

نویسندگان

پروین هادیان^{۴*}صدیقه صادق حسنی^۴مریم خراشادی زاده^۴

parvinhadian@gmail.com

ذره مغناطیسی

میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی

چکیده

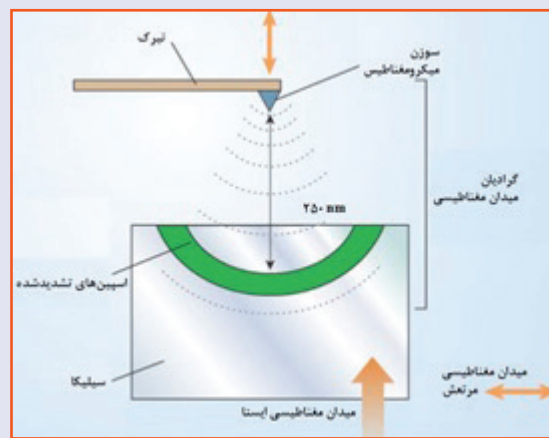
محققین در نانو فناوری و زیست شناسی مولکولی، اغلب به دلیل عدم توانایی مشاهده اتمها و مولکولها با توان تفکیک بالا به ویژه به صورت سه بعدی، به شدت محدود بوده اند. میکروسکوپی نیروی تشدید مغناطیسی (MRFM)، گونه ای از میکروسکوپی پروبی روبشی است که قابلیت تهیه تصویر سه بعدی روش تصویربرداری تشدید مغناطیسی را با حساسیت و توان تفکیک بالای میکروسکوپ نیروی اتمی تلفیق می نماید. در MRFM، برهم کنش نیروهای بین میدان مغناطیسی گرادینانی سوزن میکرومگنت و اسپین هسته های اتمهای سطح نمونه، آشکار سازی می شود.

واژه های کلیدی

تشدید مغناطیسی، ممان مغناطیسی، میکروسکوپ نیروی اتمی، میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی.

در طول چند دهه اخیر، روش های مختلف تشدید مغناطیسی^۵ به عنوان ابزار قدرتمندی برای تهیه تصویر و توصیف ساختار مولکولی مورد استفاده قرار گرفته است و باعث ایجاد پیشرفت های شایانی در زمینه علوم پزشکی، زیست شناسی، شیمی، علم مواد و فیزیک شده اند. در روش تشدید مغناطیسی هسته^۶ تعیین ساختار مولکولی نمونه با قرار دادن آن در یک میدان مغناطیسی همگن و بررسی محیط پیرامون اتمها و پیوندهای مولکولی میسر می شود. در تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۷ تجسم ساختار سه بعدی نمونه مورد نظر، از قرار دادن آن در یک میدان مغناطیسی گرادینانی به دست می آید. اگرچه قدرت روش های تشدید مغناطیسی بی شمار است اما هنگامی که در مقیاس میکرومتری به کار برده می شود، دارای ضعف حساسیت پایین به دلیل نوع روش های آشکار سازی و میدان مغناطیسی گرادینانی بالا هستند. محققین از روش های متعددی برای بهبود حساسیت روش های تشدید مغناطیسی استفاده نموده اند. در سال ۱۹۹۱، جان

سیدلس^۸ از دانشگاه واشنگتن پیشنهاد داد تا با استفاده از آشکارسازی مکانیکی سیگنال اسپین‌ها و ایجاد میدان مغناطیسی قوی با استفاده از ذرات مغناطیسی کوچک، حساسیت و توان تفکیک جانبی روش‌های تشدید مغناطیسی را بهبود دهد. وی میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی^۹ را که ترکیبی ایده‌آل از روش میکروسکوپی نیروی اتمی^{۱۰} با توانایی تهیه تصویر در مقیاس نانومتر و MRI با قدرت طیف‌سنجی است، اختراع نمود. MRFM را می‌توان نقطه اوجی در تاریخ طولانی توسعه دستگاهی برای تهیه تصویر و آشکارسازی ممان مغناطیسی با حساسیت و توان تفکیک جانبی بالا دانست [۱ و ۲]. براساس قوانین بنیادین فیزیک، ممان مغناطیسی می‌تواند نیرویی در یک میدان مغناطیسی گرادیانی اعمال نماید که می‌توان آن را به صورت مکانیکی اندازه‌گیری نمود. ایوان^{۱۱} و همکارانش اولین کسانی بودند که توانستند رزونانس مغناطیسی را به کمک آشکارسازهای مکانیکی، تشخیص دهند [۳]. همان‌گونه که اشاره شد، دو فناوری بسیار مهم MRI و AFM در ساخت MRFM دخیل هستند. هر دو روش در طول سه دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای را به‌طور مستقل و موازی داشته‌اند. امروزه MRFM قابلیت تهیه تصویر مغناطیسی MRI و امکان تهیه تصویر سه‌بعدی با توان تفکیک اتمی AFM را دارا است.



شکل ۱: نمایی از روش میکروسکوپی نیروی تشدید مغناطیسی

این روش قادر است تصاویری از خواص شیمیایی طیف وسیعی از مواد با توان تفکیک بالا و بدون تخریب نمونه در اختیار محققین قرار دهد. اخیراً یکی از سازندگان دستگاه با استفاده از این روش، اسپین مغناطیسی تک الکترون را نمایش داده است (سیگنال‌های مغناطیسی تک الکترون تقریباً ۶۰۰ برابر قوی‌تر از تک پروتون‌ها است). حساسیت این میکروسکوپ ۱۰ بیلیون برابر دستگاه‌های MRI موجود در بیمارستان‌ها است. در دستگاه MRI یک سیم‌پیچ گیرنده وجود دارد که سیگنال مربوط به تشدید اسپین هسته را در میدان مغناطیسی دریافت می‌نماید [۴]. در MRFM از سوزنی استفاده می‌شود که ویژگی فرومغناطیس دارد (آهن یا آلیاژهایی از کبالت) و به‌طور مستقیم و با توان تفکیک بالا، برهم‌کنش اسپین نمونه را آشکارسازی می‌نماید. با نزدیک شدن سوزن فرومغناطیس به نمونه، اسپین‌های هسته‌ها با وارد نمودن نیروهای جاذبه یا دافعه، باعث انحراف جزئی تیرک می‌شوند. این عمل چند بار به‌وسیله اسپین‌ها صورت می‌گیرد و باعث بالا و پایین رفتن تیرک می‌شود. این جابجایی به کمک یک تداخل‌سنج (فیبر نوری) اندازه‌گیری می‌شود تا تصاویر سه‌بعدی از سطح نمونه تهیه شود. سوزن‌های فرومغناطیس باریک و تیرک‌های نرم، مقادیر بالایی از نسبت سیگنال به نوفه را در اختیار می‌گذارند. با توجه به این که نسبت سیگنال به نوفه با معکوس اندازه ذرات نمونه رابطه نمایی دارد، حرکت براونی^{۱۲} اولین منبع نوفه خواهد بود. به همین علت، معمولاً این دستگاه در دمای پایین کار می‌کند. عملکرد MRFM در دمای خیلی پایین به دلیل کاهش نوفه ترمومکانیکی و افزایش قطبش اسپینی گرمایی، مفید خواهد بود. با پیشرفت‌های قطعات تداخل‌سنج کوانتومی ابررسانا^{۱۳} که برای جلوگیری از گرمای بیش از حد تیرک (برپایه نوع روش آشکارسازی انحراف تیرک) استفاده می‌شود، عملیات MRFM را می‌توان در دماهای حدود ۳۰ mK نیز انجام داد [۵].

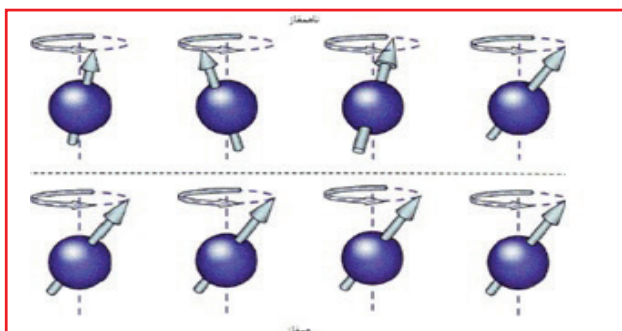
یکی از کاربردهای MRFM، تعیین ساختار پروتئین‌هایی است که شناسایی آن با استفاده از سایر روش‌ها (به دلیل شکل اتمی پیچ‌خورده پروتئین‌ها) به‌صورت درجا^{۱۴} بسیار محدود است، همچنین MRFM‌های پیشرفته ممکن است برای نشان دادن اطلاعات کوانتومی در رایانه‌های کوانتومی آینده که مبتنی بر اسپین است، مورد استفاده قرار گیرند [۶ و ۷]. در این مقاله ابتدا به اصول حرکت‌های اسپینی اشاره خواهد شد، سپس سازوکار تصویربرداری MRI و AFM و در انتها سازوکار عملکرد میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی و کاربردهای آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

○ تشدید

پدیده تشدید زمانی رخ می‌دهد که یک شیء در معرض نوساناتی قرار گیرد که فرکانسی نزدیک به فرکانس نوسانات طبیعی خودش داشته باشد. زمانی که یک هسته در معرض نوساناتی قرار گیرد که دارای نوسانی مشابه با فرکانس طبیعی خودش باشد، این هسته از نیروی خارجی انرژی به دست می‌آورد و اگر انرژی داده شده دقیقاً دارای همان فرکانس فرقه‌ای (لارمور) هسته باشد، تشدید رخ خواهد داد.

○ تشدید مغناطیسی هسته‌ای

تشدید مغناطیسی هسته‌ای یک پدیده فیزیکی براساس مکانیک کوانتوم است. در حضور یک میدان مغناطیسی قوی، انرژی هسته‌های عناصر مشخصی به علت خواص مغناطیسی این ذرات به دو یا چند تراز کوانتیده شکافته می‌شوند. الکترون‌ها نیز به طریقی مشابه هسته، عمل می‌کنند. نقل و انتقال میان ترازهای انرژی القا شده مغناطیسی حاصل می‌تواند با جذب تابش الکترومغناطیسی با بسامد مناسب انجام شود. درست مشابه نقل و انتقال الکترونی که با جذب تابش فرابنفش یا مرئی صورت می‌پذیرد. اختلاف انرژی بین ترازهای کوانتومی مغناطیسی برای هسته‌های اتمی مقداری است که با تابش در گستره‌ای از ۰/۱ تا ۱۰۰-۱۰۰ مگاهرتز مطابقت دارد. در حالت عادی اختلاف انرژی بین ترازهای اسپین هسته صفر است، اما زمانی که اتم‌ها در حضور میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، براساس پدیده زیمان^{۱۷} شکافته خواهند شد. یکی از نتایج تشدید آن است که برخی هسته‌های کم انرژی از طریق تشدید، انرژی کافی به دست می‌آورند که به تراز پرنرژی ملحق گردند. نتیجه دیگر تشدید آن است که گشتاورهای مغناطیسی هسته‌ها (به‌عنوان مثال، هسته‌های هیدروژن) با یکدیگر هم‌فاز می‌شوند. در نتیجه تمام گشتاورهای مغناطیسی در وضعیت یکسانی روی مسیر فرقه‌ای قرار می‌گیرند و هم‌فاز می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳: حرکت فرقه‌ای هسته‌های غیرهم‌فاز (بالا) و هم‌فاز (پایین) [۸]

○ جمعیت

سطح انرژی گرمایی (T) و شدت میدان مغناطیسی خارجی، عوامل تعیین‌کننده جمعیت هسته‌ها در حالت اسپین بالا و پایین هستند که براساس تابع توزیع بولتزمن^{۱۸}، جمعیت یک سطح انرژی متناسب با $\exp(-E_m/kBT)$ است. در تعادل گرمایی،

تشدید مغناطیسی

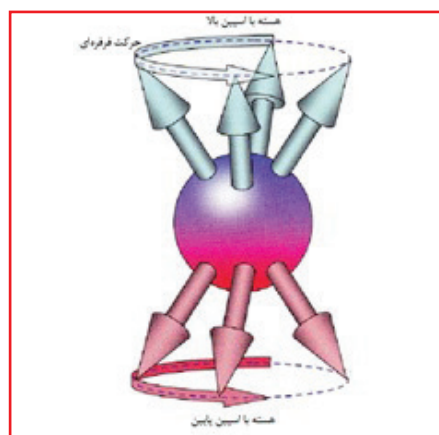
○ اصول پایه

سه نوع حرکت در اتم وجود دارد که عبارتند از: حرکت اسپینی الکترون‌ها حول محور خود، حرکت مداری الکترون‌ها در اطراف هسته و حرکت اسپینی هسته حول محور خود. اساس کار MRFM مبتنی بر حرکت اسپینی هسته‌های خاص است (این اسپین از اسپین‌های فردی پروتون‌ها و نوترون‌های درون هسته ناشی می‌شود). هسته‌های فعال تشدید مغناطیسی با مرتب شدن و هم‌راستایی محور چرخش آنها در جهت یک میدان خارجی شناسایی می‌شوند. این هم‌راستایی به این دلیل رخ می‌دهد که هسته‌ها دارای گشتاور زاویه‌ای یا اسپینی هستند. هسته‌های فعال تشدید مغناطیسی بار و اسپین دارند، لذا به‌طور خودبه‌خود یک ممان مغناطیسی پیدا می‌نمایند که می‌توانند در میدان مغناطیسی خارجی مرتب شوند. به‌عنوان مثال، هسته اتم‌های هیدروژن (۱)، کربن (۱۳)، نیتروژن (۱۵)، اکسیژن (۱۷)، فلور^{۱۹}، سدیم (۲۳) و فسفر (۳۱) فعال مغناطیسی هستند. ممان مغناطیسی (μ) به ممان زاویه‌ای اسپین (J) و به ضریب نسبت ژیرومغناطیس^{۱۵} (۷) وابسته است (نسبت ژیرومغناطیس بیان‌کننده رابطه بین اندازه حرکت زاویه‌ای و ممان مغناطیسی است) [۸ و ۹].

$$\mu = \gamma J \quad (۱)$$

بنابر نظریه کوانتومی، به‌عنوان مثال، هسته هیدروژن، دارای دو حالت انرژی بالا و پایین است. هسته‌های دارای انرژی پایین ممان مغناطیسی خود را موازی با میدان خارجی و هسته‌های دارای انرژی بالا ممان مغناطیسی خود را غیر موازی با میدان خارجی مرتب می‌نمایند. اختلاف انرژی بین این دو حالت با معادله (۲) بیان می‌شود. ωL فرکانس تشدید یا همان فرکانس لارمور^{۱۶} است. گشتاور مغناطیسی تمام این هسته‌ها در اطراف میدان مغناطیسی خارجی روی یک مسیر فرقه‌ای حرکت می‌کند. شکل (۲) حرکت فرقه‌ای اسپین‌های بالا و پایین را نشان می‌دهد.

$$|\Delta E| = \gamma \hbar H = \hbar \omega L \quad (۲)$$



شکل ۲: حرکت فرقه‌ای اسپین‌های بالا و پایین [۷]

○ روش تصویربرداری MRI

سازوکار MRI، مبتنی بر حرکت اسپینی هسته اتم‌های هیدروژن موجود در بدن است. با توجه به این‌که در اتم هیدروژن فقط یک پروتون وجود دارد، خود هسته یک اسپین خالص یا گشتاور زاویه‌ای دارد و چون دارای حرکت است، طبق قانون القا فاراده به‌طور خودبه‌خود یک گشتاور مغناطیسی پیدا نموده و در نتیجه با قرار گرفتن در میدان مغناطیسی خارجی جهت‌گیری می‌کند. برخی هسته‌های اتم هیدروژن موازی با میدان و تعداد خیلی کمتری از هسته‌ها غیر موازی با میدان مغناطیسی می‌شوند. تأثیر میدان مغناطیسی خارجی، ایجاد یک نوسان اضافی برای هسته‌های هیدروژن حول میدان خود آن‌ها است (حرکت تقدیمی). برای آن‌که تشدید هسته‌های هیدروژن رخ دهد، یک پالس (RF) با همان بسامد حرکت تقدیمی به‌کار می‌رود. اعمال پالس (RF) را که سبب تشدید هسته‌ها می‌شود، تحریک می‌نامند. در نتیجه عمل تحریک، هسته‌های هیدروژن انرژی پالس (RF) را جذب و به تراز انرژی بالاتر منتقل می‌شوند، در نتیجه هم راستایی خود را با میدان مغناطیسی خارجی از دست می‌دهند. به زاویه‌ای که بین هسته‌های هیدروژن و میدان مغناطیسی خارجی ایجاد می‌شود، زاویه فلیپ^{۲۰} می‌گویند. طبق قانون القای فاراده، اگر یک سیم‌پیچ گیرنده در صفحه حرکت این میدان مغناطیسی قرار گیرد، ولتاژ در سیم‌پیچ القا می‌شود. وقتی میدان مغناطیسی عرض صفحه سیم‌پیچ را قطع نماید، سیگنال MR تولید می‌شود. این سیگنال نقاط فضای (k) یا فوریه را تشکیل می‌دهد، با انجام تبدیل فوریه در این فضا، تصویر نهایی به‌دست می‌آید. با این وجود و با تمام تلاش‌های انجام شده، توان تفکیک جانبی MRI به‌وسیله محدودیت‌های روش، بیش‌تر از $40 \mu\text{m}^3$ نیست. اساس کار MRI بر پایه آشکارسازی مغناطیس هسته است و چون مغناطیس هسته اثر فیزیکی ضعیفی دارد و سیگنال نوفه کوچک‌تری تولید می‌نماید، لذا سیستم‌های آشکارسازی موجود در MRIهای معمولی قادر به آشکارسازی این پدیده در مقیاس زیر میکرومتر نخواهند بود. با وجود این چالش‌ها، انگیزه بالایی برای بهتر کردن توان تفکیک MRI برای به‌کارگیری آن در مقیاس نانومتری با استفاده از روش MRFM وجود دارد. در این مقیاس ممکن است بتوان تصویری سه‌بعدی و بدون تخریب نمونه از ماکرومولکول‌های انفرادی و یا کمپلکس‌های مولکولی به‌دست آورد. این روش می‌تواند زیست‌شناسان را قادر به شناسایی پروتئین‌هایی نماید که برای آنالیز پرتو ایکس^{۲۱} قادر به بلوری شدن نیستند [۱۰ و ۱۱].

میکروسکوپ پروبی روبشی (SPM)

میکروسکوپ پروبی روبشی اولین بار در سال ۱۹۸۲ توسط دو دانشمند (بنینگ^{۲۲} و روهبر^{۲۳}) در شرکت IBM^{۲۴} در زوریخ سوئیس اختراع شد. SPM عبارتی است کلی، برای مجموعه‌ای از میکروسکوپ‌ها که سطح نمونه را با استفاده از یک پروب فیزیکی روبش نموده و اطلاعات متفاوتی از ویژگی‌های سطح نمونه را در مقیاس نانومتری و یا حتی آنگسترومی در اختیار می‌گذارند (شکل ۴).

همیشه تعداد هسته‌های با انرژی بالا کمتر از تعداد هسته‌های با انرژی پایین هستند. هسته‌های با انرژی گرمایی پایین فاقد انرژی لازم برای مخالفت با میدان است و لذا هسته‌های با انرژی گرمایی بالا انرژی کافی را برای مخالفت با میدان دارند و هنگامی که شدت میدان مغناطیسی افزایش یابد، هسته‌های کمتری انرژی کافی برای این کار را دارند.

تصویربرداری تشدید مغناطیسی

MRI ابزاری قدرتمند برای تهیه تصاویر مورفولوژی سه‌بعدی (با قدرت تفکیک میلی‌متر تا زیر میلی‌متر) از اعضای بدن است که دارای کاربردهای فراوانی در پزشکی و علوم اعصاب است.

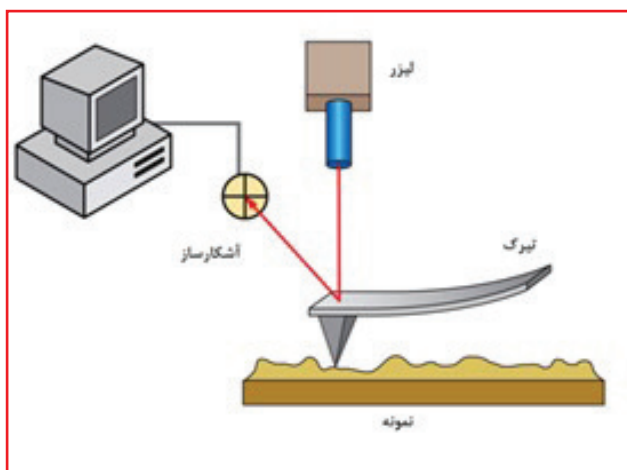
○ سازوکار MRI

در تصویربرداری با این روش، اتم‌هایی که از نظر مغناطیسی فعال بوده و به مقدار لازم در اعضای بدن وجود داشته باشند، مورد نیاز هستند. هسته اتم هیدروژن علاوه بر این‌که از نظر مغناطیسی فعال است، در مولکول‌های چربی و نیز در مولکول‌های آب (که $\frac{1}{3}$ وزن بدن را تشکیل می‌دهد) وجود دارد. در دستگاه MRI سه میدان مغناطیسی استفاده می‌شود که عبارت است از:

۱. میدان خارجی ثابت و قوی (B_0);
۲. میدان ضعیف گرادیانی متغیر؛
۳. میدان حاصل از پالس بسامد رادیویی^{۱۹} (RF) الکترومغناطیسی (B_1).

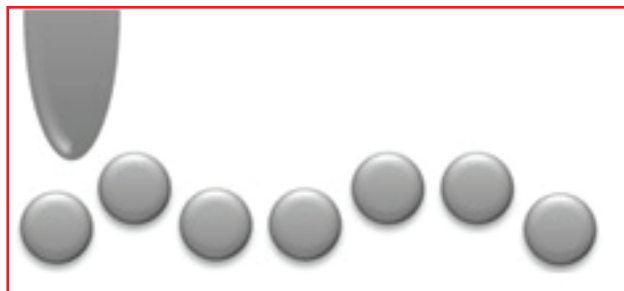
میدان مغناطیسی خارجی یک مغناطیس‌کننده دائم و یکنواخت است که اسپین هسته‌های هیدروژن را هم‌سو می‌نماید؛ هرچه قدرت میدان مغناطیسی خارجی بیشتر باشد، تصویر، با کیفیت بالاتری ایجاد می‌شود؛ زیرا تعداد بیشتری اسپین در فرآیند تصویربرداری مداخله می‌نمایند. برای اینکه عمل تشدید رخ دهد، پالس با بسامد مشخصی مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای هسته‌های هیدروژن، بسامد تشدید در محدوده بسامد رادیویی واقع شده‌است. لذا دستگاه MRI پالس مزبور را وارد نموده و باعث می‌شود هسته‌های هیدروژن انرژی را در بسامد خاص (لامور) جذب نموده و اسپین‌ها، غیر موازی با میدان قرار گیرند. با قطع بسامد رادیویی، اسپین‌ها به حالت اولیه بازگشته و امواجی با بسامد رادیویی، تشعشع می‌نمایند که به‌وسیله سیم‌پیچ‌های موجود در بدنه دستگاه MRI دریافت شده و به جریان الکتریکی تبدیل می‌شود، سپس اطلاعات به رایانه منتقل و پس از انجام عملیات پردازش و تبدیل فوریه، تصویر از بافت مربوطه ایجاد می‌شود. روی هم رفته از سه میدان الکترومغناطیسی برای تصویربرداری MRI استفاده می‌شود: میدان مغناطیسی بسیار قوی و یکنواخت که میدان استاتیک نام دارد، میدان مغناطیسی ضعیف‌تر متغیر با زمان (در مجموع یک کیلوهرتز) برای کدگذاری فضایی، که میدان گرادیان نام دارد و میدان مغناطیسی ضعیف با بسامد رادیویی (RF) برای تشدید هسته‌های هیدروژن و تولید سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری، که سیم‌پیچ‌های (RF) نام دارد [۱۰ و ۱۱].

ضعیفی از جمله نیروهای واندروالسی (10^{-10} - 0.1 nN) وابسته به حالت کاری (AFM) بین سوزن و سطح اعمال می‌شود و این نیرو باعث انحراف یا خمش تیرک شده و با حرکت سوزن به صورت خط به خط روی سطح نمونه و آشکارسازی میزان انحرافات تیرک، تصویر مورد نظر ایجاد می‌شود. میکروسکوپ نیروی اتمی برای مطالعه مواد هادی، نیمه‌هادی و عایق مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های متفاوتی برای آشکارسازی میزان انحراف تیرک در اثر نیروهای بین سوزن و سطح، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اغلب دستگاه‌ها، از روش انحراف پرتو لیزر استفاده می‌نمایند. یک پرتو نور لیزر به پشت تیرک تابیده می‌شود و انعکاس آن در اثر انحراف، با استفاده از یک دیود نوری حساس به موقعیت^{۲۷}، آشکار می‌شود. نمایی از دستگاه در شکل (۶) نشان داده شده‌است. یک دیود نوری چهار قسمتی، نه تنها انحراف معمول، بلکه پیچش تیرک در اثر نیروهای جانبی اعمال شده روی سوزن را نیز اندازه‌گیری می‌نماید.



شکل ۶: نمایی از AFM و انحراف پرتو لیزر [۱۲]

در نوع دیگری از حسگر انحراف، از یک تیرک به‌عنوان آینه تداخل‌سنج^{۲۸} لیزر نوری، استفاده می‌شود و معمولاً این روش آشکارسازی در MRFM مورد استفاده قرار می‌گیرد. برتری مهم این روش، سادگی کالیبراسیون آن با طول موج نور و فضای کوچک آن در صورت محدود بودن فضا (در آزمایش‌های دمای پایین) است. حساسیت هر دو روش نوری، به نوبه حرارتی تیرک، محدود می‌شود. در روش دیگر، از یک الکتروود کمکی^{۲۹} در پشت تیرک، به صورت خازن استفاده می‌شود تا با انحراف تیرک و تغییر در ظرفیت خازنی بین تیرک و الکتروود کمکی، انحرافات تیرک آشکارسازی شود. سرعت اندازه‌گیری این روش بسیار زیاد است. حسگرهای نیرو را می‌توان با روش‌های ساخت میکرو تولید نمود. مشکل این حسگر، نیروی غیرقابل صرف‌نظر کردن بین تیرک و الکتروود کمکی است. تیرک‌های خود حسگر^{۳۰} نیز دسته جالبی از حسگرهای انحراف را تشکیل می‌دهند. اغلب آن‌ها با استفاده از یک لایه مقاومت پیزویی در پشت یک تیرک سیلیسیمی، تولید شده‌اند. اولین اندازه‌گیری با توان تفکیک اتمی، با تیرک‌های مقاومت پیزویی انجام شده‌است [۱۲].

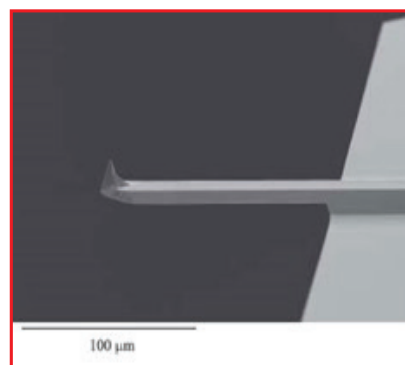


شکل ۴: نمایی از چگونگی روبش سطح نمونه به وسیله سوزن^{۲۵}

SPM [۱۲]

نمونه با استفاده از یک سوزن متصل به تیرک^{۲۶} (شکل ۵) روبش شده و با اندازه‌گیری و پردازش سیگنال به‌دست آمده از نقاط مختلف سطح روبش شده، تصویر آن سطح تهیه می‌شود. توان تفکیک و بزرگ‌نمایی SPM بهتر از میکروسکوپ‌های الکترونی متداول است و توانایی تهیه تصاویر سه‌بعدی از اتم‌ها را نیز فراهم می‌آورد.

به کمک این روش می‌توان تصاویری از خواص مغناطیسی، الکتریکی، مکانیکی و نوری سطح تهیه نمود. از مهمترین ویژگی‌های این روش میکروسکوپی، تهیه تصاویر سه‌بعدی (واقعی) از سطح نمونه با دقت آنگسترومی است. همچنین در این روش، نمونه علاوه بر خلاء، در هوا و زیر سطح مایعات می‌تواند مورد تصویربرداری قرار گیرد. مزایایی که دقیقاً نقاط ضعف روش‌های میکروسکوپ الکترونی است و در نتیجه احتمال آسیب‌رسانی به نمونه در اثر خلاء بسیار کمتر می‌شود.



شکل ۵: نمایی از تیرک به همراه سوزن [۱۲].

امروزه کاربرد این روش در کنار سایر دستگاه‌های پژوهشی، در علوم متفاوت از جمله فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی، مواد، پلیمر، داروسازی بسیار گسترش یافته است [۱۲].

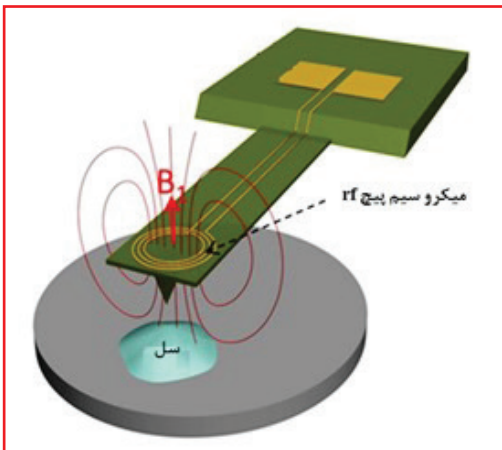
○ میکروسکوپ نیروی اتمی

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) یکی از انواع روش‌های میکروسکوپی پروبی روبشی است که سطح نمونه را با استفاده از یک سوزن تیز، به طول (۲) میکرون روبش می‌نماید. سوزن در انتهای آزاد یک تیرک به طول حدود (۱۰۰) تا (۴۵۰) میکرون قرار دارد. زمانی که سوزن به سطح نزدیک می‌شود، نیروهای

اسپین‌های هسته نمونه، و سوزن مغناطیسی استوار است. در واقع MRFM مشابه MFM است با این تفاوت اساسی که در میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی میدان بسامد رادیویی به کار گرفته می‌شود تا مغناطیس‌پذیری نمونه با استفاده از روش‌های تشدید مغناطیسی دستکاری شود. در این روش، تیرک به همراه سوزن میکرومغناطیسی به نزدیکی سطح نمونه آورده می‌شود. نیروی (F) (معادله ۳) از طرف ممان مغناطیسی نمونه به سوزن اعمال می‌شود.

$$F = -(m \cdot \nabla) B \quad (3)$$

در این معادله: (M) ممان مغناطیسی نمونه و (∇B) گرادیان میدان مغناطیسی سوزن میکرومغناطیس است. این نیرو موجب انحراف تیرک خواهد شد. روش‌های آشکارسازی خاص و حساس مانند روش‌های تداخل سنج نوری و مقاومت پیزویی^{۳۵}، این نیرو را که کوچکتر از 10^{-16} N است، اندازه‌گیری می‌نماید. شکل (۸) نمایی از تیرک و میدان بسامد رادیویی اطراف آن را نشان می‌دهد.

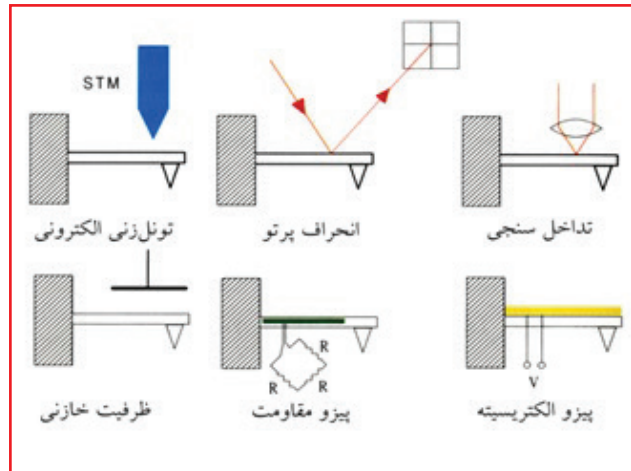


شکل ۸: نمایی از تیرک و میدان بسامد رادیویی

○ دستگاه میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی

■ تشدیدکننده میکرومکانیک

قلب میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی، حسگر نیرویی مرتعش‌کننده آن یا همان تیرک است. تیرک‌های مورد استفاده در MFRM دارای طولی معادل $500 - 300 \mu\text{m}$ ، عرض $20 \mu\text{m}$ و ضخامت $0.5 \mu\text{m}$ هستند و معمولاً از Si یا Si_3N_4 ساخته می‌شوند. یک میکرومغناطیس به‌عنوان سوزن به انتهای تیرک متصل می‌شود. مواد مغناطیسی مختلفی نظیر فلزات واسطه و Co ، Fe و Ni و یا آلیاژی از خاک‌های نادر مانند SmCo_5 یا $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ برای ساخت سوزن MRFM مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوزن‌های ساخته شده از خاک‌های نادر، طی دو مرحله تولید می‌شوند. ابتدا ذرات کوچکی از آلیاژ موردنظر در حضور میدان مغناطیسی به تیرک چسبانده می‌شود تا ممان مغناطیسی سوزن در جهت مناسب قرار گیرد، سپس سوزن با استفاده از روش آسیاب پرتو یونی متمرکز^{۳۶} شکل می‌گیرد. با این روش می‌توان سوزن‌هایی را با میدان گرادیانی بیش از 10^5Tm^{-1} ایجاد نمود (شکل ۹) [۹].



شکل ۷: حسگرهای انحراف برای میکروسکوپ نیروی اتمی [۱۲]

○ میکروسکوپ نیروی مغناطیسی

میکروسکوپ نیروی مغناطیسی^{۳۱} حالت ویژه‌ای از میکروسکوپ نیروی اتمی است که از آن برای مشاهده و اندازه‌گیری توزیع میدان مغناطیسی آشفته^{۳۲} روی سطح نمونه، استفاده می‌شود. میکروسکوپ نیروی مغناطیسی ابزار نیرومندی برای مشاهده و اندازه‌گیری نیروهای مغناطیسی کوچک بین سوزن و سطح، یا گرادیان نیروی مغناطیسی روی سطح نمونه است. این دستگاه امکان تصویربرداری از سطوح مغناطیسی با توان تفکیک بالا را بدون نیاز به آماده‌سازی نمونه و یا نیاز به شرایط محیطی خاص فراهم می‌نماید. در این روش، از یک سوزن مغناطیسی برای تصویربرداری استفاده می‌شود. سوزن فوق که با لایه‌ای نازک از مواد فرومغناطیسی پوشیده شده‌است، در نزدیکی سطح نمونه قرار می‌گیرد و با میدان‌های مغناطیسی آشفته اطراف سطح نمونه، برهم‌کنش می‌دهد و نیروهای مغناطیسی کوچک بین سوزن و سطح یا گرادیان نیروی مغناطیسی روی سطح نمونه را به تصویر می‌کشد. سوزن به یک تیرک کوچک متصل است. قدرت برهم‌کنش مغناطیسی موضعی، حرکت عمودی سوزن را در حین روبش سطح، تغییر می‌دهد و مقدار نیرو به انحراف قابل اندازه‌گیری، تبدیل می‌شود. برهم‌کنش‌های مغناطیسی سوزن - نمونه، به کمک آشکارساز ثبت شده و برای بازسازی ساختار مغناطیسی سطح نمونه و به دست آوردن تصویر نیرو به کار برده می‌شود. به کمک MFM تصاویر نیرو (در حالت پایا)^{۳۳} و گرادیان نیروی روی سطح به دست می‌آید. تصویر گرادیان نیروی روی سطح، بر اثر تغییر فرکانس رزونانس تیرک که به وسیله میدان‌های مغناطیسی اطراف سطح ایجاد می‌شود و به فاصله نمونه تا سوزن وابسته است، به دست می‌آید. به طور کلی، تصاویر MFM تغییرات سه‌بعدی نیروهای مغناطیسی روی سطح نمونه را نشان می‌دهند. داده‌های مغناطیسی را می‌توان با هر یک از حالت‌های تغییر در دامنه، فرکانس و یا فاز ارتعاش تیرک، ثبت نمود. بزرگی نیروی مغناطیسی ایجاد شده 10^{-12} N تا 10^{-9} است [۱۳].

■ میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی

روش میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی بر پایه اندازه‌گیری مکانیکی نیروهای مغناطیسی بسیار کوچک (آتونویوتن)^{۳۴} بین

نتیجه گیری

دستگاه MRI که در پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، قابلیت تصویربرداری از گروه‌های اسپینی پروتون‌ها را در صورتی که حداقل یک تریلیون اسپین پروتون حضور داشته باشد، دارد. در حالی که دستگاه MRFM سیگنال‌های بسیار ضعیف‌تر از اسپین تک الکترون را هم آشکار می‌کند. همچنین تحقیقات تصویربرداری یک‌بعدی با این دستگاه، با دقت ۲۵ nm میسر است که تقریباً ۴۰ برابر بیشتر از بهترین میکروسکوپ‌های متعارف MRI است. تحقیقات به‌منظور افزایش حساسیت، دقت، سرعت و همچنین قابلیت نشان دادن پروتون‌های منفرد و دیگر هسته‌ها نظیر کربن (۱۳) ادامه دارد تا بتوان از این روش برای تشخیص ساختمان‌های مولکولی استفاده نمود. یکی از کاربردهای MRFM تعیین ساختار، به‌صورت درجا برای پروتئین‌هایی است که شناسایی آن‌ها با استفاده از سایر روش‌ها مانند پراش پرتو ایکس و یا شبیه‌سازی رایانه‌ای، به‌دلیل شکل اتمی پیچ‌خورده پروتئین‌ها، بسیار محدود است. همچنین مدل‌های پیشرفته MRFM ممکن است در آینده برای نشان دادن اطلاعات کوانتومی در رایانه‌های کوانتومی آتی که مبتنی بر اسپین است، مورد استفاده قرار گیرد.

تشدید، نقش اساسی را ایفا می‌نماید، به طوری که هر چه این منطقه نازک‌تر باشد، تعداد اسپین‌های بیشتری در شرایط میدان یکنواخت قرار می‌گیرند و سیگنال آشکارسازی را بهبود می‌بخشند. میدان مغناطیسی با گرادیان قوی‌تر، باعث ایجاد منطقه برش^{۳۷} تشدید نازک‌تر می‌شود. ضخامت منطقه برش تشدید با معادله بلاش^{۳۸} توصیف می‌شود [۱۴ و ۱۵].

محدودیت‌های MRFM

مهمترین عامل محدودکننده توان تفکیک MRFM، نوفه حرارتی تیرک است که حساسیت را محدود می‌نماید و باعث ایجاد نوفه در نیرو نیز خواهد شد. برای کاهش نوفه حرارتی، می‌توان از تیرک‌های نرم با بسامد تشدید و عامل (Q) بالا استفاده نمود تا مقدار اتلاف سیگنال، کاهش یافته و میزان سیگنال به نوفه افزایش یابد.

خنک کردن دستگاه تا کمتر از ۱۰۰ mK حساسیت به نیرو را بهبود می‌دهد و همچنین باعث افزایش تعداد اسپین‌های پلاریزه مطابق معادله بولتزمن شده که موجب افزایش سیگنال خواهد شد. از دیگر عوامل محدودکننده توان تفکیک، سیستم آشکارسازی حرکت تیرک است. با بزرگ‌تر کردن سطح تیرک، میزان انعکاس نور به داخل فیبر نوری افزایش می‌یابد در نتیجه باید تیرکی با اندازه بهینه تهیه شود تا علاوه بر سطح، با ضریب انعکاس بالا به‌منظور آشکارسازی بهتر، نازک و نرم نیز باشد تا حساسیت بیشتری نسبت به نیرو داشته باشد. در نتیجه به‌وسیله MRFM می‌توان تصویر و ساختار شیمیایی نمونه‌های بیولوژیکی چون ذرات ویروس، پروتئین‌ها و سایر کمپلکس‌های مولکولی را تعیین نمود [۱۵].

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد شیمی تجزیه - پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، آزمایشگاه نانوتکنولوژی
۲. کارشناس ارشد شیمی تجزیه - پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات نانوفناوری
۳. کارشناس ارشد فیزیک - دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم گروه فیزیک، آزمایشگاه مغناطیس و ابررسانایی
۴. عضو کارگروه تخصصی SPM شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

5. Magnetic Resonance
6. Nuclear Magnetic Resonance(NMR)
7. Magnetic Resonance Imaging(MRI)
8. John Sidles
9. Magnetic Resonance Force Microscopy(MRFM)
10. Atomic Force Microscopy(AFM)
11. Ivan
12. Brownian motion
13. Superconducting quantum interference device (SQUID)
14. In situ
15. Gyromagnetic
16. Larmor

17. Zeeman
18. Boltzman
19. Radio Frequency
20. Flip angle(FA)
21. X-ray
22. Bening
23. Rohrer
24. International Business Machines Corporation (IBM)
25. Tip
26. Cantilever
27. Position sensitive photodiode(PSD)
28. Interferometer
29. Counter electrode
30. Self sensing
31. Piezoresistive
32. magnetic force microscope (MFM)
33. Stray
34. Static
35. Attonewton
36. Focused Ion Beam(FIB)
37. Resonant slice
38. Bloch

مراجع

- [1] Sidles, J.A. (1991) Applied Physics Letters, Noninductive detection of single-proton magnetic resonance, 58, 2854-6.
- [2] D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mamin & B. W. Chui, Single spin detection by magnetic resonance force microscopy, NATURE (2004), VOL 430.
- [3] S. Codd, J.D. Seymour –Book of Magnetic Resonance Microscopy, 2008, page 62.
- [4] http://www.e-radiography.net/mrict/Basic_MR.pdf.
- [5] A. Vinante, G. Wijts, O. Usenko, L. Schinkelshoek, (2011) naturecommunications, 1581, 2011.
- [6] C. L. Degen, M. Poggio, H. J. Mamin, C. T. Rettner, and D. Rugar, Nanoscale magnetic resonance imaging, PNAS (2009), Vol 106, no 5, 1313-17.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_resonance_force_microscopy.
- [۸] کتاب MRI از تصویر تا پروتون ترجمه شده توسط ح. غیاسی.
- [9] P. Chris Hammel and Denis V. Pelekhov, Handbook of The Magnetic Resonance Force Microscope, Ohio State University, Columbus, OH, USA.
- [10] <http://danestanihayephysics.blogfa.com/post/17>.
- [11] <http://www.centralclubs.com/mri-t14903.html>.
- [۱۲] کتاب میکروسکوپ پروبی روبشی آزمایشگاهی روی نوک سوزن، ع. ذوالفقاری، م. الماسی، پ. مرعشی، م. نجبا، ا. سیفی، تهران انتشارات پیک نور، ۱۳۸۵.
- [۱۳] میکروسکوپ نیروی مغناطیسی (MFM)، ص. صادق حسنی، ج. افضلی، م. محسن‌نیا، ماهنامه فناوری‌نانو، شماره ۱۷۳، اسفند ۱۳۹۰، صفحات ۲۴ تا ۲۸.
- [14] A. Suter, Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy 45 (2004) 239–274.
- [15] http://courses.washington.edu/goodall/MRFM/qse_faq.html.