

نویسندگان

زهرا ثبات^{۱*}، مریم دارایی^۲
صدیقه صادق حسنی^۳
و ندا رحمانی^۴

* zsobat@gmail.com

میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده

چکیده

میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی^۶ به‌عنوان اولین عضو از خانواده میکروسکوپی پروبی روبشی، به دلیل ابعاد بسیار کوچک سوزن، می‌تواند کوچکترین پستی و بلندی موجود در سطح را (در حد نانومتر) حس کند. با توسعه روش‌های شناسایی نانوساختارها، همواره یکی از اهداف اصلی افزایش توان تفکیک این میکروسکوپ برای بررسی ساختارهای کوچک‌تر و همچنین شناسایی نانوساختارهای مغناطیسی بوده است. به این منظور، در سال‌های اخیر میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده^۷ به ابزاری قدرتمند برای بررسی ساختارهای مغناطیسی در مقیاس نانومتر تبدیل شده است. میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده به تکمیل مطالعات مغناطیسی در مقیاس نانومتر کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی

نانو ساختارهای مغناطیسی، میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده، چگالی الکترون، میکروسکوپ پروبی روبشی.

در ابزارهای مدرن، نانو ساختارهای مغناطیسی دارای اهمیت فراوانی هستند. هم‌زمان با تمایل به کوچک‌سازی ابزارهای مغناطیسی، پرسش‌های جدید در مورد رفتار مغناطیسی ساختارهای کوچک شده در مقیاس نانو نیز افزایش یافته است. از طرفی، علاقه به تهیه تصویر از آرایه‌های مغناطیسی و دستیابی به ساختارهای آن در مقیاس نانو یا حتی اتمی از دیرباز مورد توجه دانشمندان بوده و انتظار می‌رود چشم‌اندازی بر رفتارهای جدید پدیده‌های مغناطیسی فراهم آورد. در میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی به‌عنوان اولین عضو خانواده میکروسکوپی پروبی روبشی، یک سطح رسانا با سوزنی که در موقعیت و وضعیت مناسبی نسبت به سطح قرار گرفته، روبش می‌شود. این میکروسکوپ به دلیل ابعاد بسیار کوچک سوزن، می‌تواند کوچکترین پستی و بلندی موجود در سطح را (در حد نانومتر) حس کند. برای این منظور، سوزن به‌وسیله یک سیستم کنترل‌کننده آنقدر به سطح نزدیک می‌شود تا برهم‌کنش‌های دلخواه بین سوزن و سطح نمونه پدید آید. در این فاصله بین سوزن و سطح نمونه که ممکن است در حد چند آنگستروم باشد، با اعمال ولتاژ مناسب (به بزرگی چند ده میلی‌ولت) بین سوزن و سطح، براساس پدیده تونل‌زنی مکانیک کوانتوم، جریان الکتریکی برحسب نانآمپر برقرار می‌شود. در میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی مقدار جریان تونلی، تابع فاصله سوزن از سطح، شکل و جنس سوزن، هندسه و جنس سطح و اختلاف ولتاژ بین سوزن و سطح است. در این روش، سوزن به بازوهای پیزوالکتریکی متصل بوده که به‌وسیله آنها سوزن با فاصله دلخواه، به نقطه موردنظر روی سطح نمونه منتقل شده و بدین ترتیب، امکان بررسی خواص آن نقطه از سطح نمونه فراهم می‌شود.

با توسعه روش‌های اولیه، یکی از تلاش‌های اصلی همواره ارتقاء توان تفکیک این روش میکروسکوپی برای بررسی ساختارهای کوچک‌تر بوده است. به این منظور، در سال‌های اخیر میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده و طیف‌سنجی تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده^۸ به دو ابزار قدرتمند برای بررسی ساختارهای مغناطیسی در مقیاس نانومتر تبدیل شده‌اند به‌گونه‌ای که حتی می‌توان تصویر سطوح آنتی‌فررومغناطیس را با این روش‌ها تهیه کرد. این روش‌ها همچنین می‌توانند برای مطالعه چگونگی خنثی‌سازی مغناطیسی در سطح لایه‌های نازک آنتی‌فررومغناطیس‌ها که در تماس مستقیم با پایه‌های مغناطیسی هستند و همچنین بررسی ویژگی‌های مرتبط با برهم‌کنش بین آنتی‌فررومغناطیس‌ها با فررومغناطیس‌ها، نیز به‌کار گرفته شوند [۱].

میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده (Sp-STM)

میکروسکوپ تونل‌زنی اسپین قطبیده، به‌عنوان یک روش تهیه تصویر مغناطیسی، با توان تفکیکی در مقیاس نانومتر است. این میکروسکوپ امکان ثبت تصاویر را در دو حالت جریان ثابت و ارتفاع ثابت، فراهم می‌کند. همچنین این توانایی را دارد که به‌طور هم‌زمان چگالی الکترون اسپین قطبیده را که مربوط به گشتاور مغناطیسی است، بررسی کند [۲].

در سال ۱۹۱۹ بارخوسن^۹ نخستین بار این ایده را مطرح کرد که یک ساختار مغناطیسی ممکن است شامل نواحی باشد که در آن نقاط مغناطیسی در جهت‌های مختلف قرار گرفته باشند [۳]. با طرح این ایده، روش‌هایی که امکان تهیه تصویر مستقیم الگوهای مغناطیسی را در فضای واقعی فراهم می‌نمودند، ابداع شد. در مطالعات بنیادی مغناطیسی، یکی از نیازهای اساسی تهیه تصویر مغناطیسی با توان تفکیک بالا است. Sp-STM در راستای مطالعات مغناطیسی در مقیاس نانومتر به‌کار می‌رود.

■ اثر مقاومت مغناطیسی تونل‌زنی

شکاف چگالی حالت‌های انرژی روی جریان تونل‌زنی اثر

دارد. آزمایش‌های نشر میدان با سوزن‌های فررومغناطیس نشان داده‌اند [۴ و ۵] که در طول فرآیند تونل‌زنی از سوزن به‌خلاء، پلاریزاسیون اسپین چگالی حالت‌های سوزن، به‌صورت جزئی به الکترون‌های منتشر شده، منتقل و یک جریان اسپینی پلاریزه را به‌وجود می‌آورند. این امر با توجه به قانون فرمی قابل درک است. پلاریزاسیون نهایی بدلیل تفاوت تعداد الکترون‌ها در حالت‌های پیشینه و کمینه به‌وجود می‌آید. الکترون‌هایی که در حالت پیشینه قرار می‌گیرند، می‌توانند در فرآیند تونل‌زنی شرکت کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهند، هنگامی که الکترون‌ها بین دو ماده فررومغناطیس تونل می‌زنند، نه تنها جریان اسپین - پلاریزه می‌شود بلکه اندازه جریان هم تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۶]. در این مطالعات، دو لایه نازک مغناطیس به‌وسیله یک لایه نازک عایق از هم جدا می‌شوند تا یک اتصال تونلی مسطح را به‌وجود آورند. این وضعیت اجازه می‌دهد که جهت‌گیری مغناطیسی در دو لایه نازک مغناطیسی، به‌صورت موازی یا ضد موازی به‌عنوان تابعی از میدان مغناطیسی اعمال شده جهت‌گیری کند. بر این اساس، هدایت تونل‌زنی^{۱۰} G (و بدین ترتیب مقاومت) به جهت‌گیری نسبی مغناطیس دو لایه بستگی دارد. این اثر، اثر مقاومت مغناطیسی تونل‌زنی^{۱۱} نامیده می‌شود. هدایت (G)، کمیتی است که به توصیف خواص الکتریکی مواد می‌پردازد که براساس آن مواد به ترکیبات هادی، نیمه هادی و عایق تقسیم می‌شوند. برای یک مولکول کوچک، هدایت، تابعی از شدت جریان و اختلاف پتانسیل است. در الکترونیک مولکولی

سوزن سطح نمونه را روبش می‌کند، نوک سوزن روی خطوط جریان ثابت حرکت می‌کند و توپوگرافی نمونه را منعکس می‌سازد. پیش از این، در سال ۱۹۸۸، پیرس^{۱۳} پیشنهاد کرد که یک دستگاه STM راه‌اندازی شود که در آن از مفهوم TMR برای تهیه تصویر هم‌زمان اثر مقاومت مغناطیسی و جریان تونل‌زنی نمونه استفاده شود [۹]. در این طرح تنها به یک جریان تونل‌زنی اسپین - قطبیده همراه با یک STM مورد نیاز است. او دو دیدگاه متفاوت را برای Sp-STM مطرح نمود. علاوه بر استفاده از فرومغناطیس، به‌عنوان مثال، سوزن‌های اسپین پلاریزه، او امکان استفاده از حامل‌های اسپین - پلاریزه‌ای که با نور برانگیخته می‌شوند را در سوزن‌های GeAs مورد بحث قرار داد. این سوزن‌ها توسط سوزوکی^{۱۴} و همکارانش ابداع شده بودند [۱۰]. در رویکرد آنها، نوری که به‌صورت دایره‌ای پلاریزه شده‌است برای برانگیخته نمودن حامل‌های اسپین - پلاریزه در باند هدایت سوزن که بعداً به نمونه تونل می‌زند، استفاده می‌شود. به‌دلیل وابستگی اسپین به جریان تونلی، با مدوله کردن نور، مدولاسیون جریان نیز اجرا می‌شود. برای جدا کردن اطلاعات اسپین از اطلاعات توپوگرافی، مدولاسیون‌ها با یک تقویت‌کننده قفل‌شونده تشخیص داده می‌شود. به هر حال، به علت کنتراست نسبتاً پایین و کنتراست مغناطیسی - نوری اضافی ناخواسته در توان تفکیک جانبی، موفقیت این رویکرد محدود بود. از طرفی رویکرد مبتنی بر آزمایش‌های Sp-STM با سوزن‌های فرومغناطیس بسیار موفق‌تر بود. در گزارش منتشر شده از سوی پیرس، سه حالت تهیه تصویر کاربردی متفاوت برای Sp-STM پیشنهاد شده‌است. همه این روش‌ها به‌صورت تجربی اجرا شده و به‌طور خلاصه در ذیل این بخش شرح داده شده‌است [۲].

حالت جریان ثابت: در حالت جریان ثابت، تصاویر STM با سوزن‌های غیرمغناطیسی و غیرفرومغناطیسی گرفته و نتایج به‌دقت مقایسه می‌شوند. ویسندانجر^{۱۵} و همکارانش نخستین افرادی بودند که نتایج بدست آمده با این حالت [۱۱] را روی سطح لایه‌ای غنی از ماده آنتی‌فرومغناطیس Cr(001) گزارش کردند [۱۱]. آنها در این حالت با استفاده از سوزن‌های تنگستنی و به کمک پله اتمی ایجاد شده در اثر تغییر جریان، توانستند پله‌های اتمی را روی Cr(001) آشکار کنند که ارتفاع آن در حد انتظار ۰/۱۴ nm بود. در حالی که استفاده از سوزن فرومغناطیس CrO₂ ارتفاع پله را به مقادیر ۰/۱۶ nm و ۰/۱۲ nm تغییر می‌دهد. این امر به اثر TMR بین سوزن فرومغناطیس و اتم‌های Cr که به‌صورت فرومغناطیسی روی تراس‌ها جهت‌گیری کرده‌اند، نسبت داده می‌شود. هنگامی که پلاریزاسیون اسپین سوزن و اتم‌های Cr واقع در تراس موازی باشند، جریان تونل‌زنی به‌دلیل اثر TMR ارتقاء می‌یابد و در حالت جریان ثابت STM، سوزن به‌مقدار اندکی (۰/۰۲ nm) عقب رانده می‌شود [۱۲]. بنابراین، روی این تراس اثر TMR باعث کاهش جریان می‌شود و سوزن STM تقریباً نزدیک سطح می‌شود. این سازوکار سبب تغییر در ارتفاع پله می‌شود که با سوزن اسپین - پلاریزه مشاهده شد. به هر حال، در این حالت تهیه تصویر، هیچ تفکیکی در اطلاعات توپوگرافی و اسپین نمی‌تواند به‌دست آید و اندازه‌گیری‌های مرجع باید با سوزن‌های غیرمغناطیسی به‌دست آیند [۲].

برای تعیین هدایت یک مولکول، باید مولکول حداقل در تماس با دو الکتروود خارجی قرار گیرد و این اتصال باید قوی و تکرارپذیر باشد که بتواند یک تماس الکترونی مناسب بین مولکول و الکتروودها ایجاد کند. G در حالت جهت‌گیری موازی (منظور از جهت‌گیری موازی، حالت مغناطیسی در مولکول و الکتروود است) بزرگتر از حالت جهت‌گیری ضد موازی است. این یافته را می‌توان براساس یک مدل ساده شرح داد. در این مدل تنها روی چگالی حالت‌های دو الکتروود تمرکز می‌نماییم. با فرض اعمال یک ولتاژ بایاس کوچک در سراسر اتصال و در غیاب پراکندگی اسپین، الکترون‌های فرومغناطیس در نزدیکی انرژی فرمی، هدایت تونل‌زنی را تعیین می‌کنند. برای جهت‌گیری موازی، چنانچه یک ولتاژ بایاس محدود برقرار شود، همه حالت‌های بین سطوح فرمی در تونل‌زنی درگیر می‌شوند که هر یک مطابق با احتمال تونل‌زنی خود که وابسته به انرژی است، وزن می‌گیرند. در این حالت، الکترون‌های بیشینه/کمینه نخستین الکتروود، به‌ترتیب به‌سوی حالت‌های بیشینه/کمینه در الکتروود دوم تونل می‌زنند. با استفاده از قانون فرمی، هدایت G با چگالی N حالت اولیه i (قبل از انجام هدایت) و حالت نهایی f (بعد از انجام هدایت) در لبه فرمی متناسب است. بنابراین، هدایت برای مغناطیس با جهت‌گیری موازی با استفاده از رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$G_{\uparrow\uparrow} \propto N_{\uparrow}^i N_{\uparrow}^f + N_{\downarrow}^i N_{\downarrow}^f \quad (1)$$

برای جهت‌گیری ضد موازی الکترون‌های بیشینه در یک تونل‌زنی از الکتروود به سوی حالت کمینه با استفاده از رابطه (۲) هدایت داده می‌شود:

$$G_{\uparrow\downarrow} \propto N_{\uparrow}^i N_{\downarrow}^f + N_{\downarrow}^i N_{\uparrow}^f \quad (2)$$

به‌طور کلی، این دو هدایت متفاوت هستند که به تغییر جریان تونلی با جهت‌گیری نسبی مغناطیس الکتروودها منجر می‌شود. در حقیقت هدایت با ترکیب حالت‌های مختلفی از اسپین‌های موازی و ضد موازی انجام می‌شود که رابطه (۱) هدایت ناشی از ترکیب حالت‌های موازی و رابطه (۲) هدایت ناشی از ترکیب اسپین‌های ضد موازی را نشان می‌دهد.

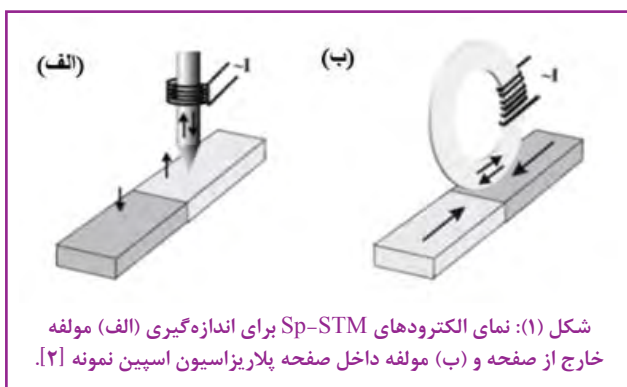
اصول میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی اسپین - پلاریزه

با اختراع STM، بینینگ^{۱۲} و همکارانش تهیه تصویر با توان تفکیک مطلوب که قادر به تشخیص یک اتم منفرد بود را تحقق بخشیدند [۷] و [۸]. در روش STM، نوک سوزن رسانا در نزدیکی سطح رسانای نمونه قرار داده می‌شود. بین نمونه و سوزن یک ولتاژ بایاس برقرار شده و یک جریان تونل‌زنی کوچک به‌وجود می‌آید که با فاصله بین سوزن و نمونه به‌صورت توانی یا نمایی کاهش می‌یابد. در حالت جریان ثابت STM، فاصله سوزن و نمونه به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که یک جریان تونل‌زنی ثابت به‌دست آید. هنگامی که

توسط جانسون^{۱۸} و همکارانش انجام شد، با الاستیسیته مغناطیسی بزرگ سوزن Ni مواجه بود، به طوری که تهیه تصویر توپوگرافی یا مغناطیسی پایدار امکان پذیر نبود [۱۴].

دستگاهوری

مغناطیسی کردن الکتروود فرومغناطیس با برقراری یک جریان متناوب کوچک در سیم پیچی که دور الکتروود پیچیده است، انجام می شود. جهت مغناطیس الکتروود STM بیشتر با استفاده از شکل الکتروود تعیین می شود. برای تهیه تصویر مؤلفه خارج از سطح پلاریزاسیون اسپین، یک سوزن نوک تیز استفاده می شود. نمای این حالت در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. میدان مغناطیسی تناوبی که با سیم پیچ القاء می شود، برای معکوس کردن کامل مغناطیس سوزن به اندازه کافی بزرگ است. در سوزن، جهت مغناطیس به علت ناهمسانگردی^{۱۹} بزرگ همواره در طول محور سوزن قرار دارد. بنابراین، در نوک سوزن جایی که تونل زنی روی می دهد، مغناطیس عمود بر سطح نمونه است. برای تهیه تصویر از مؤلفه درون سطح پلاریزاسیون اسپین نمونه، از یک حلقه که نمای آن در شکل (۱-ب) نشان داده شده است، به عنوان الکتروود STM استفاده می شود. میدان مغناطیسی سیم پیچ جریان را در حلقه ای که بین دو ساختار مغناطیسی دایره ای قرار دارد، عوض می کند. در پایین حلقه، مغناطیس مماس بر حلقه یعنی در سطح صفحه قرار دارد. با انتخاب صفحه ای که حلقه در آن جهت گیری می کند، جهت مغناطیس حلقه تعیین می شود؛ بنابراین، جهت حساسیت در سطح صفحه برای سیگنال اسپین اندازه گیری شده، معلوم می شود [۲].



شکل (۱): نمای الکتروودهای Sp-STM برای اندازه گیری (الف) مؤلفه خارج از صفحه و (ب) مؤلفه داخل صفحه پلاریزاسیون اسپین نمونه [۲].

شکل (۲) چگونگی ساخت آزمایشگاهی الکتروودهای STM را نشان می دهد. سوزن های STM برای ثبت مؤلفه خارج از سطح پلاریزاسیون اسپین (شکل (۲-الف)) با اسیدشویی الکتروشیمیایی سیم های CoFeSiB نازک با قطر $130 \mu\text{m}$ ، تهیه می شوند. مخلوط رقیقی از HCl و HF به عنوان معرف اسیدشویی استفاده می شود که در طول فرآیند اسیدشویی با استفاده از کشش سطحی به صورت یک غشاء نازک در حلقه Pt پخش می شود. مقدار pH به گونه ای تنظیم

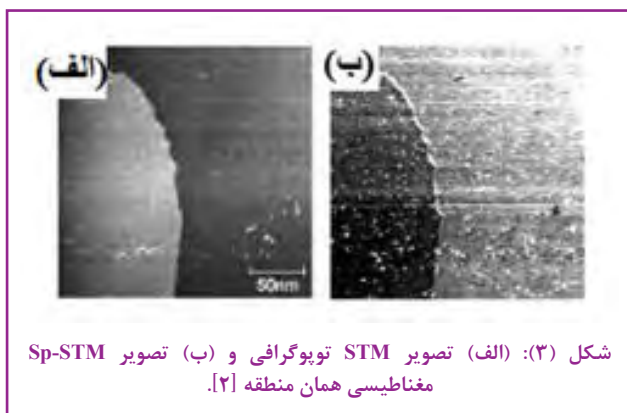
حالت طیفسنجی: حالت میکروسکوپی Sp-STM در شرایط خاصی، تفکیک اطلاعات توپوگرافی را از اطلاعات اسپینی امکان پذیر می سازد. این حالت طیفسنجی تونل زنی روبشی اسپین - قطبیده نامیده می شود. در این حالت از این واقعیت استفاده می شود که پلاریزاسیون اسپین جریان تونل زنی تابعی از انرژی است و پلاریزاسیون اسپین حالت های سوزن و نمونه هر دو در تونل زنی شرکت می کنند. بنابراین، به طور کلی پلاریزاسیون اسپین جریان تونل زنی با بایاس نمونه تغییر می کند. در حالت طیفسنجی، ولتاژ بین سوزن و نمونه تغییر می کند تا اطلاعاتی از ساختار الکترونی سطح به دست آید. در این حالت هدایت تونلی دیفرانسیلی (dI/dU) به عنوان تابعی از ولتاژ بایاس و مختصات فیزیکی نوک سوزن اندازه گرفته می شود. این حالت می تواند در شرایط حالت جریان ثابت نیز استفاده شود به گونه ای که در آن جداسازی نمونه و سوزن منجر به تغییر نتایج در اطلاعات توپوگرافی و الکترونی خواهد شد.

حالت تهیه تصویر مغناطیسی دیفرانسیلی: SP-STM می تواند در حالت مغناطیسی مدولاسیون استفاده شود که در آن سوزن مغناطیسی به صورت دوره ای تغییر می کند و موجب جریان تونلی می شود که متناسب با مغناطس^{۱۶} (چگالی گشتاورهای مغناطیسی دائم یا القایی در یک ماده مغناطیسی) موضعی نمونه است. این حالت قادر است که ویژگی های مغناطیسی را از ویژگی های توپوگرافی و الکترونی جدا کند. در حالت تهیه تصویر مغناطیسی دیفرانسیلی، یک سوزن با بدنه فرومغناطیسی که مغناطیس آن تنظیم شده است، مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل اثر TMR، این تنظیم منجر به مدولاسیون جریان تونل زنی می شود که با پلاریزاسیون اسپین نمونه مرتبط است. در آزمایش، یک سوزن قابل تنظیم مغناطیسی، استفاده می شود. مغناطیس سوزن به صورت متناوب بین دو وضعیت پایدار مغناطیس متضاد تغییر می کند. این وضعیت معادل تغییر علامت پلاریزاسیون اسپین نوک سوزن است. در یک دستگاه آزمایشگاهی، مغناطیس سوزن با تغییر جریان در یک سیم پیچ کوچک که روی سوزن نصب شده است، معکوس می شود. تناوب تغییر جریان باعث تناوب در قطع حلقه بازخورد STM می شود [۱۳]. بنابراین، حلقه بازخورد تنها می تواند متوسط جریان تونل زنی را برای دو پلاریزاسیون (مثبت و منفی) اسپین در نوک سوزن نمایان کند به طوری که تصویر جریان ثابت شامل هیچ اطلاعات مغناطیسی نمی شود. با یک تقویت کننده قفل شونده حساس به فاز، تغییر بخشی از جریان تونل زنی ΔI تشخیص داده می شود. این بخش شامل همه اطلاعات مربوط به اسپین است. با این روش، اطلاعات توپوگرافی و اسپین قویاً از هم جدا شده و تصویر مؤلفه اسپین در طول محور مغناطیس سوزن به صورت هم زمان با توپوگرافی ثبت می شود [۱۳]. تغییر میدان مغناطیسی که در داخل سیم پیچ القا می شود برای معکوس کردن کامل مغناطیس سوزن به اندازه کافی بزرگ است. ولی به هر حال، تغییر میدان جریان های القایی را نیز در حلقه تونل زنی ایجاد می کند. بدین دلیل، تنها ترکیبات مغناطیسی نرم می توانند به عنوان سوزن استفاده شوند. علاوه بر این، باید از الاستیسیته مغناطیسی^{۱۷} سوزن نیز در طول فرآیند معکوس سازی جلوگیری شود. آزمایش های اولیه ای که

کاربردهای میکروسکوپ الکترونی روبشی اسپین پلاریزه

یکی از کاربردهای میکروسکوپ SP-STM بررسی سطوح ترکیبات آنتی فرومغناطیس است. در این جا بیشتر، ویژگی‌های توپوگرافی آنتی فرومغناطیس‌ها مورد توجه است. ترکیب در یک ماده آنتی فرومغناطیس به صورت لایه‌ای است. Cr(001) نمونه‌ای از یک ماده آنتی فرومغناطیس لایه است که روی Fe(001) به عنوان پایه رشد یافته و هر دو پلاریزاسیون اسپین در صفحه را نشان می‌دهند.

Cr(001) یک آنتی فرومغناطیس است. Cr می‌تواند به طور پراکنده روی Fe(001) رشد کند و یک پلاریزاسیون اسپین در صفحه همراستا با پایه زیرین را به وجود آورد [۱۵]. در این مطالعه از الکترودهای حلقه‌ای که در راستای محور رشد جهت‌گیری کرده‌اند برای تهیه تصویر سطح آنتی فرومغناطیس استفاده شده‌است. شکل (۳-الف) توپوگرافی لایه نازک Cr را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، تصویر Sp-STM که به صورت هم‌زمان ثبت شده‌است نظم آنتی فرومغناطیسی ترانس‌ها را نشان می‌دهد (شکل (۳-ب)) [۲].

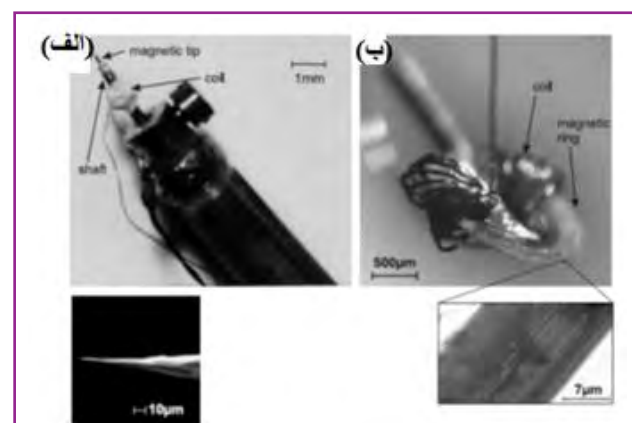


شکل (۳): (الف) تصویر STM توپوگرافی و (ب) تصویر Sp-STM مغناطیسی همان منطقه [۲].

یکی از کاربردهای میکروسکوپ تونل زنی روبشی اسپین پلاریزه، بررسی نانوساختارهای مغناطیسی است. در بخش زیر نانوساختارهای Fe و Co روی Cu(111) شرح داده شده‌است. در این مطالعه لایه‌ای با ارتفاع دو اتم $2 \times \text{Co(BLH)}$ Fe، جزیره‌هایی که از Co تشکیل شده و جزیره‌هایی از کروم که دارای اثراتی از Fe است (Fe/Co) و روی Cu(111) نشانده شده‌است، مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۴-الف) نمای فرآیند آماده‌سازی نمونه را نشان می‌دهد. این فرآیند (۳) نوع جزیره BLH را ایجاد می‌کند که نمای آن در شکل (۴-ب) نشان داده شده‌است: همان‌طور که در شکل (۴-ج) نشان داده شده‌است، ابتدا رسوب‌دهی یک لایه تکی Co در دمای اتاق باعث به وجود آمدن جزیره‌های Co می‌شود. سپس این جزیره‌های Co با ارتفاع 4 \AA به کمک تصویر STM در حالت جریان ثابت، مشخص می‌شوند.

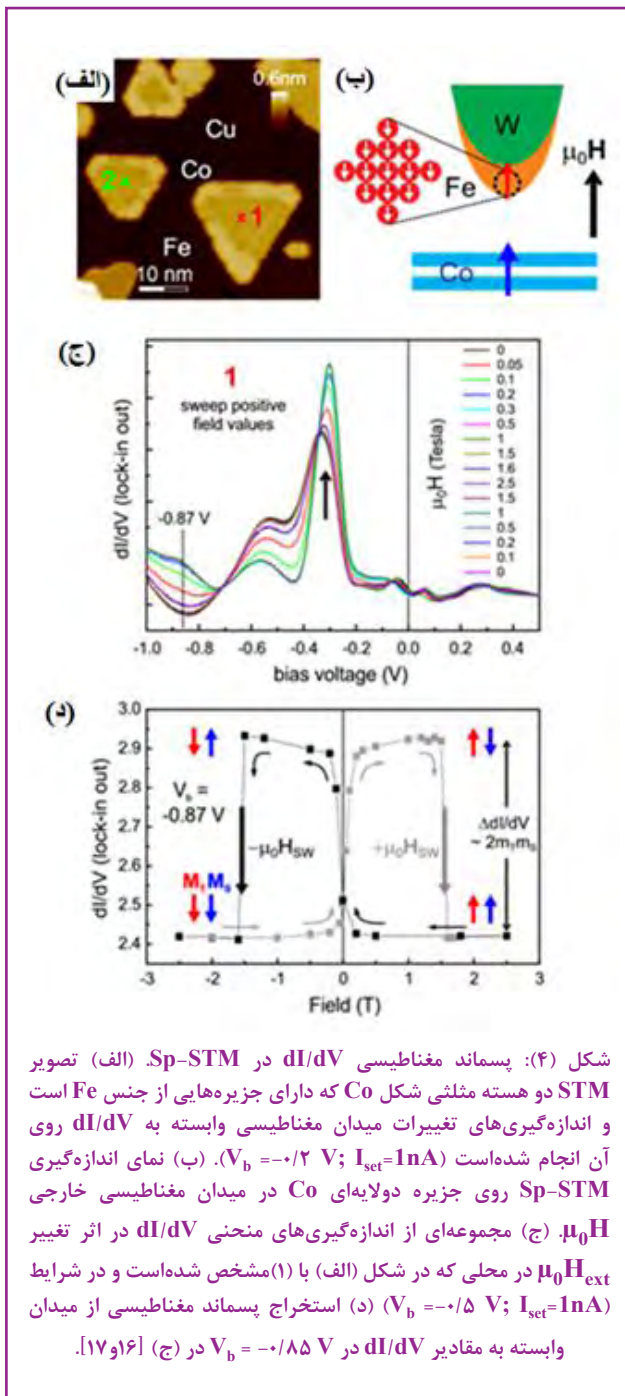
می‌شود که از تشکیل سیلیکا از Si موجود در سیم آمورف جلوگیری شود. استفاده از جریان‌های ضعیف اسیدشویی در حد $250 \mu\text{A}$ ، باعث به وجود آمدن سوزن‌های نوک‌تیزی با زاویه مخروطی بین 8° تا 15° می‌شود (پایین، شکل (۲-الف)). به دلیل ناهمسانگردی بزرگ، مغناطیس سوزن در راستای محور سوزن است. سوزن‌های مغناطیسی در یک محور غیرمغناطیسی که دور آن یک سیم پیچ پیچیده شده، نصب می‌شود. در طول عوض شدن جریان در سوزن، الاستیسیته مغناطیسی ایجاد شده در دیواره‌های محدوده، به اندازه کافی کوچک است و این اطمینان را حاصل می‌کند که تقریباً تمام ارتعاشات مکانیکی متوقف شده‌اند. با شبیه‌سازی میکرومغناطیسی دقیق فرآیند عوض شدن جریان سوزن، الاستیسیته مغناطیسی مورد انتظار کمتر از $14-10 \text{ m}$ برآورد می‌شود، بدین معنی که این مقدار به آزمایش ارتباط نمی‌یابد.

برای تهیه تصویر از یک مؤلفه درون سطح پلاریزاسیون اسپین، الکترودهای حلقه‌ای شکل STM از جنس CoFeSiB استفاده می‌شود. شکل (۲-ب) تصویر حلقه‌ای با قطر خارجی در حدود 2 mm و ضخامت $25 \mu\text{m}$ را نشان می‌دهد. حلقه‌ها از ورق نازک CoFeSiB به صورت الکتروشیمیایی اسیدشویی شدند. سیم پیچی پیچیده شده دور حلقه در شکل (۲-ب) قابل مشاهده است. با انتخاب جهت حلقه، جهت حساسیت در سطح صفحه تعیین می‌شود. محیط بیرونی حلقه‌ها جلا داده می‌شوند تا حتی زبری که با اسیدشویی ایجاد شده‌است نیز برطرف شود. بعد از جلا دادن، محیط بیرونی نرم و دارای حداقل ترانس‌های بر جای مانده از جلادهی است (پایین، شکل (۲-ب)). با وجودی که الکترودهای حلقه‌ای استفاده شده در STM تیز نیستند ولی توان تفکیک جانبی زیر 1 nm به دست می‌آید. به احتمال زیاد نانوسوزن‌هایی در نوک آن وجود دارد که چنین توان تفکیک جانبی بالایی را به وجود آورده است. برای به دست آوردن کنتراست اسپین، لازم است الکترودهای STM به صورت هم‌زمان به وسیله اسپری کردن Ar تمیز شوند. این کنتراست می‌تواند با روکش کردن الکترودهای CoFeSiB با چندین لایه از Fe افزایش یابد [۲].



شکل (۴): الکترودهای Sp-STM برای اندازه‌گیری (الف) مولفه خارج از صفحه و (ب) مولفه داخل صفحه پلاریزاسیون اسپین نمونه. تصاویر بزرگنمایی شده میکروسکوپی الکترونی روبشی را به ترتیب برای انتهای تیز حلقه و کف حلقه نشان می‌دهند [۲].

این نکته دلالت می‌کند که مؤلفه خارج از سطح مغناطیس سوزن با میدان خارجی تغییر می‌کند [۱۶].



این جزیره‌ها دارای ابعاد جانبی ۵ تا ۳۰ نانومتر هستند. رسوب‌گذاری پی‌درپی نخستین تک‌لایه‌های Co (۰/۲۴ ML) و سپس Fe (۰/۲۸ ML) در دمای اتاق، دو نوع جزیره را به وجود می‌آورد که در شکل (۴-د) نشان داده شده است:

• جزیره خالص BLH Fe

• جزیره BLH Fe/Co که در آن Co حفره را تشکیل داده و Fe پیرامون Co را احاطه کرده است. در این بررسی $Sp-STM$ و نیز STS برای هر سه نوع جزیره و روی جزیره‌های تکی اجرا شد [۳۲].

شکل (۴-الف) به بررسی نانوجزیره‌های Co روی $Cu(111)$ به روش میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده پرداخته است. مطابق این شکل، تصویر STM جزیره‌های BLH از جنس Fe/Co روی $Cu(111)$ مشاهده می‌شوند. بخش هسته جزیره‌ها که از جنس کبالت است، به وسیله خطوط نقطه‌چین محصور شده و با شماره‌های (۱) و (۲) مشخص شده است. بخش‌هایی که با خطوط متقاطع مشخص شده‌اند، نواحی را که در آنها اندازه‌گیری dI/dV انجام شده است را مشخص می‌کند. بررسی‌های $Sp-STM$ با استفاده از سوزن‌هایی از جنس تنگستن و با روکش آهن که در میدان مغناطیسی خارجی $\mu_0 H$ تهیه شده، انجام می‌شود. نمای مراحل آماده‌سازی این سوزن‌ها در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. دمای مناسب برای تهیه سوزن‌ها ۱۰ K است.

شکل (۴-الف) طیف STS به دست آمده در مرکز هسته Co در ناحیه (۱) را نشان می‌دهد. محدوده این اندازه‌گیری در شکل (۴-ب) و با رنگ قرمز مشخص شده است. این طیف با تغییر $\mu_0 H$ در راستای سطح نرمال به دست می‌آید. طیف STS در همه میدان‌ها حالت تیز $3d_{z^2}$ را نشان می‌دهد که به حالت الکترونی Co در محدوده $V_b = -0.8$ V مربوط می‌شود که با پیکان تیره عمودی نشان داده شده است. شکل و بزرگی طیف با تغییر میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. در این میان ولتاژ بایاس $V_b = -0.87$ V به عنوان ولتاژی که تغییرات وابسته میدان به سیگنال dI/dV کاملاً مشهود و واضح است، معین شد. همچنین از شکل (۴-د) می‌توان دریافت که پسماند مغناطیسی dI/dV از مقدار dI/dV در $V_b = -0.87$ V قابل دست‌یابی است. حلقه پسماند مغناطیسی شامل منحنی‌هایی به شکل پروانه است که نسبت به محور عمودی دارای حالتی است که آن را تقریباً متقارن نشان می‌دهد. افت ناگهانی سیگنال در حدود $\pm 1/6$ T نشان‌دهنده تغییر جهت مغناطیسی در هسته Co است. تغییرات تدریجی سیگنال dI/dV در محدوده میدان H_{sw} ، بر

$STIM$ روشی جدید برای بررسی خواص الکتروشیمیایی موضعی در مقیاس نانو است که با استفاده از تصویربرداری حرارتی از کرنش و گارد ناشی از نوسانات غلظت یونی کار می‌کند که این تغییرات با نوسانات دمایی موضعی اعمال شده با استفاده از پروب حرارتی ایجاد می‌شود. این ابزار از حساسیت و توان تفکیک بالایی برخوردار بوده و برای بررسی خواص الکتروشیمیایی و ترمومکانیکی موضعی به کار برده می‌شود. پس می‌تواند برای مطالعه طیف وسیعی از مواد و سیستم‌های الکتروشیمیایی که فعالیت‌های یونی در آنها ضروری است، مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، انبساط حرارتی و سختی مکانیکی نمونه نیز قابل دستیابی خواهد بود و بینش بیشتری را در فرآیندهای الکتروشیمیایی موضعی ایجاد خواهد کرد.

نتیجه‌گیری

پی‌نوشت

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 10. Tunneling guidance | ۱. کارشناس ارشد شیمی فیزیک، پژوهشگاه صنعت نفت |
| 11. Tunneling magnetoresistance (TMR) | ۲. دکتری مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت |
| 12. Binning | ۳. دکتری شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت |
| 13. Pierce | ۴. کارشناس ارشد مهندسی مواد، پارک علم و فناوری استان همدان |
| 14. Suzuki | ۵. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ پروبی روبشی |
| 15. Wiesendanger | 6. Scanning tunneling microscope (STM) |
| 16. Magnetization | 7. Spin-polarized scanning tunneling microscopy (Sp-STM) |
| 17. magnetostriction | 8. Spin-polarized scanning tunneling spectroscopy (Sp-STs) |
| 18. Johnson | 9. Barkhausen |
| 19. anisotropy | |
| 20. biatomic-layer-high (BLH) | |

مراجع

- [1] Katharina Uta Schlickum, Spin-polarized scanning tunneling microscopy studies on in-plane magnetization components of thin antiferromagnetic films on Fe (001), thesis, 2004.
- [2] Wulf Wulfhekel·Uta Schlickum·Jürgen Kirschner, Spin-polarized Scanning Tunneling Microscopy
- [3] H. Barkhausen, Phys. Z. 20, 401 (1919).
- [4] Müller N, Eckstein W, Heiland W, Zinn W Phys Rev Lett, 29:1651 (1972).
- [5] Landolt M, Yafet Y, Phys Rev Lett, 40:1401 (1978).
- [6] Julli`ere M, Phys Lett, 54A:225 (1975).
- [7] Binning G, Rohrer H, Gerber Ch, Weibel E (1982) Appl Phys Lett 40:178
- [8] Binning G, Rohrer H, Gerber Ch, Weibel E (1982) Phys Rev Lett 49:57
- [9] Pierce DT (1988) Physica Scripta 38:291
- [10] Suzuki Y, Nabhan W, Tanaka K (1997) Appl Phys Lett 71:3153
- [11] Wiesendanger R, Güntherodt HJ, Güntherodt G, Gambino RJ, Ruf R (1990) Phys Rev Lett 65:247
- [12] Blügel S, Pescia D, Dederichs PH (1989) Phys Rev B 39:1392
- [13] Wulfhekel W, Kirschner J (1999) Appl Phys Lett 75:1944
- [14] Johnson M, Clarke J (1990) J Appl Phys 67:6141
- [15] Pierce DT, Unguris J, Celotta RJ, Stiles MD (1999) J Magn Magn Mater 200:290
- [16] Soo-hyon Phark, Dirk Sander³, Spin-polarized scanning tunneling microscopy with quantitative insights into magnetic probes, 17Phark and Sander Nano Convergence (2017) 4:8.
- [17] S.H. Phark, J.A. Fischer, M. Corbetta, D. Sander, J. Kirschner, Superparamagnetic response of Fe-coated W tips in spin-polarized scanning tunneling microscopy. Appl. Phys. Lett. 103, 032407 (2013)