

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

۴-۶ - میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک تماسی دینامیک (DC-EFM)

حالتی از میکروسکوپ نیروی الکترواستاتیک پیشرفته است که در حالت تماسی اجرا می شود و از همان روش EFM(Ext) استفاده می کند ولی این حالت در وضعیت غیر تماسی اجرا می شود. در شکل (۱۳)، تصویر توپوگرافی و بار سطحی کریستال منفرد TGS که به دو روش DC-EFM (بالا) و EFM قدیمی (پایین) به دست آمده اند، مقایسه شده اند. تصویر توپوگرافی به دست آمده به روش قدیمی EFM، اثر جفت شدگی ۱ قوی را نشان می دهد، در حالی که در تصویر تهیه شده به روش DC-EFM، جدایی کامل توپوگرافی مشاهده می شود. روش DC-EFM علاوه بر تصویربرداری EFM، می تواند برای اندازه گیری سختی سطح نیز مورد استفاده قرار گیرد [۲].

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

شکل ۱۴: (a) دامنه تغییر رفتار در ترکیبات فروالکتریک. ایجاد نواحی کوچک روی TGS به وسیله (b) اعمال ولتاژ مثبت $10V$ و (c) اعمال ولتاژ منفی $10V$ [۲].

۷- 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؛

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 TiO_2/PPV را نشان می‌دهد [۳].

شکل ۱۵: مهاجرت بار در مخلوط TiO_2/PPV [۵ و ۳].

یکی دیگر از کاربردهای EFM، بررسی توزیع دوباره بار و تراز فرمی^۱ 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].

شکل ۱۶: پنتاسن روی SiO_2/Si (نوع n) ۲۵ نانومتری [۶ و ۳].

در شکل (۱۷) تصاویر EFM، ترکیب پنتاسن روی SiO_2/Si را در ولتاژهای بایاس مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۱۸) نیز تغییرات ولتاژ تقویت‌کننده قفل‌شونده در برابر ولتاژ بایاس رسم شده‌است. مشاهده می‌شود، پتانسیل سطحی در پنتاسن از دی‌اکسید سیلیسیوم مثبت‌تر است که ممکن است به خاطر بازآرایی سطح تراز فرمی باشد [۳].

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

(a) -0.18 V (b) -0.16 V (c) -0.15 V (d) 0 (e) 0.12 V (f) 0.14 V

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

شکل ۱۸: (a) نیم‌رخ‌های نیروی الکتریکی از میان جزیره پنتاسن در سطح مقطع نشان داده شده در شکل ۱۷-d. 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 [۶ و 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].

۸- 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 الکتروستاتیکی 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 به دست می‌آید. وضعیت ایده‌آل برای این مطالعات، طیف‌سنجی سه‌بعدی نیرو است که در آن گرادیان نیرو با روبش ولتاژ نمونه - پروب، ساختار سه‌بعدی را در هر نقطه محاسبه می‌نماید [۱].

۹- منابع

- 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).

Electrostatic Force Microscopy and its applications

Zahra Sobat¹, Marzieh Keshavarzi^{2,5}, Sedigheh Sadegh Hassani^{3,5}, Neda Aboudzadeh^{4,5}

zsobat@gmail.com

1- M.S. Degree in Physical chemistry, Research Institute of Petroleum Industry, Catalysis and Nanotechnology Research Division

2- M.S. Degree in Agricultural Biotechnology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Nanotechnology lab

3- M.S. Degree in Analytical chemistry, Research Institute of Petroleum Industry, Catalysis and Nanotechnology Research Division

4- Material Engineering Ph.D student, Iran University of Science and Technology (IUST), Department of Material Science and Engineering

5- Iran Nanotechnology Laboratory Network (INLN), SPM Experts work group.

Abstract:

Electrostatic Force Microscope (EFM) is a member of scanning probe microscopes family. It maps the electrical properties of sample by measuring local electrostatic interaction between conductive tip and sample by applying a bias voltage between tip and sample. This voltage is used to create and adjust electrostatic field. The phase and resonance frequency of cantilever is varied by intensity of electrostatic field gradient. These parameters are used to prepare the EFM images. In addition, EFM technique can be used to distinct the conductive and dielectric areas. EFM images present useful information about sample electrical properties such as potential and charge distribution of sample surface. This method is a useful tool for testing microprocessor chips in sub-micron scales.

Keywords: Electrostatic Force Microscope, Scanning Probe Microscope, Electrostatic Force, EFM, SPM