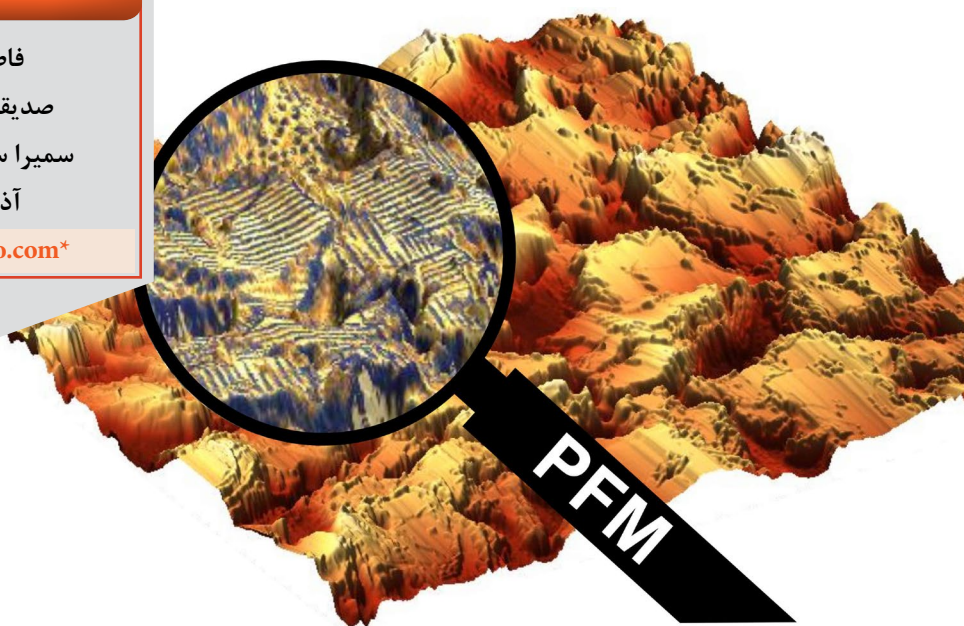


نویسندگان

فاطمه خاکراه^{۱*}صدیقه صادق حسینی^۲سمیرا سادات میرجلیلی^۳آذر خزاعی پور^۴

pkhakrah@yahoo.com*



انواع پیشرفته میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، محدودیت‌ها و راهکارهای آن

چکیده

میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، نوعی میکروسکوپ نیروی اتمی^۷ است که امکان تصویربرداری حوزه‌های فروالکتریک را با توان تفکیک جانبی چند نانومتری فراهم می‌کند. انواع مختلفی از میکروسکوپ PFM ساخته شده که به‌طور قابل توجهی برای اندازه‌گیری در مقیاس نانو تأثیرگذار بوده است. در این مقاله سعی شده است حالت‌های پیشرفته PFM، محدودیت‌های روش‌های متداول و راه‌حل‌های آنها بیان شود.

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، پیزوالکتریک، حوزه، تصویربرداری.

میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو در واقع یکی از حالت‌های تماسی AFM است که در آن تصویربرداری و دستکاری حوزه‌های فروالکتریک را امکان‌پذیر می‌سازد. در این حالت کاری، با نزدیک کردن سوزن رسانای تیز یک پروب^۸ به یک سطح فروالکتریک (یا مواد پیزوالکتریک) و اعمال بایاس جریان متناوب^۹ (AC) به سوزن^{۱۰}، تغییر شکل نمونه در اثر تحریک، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این کار از طریق اثر پیزوالکتریک معکوس^{۱۱} (CPE) انجام می‌شود [۱]. پیزوالکتریک‌ها موادی هستند که توانایی تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی را دارند. فروالکتریک‌ها زیرمجموعه‌ای از مواد پیزوالکتریک هستند و خواص گسترده‌ای نظیر قطبش الکتریکی بالا، قابلیت پیزوالکتریکی قوی، فعالیت اپتیکی غیرخطی و رفتار دی‌الکتریک غیرخطی قابل توجه دارند. این ویژگی‌ها برای کاربردهای متعدد در ابزار الکترونیکی مانند حسگرها، محرک‌ها، آشکارسازهای IR، فیلترهای میکروموج و اخیراً حافظه‌های غیرفرار (حافظه‌هایی که بعد از قطع جریان برق حفظ می‌شوند) استفاده می‌شوند. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این ترکیبات، محققین و پژوهشگران بر مواد فروالکتریک تمرکز کرده‌اند [۲]. به همین علت نیاز به استفاده از ابزار پیشرفته PFM بیشتر احساس می‌شود.

امکان را فراهم می‌کند. در این روش امکان مقایسه طیف بدست آمده با توپوگرافی وجود دارد [۵].

حالت‌های پیشرفته PFM

■ میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی چرخان

در روش میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی چرخان^{۱۲}، یک پالس ولتاژ با دامنه بسیار بالاتر از ولتاژ نمونه اما در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به زمان تغییر وضعیت، به نمونه اعمال می‌شود و پس از آن تصویربرداری انجام می‌شود. سپس تعداد پالس‌های بیشتری با دامنه یکسان اما در زمان طولانی‌تری نسبت به تصویربرداری عادی در PFM اعمال می‌شود. در این روش، یک سری تصاویر از تغییر وضعیت نمونه می‌توان تهیه نمود. [۳].

■ میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی رزونانس تماسی^{۱۳}

در PFM، بایاس AC با فرکانس خاص، باعث تغییر شکل نمونه می‌شود که در همان فرکانس، دستگاه می‌تواند به‌عنوان یک نوسانگر هارمونیک (هماهنگ) در نظر گرفته شود. به این ترتیب، رزونانس به‌عنوان تابعی از فرکانس محرک است. این اثر در PFM به‌منظور بهبود و تقویت سیگنال، بکار برده شده است [۴]. به‌طور معمول رزونانس تماسی در محدوده کیلو تا مگاهرتز است که دارای فرکانسی چندین مرتبه بزرگتر نسبت به اولین هارمونیک تیرک استفاده شده در هوا است. اشکال این است که رزونانس تماسی نه تنها بر پاسخ دینامیکی تیرک، بلکه به مدول الاستیک مواد نمونه در تماس با نوک پروب، وابسته است بنابراین، می‌تواند در طول روبش مناطق مختلف تغییر کند. این امر منجر به تغییر در دامنه سیگنال اندازه‌گیری شده می‌شود و نامطلوب است. یکی از روش‌های از بین بردن معایب ذاتی رزونانس تماسی PFM این است که فرکانس محرک را به‌منظور بررسی تغییرات در فرکانس رزونانس تماسی تغییر دهیم. این ویژگی که توسط مرکز تحقیقات آسیلیوم^{۱۴} توسعه و کشف شد، ردیابی فرکانس رزونانس دوگانه^{۱۵} نامیده شد که از دو حد فرکانس در دو طرف پیک رزونانس تماسی استفاده نموده و می‌تواند تغییرات مکان پیک را احساس کند. سپس این امکان‌پذیر است که فرکانس محرک بایاس AC را به‌منظور حفظ تقویت سیگنال حاصل از رزونانس تماسی تعدیل کنیم.

■ طیف‌سنجی راه‌گزینی

در طیف‌سنجی راه‌گزینی^{۱۶}، در سراسر سطح نمونه مجموعه‌ای از حلقه‌های پسماند به‌عنوان تابعی از مکان به‌دست می‌آیند. طیف‌سنجی PFM اشاره به تولید موضعی حلقه‌های پسماند مغناطیسی در مواد فروالکتریک دارد. از این حلقه‌های پسماند مغناطیسی، می‌توان اطلاعاتی در مورد رفتار فروالکتریک موضعی مواد به‌دست آورد. درک تغییر رفتار فروالکتریک‌ها در مقیاس نانو، باعث پیشرفت در کاربردهایی نظیر حافظه فروالکتریک غیرفرار با دسترسی تصادفی و ذخیره‌سازی داده‌های متراکم می‌شود و این

محدودیت روش‌های متداول PFM

محدودیت ولتاژ بالا: معمولاً با استفاده از دامنه تحریکی با ولتاژ^{۱۷} (Vpp) ۱-۱۰ روی موادی با پاسخ‌های الکترومکانیکی قوی، تصویر الکتریکی تهیه شده و طیف‌بینی دقیقی از مواد فرومغناطیس میسر می‌شود که در کاربردهای مربوط به حد آشکارسازی ۵۰ pm در ۱۰۰ کیلوهرتز کفایت می‌کند. سنجش موادی با میزان حساسیت کمتر، نیازمند استفاده از ولتاژهای بالاتر و یا استفاده از رزونانس تماسی است.

تصویربرداری از رزونانس تماسی: در برخی از نمونه‌ها استفاده از ولتاژ محرک بالا به‌طور ناخواسته صورت می‌گیرد. ولتاژ محرک بالا موجب جابه‌جا شدن دو قطب و یا حتی آسیب دیدن نمونه خواهد شد. پیشرفت‌های اخیر در زمینه درک نظری طرز کار تصویر الکتریکی PFM نشان می‌دهد که محدودیت اصلی میکروسکوپ روبشی پیمایشی‌های^{۱۸} پیشین، ناتوانی آنها در استفاده مؤثر از ارتقای رزونانس است. رزونانس پدیده‌ای است که در بسیاری از روش‌های SPM مورد استفاده قرار می‌گیرد. واکنش فرکانسی دامنه و فاز ($Q < 10$) توسط سادر^{۱۹} به‌صورت زیر توضیح داده می‌شود [۶]:

$$A(\omega) = \frac{A_{max}\omega^2/Q}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega_0/Q)^2}} \quad (1)$$

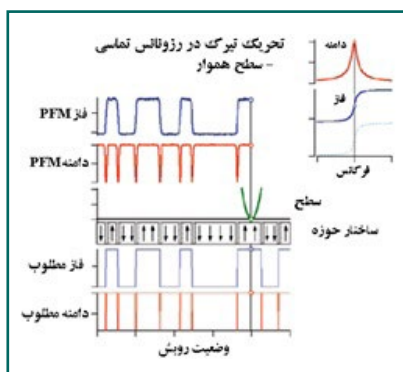
$$\tan\varphi(\omega) = \frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2)$$

که در آن: A_{max} دامنه رزونانس، ω_0 فرکانس قطع و Q همان مؤلفه کیفیت است که هدر رفت انرژی را در دستگاه نشان می‌دهد. رابطه پاسخ تیرک در رزونانس و مؤلفه کیفیت Q طبق فرمول (۳) نشان داده شده است. مؤلفه Q در فضا برای تیرک‌های PFM از X ۱۰-۱۰۰ متفاوت است. این مسئله نشان می‌دهد که می‌توان یک سیگنال PFM ضعیف را با مؤلفه‌ای از X ۱۰-۱۰۰ با تحریک ولتاژ سوزن در فرکانس اتصال رزونانس به سادگی تقویت کرد. شکل (۱) تیرک را در تماس با سطح نشان می‌دهد.

$$A = d_{33}V_{ac}Q \quad (3)$$

ولتاژ تیرک در حال نوسان است، که در ازای آن پاسخ پیزو را به سطح نمونه القا می‌کند. این تیرک در برخورد با سطح دارای رزونانس است که با استفاده از خواص مکانیکی تیرک و سفتی اتصال سوزن - نمونه تعریف می‌شود. این رزونانس می‌تواند دارای یک مؤلفه کیفیت بالا Q برای نمونه‌های PFM باشد که به‌طور مؤثر سیگنال پیزوی ایجاد شده با مؤلفه Q را نزدیک

شکل (۳) تصویر نمونه‌ای است که در شکل (۲) بررسی شده بود ولی با ولتاژ تیرک که در رزونانس تیرک تعدیل شده، بررسی شده است. فاز اندازه‌گیری شده طرحی از ساختار حوزه و نیز دامنه‌ای که در مرز حوزه به زیر صفر می‌رسد را نشان می‌دهد. این مسئله زمانی رخ می‌دهد که سوزن با استفاده از دو حوزه جهت‌دار مخالف تحریک می‌شود که هر کدام از این دو حوزه، دیگری را زمانی که ۱۸۰ درجه خارج از فاز هستند، از کار می‌اندازد. کسب سیگنالی از مؤلفه Q، نسبت سیگنال به نویز^{۲۰} را برای فاز و دامنه PFM تقویت می‌کند. در این حالت چون مؤلفه Q در رزونانس ۱۰۰ است، نسبت سیگنال به نویز در دامنه اندازه‌گیری شده PFM (منحنی نازک قرمز رنگ) و فاز اندازه‌گیری شده PFM (منحنی نازک آبی رنگ) به‌طور چشمگیری تقویت شده است.



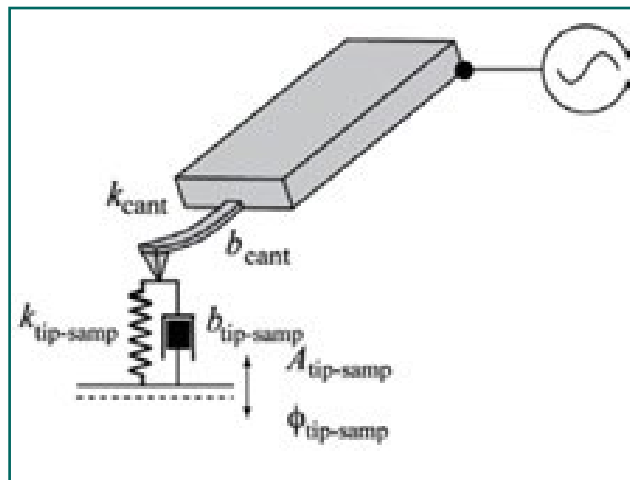
شکل ۳: وضعیتی دیگر از شکل (۲) که با افزایش رزونانس، سیگنال PFM افزایش یافته است [۷].

معمولاً نمونه دارای ناهمواری‌هایی است که وابسته به شرایط، این ناهمواری‌ها در فرکانس رزونانس تماسی موجب تغییراتی می‌شوند. تأثیرات این تغییر فرکانس رزونانس بر PFM می‌تواند به آسانی و به‌طور کامل سیگنال مطلوب PFM را بپوشاند (شکل‌های ۴، ۵ و ۶).

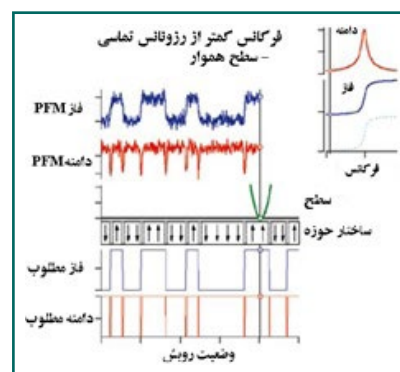
اگر به سطح نمونه ایده‌آل ناهمواری بیافزاییم، می‌توانیم مشاهده کنیم که رزونانس تماسی تعدیل و تنظیم می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر سوزن روی قسمت بلند نمونه باشد، با قسمتی از نمونه در تماس خواهد بود. سایش قسمت‌های تیز نسبتاً آسان‌تر است. از آنجا که برقراری اتصال بین سوزن و نمونه کم است، فرکانس رزونانس تماسی کاهش می‌یابد. اگر تیرک با یک فرکانس ثابت تحریک شود، با کاهش میزان رزونانس، فاز افزایش می‌یابد. برعکس حالت قبل، اگر نوک سوزن در یک شیار قرار گیرد، برقراری اتصال بین سوزن و نمونه افزایش یافته و فرکانس رزونانس افزایش می‌یابد. تغییر جهت فازی به مجموع رزونانس‌های تماسی و نیز به ساختار حوزه ماده پیزو، مربوط می‌شود. در نتیجه، تعبیر و تفسیر ساختار حوزه، کار دشواری بوده و در بسیاری از موارد غیرممکن است. شکل (۴) حالتی را نشان می‌دهد که حوزه‌ها کاملاً با تغییر جهت‌های گسترده فازی که از جابه‌جایی رزونانس تماسی به‌وجود آمده‌اند، پوشیده شده‌اند.

رزونانس تقویت می‌کند. برای نمونه‌هایی با ضرایب پیزوی کمتر، این مسئله بسیار مهم است و می‌تواند بدین معنی باشد که یک نویز با یک سیگنال قابل اندازه‌گیری تفاوت دارد. متأسفانه از آنجا که فرکانس رزونانس تیرک به برقراری اتصال بین سوزن و نمونه بستگی دارد، فرکانس رزونانس بسیار ناپایدار است. همان‌طور که سوزن سطح نمونه را روبش می‌کند، برقراری اتصال بین سوزن و نمونه به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند که بر فرکانس رزونانس تأثیرگذار است.

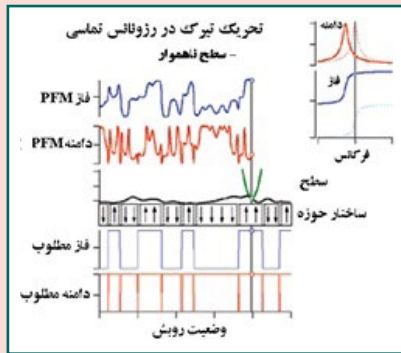
تأثیر رزونانس در PFM در شرایط «ایده‌آل» در شکل (۲) نشان داده شده است که شبیه‌سازی عددی از پاسخ تیرک را با استفاده از عوامل تیرک واقعی و نمونه نشان می‌دهد. ساختار حوزه‌ای این نمونه فروالکتریک در زیر سطح و در جایی که پیکان‌ها به مسیر پلاریزاسیون نمونه اشاره دارند، نشان داده شده است. قسمت هاشورزده بین حوزه‌ها، محدوده حوزه‌ها را نشان می‌دهد. «فاز مطلوب» (منحنی نازک آبی رنگ) در بالای سوزن روبشگر وجود دارد. از آنجا که این اندازه‌گیری‌ها با فرکانسی کمتر از فرکانس رزونانس و در شرایطی که در سیگنال PFM افزایش رزونانس وجود ندارد، انجام شده‌اند، میزان دریافت سیگنال از سیگنال اندازه‌گیری شده نسبت به نویزی که از آن دریافت می‌شود کمتر است.



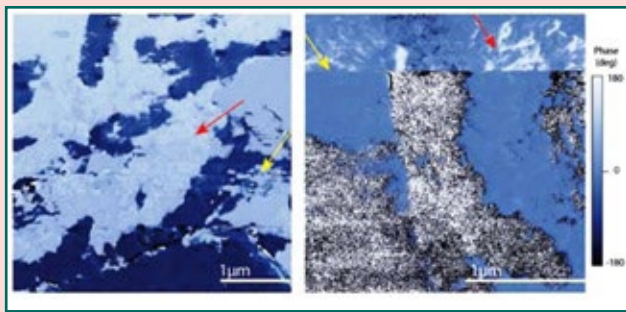
شکل ۱: ولتاژ تیرک در PFM به‌طور معمول با ولتاژ ثابتی تغییر می‌کند. این امر موجب می‌شود وقتی نمونه به فاز و دامنه خاصی رسید، خمیده شود. هنگامی که سوزن با دخالت و تماس ابزار مکانیکی تحریک شود با استفاده از حسگر AFM نمایش داده می‌شود [۸].



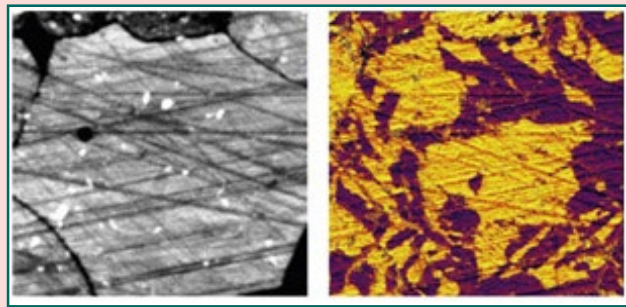
شکل ۲: پاسخ ایده‌آل و اندازه‌گیری شده PFM به سوزن (سبز) در حال روبش یک سطح صاف (خطوط مشکی زیر «سوزن») [۷].



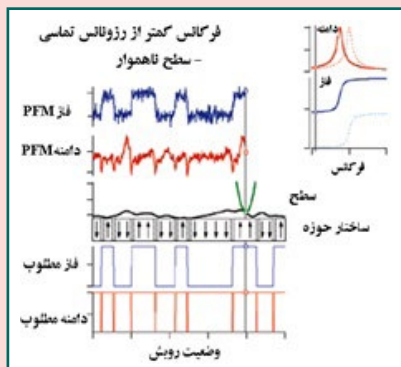
شکل ۴: این شکل یکی از محدودیت‌های کاربردی استفاده از رزونانس تماسی به عنوان فرکانس محرک را نشان می‌دهد. در سیستم‌های قراردادی PFM، رزونانس تماسی می‌تواند در تهیه تصویر الکتریکی از یک نمونه ناهموار از ۱۰ تا ۳۰ کیلوهرتز تغییر کند. تیرک‌ها دارای پهنای حداکثر ۴-۱۰ کیلوهرتز باعث تغییرات در طول فرآیند روبش می‌شود [۷].



شکل ۵: کانال فاز PFM روی نمونه PZT صیقلی. تیرک برای افزایش سیگنال به نویز در حوالی رزونانس تماسی تحریک شد. یک تداخل قابل توجه بین تصویر توپوگرافی نمونه و سیگنال PFM وجود دارد. پیکان‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده «ناهمواری» قسمت‌هایی هستند که برقراری اتصال بین سوزن و نمونه در آنها فاز را تعدیل می‌کند. علاوه بر این، ناهمواری سطح، رزونانس تماسی را تغییر می‌دهد. پیکان‌های زرد رنگ نشان‌دهنده تغییر ناگهانی سوزن هستند که منجر به تغییر رزونانس تماسی شده‌اند. محدوده روبش $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ [۷].



شکل ۶: نمایش تداخل (سیگنال‌های ناخواسته) PZT، محدوده روبش $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ [۷].



شکل ۷: تحریک تیرک در فرکانس کمتر از رزونانس تماسی روی سطح ناهموار [۷].

تغییر جهت فازی از تغییرات برگشت‌ناپذیری که به تیرک وارد شده ناشی می‌شود. PFM حالت کاری دستگاه بوده که به روش اتصال مرتبط است و می‌تواند نیروی زیادی را به سوزن وارد کند. اگر سوزن دچار شکستگی و یا کثیف شود، رزونانس ممکن است یک افزایش ناگهانی داشته باشد که این افزایش معمولاً مثبت است؛ زیرا سایش سوزن موجب کندشدن سوزن می‌شود. افزایش ناگهانی رزونانس باعث کاهش مقدار آن از نظر کیلوهرتز می‌شود. این کار باعث تغییرات گسترده و ناپایسته‌ای در فاز اندازه‌گیری می‌شود. شکل‌های (۵) و (۶) اطلاعات PFM تهیه شده از سطح سرب - زیرکونات - تیتانات (PZT) را نشان می‌دهد. تغییرات متوالی سوزن باعث تغییر در رزونانس تماسی شده و منجر به تغییر برگشت‌ناپذیر در سطح فاز اندازه‌گیری می‌شود. همچنین علاوه بر این افزایش‌های ناگهانی، یک سفتی قابل توجه در سیگنال‌های فازی ناشی از تداخل رزونانس تماسی وجود دارد.

همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده با حذف رزونانس، اثرات ناخواسته تصویر روی نمونه‌های ناهموار کاهش می‌یابد. اگر تیرک به خوبی در اثر رزونانس تحریک شود، ساختار حوزه به درستی عمل می‌کند.

به طور خلاصه، برای بهینه کردن رزونانس تماسی و تصویربرداری PFM موارد زیر پیشنهاد می‌شوند:

۱. رزونانس را برای تقویت سیگنال‌ها به کار می‌برند اما به دلیل اثرات پیچیده‌ای که دارد، اجازه نمی‌دهد بدون ابهام ساختار دامنه نمونه را تعیین کند.
۲. از به کار بردن رزونانس برای کم کردن اثرات ناخواسته تصویر اجتناب شود مگر این که شامل سیگنال‌های کمی باشد که به طور ذاتی در مواد پیزو وجود دارند.

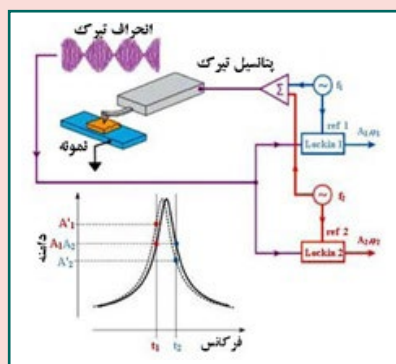
راه‌حلهایی برای رفع محدودیت‌های میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو

افزایش ولتاژ متحرک: واضح‌ترین روش برای تقویت و بهبود پاسخ PFM، افزایش دامنه ولتاژ است. این سیگنال معمولاً متناسب با ولتاژ متحرک است؛ بنابراین، افزایش ولتاژ متحرک به $10 \times$ منجر به تقویت $10 \times$ در نسبت سیگنال به نویز می‌شود. یک تقویت‌کننده محرک قوی‌تر همچنین عملکردهایی با فرکانس بالاتر را ممکن می‌سازد.

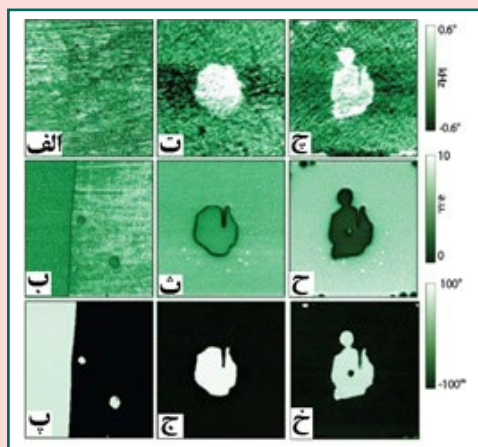
استفاده از رزونانس تماسی به عنوان تقویت‌کننده در PFM: گاهی اوقات افزایش سیگنال به نویز با افزایش ولتاژ متحرک، گزینه مناسبی نیست. در برخی از نمونه‌های فروالکتریک ممکن است قطب‌ها به کمک یک ولتاژ متحرک بسیار بالا جابجا شود. از طرف دیگر، نمونه ممکن است خراب شده و منجر به بالا رفتن شدت جریان و آسیب رساندن به نمونه و یا حتی خراب شدن آن شود. بنابراین، روش دیگر برای افزایش سیگنال به نویز، استفاده از رزونانس تماسی است. کار در فرکانس رزونانس، باعث می‌شود که مؤلفه کیفیت تیرک به طور طبیعی افزایش یابد.

بی شماری در اندازه گیری PFM هستند:

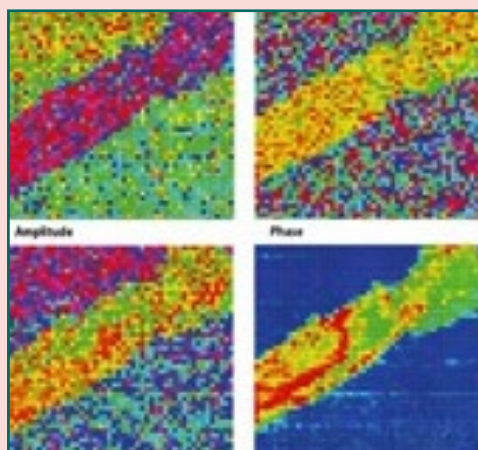
۱. نسبت سیگنال به نویز ۱۰۰ برابر افزایش می یابد که تداخل را با استفاده از رزونانس برطرف می کند.
۲. کسب اطلاعات در BE در مقایسه با دیگر فناوری های بدون فرکانس تجاری موجود، به میزان $100 \times$ تقویت می شود.
۳. روش ها و سخت افزارهای تصویربرداری کاملاً با یکدیگر هماهنگ هستند.



شکل ۸: نمودار طرز کار ردیابی فرکانس رزونانس دوگانه [۸].



شکل ۹: مطالعه جابجایی قطب ها در نیوبات لیتیوم (LiNbO_3) با استفاده از DFRT-PFM [۸].



شکل ۱۰: تصویربرداری از رشته های کوچک آمیلونید روی میکا در آب [۷] ($250 \text{ nm} \times 250 \text{ nm}$).

ردیابی رزونانس فرکانس دوگانه: این روش تحریکی دوگانه، تیرک را قادر می سازد تا در خود رزونانس و یا نزدیک آن به کار انداخته شود.

شکل (۸) چگونگی کار DFRT را نشان می دهد. پتانسیل تیرک رسانا از مجموع دو ولتاژ نوسانی با فرکانس هایی در همان رزونانس و یا نزدیک به آن تشکیل شده است. انحراف تیرک به صورت دیجیتالی به دو تقویت کننده مجزایی که در داخل تعبیه شده اند، فرستاده می شود که هر کدام از آنها مختص یکی از سیگنال های محرک است. با اندازه گیری دامنه فرکانس ها، سنجش تغییرات وضعی رزونانس و نیز ردیابی فرکانس رزونانس میسر می شود. با تحریک فرکانسی کمتر از رزونانس ($A1$) و فرکانس دیگری بالاتر از رزونانس ($A2$)، یک سیگنال نادرست را می فرستد که کنترل کننده MFP-3D از این سیگنال برای ردیابی تغییرات فرکانس رزونانس استفاده می کند [۸].

در شکل های (۹-الف)، (۹-ت)، و (۹-ج) تصویر تهیه شده در فرکانس رزونانس، (۹-ب)، (۹-ث)، و (۹-ح) تصویر دامنه پاسخ پیزو و (۹-پ)، (۹-ج)، (۹-خ) تصاویر فاز پاسخ پیزو از حوزه های غیرهمسان در نیوبات لیتیوم^{۲۲} هستند که تصاویر (۹-الف) و (۹-پ) ساختار حوزه موضعی، (۹-ت) و (۹-ج) حوزه اصلی و (۹-چ) و (۹-خ) حوزه های تغییر یافته با ولتاژ $176 \pm$ (که موقعیت آن در E مشخص شده) در $Vac=66 \text{ V}$ و $Wf=4 \text{ KHz}$ به دست آمده اند. این تصاویر برای این که بتوانند تغییرات دقیقه به دقیقه در هر خط را پوشش دهند به صورت مسطح درآمده اند. تصاویر دامنه و فاز PFM یک دیوار حوزه های ۱۸۰ درجه میکروسکوپی و دو معکوس شدگی دامنه را نشان می دهند.

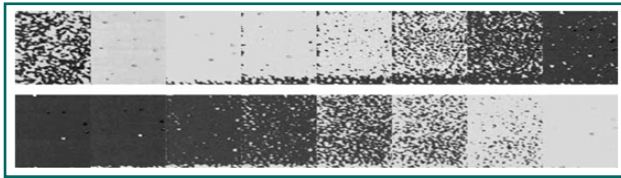
تحریک باند^{۲۳}: تحریک باند عملکرد جدیدی است که می تواند با PFM به کار برده شود. این فناوری به طور ویژه با SPM های تحقیقاتی اسلیوم تحت لیسانس آزمایشگاه ملی آک ریج^{۲۴} [۹] در دسترس قرار داده شده و جایزه R&D 100 را در سال ۲۰۰۸ دریافت کرده است. تشخیص میزان اتلاف انرژی با سنجش فرکانس سیگنال نیازمند اندازه گیری های متعدد و زمان بر است. روش تحریک باند این مشکل را با نمایان ساختن پاسخ ها در هر فرکانسی به صورت هم زمان برطرف می کند. این روش یک سیگنال دیجیتالی ترکیبی را معرفی می کند که باندهای مکرر فرکانس ها را معین کرده و پاسخ را در همان باند فرکانسی بازبینی می کند. این مسئله پیشرفتی را به میزان $100 \times$ در سرعت کسب اطلاعات ایجاد می کند. مزیتی که از این دیدگاه حاصل می شود این است که می توان به طیف کاملی از پاسخ (با کاهش قابل توجه ۳۰-۵۰ درصدی نسبت سیگنال به نویز) در مدت زمانی کوتاه دست یافت که معادل زمان به دست آوردن تنها یک پیکسل در SPM تک فرکانسی است. روش تحریک باند تا حدی تصویربرداری از اتلاف انرژی موضعی در ماده در مقیاس نانو را ممکن می سازد [۹]. شکل (۱۰) تصویربرداری با استفاده از روش BE-PFM از رشته های کوچک^{۲۵} آمیلونید روی میکا در محیط آب را نشان می دهد.

به طور خلاصه، هر دو روش DFRT و BE دارای مزیت های

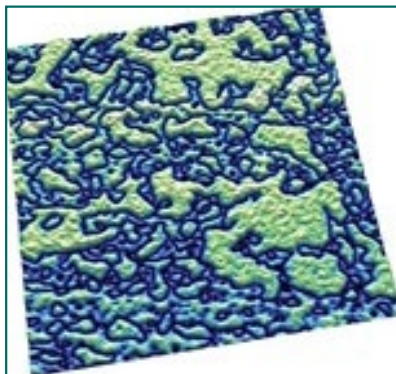
برنامه‌های کاربردی در حال ساخت برای PFM:

۱. PFM با فرکانس بالا: تهیه تصویر با فرکانس بالا و کاهش نویز، امکان بهبود سیگنال به نویز را فراهم می‌سازد. استفاده از آشکارسازهای الکترونیکی فرکانس بالا (تیرک‌های کوتاه‌تر با فرکانس رزونانس بالا) با بهبود تمرکز پرتو لیزر، امکان گسترش تصویربرداری PFM فرکانس بالا تا محدوده ۱۰-۱۰۰ مگاهرتز را فراهم می‌سازد.

۲. میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو با سرعت بالا: PFM با سرعت بالا از اطلاعات سرعت بالا و تحریک نمونه استفاده می‌کند تا سرعت تصویربرداری را به‌طور قابل توجهی از طریق افزایش میزان خطوط از حدود ۱ هرتز تا بالای ۱۰۰ هرتز افزایش دهد. کنتراست فاز و دامنه قوی قابل دسترس در PFM و نیز افزایش وضوح تصویر که با استفاده از این روش اتصالی به‌وجود آمد یک وضوح سه‌بعدی ۱۰ nm را ایجاد کرد که حتی در تصاویری با بیش از ۱۰ فریم در هر ثانیه کاربرد دارد [۱۱-۱۰]. علاوه بر توان عملیاتی بالا، فایده اصلی این روش، اندازه‌گیری دینامیکی است؛ برای مثال، ردیابی تکامل حوزه‌های فروالکتریک در هنگام تغییر، در معرض نور قرار گرفتن، تغییر دما و سایر اثرات نشان داده شده در تصویرهای (۱۱) و (۱۲).



شکل ۱۱: این توالی (از چپ به راست، بالا به پایین) از یک فیلم، شامل ۲۴۴ تصویر متوالی PFM با سرعت بالا را به تصویر می‌کشد. نیمه اول فیلم، سوزن با افست DC مثبت در طول اندازه‌گیری است. با نظارت بر فاز پاسخ پیزو، امکان مشاهده مستقیم پلاریزاسیون فروالکتریک در نمونه، از کنتراست رنگ سفید به سیاه فراهم می‌شود، (برگشت قطبیت ۱۸۰ درجه). سپس نیمه دوم فیلم با بایاس DC منفی از کنتراست سیاه به سفید به‌دست آمده است. هر تصویر فقط در ۶ ثانیه تهیه شده است [۷].



شکل ۱۲: دامنه (۰۰۱) در لایه نازک PZT، ۳/۸ میکرومتر [۷].

نتیجه‌گیری

استفاده از میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو امکان تحقیق و تصویربرداری با وضوح بالا از ساختارهای دامنه و کنترل خواص فروالکتریک در مقیاس نانو را فراهم می‌کند. در حال حاضر، هیچ ابزار دیگری که بتواند به‌طور معمول و با همان سهولت پاسخ الکترومکانیکی یک ماده را در مقیاس نانومتر اندازه‌گیری کند در دسترس نیست.

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲. کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشگاه کاتالیست و نانو فناوری
۳. کارشناس ارشد مهندسی الکترونیک، آزمایشگاه تولیدی و تحقیقات صنعتی آسار کویر یزد
۴. کارشناس فیزیک کاربردی، آزمایشگاه نانو اپتوالکترونیک دانشگاه تربیت مدرس تهران
۵. عضو کارگروه تخصصی دستگاه SPM شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو
6. Piezoresponse force microscopy (PFM)
7. Atomic Force Microscope (AFM)
8. Probe
9. Alternative Current (AC)
10. Tip
11. Reverse piezoelectric (CPE)
12. Stroboscopic
13. Contact resonance
14. Asylum Research
15. Dual frequency Resonance Tracking (DFRT)
16. Switching Spectroscopy (SSPFM)
۱۷. فاصله پیک تا پیک در ولتاژ AC، اختلاف بین ماکزیمم مثبت و ماکزیمم منفی است. ولتاژ پیک تا پیک را معمولاً با V_{pp} یا V_{p-p} نشان می‌دهند که برابر است با $V_{peak} - (-V_{peak}) = 2V_{peak}$
18. Scanning probe microscopy (SPM)
19. Sader
20. Signal- to- Noise Rate (SNR)
21. Amplifier
22. lithium niobate
23. Band excitation (BE)
24. Oak Ridge National Laboratory
25. Fibril
26. High Speed (HSPFM)

مراجع

[۱] فاطمه خاکراه و همکاران، اصول و کاربردهای میکروسکوپی نیروی پاسخ پیزو، فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران، شبکه آزمایشگاهی، سال سوم، زمستان ۱۳۹۴.

[2] WWW.physicsworld.com

[3] Gruverman, A.; Rodriguez, B. J.; Dehoff, C.; Waldrep, J. D.; Kingon, A. I.; Nemanich, R. J.; Cross, J. S. (2005). "Direct studies of domain switching dynamics in thin film ferroelectric capacitors". Applied Physics Letters 87: 082902.

[4] Harnagea, C.; Alexe, M.; Hesse, D.; Pignolet, A. (2003). "Contact resonances in voltage-modulated force microscopy". Applied Physics Letters 83: 338.

[5] WWW.wikipedia.org

[6] R. Garcia. R.; Perez, R. (2002). Surf.Sci. Reports 47, 197.

[7] Proksch, R.; Kalinin, S. Piezoresponse Force Microscopy with Asylum Research AFMs at Oak Ridge National Laboratory.

[8] Rodriguez, B.J.; Callahan, C.; Kalinin, S.; Proksch, R. (2007). Nanotechnology 18, 475504.

[9] Jesse, S.; Kalini, S.; Proksch, R.; Baddorf, A.P.; Rodriguez, B.J. (2007). Nanotechnology 18, 435503.

[10] Nath, R.; Chiu, Y.H.; Polomoff, N.; Ramesh, R.; Huey, B.D. (2008). App. Phys. Let. 93, 072905.

[11] 4. Kalinin, S. V.; Rodriguez, B. J.; Jesse, T. THundat, A. Gruverman, (2005). Electromechanical imaging of biological system with sub-10 nm resolution, APPL. Phys. Lett. 87, 053901.



PFM