به نام ایزد بخشنده

۱۰۲۵۹۹

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

رسالهٔ ارائه شده برای دریافت درجهٔ دکترای فیزیک

(گرایش ماده چگال)

عنوان :

مقاومت الکتریکی ناشی از دیواره‌های مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی و برهمکنش اسپین—مدار راشبا

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

نگارش :

آرش فیروزنیا

۱۳۸۶ /۸/ ۲۸

استاد راهنما :

دکتر محمد مهدی طهرانچی

استاد مشاور :

دکتر مجید قناعت شعار

۱۰۲۳۹۹

آبان ۱۳۸۵

دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

[صورتجلسه دفاع از رساله دکترا]

جلسه ارزیابی رساله **آقای آرش فیروز نیا** فرزند: **احمد** دارای شناسنامه شماره : **۲۱۴۱** صادره از : **شمیران** متولد **۱۳۵۳** دانشجوی دوره دکترای رشته : **فیزیک** گرایش : **حالت جامد** با عنوان :

« مقاومت الکتریکی ناشی از دیواره های مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی و برهمکنش اسپین-مدار راشبا »

به راهنمائی آقای **دکتر محمد مهدی طهرانچی** و مشاورت آقای **دکتر مجید قناعت شعار** طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۵/۹/۲۱ تشکیل گردید و بر اساس رأی هیات داوران و با عنایت به ماده ۲۱،۲۲،۲۳، تبصره های مربوطه مندرج در آئین نامه دوره دکترای مورخ ۱۳۷۲/۱۲/۸ ، رساله مزبور با نمره ۱۹/۱۷ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت .

[اعضای هیات داوران]

	نام و نام خانوادگی	درجه دانشگاهی	امضاء
۱- استاد راهنما	آقای دکتر محمد مهدی طهرانچی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	آقای دکتر مجید قناعت شعار	استادیار	
۳- داور از دانشگاه	آقای دکتر حسن عزیزی	دانشیار	
۴- داور از دانشگاه	آقای دکتر فرشاد ابراهیمی	استادیار	
۵- داور خارج از دانشگاه	آقای دکتر ناصر شاه طهماسبی	دانشیار	
۶- داور خارج از دانشگاه	آقای دکتر افشین نمیرانیان	استادیار	

۷- عضو هیات داوران و نماینده شورای تحصیلات تکمیلی

ناظر تحصیلات تکمیلی :

۱۳۸۶ /۸/ ۲۸

تقدیم به

پدر، مادر

و همسر عزیزم

تشکر و قدردانی

از توجه و حمایت‌های آقای دکتر طهرانچی که سمت استاد راهنمایی این رساله بر عهدهٔ ایشان بود سپاسگذارم. همچنین به جهت اینکه ایشان زمینه استفادهٔ اینجانب از امکانات پژوهشکده لیزر را فراهم آوردند، ممنون و متشکرم. از آقای دکتر قناعت شعار استاد مشاور رسالهٔ حاضر به جهت بررسی‌های دقیق علمی و نگارشی ایشان در مدت انجام این رساله متشکرم.

از اساتید بزرگوار، آقای دکتر ابراهیمی و آقای دکتر عزیزی به سبب دِین بزرگی که ایشان در آموخته‌های اینجانب در این دوره و مراحل پیشین داشته‌اند، کمال تشکر را دارم.

از آقایان سعید سرکاراتی، وحید فلاحی و سیّد مجید محسنی به جهت بحث های مفید، کمک در نکات برنامه نویسی و معرفی مقالات ارزنده بسیار متشکر و سپاسگذارم. همچنین از آقای دکتر توسلی به جهت کمک های ارزندهٔ ایشان در جریان سفر خارج از کشور اینجانب سپاسگذارم.

یاد و خاطرهٔ دوستانم درآزمایشگاه مگنتواپتیک و دانشگاه شهید بهشتی همیشه با من خواهد بود و توفیق روز افزونِ ایشان را از خداوند خواستارم.

آرش فیروزنیا

چکیده :

در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از نظریه ترابرد بولتزمن و در چارچوب تقریب زمان واهلش تغییرات مقاومت الکتریکی نسبی، برای یک دیواره مغناطیسی که در بین دو ناحیه فرومغناطیس با مغناطش پاد موازی قرار دارد محاسبه شده است. بر این اساس اثر ناخالصی‌های مغناطیسی بر مقاومت دیواره در حضور یک میدان مغناطیسی ضعیف خارجی برای دو حالت کایرالیتی ممکن محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهندهٔ این نکته است که دیوارهٔ مغناطیسی (بسته به قدرت برهمکنش زیمن، به عنوان یک مکانیسم خارجی) اثر کاهنده یا افزاینده بر مقاومت نمونه دارد. در مرحله بعد اثر جفت شدگی راشبا بر روی مقاومت مغناطیسی دیواره مغناطیسی هموار در سیستمی دو بعدی و در چارچوب مدل نیمه کلاسیک یاد شده، بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان دهنده منفی بودن مقاومت مغناطیسی دیواره در حالت CIW در بازه‌های ویژه‌ای از چگالی ناخالصی‌ها است. هچنین نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مقاومت مغناطیسی دیواره به نوع کایرالیتی وابستگی دارد و افزایش قدرت برهمکنش راشبا در چگالی‌های ناخالصی پایین به طور موثری قادر به افزایش مقاومت مغناطیسی دیواره خواهد بود.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست شکل‌ها ۲

مقدمه ۴

فصل اول : مفاهیم اسپینترونیک

۱.۱ پیش گفتار ۱۳

۲.۱ قطبش اسپینی ۱۵

۳.۱ مقاومت مغناطیسی در پدیدهٔ تونل زنی ۱۹

۴.۱ مکانیسم‌های واهلش اسپینی و نافازی اسپین ۲۱

۱.۴.۱ مکانیسم الیوت—یافت ۲۳

۲.۴.۱ مکانیسم دیاکونوف—پرِل ۲۵

فصل دوم : روش استاتیک درمحاسبات ترابردی

۱.۲ ساختارهای مغناطیده نا هم راستا ۳۲

۲.۲ ویژه حالت‌های هامیلتونی دیوارهٔ مغناطیسی خطی ۳۶

فصل سوم : اثر میدان مغناطیسی خارجی در مقاومت دیواره مغناطیسی یک بعدی

۱.۳ مقدمه ۴۵

۲.۳ اثر ترم زیمن در مقاومت الکتریکی دیواره مغناطیسی ۴۶

۳.۳ مدل ۴۹

۱.۳.۳ توصیف برهمکنش‌های دیواره ۵۰

۲.۳.۳ معادله بولتزمن در محاسبه ترابرد سیستم ۵۲

۴.۳ بحث و نتایج ۵۹

عنوان صفحه

فصل چهارم : اثر برهمکنش راشبا در مقاومت الکتریکی دیواره مغناطیسی دو بعدی

۱.۴ مقدمه ۶۵

۲.۴ مدل ۶۸

۳.۴ ترابرد غیر آدیاباتیک در دیواره مغناطیسی در حضور ناخالصی‌ها ۷۰

۴.۴ محاسبه ماتریس‌های پراکندگی ۷۲

۵.۴ محاسبه تابع توزیع غیر تعادلی و مقاومت مغناطیسی دیواره مغناطیسی ۷۶

۶.۴ بحث و نتایج ۸۱

پیوستها

الف تفکیک ماتریس پراکندگی ۸۷

ب ماتریس پراکندگی برهمکنش راشبا در دیواره مغناطیسی ۸۸

نتیجه گیری ۹۰

چکیدهٔ لاتین رساله ۹۱

فهرست منابع ۹۲

فهرست شکل‌ها

شکل ۱: نمودار افزایش کارایی کامپیوترها بر اساس قانون تجربی مور.

شکل ۲: اتلاف انرژی با کاهش اندازه قطعات الکترونیک.

شکل ۱.۱: ساختار دو لایه‌ای F/N.

شکل ۲.۱: ساختار چند لایه‌ای فرو — نارسانا— فرو.

شکل ۳.۱: جریان در هندسه‌های ترابرد CPP و CIP.

شکل ۱.۲: ساختار فرو — دیواره مغناطیسی — فرو.

شکل ۲.۲: منحنی مشخصه چگالی جریان الکتریکی و اسپینی.

شکل ۱.۳: دیواره مغناطیسی در یک سیم کوانتومی برای کایرالیتی‌های (الف) مثبت و (ب) منفی.

شکل ۲.۳: مقاومت نسبی سیستم در حضور دیواره مغناطیسی و میدان مغناطیسی خارجی.

شکل ۳.۳: مقاومت نسبی سیستم در حضور دیواره مغناطیسی بر حسب قدرت موثر برهمکنش ناخالصی‌ها.

شکل ۱.۴: جریان در هندسه‌های CIW و CPW.

شکل ۲.۴: (الف) کایرالیتی مثبت و (ب) کایرالیتی منفی دیواره مغناطیسی (جهت میدان الکتریکی مقید کننده در جهت $+\hat{z}$ فرض شده است.).

شکل ۳.۴: مقاومت مغناطیسی دیواره مغناطیسی بر حسب قدرت برهمکنش راشبا در چگالی‌های متفاوت ناخالصی (c_i) برای هندسه CIW.

شکل ۴.۴: مقاومت مغناطیسی دیواره مغناطیسی بر حسب قدرت برهمکنش راشبا در چگالی‌های متفاوت ناخالصی (c_i) برای هندسه CPW.

شکل ۵.۴: پتانسیل موثر مغناطیسی در ترابرد CIW (الف) در درون دیواره (ب) در درون یک فرومغناطیس. مکان‌های تیره‌تر متناظر با انرژی مغناطیسی بالاتر هستند.

شکل ٦.۴: وابستگی مقاومت مغناطیسی دیواره مغناطیسی به کایرالیتی بر حسب قدرت جفت شدگی راشبا برای هندسه CIW.

شکل ۷.۴: وابستگی مقاومت مغناطیسی دیواره مغناطیسی به کایرالیتی بر حسب قدرت جفت شدگی راشبا برای هندسه CPW.

مقدمه

از زمان ابداع ترانزیستور در دسامبر سال ۱۹۴۷ تا فناوری‌های پیشرفته نوین مانند مدارهای مجتمع سیلیکونی (ICها) روش زندگی بشر امروزی وابستگی شدیدی به این اختراع بزرگ پیدا کرده است. پردازنده‌های کنونی دارای چندین میلیون ترانزیستور جهت پردازش داده‌ها و نیز چند میلیون ترانزیستور دیگر جهت ذخیره سازی داده‌ها به صورت پایدار یا موقت هستند.

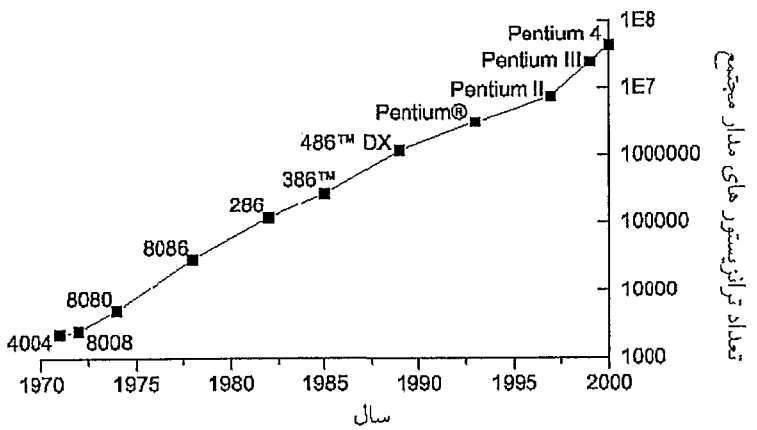
در طول پنجاه سال گذشته جهان شاهد تحولی بزرگ بر پایهٔ منطق دیجیتال الکترونی بوده است. این عرصه شامل طیف گسترده‌ای از قطعات الکترونیک از ترانزیستورهای ابتدایی گرفته تا میکروپروسسورهای قدرتمند کنونی است. بیشتر لوازم جدید الکترونیک شامل مدارهایی هستند که در آنها داده‌ها بر حسب ارقام دو—دویی یابیت‌های ۱ و ۰ به ترتیب بسته به وجود یا عدم بار الکتریکی نمایش داده می‌شوند. علاوه بر این مخابرهٔ اطلاعات و انتقال داده‌ها بین قطعات میکروالکترونیک نیز با جریان دو—دویی [۱] صورت می‌گیرد. فناوری شکل گرفته بر اساس این منطق سالانه چندین تریلیون دلار وارد چرخهٔ صنعت جهانی می‌کند، که محصولات آن، هم اکنون در همه جا به چشم می‌خورد.

آنچه که اینک مسلم گردیده این است که تمام توان رایانه‌های کنونی و آینده نزدیک برای توصیف دقیق در کاربرد هایی مانند پیش بینی‌های هوا شناسی، طراحی داروهای گوناگون، شبیه سازی‌های تصادف، ترتیب

[۱] Binary flow of electric charges

گذاری ژن‌ها، شبیه سازی آزمایشات هسته‌ای، شبیه سازی‌های کیهانی و ...کافی نخواهد بود. کارایی رایانه‌ها به گونه‌ای اساسی وابسته به امکان کاهش ابعاد و اندازهٔ ترانزیستورها است. این کاهش حجم، امکان استفاده از تعداد قابل توجهی از آنها را در تراشه‌های جدید فراهم می‌کند. به همین دلیل این موضوع به شدت توسط محققان فناوری‌های نوین دنبال می‌گردد و در دستور کار آنها قرار دارد.

پیشرفت سریع در کاهش ابعاد و افزایش توان پردازنده‌ها به طور معمول و عامه پسند در چارچوب قانون مور [۲] که در سال ۱۹۶۵ میلادی بیان شده است، خلاصه می‌گردد. این قانون که شواهد درستی آن صرفا تجربی است، بیانگر این نکته است که با کاهش حجم قطعات الکترونیک —حداقل در مورد پردازنده‌های [۳] شرکت اینتل [۴] — قدرت میکروپروسسورها هر ۱۸ ماه دو برابر می‌گردد، که این تغییر متناظر با نصف شدن حجم قطعات الکترونیک در بازهٔ زمانی ۲ سال است (شکل ۱).

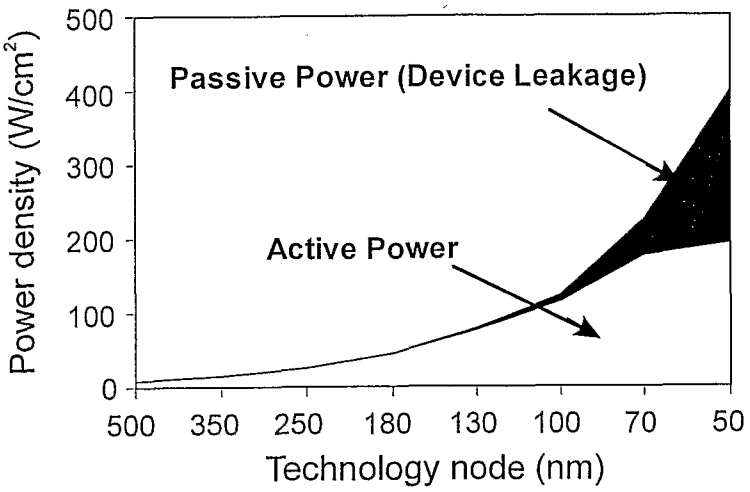


شکل ۱

طبق برخی از برآوردهای انجام شده در صورت پایداری قانون مور، این کاهش تا سال ۲۰۲۰ میلادی به مرز ابعاد اتمی خواهد رسید، که این حد نهایی، که در آن اندازهٔ یک تک بیت به ابعاد اتمی بسیار نزدیک شده است را می‌توان به معنی حد زمانی قانون مور تلقی نمود. این حد پایان نقشهٔ راه سیلیکونی [۵] نامیده شده است. البته بایستی خاطر نشان ساخت که قانون مور با تهدید فزاینده‌ای به دلیل افزایش توان اتلافی همزمان با کاهش ابعاد قطعات روبرو است، به طوری که با کاهش حجم تراشه‌های کامپیوتری توان اتلافی واحد سطح آنها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲). برای غلبه بر این مشکل باید ولتاژ مصرفی این تراشه‌ها کاهش یابد که این کاهش حد پایینی

[۲] Moore's Law
[۳] CPUs
[۴] Intel
[۵] End of the silicon road map

دارد که در آن نوسانات دمایی قادر به ایجاد اختلال‌های بسیار موثر در ولتاژ و کارکرد سیستم هستند.



شکل ۲

سیستم های مغناطیسی از آن روی که داراي یک درجهٔ آزادی بیشتر نسبت به سیستم های غیرمغناطیسی مشابه خود هستند، اخیرا درزمینهٔ فناوری اطلاعات توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. به ویژه پس از اینکه کشف پدیدهٔ «مقاومت مغناطیسی بزرگ» [۶] گامی بزرگ در حوزهٔ ترابرد اسپینی و انتقال اطلاعات ایجاد نمود، این گونه از سیستم‌ها مورد بررسی‌های فراوانی قرار گرفته اند.

به منظورِ افزایش کارایی‌های چندگانه (مانند انتقال، ذخیره و...) در قطعات الکترونیکی نوین پژوهشگران بر آن شده‌اند که ویژگی دیگری از الکترون را به کار گیرند. این ویژگی که یک مشخصهٔ صرفا کوانتومی است، اسپینِ الکترون است. از آنجایی که اسپین الکترون منحصرا در دو حالت بالا و پایین نسبت به هر جهت داده شدهٔ دلخواه کوانتیزه می‌گردد، این بدان معنی است که اسپین الکترون دارای دو درجهٔ آزادی ذاتی بوده و بنابراین منطق دو—دویی برازندهٔ این ویژگی کوانتومی الکترون خواهد بود و همان گونه که در برخی از پژوهش‌ها به آن اشاره شده است، اسپین الکترون طبیعی‌ترین گزینه برای به کار گیری در کیوبیت‌ها [۷] است. از این روی قطبش اسپینی همانند جریان بار الکتریکی می‌تواند برای انتقال داده‌ها به کار گرفته شود.

مزیت اسپین الکترون نسبت به بار الکتریکی آن در این نکته نهفته است که، اسپین الکترون با یک میدان مغناطیسی خارجی قابل کنترل و دستکاری است، که البته بایستی خاطر نشان ساخت که این ویژگی پیش‌تر در مورد

[۶] Giant Magnetoresistance (GMR)
[۷] Qubits

فناوری حافظه‌های مغناطیسی به کار گرفته شده است. ویژگیِ دیگرِ بسیار ظریف و اساسی اسپین، طولانی بودن همدوسی یا زمان واهلش آن نسبت به حالت بار است [۱]. یک پالس جریانیِ بارالکتریکی به راحتی در اثر پراکندگی یا برخورد با ناخالصی‌ها و ناکاملی‌ها از بین می‌رود، در حالی که قطبش اسپینی جریان مدت بیشتری حفظ می‌شود. این بدان معنی است که الکترون حالت اسپینی خود را دیرتر از حالت بار خود از دست می‌دهد. به زبان مکانیک کوانتومی زمان واهلش عدد کوانتومی اسپین (σ) بزرگتر از زمان واهلش بردار موج الکترون $\vec{k}$ (به عنوان نمونه در یک نیمه رسانا، پیش از ترکیب الکترون با یک حفره) است. از آنجایی که مرتبه برهمکنش‌های الکتریکی بزرگتر از برهمکنش‌های مغناطیسی است، برهمکنش‌های الکتریکی مانند برهمکنش الکترون—الکترون بسیار قوی‌تر از برهمکنش‌های مغناطیسی، نظیر برهمکنش بین اسپین الکترون‌ها خواهد بود، و بنابراین حالتهای اسپینی پایدارتر خواهند بود. مرتبه بزرگی برهمکنش‌های وابسته به بارالکتریکی در حدود eV و مرتبه بزرگی برهمکنش‌های وابسته به اسپین در حدود ۱۰۰meV—۱۰ است. از این روی عدد کوانتومی اسپین که تا کنون اثرات ترابردی آن نادیده گرفته می‌شد، برای انتقال داده‌ها مناسب‌تر به نظر می‌رسد، به ویژه اینکه با داشتن وابستگی انرژی پایین‌تر توانایی حل مشکل اتلاف انرژی تراشه‌های ریز و حفظ پایداری قانون مور را دارا است.

برای اسپین الکترونها مسافت واهلشی تا حدود ۱۰۰μm نیز مشاهده شده است، که امیدهای زیادی را برای یافتن مکانیسمی قدرتمندتر برای انتقال داده‌ها و ساخت نسل جدیدی از قطعات الکترونیک با قابلیت بسیار بالا را ایجاد کرده است و عرصهٔ تحقیقاتی بزرگی را پیش روی پژوهشگران محاسبات کوانتومی [۸] و اسپینترونیک [۹] نهاده است. از جمله اینکه در حال حاضر مطالعه خواص اسپینی در نیمه رساناها موضوع داغ تحقیقات کنونی به شمار می‌رود.

کشف اثر «مقاومت مغناطیسی بزرگ» را می‌توان به عنوان نقطهٔ شروع دانش اسپینترونیک تلقی نمود. این کشف بزرگ که در سال ۱۹۸۸ میلادی به وقوع پیوست، نقطه عطف مهمی در عرصهٔ ترابرد اسپینی به شمار می‌رود. استفاده‌های تجاری که تاکنون از این پدیده به عمل آمده است عبارت است از هدهای ویژهٔ خواندن اطلاعات [۱۰] و «مقاومت مغناطیسی بزرگ» موجود در هارد درایوها یا RAMهای مغناطیسی است، که اساس کار آنها بر پایه رفتار اسپین در فلزات پایه ریزی شده است.

[۸] Quantum Computing
[۹] Spintronic
[۱۰] Read Heads

موفقیت بسیار سریع قطعات الکترونیکی که بر اساس پدیده «مقاومت مغناطیسی بزرگ» طراحی و در حسگرهای [11] به کار رفته در هدهای خواندن اطلاعات استفاده گردیده‌اند، باعث شد که دانش اسپینترونیک به عنوان شاخه برجسته‌ای از علم ماده چگال، که به سرعت در حال رشد و گسترش است معرفی گردد. در واقع موفقیت هارد دیسک‌های تجاری با کارایی بالا، مرهون کشف پدیدهٔ «مقاومت مغناطیسی بزرگ» است و همان گونه که به آن اشاره شد، محققان کنونی در پیِ ساختن قطعات جدیدی هستند که توان فعال ساختن و به کار گیری اسپین الکترون را به عنوان یک عنصر فعال در ترابرد اطلاعات را دارا است. در همین راستا شناخت عامل‌های موثر در ترابرد اسپینی و برهمکنش‌های مغناطیسی امری اجتناب ناپذیر است.

پیشرفتهای تکنولوژی نانو، محققان را به ساخت و بررسی سیستم و قطعات با ابعاد کم قادر نموده است. به علت پاره‌ای از ویژگی‌های کوانتوم مکانیکی این گونه از سیستم‌ها، خواص ترابردی متفاوتی نسبت به سیستم‌های کلاسیک برای آنها انتظار می‌رود. این یافته‌ها نظر بسیاری از پژوهشگران را برای یافتن پدیده‌های ترابردی بکر و نوینی در زمینه سیستم‌های کم بعد، و مخصوصا گونه مغناطیسی آنها، به خود جلب نموده است. زیرا این گونه از سیستم‌ها دارای درجه آزادی اسپینی نیز هستند.

ترابرد الکترون در ساختارهای ریز کوانتومی از جمله سیستم های مزوسکوپیک [12] و نانو ساختارها ویژگیهای بسیار متفاوتی نسبت به ساختارهای کلاسیکی دارد و پدیده‌های نوینی برای آن انتظار می‌رود. در این گونه از سیستم‌ها اثرات کوانتومی مانند کوانتیده شدن ترازها در اثر مقید شدن سیستم و یا به علت وجود میدان مغناطیسی، تداخل‌های کوانتومی، برهمکنش قوی الکترون–الکترون در کنار مکانیسم های واهلش دیگر، ترابرد الکترونی را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

در سیستم‌های مغناطیسی همان طور که شرح آن در فصل نخست خواهد آمد، پراکندگی وابسته به اسپین سهم قابل توجهی در مقاومت الکتریکی نمونه دارد. ترابرد در سیستم‌های مغناطیسی می‌تواند تحت تاثیر پارامترهای متعددی قرار گیرد، که یکی از آنها نحوه وابستگی مکانی مغناطش در سیستم‌هایی با مغناطش نا هم راستا مانند دیواره‌های مغناطیسی است.

پژوهش‌های اخیر بیانگر این نکته است که رسانایی الکتریکی علاوه بر مکانیسم‌های واهلش شناخته شده، به

[11] Sensors
[12] Mesoscopic systems

ساختار و جهت گیریِ مغناطش درون ماده نیز وابستگی دارد، به گونه‌ای که الکترون‌های رسانش موازی یا پاد موازی با مغناطش درون ماده مقاومت های الکتریکیِ مختلفی را از خود نشان خواهند داد. این امر به نوبه خود موجب تغییر قطبش اسپینی به هنگام گذر از چند لایه‌ها خواهد شد. قطبش اسپینی یاد شده نقش انتقال اطلاعات در ادوات الکترونیکی احتمالی آینده را خواهد داشت.

یکی از مشخصه‌های بسیار مهم در تعیین کارایی یک قطعهٔ اسپینترونیکی مقاومت مغناطیسی [۱۳] آن است. مقاومت مغناطیسی یک نمونه عبارت است از تغییر مقاومت آن تحت تاثیر میدان مغناطیسیِ خارجی، برهمکنش‌های میکروسکوپیکِ درونی و یا حتی به دلیل جهت گیری‌های گوناگون اسپین های جایگزیده است. این کمیت در خواندن داده‌های موجود بر روی دیسک‌های سخت دارای اهمیت است. به این ترتیب که مکان‌هایی که داده‌ها ثبت گردیده‌اند به صورت ناحیه‌هایی کوچک از اکسید آهن یا کروم با جهت گیری خاصی از مغناطش مشخص شده‌اند. یک هد خواننده بایستی به طریقی این جهت گیری را که متناظر با یک مولفه ۱ یا۰ دو—دویی است، در لایهٔ زیرین خود تشخیص دهد. نحوه دسترسی به این جهت گیری با استفاده از این ویژگی به دست خواهد آمد که جهت گیری‌های موازی یا پاد موازی اسپین‌های جایگزیده نسبت به اسپین الکترون رسانش، مقاومت مغناطیسی متفاوتی را نسبت به جریان ورودی هد نشان خواهند داد. پس از کشف پدیدهٔ «مقاومت مغناطیسی بزرگ» که به مقاومت‌های مغناطیسی نسبتا بزرگتری اطلاق می‌شد، این پدیده برای فرایند خواندن داده‌ها مناسب‌تر تشخیص داده شد. در مواردی «مقاومت مغناطیسی بزرگ»، ۲۰۰ برابر مقاومت‌های مغناطیسی معمولی بوده است (که البته به همین دلیل بزرگ [۱۴] نامیده شده است). شرکت آی‌بی‌ام [۱۵] به سرعت دریافت که با استفاده از اثر «مقاومت مغناطیسی بزرگ» می‌توان جهت گیری مغناطش حوزه‌های مغناطیسی کوچکتری را آشکار نمود. توسعهٔ این فناوری به افزایش ظرفیت هارد دیسک‌ها از ۱ به حدودِ ۲۰ گیگا بایت در سال ۱۹۹۷ انجامید. در همین راستا در سال ۲۰۰۲ میلادی شرکت فوجیتسو [۱۶] ادعا نمود که بر پایهٔ فناوری «مقاومت مغناطیسی بزرگ» در مد عمود بر صفحه موفق به ساخت هارد دیسک‌های ثبت/ضبط داده‌ها با ظرفیت ۳۰۰ گیگا بایت بر اینچ مربع شده است.

بجز پدیدهٔ «مقاومت مغناطیسی بزرگ» محور دیگری که پژوهشگران برای توسعه قطعات اسپینترونیک پیش

[۱۳] Magnetoresistance (MR)
[۱۴] Giant
[۱۵] IBM
[۱۶] Fujitsu

رو گرفته‌اند روشهایی برای تولید، کنترل و استفاده از قطبش اسپینی در فرایندهای ترابرد به شکل دینامیک در نیمه رساناهایِ ساختارهایِ چند لایه‌ای است. در صورت امکان ساخت و بهره گیری از ویژگیهای چنین قطعاتی، از آنها می‌توان به عنوان دستگاه‌های چند منظوره نیز استفاده نمود. زیرا علاوه بر قابلیت‌های اسپینترونیکی شامل ویژگی‌های نیمه رساناهای متداول نیز خواهند بود.

از جملهٔ عوامل تاثیر گذار در مقاومت مغناطیسی یک سیستم مشخص، وابستگی مکانی مغناطش موضعی در ساختارهایی مانند دیواره‌های مغناطیسی است که بین لایه‌هایِ فرومغناطیس با جهت گیری مغناطش متفاوت شکل می‌گیرند. نکته قابل توجه در سهم مقاومت مغناطیسی دیواره‌های مغناطیسی این است که، این سهم در آزمایش پاره‌ای از نمونه‌ها منفی گزارش شده است [۲]. همچنین در پاره‌ای از نمونه‌ها نیز آزمایشها دلالت بر مثبت بودن این سهم حتی در حد مقاومت‌های مغناطیسی بسیار بالا از مرتبه ۳۰۰۰ درصد دارد [۵۱]. مقاومت مغناطیسی منفی برای نمونه‌های یاد شده به معنی کاهش یافتن مقاومت الکتریکی سیستم در حضور دیوارهٔ مغناطیسی نسبت به حالتی است که این دیواره وجود ندارد.

هر چند که علامت مقاومت مغناطیسی دیوارهٔ مغناطیسی را بر اساس برخی از مدل‌های موجود در سیستم‌های کم بعد به ضخامت لایه و یا مقدار نسبی زمان‌های واهلش اسپین‌های اکثریت و اقلیت در رژیم نیمه کلاسیک وابسته دانسته‌اند، تاکنون مدل واحد نوینی برای توضیح هر دو نوع مقاومت مغناطیسی دیواره در تمام رژیم‌ها از جمله رژیم بالستیک وجود ندارد، و انتظار آن می‌رود که مکانیسم‌های متفاوتی در تعیین علامت مقاومت مغناطیسی دیواره نقش داشته باشند. در رساله حاضر سعی بر آن شده است که مدلی برای فهم و توضیح هر دو حالت مقاومت مغناطیسی دیواره در رژیم نیمه کلاسیک ارائه شود. در همین راستا به اثر دیواره‌ها در مقاومت مغناطیسی سیستم‌ها در حضور برخی از برهمکنش های داخلی و خارجی خواهیم پرداخت.

ترتیب بندی رساله بدین گونه است که ابتدا در فصل اول به مفاهیم اسپینترونیک و مکانیسم‌های واهلش و نافازی (به عنوان عوامل موثر در تعیین مقاومت مغناطیسی سیستم‌ها) اشاره خواهیم نمود. سپس در فصل دوم به بررسی روش استاتیک یا ماتریس انتقال در محاسبه خواص ترابردی ساختارهای مغناطیسی نا هم راستا و دیواره‌های مغناطیسی خواهیم پرداخت. در فصل سوم اثر میدان مغناطیسی در مقاومت یک دیواره مغناطیسی از نوع نیل [۱۷] درون یک سیم کوانتومی را بررسی خواهیم نمود، و چگونگی امکان شرکت برهمکنش زیمن [۱۸] را در

[۱۷] Néel

مقاومت مغناطیسی دیواره (به عنوان یک ساختار مغناطیسی نا هم راستا) نشان خواهیم داد. در فصل چهارم این رساله اثر برهمکنش راشبا [۱۹] در مقاومت مغناطیسی این نوع دیوارهٔ مغناطیسی برای یک سیستم دو بعدی و هندسه‌های CIW و CPW محاسبه خواهد شد. نتایج این پژوهش بیانگر این نکته است که در رژیم نیمه کلاسیک تحت شرایط ویژه‌ای که با قدرت نسبی برهمکنش‌های واهلشی معین می‌گردد، می‌توان هر دو گونهٔ مقاومت مغناطیسی مثبت و منفی را برای دیواره مغناطیسی به دست آورد. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که مقاومت دیواره مغناطیسی به طور موثر وابسته به کایرالیتی [۲۰] یا جهت محور دوران دیواره مغناطیسی نسبت به جهت میدانهای الکتریکی یا مغناطیسی خارجی است.

نتایج به دست آمده از این رساله تاکنون در کنفرانس IEEE INTERMAG (2005) NAGOYA JAPAN و ژورنال‌های EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B و PHYSICAL REVIEW B پذیرفته شده است.

[۱۸] Zeeman
[۱۹] Rashba
[۲۰] Chirality

فصل ۱

مفاهیم اسپینترونیک

۱.۱ پیش گفتار

دانش اسپینترونیک از حوزه‌های چندگانه‌ای تشکیل یافته است که موضوع محوری در آنها کنترل درجهٔ آزادی اسپین الکترونهای رسانش یا اسپین‌های جایگزیده در سیستم‌های حالت جامد است. کنترل اسپین بنابراین مستلزم کنترل جمعیت و فاز اسپینِ هنگردی [۱] از ذرات و یا ایجاد تغییر همدوس اسپین در سیستمی با یک یا تعدادی اندک از زیر سیستم‌های اسپینی است. هدف این علم درک برهمکنش‌های اسپین ذره با محیط حالت جامدی اطراف آن است. مطالعات بنیادی در این شاخه شامل بررسی ترابرد اسپین الکترون در ماده همچنین دینامیک و واهلش اسپین است [۴]، و سوالاتی که در این راستا بایستی پاسخی در خور به آنها یافت عبارتند از الف) موثرترین راه برای قطبیده کردن یک سیستم اسپینی چیست؟ ب) تا چه مدتی یک سیستم توان نگهداری از جهت‌گیری اسپین خود را دارد و ج) چگونه می‌توان اسپین را آشکار سازی کرد؟

تولید قطبش اسپینی به معنی تولید جمعیت اسپینی غیر تعادلی [۲] است. این کار به چند روش امکان پذیر است. روش پیشین متداول برای جهت دهی به اسپین استفاده از مکانیسم‌های اپتیکی بود، بدین ترتیب که فوتون‌هایی با قطبش دایروی با انتقال اندازهٔ حرکت زاویه‌ای خود به الکترونها باعث ایجاد قطبش اسپینی در سیستم می‌گردیدند. اما برای مقاصد کاربردی در قطعات الکترونیک تزریق الکتریکی اسپین مطلوب‌تر است. در این روش یک الکترود مغناطیسی به نمونه متصل می‌گردد. هنگامی که جریان، الکترون‌های قطبیده را از الکترود بیرون می‌راند انباشت اسپینیِ [۳] غیر تعادلی در سیستم روی خواهد داد. انباشت اسپینیِ غیر تعادلی خود، نتیجه مستقیم عدم تقارن اسپینی [۴] در سیستم است. زیرا در یک سیستم مغناطیسی دو مولفه اسپینی الکترون در ترابرد کاملا متفاوت عمل می‌کنند، که این خود به دلیل متفاوت بودن مقدار چگالی این دو نوع حامل یا به دلیل تفاوت موبیلیتی آنها است. علت این امر را بایستی شکافتگی تراز ایجاد شده بوسیله میدان تبادلی درون فرومغناطیس دانست. بنابراین به وضوح می‌توان دریافت که اختلاف چگالی حالتها در سطح فرمی، به دلیل این شکافتگی، به اختلاف تعداد الکترونهای کانالهای اسپینی مجزا (که در رسانایی سیستم شرکت می‌کنند) و تفاوت رفتار حاملها بر حسب اسپین آنها خواهد انجامید. این تفاوت منحصر به سیستم‌های مغناطیسی مانند مواد فرومغناطیس و مواد

[۱] Ensemble
[۲] Nonequilibrium Spin Population
[۳] Spin Accumulation
[۴] Spin Asymmetry