

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان:

بررسی گشتاور انتقالی اسپینی در سامانه‌ی FM / Polyacetylene / FM

اساتید راهنما:

دکتر ناصر شاه طهماسبی

دکتر محمود رضایی رکن آبادی

نگارش:

صدیقه طوطی

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری خداوند این تحقیق به پایان رسیده، بر خود لازم می‌دانم از اساتید راهنمای گرامیم آقایان دکتر ناصر شاه‌طهماسبی و دکتر محمود رضایی رکن‌آبادی به پاس زحماتشان در طی انجام این تحقیق، سپاسگزاری نمایم. همچنین از اساتید محترم آقایان دکتر احمد کمپانی و دکتر ابراهیم عطاران که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند نهایت تشکر را دارم.

از جناب آقای داود واحدی فخرآباد که در طول این تحقیق کمک‌های ارزشمندی نمودند، تشکر ویژه دارم. همچنین از دوست خوبم خانم زهره حریری طرقي به خاطر همراهی من در این پایان‌نامه و نیز از همه‌ی عزیزانی که مرا در مراحل مختلف کار یاری رساندند، سپاسگزاری می‌کنم. برای همه این مهربانان از پیشگاه پروردگار، سلامت و سعادت آرزومندم.

تقدیم بہ

خانوادہ ام

چکیده:

در این پژوهش، گشتاور انتقالی اسپینی در سامانه الکترو-مولکول-الکترو بصورت نظری بررسی می‌شود. در این سامانه قطعه‌ای کوچک از یک فلز فرومغناطیس با شبکه مکعبی ساده به عنوان الکترو فرومغناطیس با سطح مقطع محدود و از مولکول پلی‌استیلن به عنوان پل مولکولی بین دو الکترو استفاده می‌شود.

برای مطالعه رفتار الکترونی ساختار FM / Polyacetylene / FM یک مدل هامیلتونی بستگی قوی ارائه نموده و براساس آن با استفاده از روش تابع گرین غیر تعادلی، خواص گشتاور انتقالی از درون سامانه را محاسبه می‌کنیم. در چارچوب مدل محاسباتی پیشنهادی و کاربرد فرمول‌بندی کلدیش، گشتاور انتقالی اسپینی سامانه محاسبه و مشخصه گشتاور-ولتاژ آن تعیین می‌گردد. مقدار این گشتاور نسبت به تک تک اتم‌ها در الکترو راست محاسبه و رفتار نوسانی آن که با فاصله از فصل مشترک میرا می‌گردد، نشان داده می‌شود. همچنین وابستگی گشتاور انتقالی به زاویه‌ی بین مغناطش‌ها و طول و نوع مولکول سد را نشان می‌دهیم. نتایج این پژوهش امکان درک بهتر پدیده‌ی گشتاور انتقالی اسپین را فراهم می‌کند و همچنین پلی‌استیلن را به عنوان مولکول مناسبی برای سد جداساز در طراحی قطعات الکترونیکی نانومتری وابسته به جریان اسپین، مانند مولدهای نانویی موج رادیویی مطرح می‌نماید.

کلید واژه: پلی‌استیلن، جریان اسپینی، گشتاور انتقالی اسپین، تابع گرین، فرمول‌بندی کلدیش.

فهرست

چکیده	۵
پیش گفتار	۱

فصل اول: گشتاور انتقالی اسپین

۱-۱ اسپینترونیک و مفاهیم	۲
۲-۱ - گشتاور انتقالی اسپین	۳
۱-۲-۱ تاریخچه	۳
۲-۲-۱ برهمکنش اسپین و مغناطش	۴
۳-۲-۱ مقاومت مغناطیسی	۶
۴-۲-۱ گشتاور انتقالی اسپین	۷
مراجع	۱۱

فصل دوم: مولد نانویی موج رادیویی

۱-۲ تولید موج با بسامد رادیویی (موج میکروویو)	۱۳
۱-۱-۲ مقدمه	۱۳
۲-۱-۲ تولید موج توسط گشتاور انتقالی	۱۴
۲-۲ ساخت مولد موج نانویی گشتاور اسپینی	۱۸
۱-۲-۲ بررسی نرده‌های نانویی	۱۸
۲-۲-۲ ساخت نوسانگر نانویی گشتاور اسپینی (STNO)	۱۹
مراجع	۲۳

فصل سوم: الکترونیک مولکولی، مولکول پلی استیلن

۱-۳ الکترونیک مولکولی	۲۵
۲-۳ مفاهیم پایه در پلیمرها	۲۹
۳-۳ پلی استیلن، ساده‌ترین پلیمر رسانا	۳۳
مراجع	۳۸

فصل چهارم: فرمول‌بندی سامانه

۴۱	۱-۴ رهیافت تابع گرین و فرمول‌بندی کلدیش.....
۴۱	۱-۱-۴ مقدمه‌ای بر تابع گرین.....
۴۳	۲-۱-۴ الکترودهای نیمه بی‌نهایت و توصیف خودانرژی.....
۴۵	۳-۱-۴ تئوری انتقال تابع گرین غیرتعادلی و ماتریس چگالی.....
۴۷	۴-۱-۴ نمایش برهم‌کنش.....
۴۹	۵-۱-۴ توابع گرین در نمایش برهم‌کنش.....
۵۰	۲-۴ فرمول‌بندی سامانه FM/Polyacetylene/FM.....
۵۰	۱-۲-۴ مقدمه.....
۵۲	۲-۲-۴ مدل سازی و فرمول‌بندی.....
۵۸	مراجع.....

فصل پنجم: نتایج و نمودارها

۶۱	۱-۵ مقدمه.....
۶۱	۲-۵ تابع گرین سطحی الکترودهای نیمه بی‌نهایت برای ساختار غیر همخط.....
۶۲	۱-۲-۵ نتایج عددی برای تابع گرین سطحی الکترودهای نیمه بی‌نهایت.....
۶۷	۳-۵ مولفه‌های گشتاور انتقالی اسپین.....
۶۹	۱-۳-۵ بررسی اثر طول مولکول پلی‌استیلن بر خواص انتقال گشتاور اسپین.....
۷۲	۲-۳-۵ مطالعه‌ی اثر زاویه‌ی بین مغناطش الکترودها در میزان گشتاور انتقالی.....
۷۶	۴-۵ مقایسه‌ی نتایج این پروژه با محاسبات تحلیلی.....
۷۶	۱-۴-۵ نتایج عددی و نمودارهای حاصل از محاسبات به روش تحلیلی.....
۸۰	۵-۵ بررسی توزیع فضایی گشتاور انتقالی اسپین در الکترودها از فصل مشترک.....
۸۰	۱-۵-۵ نتایج عددی و نمودارهای حاصل برای توزیع فضایی گشتاور انتقالی اسپین در الکترودها راست.....
۸۳	۶-۵ جمع‌بندی.....
۸۵	۷-۵ نتیجه‌گیری.....
۸۵	۸-۵ پیشنهادها.....
۸۷	مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱: ۱۶
- شکل ۲-۲: محور آسان مغناطیدگی در یک دیسک مغناطیس ۱۷
- شکل ۲-۳: (a) طرحواره یک نوسانگر اسپینترونیک با قطب‌بنده‌ی عمود بر صفحه لایه‌ها دیده می‌شود. ۱۸
- شکل ۲-۴: (a) طرحواره‌ی از نوسانگر گشتاور اسپینی با قطب‌بنده‌ی مسطح و عمودی اسپین الکترونها. ۲۰
- شکل ۳-۱: ترازهای انرژی مولکول و الکتروود در اتصال ضعیف و در پیوند قوی بین مولکول و الکتروود. ۲۸
- شکل ۳-۲: اثر ناپایداری پیرلز روی یک زنجیره شبه یک بعدی رسانای نوعی. ۳۱
- شکل ۳-۳: (a) سامانه خطی قبل از پدیده دوپاری و (b) سامانه بعد از پدیده دوپاری. ۳۱
- شکل ۳-۴: ایجاد پیوندهای یگانه و دوگانه در پلی‌استیلن و ایجاد پلیمر دوپار شده. ۳۲
- شکل ۳-۵: نمایشی از دو حالت پایه تبهگن $trans-PA$ و نحوه جابجایی پیرلز. ۳۲
- شکل ۳-۶: ساختار مونومر (C_2H_2) ، و یک تک زنجیره ترانس پلی‌استیلن. ۳۳
- شکل ۳-۷: (a) ایجاد ساختار هیبریدی SP^2 برای اتم کربن و (b) تغییر سطوح انرژی. ۳۳
- شکل ۳-۸: نمایش اوربیتالهای ایجاد شده پس از هیبریدشدگی برای اتم کربن. ۳۴
- شکل ۳-۹: نمایش شرکت الکترونها π در رسانندگی پلیمر ترانس پلی‌استیلن. ۳۵
- شکل ۳-۱۰: حالت پایه تبهگن ترانس پلی‌استیلن و ایجاد فازهای A, B ۳۵
- شکل ۵-۱: قسمت موهومی توابع گرین سطحی بر حسب انرژی در حالت $\theta = 0$ ۶۳
- شکل ۵-۲: قسمت حقیقی توابع گرین سطحی بر حسب انرژی در حالت $\theta = 0$ ۶۳
- شکل ۵-۳: قسمت موهومی توابع گرین سطحی بر حسب انرژی در حالت $\theta = \frac{\pi}{4}$ ۶۴
- شکل ۵-۴: قسمت حقیقی توابع گرین سطحی بر حسب انرژی در حالت $\theta = \frac{\pi}{4}$ ۶۴
- شکل ۵-۵: قسمت موهومی توابع گرین سطحی بر حسب انرژی در حالت $\theta = \frac{\pi}{2}$ ۶۵
- شکل ۵-۶: قسمت حقیقی توابع گرین سطحی بر حسب انرژی در حالت $\theta = \frac{\pi}{2}$ ۶۵
- شکل ۵-۷: قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع گرین سطحی در حالتی که مولکول پلی‌اسن میان دو الکتروود قرار دارد، زاویه‌ی مغناطش الکتروودها $\theta = \frac{\pi}{2}$ است. ۶۷
- شکل ۵-۸: گشتاور انتقالی $T_{||}$ برای حالتی که مولکول پلی‌استیلن با طول $p=4$ سلول در سامانه قرار دارد. ۶۹
- شکل ۵-۹: گشتاور انتقالی $T_{||}^T$ برای حالتی که مولکول پلی‌استیلن با طول $p=6$ سلول در سامانه قرار دارد. ۷۰
- شکل ۵-۱۰: گشتاور انتقالی $T_{||}^T$ برای حالتی که مولکول پلی‌استیلن با طول $p=10$ سلول در سامانه قرار دارد. ۷۰

- شکل ۵- ۱۱: مقدار گشتاور موازی در حالتی که مولکول پلی‌اسن میان دو الکتروود قرار گرفته است ۷۱
- شکل ۵- ۱۲: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = 0$ است ۷۲
- شکل ۵- ۱۳: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = \frac{\pi}{6}$ است ۷۳
- شکل ۵- ۱۴: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = \frac{\pi}{4}$ است ۷۳
- شکل ۵- ۱۵: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = \frac{\pi}{2}$ است ۷۴
- شکل ۵- ۱۶: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = \frac{3\pi}{4}$ است ۷۴
- شکل ۵- ۱۷: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = \frac{5\pi}{6}$ است ۷۵
- شکل ۵- ۱۸: گشتاور انتقالی اسپین در حالتی که زاویه‌ی میان مغناطش الکتروودها $\theta = \pi$ است ۷۵
- شکل ۵- ۱۹: مقدار گشتاور انتقالی اسپینی که از روش محاسبات دیورژانس جریان اسپینی به دست آمده ۷۷
- شکل ۵- ۲۰: مقدار گشتاور انتقالی اسپینی که از روش تحلیلی (رابطه‌ی ۷-۵) به دست آمده است ۷۷
- شکل ۵- ۲۱: مقدار جریان اسپینی در زاویه‌ی 0 میان مغناطش‌ها (حالت موازی)، $I_z^s(\theta=0)$ ، بر حسب ولتاژ دیده می‌شود. یکای این جریان مشابه گشتاور الکترون-ولت بر واحد سطح فصل مشترک است. ۷۸
- شکل ۵- ۲۲: مقدار جریان اسپینی در زاویه‌ی Π میان مغناطش‌ها ۷۸
- شکل ۵- ۲۳: گشتاور انتقالی اسپین به دست آمده از روش تحلیلی، بر حسب ولتاژ دیده می‌شود ۷۹
- شکل ۵- ۲۴: مقدار مولفه‌های موازی و عمود گشتاور انتقالی اسپین بر حسب جایگاه‌های الکتروود راست ۸۱
- شکل ۵- ۲۵: مقدار مولفه‌های موازی و عمود گشتاور انتقالی اسپین بر حسب جایگاه‌های الکتروود راست، در اینجا مولکول پلی‌اسن با طول ۵ سلول بین الکتروودها قرار دارد ۸۲
- شکل ۵- ۲۶: طول مولکول پلی‌استیلن را افزایش داده و $p=6$ در نظر گرفته‌ایم. نمودار (a) مولفه‌ی موازی و نمودار (b) مولفه‌ی عمود گشتاور را نشان می‌دهد ۸۲

پیش گفتار

در پیشرفت‌های علمی و صنعتی نوین نقش ریزفناوریهای نانویی بسیار بارز است. ساختارهایی در ابعاد میلیمتری مانند تراشه‌های کامپیوتری جای خود را به ابزارهایی با اندازه حدود 10^{-9} متر می‌دهند. در این شرایط علاوه بر کاهش اندازه‌ی قطعات و کاهش هزینه‌هایی چون مصرف انرژی، کاربردها و امکانات جدیدی نیز به وجود می‌آید که شاید تا کنون پنهان بوده است.

در فناوری‌های نانو، چینش دلخواه اتم‌ها و به دست آوردن موادی با خواص مطلوب و کاربردی و یا به کارگیری خواصی از اتم یا الکترون‌ها به صورتی است که عملکرد و هدف مورد نیاز را برآورده سازد. در این پژوهش ما اسپین الکترونهای عبوری از سامانه بسیار کوچکی را در نظر گرفته ایم که قادرند تکانه زاویه‌ای اسپینی خود را به الکتروود مغناطیسی نانویی انتقال دهند که این همان هدف ماست.

در فصل اول مفاهیم کلی اسپینترونیک و برخی خواص که بیشتر در دست مطالعه هستند به همراه تاریخچه‌ای از فعالیتهای انجام شده، بیان شده است. در فصل دوم برخی کاربردها و چگونگی ساخت قطعات، بخصوص یک مولد نانویی موج رادیویی شرح داده شده است. در فصل‌های سوم و چهارم ضمن معرفی بیشتر سامانه محاسبات نظری مورد نیاز عنوان شده است و در آخرین فصل نتایج حاصل از این کار پژوهشی ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

فصل اول

گساور انتقالی اسپین

۱-۱ اسپیترونیک و مفاهیم

امروزه الکترونیک جدید دانشی را بر مبنای درجه‌ی آزادی اسپین الکترون مطرح کرده است. این امکان که سرعت پردازش داده‌های غیر فرار^۱ چه با اضافه کردن درجه‌ی آزادی به دستگاه‌های الکترونیکی مرسوم و چه تنها با استفاده از اسپین افزایش یابد، وجود دارد. در این صورت مصرف انرژی الکترونیکی کاهش می‌یابد و حجم قطعات نسبت به وسایل نیم‌رسانای فعلی کوچکتر می‌گردد. برهمکنش اسپین الکترونهاى شارش یافته و مغناطش پس زمینه داخل یک فرومغناطیس از دو دهه قبل مورد مطالعه جدی قرار گرفته و منجر به کشف پدیده‌های جالبی شده است. قطعات دریچه اسپینی فلزی و اتصالات تونلی مغناطیسی^۲ MTJ ما را به حوزه‌ی جدیدی از کشفیات برده‌اند که به نام اسپیترونیک شناخته می‌شود. از موارد کاربرد مهم آن سرخوانها^۳ و حافظه‌های دائم^۴ در کامپیوترها و تولید امواج رادیویی در مخابرات است.

MTJ از قطعات مهم اسپیترونیکی است که به صورت سیستم چند لایه‌ای است که به شکل فرومغناطیس / عایق / فرومغناطیس با ضخامت در حد نانو متر ساخته می‌شود. چنانچه جریان الکترون‌ها در راستای عمود بر صفحات فصل مشترک این سیستم برقرار شود، جریان از فرومغناطیس اول به صورت تونل زنی کوانتومی به عایق و سپس به فرومغناطیس دوم جاری خواهد شد، از این رو این قطعه را پیوندگاه تونلی مغناطیسی می‌نامند. وجود مغناطش معین در لایه‌های فرومغناطیس باعث قطبیدگی جریان اسپینی می‌شود.

بدین ترتیب جریان اسپین قطبیده که از فرومغناطیس اول به دومی رسیده است با راستای مغناطش آن

^۱ . nonvolatile

^۲ . magnetic tunnel junction

^۳ . read-heads

^۴ . MRAM

برهمکنش می کند. اثر این برهمکنش منجر به پدیده‌های مهمی می‌شود که پایه‌های اسپیترونیک را تشکیل می‌دهد. از مهمترین این پدیده‌ها می‌توان مغناطومقاومت‌های تونلی^۱ و بزرگ^۲ و برهمکنش راستای قطبش اسپینی جریان با راستای مغناطش فرومغناطیس‌ها را نام برد. پدیده اخیر جدیداً مورد توجه قرار گرفته و توانایی منحرف کردن راستای مغناطش در مغناطیس‌ها را دارد که منجر به تبادل اطلاعات می‌گردد. این پدیده گشتاور انتقالی اسپین^۳ STT نام دارد.

برخی مشکلات نیز قبل از وارد کردن موفقیت آمیز اسپین به فناوری نیم‌رسانای موجود باید برطرف گردد، مانند میزان تزریق کافی آن، انتقال، کنترل، به کارگیری و پیدا کردن رد اسپین قطبش یافته و نیز تولید جریان اسپین-قطبیده، اما نهایتاً پیشرفت‌های اخیر نوید ساخت وسایل اسپیترونیکی واقعی برای آینده‌ی نزدیک را می‌دهند. در ادامه به شرح گشتاور انتقالی اسپین خواهیم پرداخت [1].

۲-۱ - گشتاور انتقالی اسپین

۱-۲-۱ تاریخچه

اولین ایده در مورد گشتاور انتقالی اسپین را اسلونزوسکی^۴ در مقاله‌ای نظری در ۱۹۸۹ ارائه داد. در آن مقاله وی در مدل الکترون آزاد برای یک MTJ پاسخ مغناطش به یک جریان الکتریکی اسپین-قطبیده را تحلیل نمود و با وجود اینکه انتظار می‌رفت اتلاف انرژی و گرمای القاء اثر کشف شده را پنهان کند، دریافت این جریان یک شبه گشتاور^۵ بر مغناطش القاء می‌کند. بعدها لیتوگرافی پرتو الکترونی امکان

¹ . tunnel magnetoresistance

² . giant magnetoresistance

³ . spin transfer torque

⁴ . Slonczewski

⁵ . pseudo-torque

ساخت قطعات زیرمیکرون را فراهم نمود. در دریچه های اسپینی فلزی چگالی جریان اعمالی می تواند برای تولید چنین گشتاوری به اندازه ی کافی بزرگ باشد (حاصلضرب مقاومت - مساحت) (RA) کمتر از $10\Omega\mu m^2$ باقی می ماند).

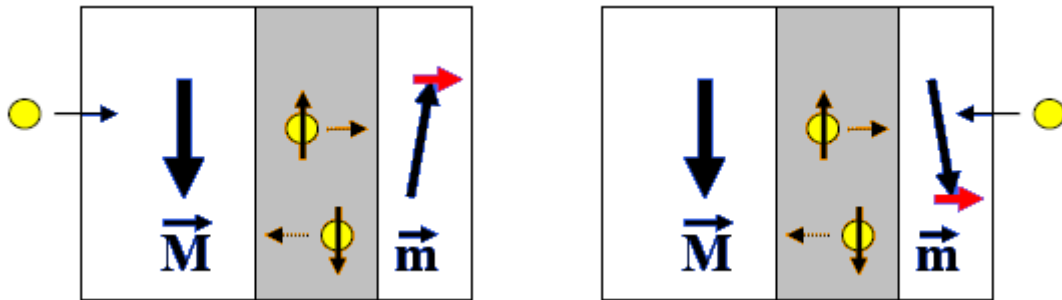
اسلونزوسکی به همراه برگر^۱ در ۱۹۹۶ نشان داد جریانی که از درون دریچه اسپینی فلزی می گذرد بر مغناطش زمینه اثر کرده برانگیختگی های مغناطیسی و حتی کلیدزنی^۲ مغناطش ایجاد می کند. کمتر از دو سال بعد داده های تجربی پیشگویی ها را تایید کرده نتایج حیرت انگیزی به بار آورد، همچنین غنایی قابل توجه به فیزیک انتقال وابسته به اسپین هم در چندلایه های مغناطیسی و هم در MTJ ها بخشید [2].

۲-۲-۱ برهمکنش اسپین و مغناطش

اسلونزوسکی و برگر در بررسی نظری متوجه شدند، به دلیل پایستگی تکانه زاویه ای اسپینی در برهمکنش تبادل، مولفه ی عرضی اسپین الکترونها در جریان اسپین - قطبیده می تواند به الکترونهای هدایت در مغناطیس کوچک منتقل شود. مطابق شکل ۱-۱ بسته به جهت شارش الکترون و ساختار مغناطیسی، جریان اسپین - قطبیده می تواند یکی از حالت ها موازی (P) یا پادموازی (AP) (نسبت به مغناطش سمت راست) را داشته باشد. انتقال اسپین به الکترونها در مغناطیس کوچکتر انجام می شود.

^۱ . Berger

^۲ . switching



شکل ۱-۱: الکتروود ضخیم، لایه‌ی ثابت^۱ (PL) و الکتروود نازک، لایه‌ی آزاد^۲ (FL) نام دارد. الکتروونها در عبور از PL بر مبنای اسپین فیلتر می‌شوند. وقتی آنها از PL به FL شارش می‌یابند، به دلیل اثر گشتاور انتقالی اسپین، حالت موازی (چپ) را به خود می‌گیرند، مشابه وقتی الکتروونها از FL به PL شارش می‌یابند، حالت ناموازی را می‌گیرند.

الکتروود با ضخامت کمتر که می‌تواند کلیدزنی (سوئیچ) شود، لایه‌ی آزاد (FL) نام دارد، در مقابل الکتروود دیگر که اغلب ضخیم‌تر است، لایه‌ی ثابت (PL) نامیده می‌شود. در توان بالا اسپین مغناطش را برعکس می‌کند، این معکوس شدن مغناطش القائی، پدیده‌ی تقریباً جدیدی است و تنها در ساختارهای مغناطیسی کوچکتر از ۲۰۰-۱۰۰ نانومتر قابل مشاهده است.

مدل ماکرو-اسپینی با این فرض که درجات آزادی مغناطیسی داخل آن بی‌حرکت هستند، به صورت یک آهنربای نانویی رفتار می‌کند. مکانیک حرکتی ماکرو-اسپین می‌تواند به وسیله‌ی معادله‌ی LLG^۳ به همراه عبارت اضافی مربوط به STT توصیف شود

$$\partial_t \vec{m} = \gamma (\vec{m} \times \vec{H}_{eff}) - \alpha (\vec{m} \times \partial_t \vec{m}) + \beta J (\vec{m} \times \vec{m} \times \vec{M}) \quad (1-1)$$

در اینجا γ نسبت ژیرومغناطیسی، α ضریب میرایی و β ضریبی برای STT است که هم به قطبش

^۱ . Pinned Layer

^۲ . Free Layer

^۳ . Landau-Lifshitz-Gilbert

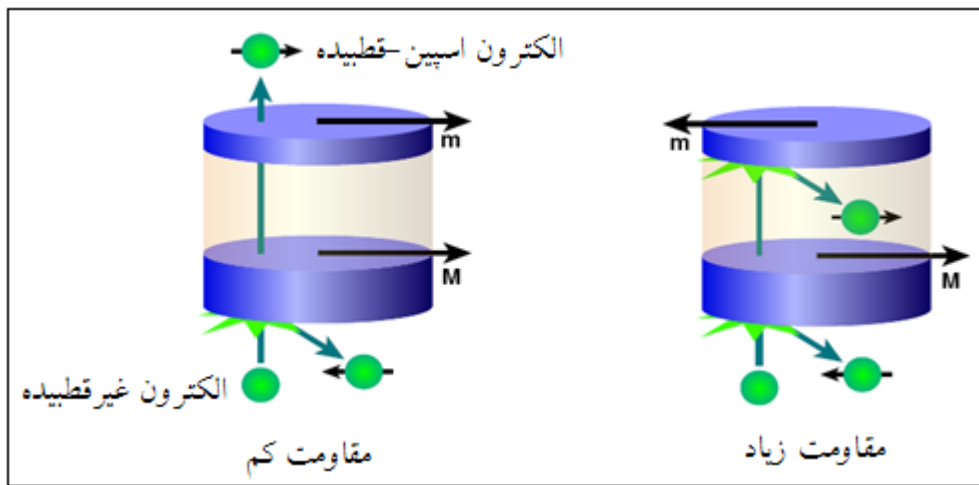
اسپینی و هم به ساختار هندسی بین اسپین ورودی و گشتاورهای جایگزیده در FL بستگی دارد، همچنین J چگالی جریان می‌باشد [1-2].

۱-۲-۳ مقاومت مغناطیسی

همان‌طور که در مبحث قبل عنوان شد، مواد مغناطیسی تمایل به فیلتر کردن الکترونهاى عبوری بر مبنای اسپین آنها دارند. نخستین اثری که از این خاصیت ناشی می‌شود، مقاومت مغناطیسی است. مقاومت دستگاه به جهتگیری‌های نسبی مغناطش‌های دو لایه بستگی دارد. تصویر ۱-۲ این را نشان می‌دهد. برای ساده‌سازی فرض کرده ایم که هر آهنربا تنها به اسپین‌های موازی با مغناطش اجازه عبور داده، مانع عبور اسپین‌های پادموازی شود.

اگر دو جهت مغناطیسی (نشان داده شده با M و m در شکل) مانند شکل ۱-۲ الف، در پیکربندی موازی (P) باشند، نیمی از اسپین‌ها از اولین لایه برگشت داده می‌شوند و نیم دیگر اجازه می‌یابند که از هر دو لایه عبور کنند که در این مورد مقدار نسبتاً کمی از مقاومت ایجاد می‌شود. در حالت پادموازی (AP)، شکل ۱-۲ ب، هیچ یک از صورت‌های اسپین اجازه عبور از اتصال را نمی‌یابند، که در این مورد مقدار بالایی از مقاومت ایجاد می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود حالت‌های بین موازی و پادموازی، مقدار مقاومت‌های متوسطی دارند.

از این اثر به‌طور متداول در حافظه‌های سخت، برای دیده شدن میدان‌های کوچک تولید شده توسط حوزه‌های مغناطیسی دیسک‌ها، استفاده می‌شود.



(الف)

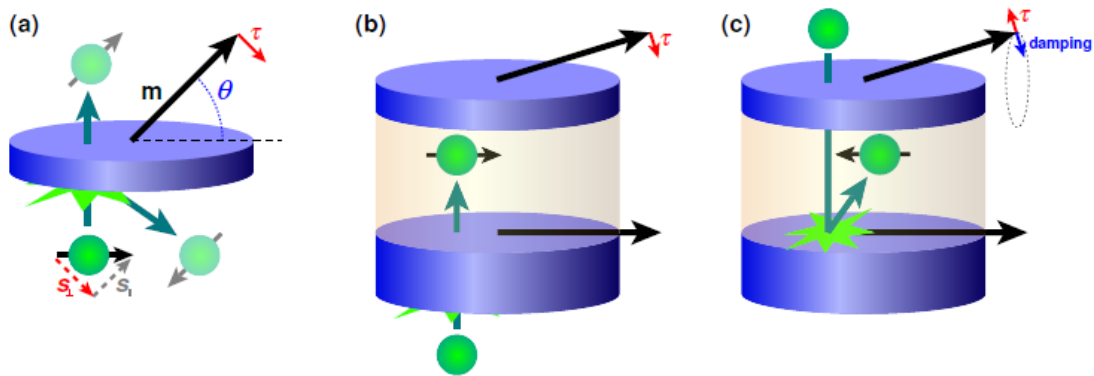
(ب)

شکل ۱-۲: نمایشی از مقاومت مغناطیسی

۴-۲-۱ گشتاور انتقالی اسپین

اثر جالب دوم ناشی از فیلترینگ اسپین، همان گشتاور انتقالی اسپین است. در حالیکه می‌بینیم مغناطومقاومت تاثیر مواد مغناطیسی بر الکترونها عبوری است گشتاور انتقالی اسپین تاثیر الکترونها عبوری بر مواد مغناطیسی است.

همانطور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده اگر یک الکترون اسپین-قطبیده از لایه مغناطیسی عبور نماید و با بردار مغناطش زاویه‌ی محدودی داشته باشد، پس از تجزیه‌ی این حالت اسپین نسبت به مغناطش m ($|\uparrow\rangle$ به $|\downarrow\rangle$ و با محور کوانتیدگی \vec{m}) بخشی از الکترون که موازی مغناطش است عبور می‌کند و بخش پاد موازی منعکس می‌شود.



شکل ۱-۳: طرحواره ای از گشتاور انتقالی اسپین در قطعه MTJ دیده می‌شود. مغناطش لایه‌ها m و M هستند. (a) لایه‌ی مغناطیسی منفرد با الکترون اسپین قطبیده‌ای که از درون آن عبور می‌کند. مغناطیس مولفه‌ی همخط را عبور داده یا می‌پراکند و مولفه‌ی عرضی جذب می‌شود. (b) قطعه‌ی شامل دو لایه‌ی مغناطیسی جدا شده با لایه‌ی غیر مغناطیسی دیده می‌شود. لایه‌ای که به دلیل اندازه‌ی بزرگتر یا بایاس تبادلی، مستعد انتقال دادن اسپین است الکترونهای اسپین قطبیده تولید می‌کند که بعداً می‌توانند به لایه‌ی دیگر گشتاور وارد کنند. علامت جریان این جا ساختار موازی را حمایت می‌کند. (c) انتقال اسپین برای جریان مخالف، الکترونهای انعکاسی با اسپین مخالف گشتاوری در خلاف جهت به لایه‌ی آزاد وارد می‌کنند که ساختار موازی را ناپایدار می‌کند. این گشتاور می‌تواند m را معکوس کند یا حرکت تقدیمی در مغناطیس برانگیزد.

تکانه‌ی زاویه‌ای الکترون قبل و بعد از پراکندگی یکسان نیست. قبل از پراکندگی مولفه‌ی اسپین S_{\perp} عمود بر m وجود دارد که دامنه‌ی آن $(\frac{\hbar}{2})\sin\theta$ است در حالیکه بعد از پراکندگی تکانه‌ی زاویه‌ای موازی یا پاد موازی با m است. این مولفه‌ی عمود که به نظر می‌رسد ناپدید شده، در واقع داخل آهن ربا مصرف شده و گشتاور کوچکی به مغناطش آن وارد می‌کند. یعنی اسپین الکترون عبوری، مغناطش را کمی چرخانیده است [3].

در این دستگاه یکی از لایه‌های مغناطیسی از دیگری ضخیم تر و کمتر مستعد اثرات انتقال اسپین برای مقدار جریان مشخص می‌باشد. این لایه‌ی ثابت، برای تولید الکترونهای قطبیده که می‌توانند گشتاورهایی

به لایه‌ی نازکتر (لایه‌ی آزاد) وارد کنند به کار می‌رود (شکل ۱-۳ b).

در جریان معکوس (شکل ۱-۳ c) گشتاوری با علامت مخالف در لایه‌ی آزاد تولید می‌شود. در این حالت الکترونهاى انعکاسی که اسپین مخالف دارند اطلاعات اسپین را از لایه‌ی ثابت به لایه‌ی آزاد حمل می‌کنند. جهت شارش الکترون در این شکل به ناپایدار سازی حالت موازی تمایل دارد. این همان حالتی است که مخالف افت مغناطیسی است. اگر جریان به قدر کافی بزرگ باشد می‌تواند بر افت غالب آید و مغناطش لایه آزاد شروع به حرکت تقدیمی خواهد کرد.

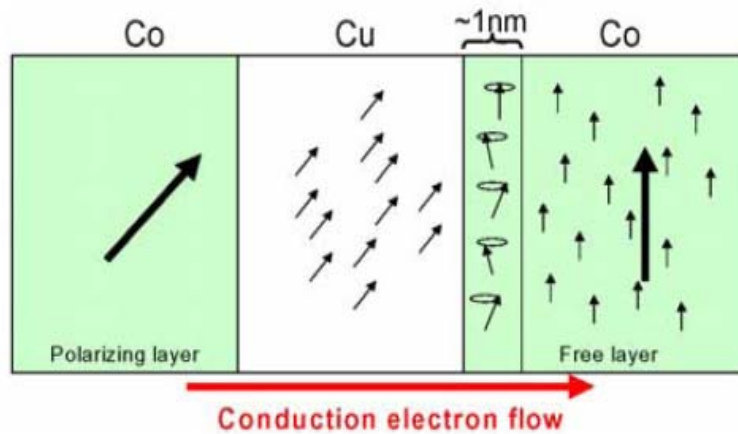
اگر حالت پادموازی پایدار باشد، دورتر از برخی نقاط بحرانی زاویه‌ی m کاملاً برعکس خواهد شد. این علامت جریان (در این جا مثبت) به حالت پاد موازی تمایل دارد در حالیکه در جریان مخالف (شکل ۱-۳ b) به حالت موازی مایل است. اگر هر دو حالت پایدار باشند به منحنی پسماند منجر می‌شود و با کنترل جریان اعمالی کاربردهای ST-MRAM میسر می‌گردد [3]. مدل ساده‌ای که مطرح شد به صورت کیفی فیزیک سیستم ما را شرح می‌دهد. برای شرح کمی، قطبیدگی اسپین خالص که در آن اختلاط با اسپین الکترونهاى هدایت درون قطعه نیز منظور شود، مورد نیاز است. در سدهای جداساز فلزی اثر میانگین تمام توابع موج الکترونی شامل شرایط مرزی همه‌ی لایه‌های دستگاه لازم است. برای اتصالات تونلی اثر ولتاژهای بزرگ اتصال و چگالی حالت‌ها را باید در نظر گرفت. برای دقت بیشتر مدل، منحنی سطح، طول نفوذ اسپین و اثرات لبه باید وارد شوند.

اتفاقی که در یک MTJ با عبور جریان عرضی (شکل ۱-۴) می‌افتد اینست که اسپین الکترونهاى انتقالی به شکل غیر همدوس حول میدان تبادلی محلی^۱ (در راستای مغناطش الکتروود سمت راست)، حرکت تقدیمی می‌کنند. نتیجتاً در فاصله‌ی کوتاهی در حدود ۱ نانومتر قطبش- اسپین الکترونهاى ورودی در امتداد مغناطش محلی تغییر جهت می‌دهد. این امر شارشی از تکانه‌ی زاویه‌ای ورودی تولید می‌کند که به

¹ local exchange field

مغناطش محلی وارد می‌شود و گشتاوری بر آن اعمال می‌کند که همان گشتاور انتقالی اسپین است

(شکل ۱-۴) [4].



شکل ۱-۴: در فرآیند همراستایی قطبش-اسپین الکترونهاى انتقالی با مغناطش راست، شارشی از تکانه‌ی زاویه‌ای به مغناطش الکتروود سمت راست وارد می‌شود.

نکته‌ی خیلی مهم این است که اثر انتقال تکانه‌ی اسپینی فقط در محدوده‌ی ۱۰۰ نانومتر یا کمتر دیده

می‌شود، جایی که چگالی جریان بحرانی از مرتبه‌ی 10^7 A/cm² باشد [5].