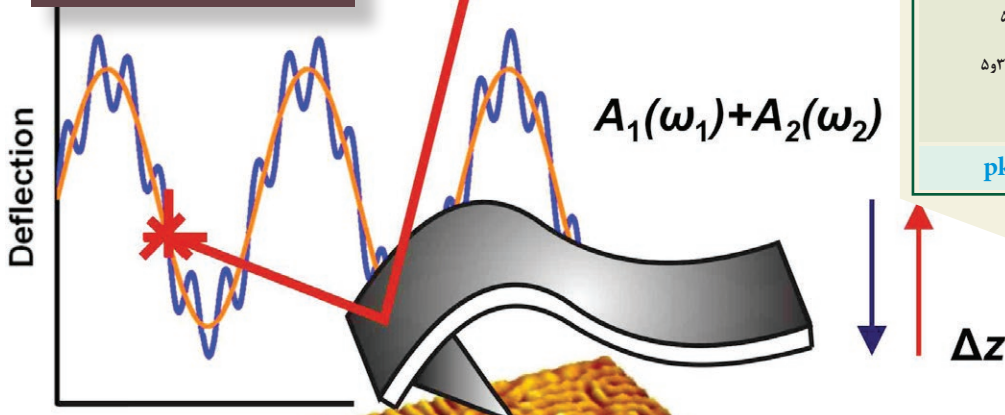


## بخش اول



## نویسندگان

فاطمه خاکراه<sup>۱\*</sup>صدیقه صادق حسنی<sup>۲</sup>سمیرا سادات میرجلیلی<sup>۳</sup>آذر خزاعی پور<sup>۴</sup>

pkhakrah@yahoo.com\*

## اصول و کاربردهای

## میکروسکوپی نیروی پاسخ پیزو

## چکیده

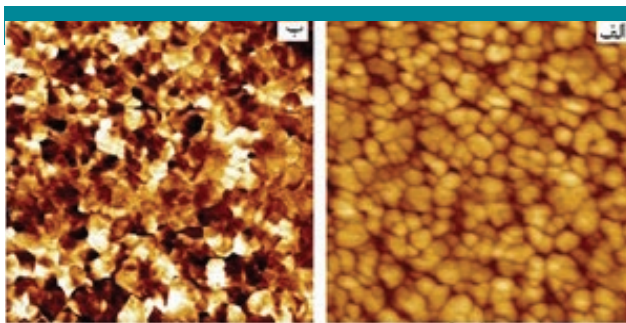
میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو<sup>۱</sup>، تغییر شکل ماده پیزوالکتریک ناشی از میدان الکتریکی اعمال شده از سوزن یک میکروسکوپ نیروی روبشی را تشخیص می‌دهد و آن را اندازه‌گیری می‌کند و همچنین می‌تواند توپوگرافی و دامنه‌های (حوزه‌های) فروالکتریک با توان تفکیک جانبی چند نانومتری را نقشه‌برداری و ترسیم کند. این ویژگی‌ها، میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو را برای ثبت و تحقیق الگوهای حوزه فروالکتریک، از دیگر روش‌ها متمایز ساخته است. در این مقاله، اصول اساسی میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو در تصویربرداری حوزه، حالت‌های تصویربرداری، تجزیه و تحلیل تصاویر، حالت‌های پیشرفته میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، کاربردها، مزایا و معایب دستگاه شرح داده می‌شود.

## واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، پیزوالکتریک، حوزه، تصویربرداری.

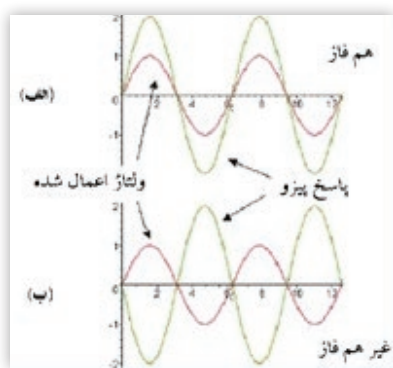
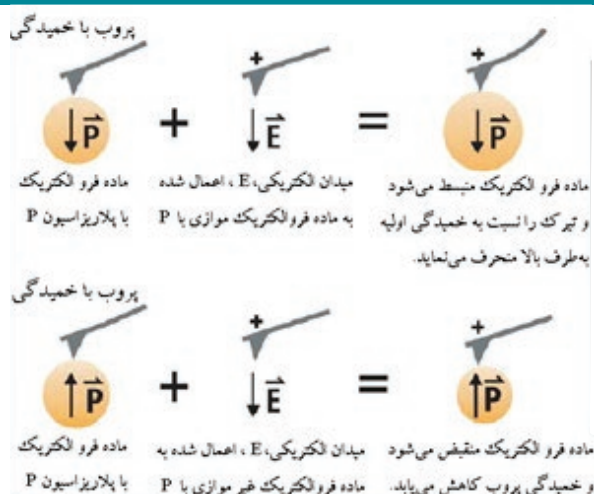
## مقدمه

کلمه یونانی «پیزو»<sup>۲</sup> به معنای فشار است. در سال ۱۸۸۰ برادران کوری، ژاک و پیر کوری<sup>۳</sup> پدیده‌ای را گزارش کردند که سال بعد توسط هنکل<sup>۴</sup>، پیزوالکتریسیته<sup>۱</sup> نامیده شد که در آن استرس مکانیکی اعمال شده به برخی مواد، بار الکتریکی روی سطوح مواد ایجاد می‌کند و منجر به تولید میدان الکتریکی و پتانسیل متناظر با آن می‌شود [۱ و ۲]. رفتار پیزوالکتریک یا پیزوالکتریسیته رفتاری است که از تولید الکتریسیته با استفاده از پلایزاسیون یک بلور در اثر اعمال تنش به‌وجود می‌آید. شرط ضروری برای پیزوالکتریک بودن یک بلور، عدم وجود تقارن مرکزی در ساختار بلوری است. اثر پیزوالکتریکی توانایی برخی مواد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی است، موادی که این پدیده را از خود بروز می‌دهند مواد پیزو الکتریک نامیده می‌شوند. اثر پیزوالکتریک در انواع بسیاری از مواد نظیر تک‌بلورها، سرامیک‌ها، بسپارها و مواد مرکب دیده می‌شود. فعالیت پیزوالکتریکی در اکسید نسوز تیتانیوم باریوم (BT) و در دهه ۱۹۵۰ در محلول جامد تیتانات زیرکونات سرب کشف شد [۳]. ترکیبات سرب - زیرکونات - تیتانات (PZT) با ساختار پروسکایت، اکسید روی و کوارتز، مثال‌هایی از مواد پیزوالکتریک هستند. میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو یکی از مهم‌ترین ابزارهایی است که امکان اندازه‌گیری و تعیین ویژگی‌های رفتار پیزوالکتریک مواد را در مقیاس نانومتر و کمتر از آن فراهم می‌کند. در حال حاضر، ابزار دیگری که بتواند به‌طور معمول و با همان سهولت پاسخ الکترومکانیکی یک ماده را در مقیاس نانومتر اندازه‌گیری کند در دسترس نیست [۴].



شکل ۲: (الف) تصویر توپوگرافی حالت تماسی و (ب) تصویر فاز میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی حوزه‌ها (دامنه‌ها) در یک لایه نازک فروالکتریک [۹].

هنگامی که میدان الکتریکی به یک ماده فروالکتریک اعمال می‌شود، پاسخ پیزو نوسان می‌کند، اگر پلاریزاسیون ماده موازی میدان باشد، پاسخ پیزو هم‌فاز با میدان است و ماده منبسط می‌شود و اگر موازی نباشد، غیر هم‌فاز و ماده منقبض می‌شود؛ بنابراین، انبساط و انقباض در میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، باعث تغییر خمیدگی پروب می‌شود (شکل ۳) [۹].



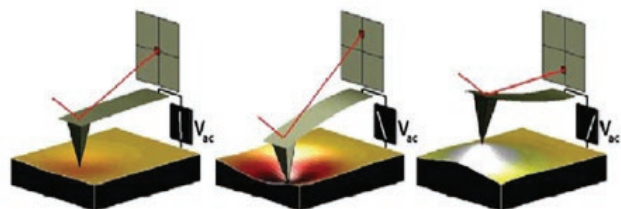
شکل ۳: (الف) پاسخ پیزوی هم‌فاز و (ب) غیر هم‌فاز ماده پیزوالکتریک به میدان الکتریکی اعمالی [۹].

### طیف‌سنجی میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو

طیف‌سنجی PFM، روشی است که در آن پاسخ پیزوی مکان خاصی روی سطح نمونه، می‌تواند نقشه‌برداری شود؛ برای مثال،

### اصول اساسی میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو

میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو روشی است که از زمان آغاز به کار آن و اولین پیاده‌سازی و اجرا [۵] به‌طور مداوم علاقمندان زیادی را به خود جذب نموده است. این امر، به‌دلیل مزایای زیاد و معایب کم PFM است که محققان در زمینه‌های مختلفی از فروالکتریک، نیمه‌هادی‌ها و حتی زیست‌شناسی از آن بهره می‌برند [۶]. PFM یک نوع میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱۱</sup> است که تصویربرداری و دستکاری حوزه‌های فروالکتریک را امکان‌پذیر می‌سازد و با نزدیک کردن سوزن تیز رسانای یک پروب<sup>۱۲</sup> به یک سطح فروالکتریک (یا مواد پیزوالکتریک) و اعمال بایاس جریان متناوب (AC) به سوزن<sup>۱۳</sup>، تغییر شکل نمونه در اثر تحریک، از طریق اثر پیزوالکتریک معکوس (CPE) به‌دست می‌آید. انحراف تیرک<sup>۱۴</sup> از طریق روش‌های آشکارساز دیود نوری<sup>۱۵</sup> تشخیص داده می‌شود. در این روش، توپوگرافی و دامنه‌های (حوزه‌های) فروالکتریک می‌تواند به‌طور هم‌زمان و با وضوح بالا تصویربرداری شود [۷]. با اعمال ولتاژ الکتریکی با استفاده از سوزن رسانای AFM، به سطح نمونه، پاسخ مکانیکی به کمک PFM اندازه‌گیری می‌شود. در پاسخ به محرک الکتریکی، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده‌است، انقباض یا انبساط نمونه، باعث انحراف قابل اندازه‌گیری در تیرک شده و امکان تفسیر ویژگی‌های پیزوالکتریک نمونه فراهم می‌شود [۸].



شکل ۱: نمایی از طرز کار PFM. تغییر شکل نمونه در پاسخ به ولتاژ اعمال شده [۸].

هنگامی که میدان الکتریکی به یک ماده فروالکتریک اعمال می‌شود، اگر میدان، موازی پلاریزاسیون ماده باشد، مواد منبسط و اگر غیرموازی باشد، منقبض می‌شوند. معمولاً این ویژگی ماده (فروالکتریک) را پاسخ پیزوی<sup>۱۶</sup> آن می‌نامند [۹]. از آنجا که تمام فروالکتریک‌ها، پیزوالکتریک هستند، می‌توان در مورد خواص فروالکتریک از جمله پاسخ پیزو، اطلاعات مفیدی به‌دست آورد. توان تفکیک جانبی PFM، اطلاعاتی را در مورد رفتار الکترومکانیکی لایه‌های نازک<sup>۱۷</sup> فروالکتریک فراهم می‌کند (شکل ۲) [۹].

به‌عنوان مثال، لایه‌های نازک مواد فروالکتریک از قسمت‌هایی مجزا تشکیل شده‌اند که روی بسترهای فلزی رشد کرده‌اند، در بررسی فرآیند رشد لایه نازک، PFM با توانایی بررسی حوزه نانومتری مشخص برای پاسخ پیزوالکتریک، می‌تواند نقطه‌ای را که در هنگام رشد لایه نازک دارای فروالکتریسیته<sup>۱۸</sup> است، تعیین کند. قسمتی که در آن پاسخ پیزو وجود دارد، به معنی وجود فروالکتریسیته است [۱۰].

## اثر پیزو

رابطه میان کرنش و میدان الکتریکی اعمال شده (که اغلب به عنوان اثر پیزو معکوس معرفی می شود) در مواد پیزوالکتریک با یک تانسور<sup>۲۰</sup> رتبه (۳) شرح داده می شود. مهم ترین مؤلفه این تانسور برای PFM «عمودی» مؤلفه  $d_{33}$  است [۱۳]. ولتاژ اعمال شده به سوزن طبق معادله زیر است:

$$V_{tip} = V_{dc} + V_{ac} \cos(\omega t) \quad (1)$$

ولتاژ اعمال شده به سوزن منجر به فشار پیزوالکتریک در مواد می شود که این کار، موجب جابجایی تیرک به دلیل اثر پیزوالکتریک خواهد شد [۱۴].

$$Z = Z_{dc} + A(\omega, V_{ac}, V_{dc}) \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

هنگامی که ولتاژ به فرکانسی پایین تر از رزونانس تماسی تیرک می رسد، خواهیم داشت:

$$Z = d_{33} V_{dc} + d_{33} V_{ac} \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

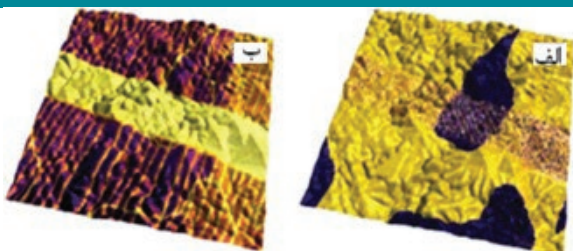
فرض می شود،  $d_{33}$  به حالت پلاریزاسیون مواد بستگی دارد. طبق معادله (۳)، بزرگی پاسخ نوسانی از بزرگی  $d_{33}$  اندازه گیری می شود و این فاز به دلیل پلاریزاسیون نمونه حساس است. مقادیر  $d_{33}$  در محدوده ۰/۱ pm/V برای مواد پیزوی ضعیف تا ۵۰۰ pm/V برای مواد قوی تر قرار دارند.

## پروب در حالت های تصویربرداری PFM

سه حالت تصویربرداری PFM و لیتوگرافی پیزوالکتریک به طور خلاصه در زیر توضیح داده شده است.

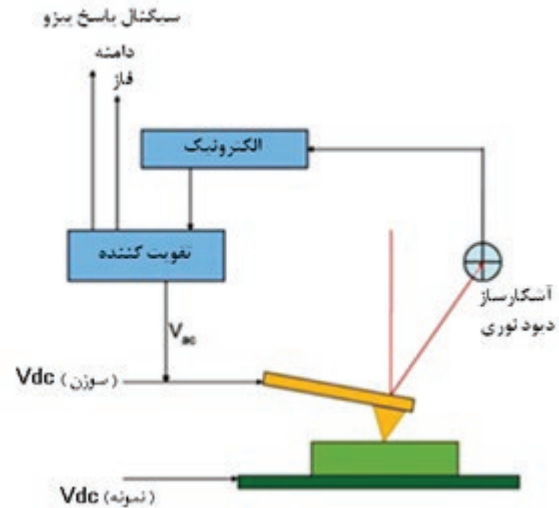
### الف. میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی عمودی

در تصویربرداری PFM عمودی<sup>۲۱</sup>، پلاریزاسیون غیرصفحه ای<sup>۲۲</sup> با ثبت سیگنال انحراف سوزن در فرکانس نوسان اندازه گیری می شود. شکل (۶) تصویر PFM عمودی لایه تیتانات سرب را نشان می دهد. حوزه های<sup>۲۳</sup> غیرموازی با پلاریزاسیون غیرصفحه ای در تصویر فاز PFM دیده می شود در حالی که حوزه صفحه ای<sup>۲۴</sup> در تصویر دامنه PFM به دلیل سیگنال ضعیف پاسخ پیزوی عمودی به صورت خطوط زرد رنگ دیده می شود [۸].



شکل ۶: الف) تصویر فاز PFM عمودی و ب) دامنه PFM عمودی روی توپوگرافی AFM در لایه تیتانات سرب، محدوده روبش ۵ میکرون [۸].

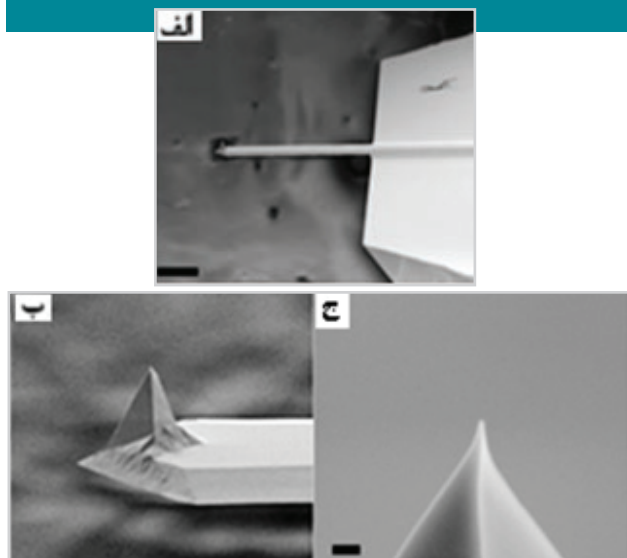
بایاس dc  $V_{dc}$ ، شکل (۴)، یا فرکانس سیگنال ac  $V_{ac}$ ، شکل (۴) از طریق سوزن به نمونه اعمال می شود. این روش همچنین می تواند برای مطالعه ویژگی های هیستریتیک<sup>۱۹</sup> پاسخ پیزو مورد استفاده قرار گیرد [۱۱ و ۱۲].



شکل ۴: نمایی از دستگاه میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو [۹].

## پروب در میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو

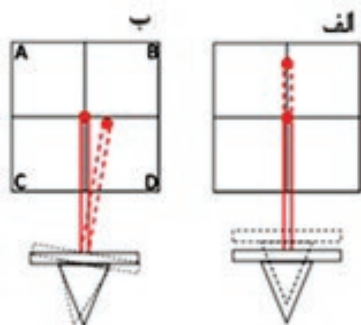
مهمترین ویژگی پروب در میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو، رسانا بودن آن است و برای اعمال بایاس به نمونه استفاده می شود. این پروب ها می توانند از طریق ساخت پروب های سیلیسیمی استاندارد و پوشش آنها با یک ماده رسانا به دست آیند (شکل ۵). پوشش های متداول مورد استفاده شامل پلاتین، طلا، تنگستن و الماس رسانا است [۷].



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پروب روبشی پوشش داده شده PtIr. بزرگنمایی تصاویر از تصویر الف) به ج)، به ترتیب افزایش می یابد به طوری که مقیاس در تصویر الف) ۵۰ میکرومتر و در ج) ۲۰۰ نانومتر است. الف) پایه، تیرک و سوزن و ب) هندسه سوزن و ج) نوک پروب را نشان می دهد. سوزن مناسب، با شعاع انحنای کمتر از ۴۰ نانومتر است [۷].

## تفاوت سیگنال‌های عمودی و جانبی در میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی

جداسازی PFM عمودی و PFM جانبی از طریق استفاده از یک شکاف آشکارساز دیود نوری چهار قسمتی (ربع‌های A، B، C و D) امکان‌پذیر است (شکل ۸). ولتاژ مرکز آشکارساز صفر است؛ اما از آنجایی که محل نقطه لیزر با یک فاصله شعاعی از این نقطه مرکزی حرکت می‌کند، بزرگی ولتاژ خروجی به صورت خطی افزایش خواهد یافت. انحراف عمودی می‌تواند به صورت  $\{(A+B) - (C+D) / (ABCD)\}$  تعریف شود به طوری که ولتاژهای مثبت و منفی به جابجایی عمودی مثبت و منفی تیرک نسبت داده می‌شوند. به طور مشابه، تغییر شکل جانبی به صورت  $\{(B+D) - (A+C) / (ABCD)\}$  برای توصیف حرکات پیچشی مثبت و منفی تیرک تعریف می‌شود. بنابراین، VPFM از انحراف سیگنال عمودی آشکارساز دیود نوری استفاده خواهد کرد. در این صورت تنها به مؤلفه‌های پلاریزاسیون غیرصفحه‌ای حساس خواهد بود و LPFM از انحراف جانبی سیگنال در آشکارساز دیود نوری استفاده خواهد کرد و فقط به مؤلفه‌های پلاریزاسیون صفحه‌ای حساس خواهد بود [۷].



شکل ۸: نمایش نمودارهای اثر حرکت تیرک در آشکارساز نوری. (الف) تغییر در انحراف عمودی در اثر جابجایی عمودی و (ب) تغییر در انحراف جانبی در اثر خمیدگی پیچشی تیرک [۷].

## کاربرد میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو

PFM در زمینه‌های مختلفی به شرح زیر کاربرد دارد:

### علم مواد

در شناسایی حوزه‌ها (دامنه‌ها)، پدیده‌های بحرانی و انتقالات فازی، دینامیک هسته‌ای، پلیمرهای فروالکتریک، بلورهای مایع و کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود.

### مواد پیزوالکتریک

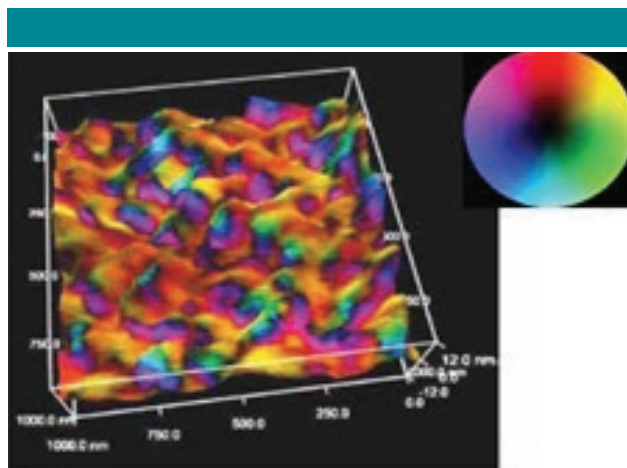
در ساخت دستگاه‌های میکرو الکترومکانیکی، برداشت و ذخیره

### ب. میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی جانبی

PFM جانبی<sup>۲۵</sup> روشی است که مؤلفه صفحه‌ای پلاریزاسیون، از حرکت جانبی تیرک به دلیل بایاس القایی برش سطحی شناسایی می‌شود. اخیراً تعدادی از محققین [۱۵-۱۸] نشان داده‌اند که مؤلفه صفحه‌ای پلاریزاسیون می‌تواند از انحراف جانبی تیرک AFM پیروی کند و این روش را برای بازسازی کاربردی توزیع سه‌بعدی پلاریزاسیون در حوزه تک‌بلورهای فروالکتریک به کار برده‌اند. رولف<sup>۲۶</sup> و همکارانش از این روش به منظور تمایز حوزه‌های ۹۰ و ۱۸۰ درجه در لایه‌های نازک تیتانات سرب ( $\text{PbTiO}_3$ ) استفاده کرده‌اند [۱۹].

### ج. میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزوی برداری

در PFM برداری<sup>۲۷</sup>، جهت پلاریزاسیون متشکل از سه مؤلفه پاسخ پیزو است: PFM عمودی به اضافه حداقل دو PFM جانبی متعامد [۲۰]. شکل (۷) تصویر PFM برداری لایه باریم تیتانات استرانسیوم<sup>۲۸</sup> را نشان می‌دهد. رنگ، شناسایی جهت موضعی پلاریزاسیون را امکان‌پذیر می‌سازد. مناطق فیروزه‌ای رنگ (آبی تیره‌تر/سبز) دارای پلاریزاسیونی هستند که به صورت عمده عمود بر سطح لایه هدایت شده‌اند. مناطقی که قرمز آبی یا سبز روشن به نظر می‌رسند دارای پلاریزاسیونی هستند که به طور عمده در سطح لایه هدایت می‌شوند. شدت رنگ نقشه نشان‌دهنده بزرگی پاسخ است [۸].



شکل ۷: تصویر PFM برداری از لایه BST. محدوده روبش ۱ میکرون × ۱ میکرون. چرخه رنگ جهت بردار PFM را تعیین می‌کند [۸].

### د. لیتوگرافی

PFM می‌تواند برای تغییر پلاریزاسیون فروالکتریک نمونه از طریق بکارگیری بایاس مورد استفاده واقع شود. هنگامی که میدان الکتریکی اعمال شده به اندازه کافی بزرگ باشد، می‌تواند پلاریزاسیون فروالکتریک معکوس را القا نمود. این فناوری می‌تواند برای توضیح الگوهای پیچیده بدون تغییر توپوگرافی سطحی مورد استفاده قرار گیرد.

انرژی، سوئیچ‌ها و فیلترهای RF، سونار<sup>۲۹</sup>، استانداردهای فرکانس و بالانس، دی الکتریک‌های K و خازن‌ها کاربرد دارد.

## مزایا و معایب

از مزایای PFM می‌توان تهیه تصاویر با توان تفکیک بالا در مقیاس نانومتری، تهیه هم‌زمان تصویر توپوگرافی و اطلاعات پاسخ پیزو، غیرمخرب بودن، آماده‌سازی آسان نمونه و دستکاری حوزه‌های فروالکتریک را نام برد. پوشش سوزن که می‌تواند سبب تغییر سطح تعامل (واکنش) شود و کنتراست را تحت تاثیر قرار دهد و رویش آهسته (به‌عنوان مثال، ده دقیقه) از معایب PFM محسوب می‌شوند.

### مواد فروالکتریک

قابلیت مهندسی دامنه، حافظه غیرفرار، وسایل ذخیره اطلاعات، دینامیک و انرژی حوزه.

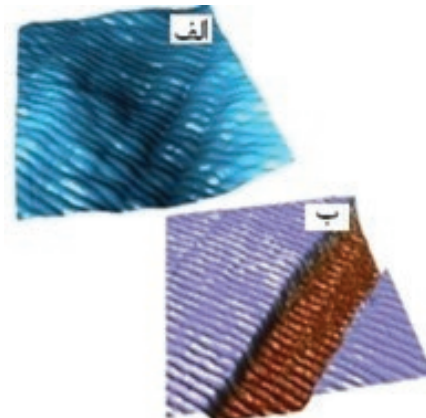
### الکترومکانیک زیستی

در تهیه و ساخت امکانات قلبی، سمعی، سیگنال سلولی، الکترومکانیک ساختاری و حسگرهای زیستی استفاده می‌شوند.

### کاربردهای زیستی

از PFM با موفقیت در طیف وسیعی از مواد زیستی مانند دندان [۲۱]، استخوان، و فیبرهای کلاژن استفاده شده است [۷]. این فرضیه ارائه شده که پیزوالکتریسیته درونی در این مواد ممکن است مربوط به زیست‌شناسی مکانیکی آنها باشد. به‌عنوان مثال، با استفاده از PFM نشان داده شده است که یک کلاژن تک رشته به ابعاد ۱۰۰ نانومتر عمدتاً به صورت مواد پیزوالکتریک برشی با ثابت پیزو الکتریک مؤثر  $PM/V \sim 1$  رفتار می‌کند [۷].

PFM امکان تفکیک اجزای آلی و معدنی سیستم‌های زیستی و مطالعه ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های موضعی مواد را فراهم می‌کند. همچنین با استفاده از PFM برداری می‌توان جهت‌گیری پروتئین در فضای حقیقی را نشان داد. به‌عنوان مثال، می‌توان ساختار داخلی و جهت‌گیری رشته‌های کوچک پروتئین با وضوح چند نانومتری را در مینای دندان انسان مشخص نمود. همچنین در سیستم‌های زیستی، PFM می‌تواند برای مطالعات الکتروفیزیولوژی در سطوح سلولی و مولکولی (به‌عنوان مثال، انتشار سیگنال در عصب‌ها) استفاده شود. تصاویر فاز و توپوگرافی PFM از فیبرهای کلاژن در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹: (الف) توپوگرافی و (ب) تصویر فازی PFM فیبرهای کلاژن، ۱/۴ میکرون [۸]

## نتیجه‌گیری

توصیف پاسخ‌های الکترومکانیکی در مواد گوناگون به‌منظور درک و پیشرفت فناوری‌ها از علوم زیستی تا تولید انرژی بسیار اهمیت دارد. در حال حاضر، وجود اثرات پیزوالکتریک، به‌صورت مستقیم و معکوس در طیف گسترده‌ای از گروه‌های مواد، از جمله پلیمرها، مواد زیستی، چوب، سرامیک و مواد جامد بلوری غیرفلزی با ساختار بلوری بدون مرکز تقارن مشخص شده است. با علاقه رو به رشد در استفاده از خاصیت پیزوالکتریک و بسیاری از رویدادها در مقیاس نانومتری، میکروسکوپ نیروی پاسخ پیزو به‌عنوان ابزار کلیدی در پیشبرد تحقیق و توسعه برنامه‌های کاربردی براساس مواد پیزوالکتریک و فروالکتریک‌های صنعتی مهم به کار گرفته شده است. میکروسکوپ پروبی روبشی به‌عنوان ابزاری جهانی برای اندازه‌گیری چنین ساختارها و عملکردها در ابعاد نانومتری پا به عرصه ظهور گذاشته است. تحقیق با این میکروسکوپ، پیشرفت‌های جدید در رشته‌های گوناگون را ممکن ساخته است به‌طوری که پیشرفت‌هایی در حوزه‌های گوناگون از دستگاه‌های ذخیره اطلاعات و ماشین‌های مولکولی تا مواد اصلاح شده برای انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز شامل می‌شود.

۱. کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد
۲. کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانوفناوری
۳. کارشناس ارشد مهندسی الکترونیک، آزمایشگاه تولیدی و تحقیقات صنعتی آسار کویر یزد
۴. کارشناس فیزیک کاربردی، آزمایشگاه نانوایتوالکترونیک دانشگاه تربیت مدرس تهران
۵. عضو کارگروه تخصصی دستگاه میکروسکوپ روبشی پیمایشی شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

6. Piezoresponse force microscopy (PFM)

7. Piezo

8. Jacques and Pierrer Curie

9. Hankel

10. Piezoelectricity

11. Atomic Force Microscopy (AFM)

12. Probe

13. Tip

14. Cantilever

15. hotodiod

16. piezoresponse

17. Thin Films

18. ferroelectricity

19. hystertic

20. Tensor

21. Vertical

22. Out- of- plane

23. Domain

24. In-Plane

25. Lateral

26. Roelofs

27. Vector

28. Barium strontium titanate (BST)

29. Sonar

- [1] Curie, P. and J., Comptes Rendus, (1880) 91, 294.
- [2] Hankel, W. G., Sa chs, Abh, (1881) 12, 457.
- [3] WWW.roshd.ir
- [4] Kalinin, S. V.; Rodriguez, B. J., S. Jesse, T. Thundat, A. Gruverman, (2005). Electromechanical imaging of biological system with sub-10 nm resolution, APPL. Phys. Lett. 87, 053901.
- [5] Gruverman, A. (1995). "Domain structure and polarization reversal in ferroelectrics studied by atomic force microscopy". Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures 13: 1095.
- [6] Rodriguez, B.J.; Kalinin, S.V.; Shin, J.; Jesse, S.; Grichko, V.; Thundat, T.; Baddorf, A.P.; Gruverman, A. (2006). "Electromechanical imaging of biomaterials by scanning probe microscopy". Journal of Structural Biology 153 (2): 151.
- [7] WWW.wikipedia.org
- [8] Proksch, R.; Kalinin, S. Piezoresponse Force Microscopy with Asylum Research AFMs at Oak Ridge National Laboratory.
- [9] Shijie, Wu, (2007). Piezoresponse Force Microscopy, Application Note, Agilent Technologies.
- [10] Okuyama, M.; Ishibashi, Y, (2005). Ferroelectric Thin Film, Basic Properties And Device Physics for Memory Applications, Number 98 in Topics in Applied Physics Series, Springer-Verlag Publishing Company, Germany. See sections 3 and 5.2 in the chapter on Pb-based Ferroelectric Thin Films Prepared by MOCVD.
- [11] Alexe, M.; et.al. (1999). Applied Physics Letters, 75, 1158.
- [12] Reolofs, A.; et.al. (2000). Applied Physics Letters, 77, 3444.
- [13] Elieev, E.A.; Kalinin, S.V.; Jesse, S.; Bravina, S.L. and Morozovska, A.N. (2007). J. Appl.Phys. 102,014109.
- [14] Jesse, S.; Baddorf, A.P.; Kalinin, S.V. (2006). Nanotechnology 17, 1615.
- [15] Eng, L. M.; Guntherodt, H.J.; Roseman, G.; Skliar, A.; Oron, O.; Katz, M and Eger, D. (1998). J. Appl. Phys. 83, 5973.
- [16] Eng, L. M.; Guntherodt, H.J.; G. A. Schneider, G.A.; Kopke, U.; Munoz Saldana, J. (1999). J. APPL. Phys. Lett. 74, 233.
- [17] Abplanalp, M.; Eng, L.M.; Gunter, P. (1998). Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. 66A, S234.
- [18] Eng, L.M.; Abplanalp, M.; Gunter, P. (1998). Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. 66A, S679.
- [19] Reolofs, A.; U. Bottger, U.; Waser, R.; Schlaphof, F.; Trogisch, S.; Eng, L.M. (2000). Appl. Phys. Lett. 77, 3444.
- [20] Kalinin, S.V.; Rodriguez, B. J.; Jesse, S.; Thundat, T.; Gruverman, A. (2005). nm "Electromechanical imaging of biological systems with sub-10 resolution". Applied Physics Letters 87: 053901.
- [21] Harnagea, C.; Alexe, M.; Hesse, D.; Pignolet, A. (2003). "Contact resonances in voltage-modulated force microscopy". Applied Physics Letters 83: 338.