بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهرکرد
دانشکده علوم پایه

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

بررسی رسانش وابسته به اسپین در نانو سیم‌های کوانتومی در حضور میدان مغناطیسی

استاد راهنما:
دکتر محمد مردانی

استاد مشاور:
دکتر حسن ربانی

پژوهشگر:
صادق سلیمانی

مهرماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

چکیده

از زمان کشف پدیده‌هایی مانند مقاومت مغناطیسی بزرگ و مقاومت مغناطیسی تونل‌زنی در چند لایه‌های مغناطیسی، تحقیقات وسیعی بر روی مواد مغناطیسی و لایه‌های نازک مغناطیسی انجام شده است. تلاش فیزیکدان‌ها در این زمینه باعث ساختن نانو ساختارها و چند لایه‌های مغناطیسی و به‌کار بردن آن‌ها در فناوری، صنایع حس‌گرها و ثبت کننده‌ها شده است. مطالعه ترابرد وابسته به اسپین در نانوساختارها و چند لایه‌ها به ما در طراحی ادوات الکترونیکی وابسته به اسپین کمک می‌کند. به این شاخه از فیزیک، اسپینترونیک می‌گویند. در این تحقیق، به تأثیر میدان مغناطیسی روی رسانش الکتریکی یک سیم و نانو ساختار مغناطیسی به کمک تابع گرین در رهیافت بستگی قوی می‌پردازیم.

برای مطالعه رسانش در نانو سیم، چند آرایش متفاوت از گشتاورهای مغناطیسی درون یک سیم مغناطیسی متصل به دو هادی غیرمغناطیسی نیمه متناهی در نظرگرفته شد، که نتایج نشان می‌دهد که رسانندگی قویاً به آرایش گشتاورهای مغناطیسی در یکایاخته وابسته است. همچنین با در نظر گرفتن یک سیم که از اتم‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی تشکیل شده است و دارای گشتاورهای مغناطیسی متفاوت است، می‌توان صافی اسپینی نانو-مقیاس را طراحی کرد. در ادامه به مطالعه‌ی تحلیلی رسانش در یک نانو ساختارهای استخوان ماهی و شانه-مانند در حضور میدان مغناطیسی پرداخته شد، بررسی نتایج نشان می‌دهد که رسانندگی قویاً به آرایش گشتاورهای مغناطیسی در نانو ساختار، انرژی جهش بین اتم اصلی و فرعی و اندازه میدان مغناطیسی وابسته است. در نهایت مطالعه رسانش در نانو بلور مشخص می‌کند که جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی لایه‌های مغناطیسی، رسانندگی‌های متفاوتی را نشان می‌دهند. درحضور میدان مغناطیسی رسانندگی کاهش می‌یابد و حالت پله‌ی آن از بین می‌رود و آن به صورت پیوسته تغییر می‌کند، زاویه قرار گرفتن گشتاورهای مغناطیسی تأثیر زیادی در ترابرد الکترونی دارد.

کلید واژه– نانو سیم، اسپینترونیک، مقاومت مغناطیسی بزرگ، مقاومت مغناطیسی تونل‌زنی، صافی اسپینی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه

۱-۱- فناوری نانو ۵
۱-۲- اسپین الکترون ۶
۱-۳- اثر مغناطو مقاومت بزرگ ۶
۱-۴- وضعیت جاری وسایل اسپینترونیکی ۷
۱-۵- اساس کار وسایل اسپینترونیکی ۱۲

فصل دوم- بررسی رسانش الکترون و تولید پرتوهای الکترونی قطبیده

۲-۱- فیزیک مزوسکوپیک ۱۳
۲-۲- تولید پرتوهای الکترونی قطبیده شده اسپینی ۱۴
۲-۲-۱- جداسازی حالت‌های اسپین الکترون ۱۵
۲-۲-۲- نیمه‌رسانا GaAs به صورت منبع الکترونی قطبیده شده ۱۵
۲-۳- توضیح منطقی الکترون‌های قطبیده شده اسپینی ۱۶
۲-۳-۱- تابع موج اسپین ۱۶
۲-۳-۲- قطبش الکترون بر حسب قواعد اسپین پاؤلی ۱۷
۲-۳-۳- پرتو الکترونی قطبیده ۲۰

فصل سوم- تأثیر میدان مغناطیسی در رسانش نانو سیم‌ها

۳-۱- بررسی رسانش الکتریکی یک نقطه‌ی کوانتومی در یک میدان مغناطیسی ۲۲
۳-۱-۱- محاسبه‌ی برهم‌کنش میدان مغناطیسی با اسپین ۲۲
۳-۱-۲- محاسبات کلی رسانندگی به کمک تابع گرین برای نانو سیم ۲۳
۳-۱-۳- بررسی ترابرد الکترونی اسپینی در یک نقطه‌ی کوانتومی ۲۵
۳-۲- در نظر گرفتن چند آرایش متفاوت از گشتاورهای مغناطیسی در نانو سیم ۲۹
۳-۲-۱- محاسبه‌ی رسانش الکتریکی و نتایج ۲۹
۳-۲-۲- نتیجه‌گیری ۳۵
۳-۳- توصیف مدلی برای طراحی ابزار فیلتر اسپینی ۳۵
۳-۳-۱- محاسبه‌ی رسانش و قطبش ۳۵
۳-۳-۲- نتیجه‌گیری ۴۰

فصل چهارم- تأثیر میدان مغناطیسی روی رسانش الکتریکی نانو ساختار استخوان ماهی و نانو بلور

۴-۱- توصیف مدل نانو ساختار استخوان ماهی مغناطیسی ۴۱

۴-۱-۱- محاسبه‌ی رسانش و نتایج ۴۳
۴-۱-۲- بررسی ترابرد الکترونی اسپینی در نانو ساختار شانه-مانند ۴۸
۴-۲- بررسی ترابرد الکترونی اسپینی یک نانو بلور با لایه‌های مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی ۵۰
۴-۲-۱- معرفی مدل ۵۰
۴-۲-۲- محاسبه‌ی رسانش الکتریکی ۵۱
۴-۳- بررسی رسانندگی حلقه بنزن در حضور ناخالصی مغناطیسی ۵۵
۴-۴- نتیجه‌گیری ۵۸
نتایج نهایی ۵۹
پیشنهادها ۶۰
مراجع ۶۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- طرحواره‌ی دو لایه پاد فرومغناطیس ۷
شکل ۲-۱- طرحواره‌ی ساز و کار به دست آوردن الکترون‌های قطبیده شده از منبع GaAs ۱۵
شکل ۳-۱- طرحواره‌ی دستگاه مغناطیسی متصل به دو سیم ۲۳
شکل ۳-۲- نمودار ضریب عبور $T_{\uparrow\uparrow}$ یا $T_{\downarrow\downarrow}$ بر حسب پارامتر تعویض اسپینی (تک ذره) ۲۷
شکل ۳-۳- نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی الکترون ورودی (تک ذره) ۲۸
شکل ۳-۴- نمودار ضریب عبور بر حسب زاویه θ (تک ذره) ۲۸
شکل ۳-۵- طرحواره‌ی یکاياخته‌های مختلف در نانو سیم ۲۹
شکل ۳-۶- نمودار ضریب عبور $T_{\uparrow\uparrow}$ برحسب انرژی برای آرایش شکل ۳-۵- الف (نانو سیم) ۳۰
شکل ۳-۷- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش۳-۵- ب (نانو سیم) ۳۱
شکل ۳-۸- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش۳-۵- ج (نانو سیم) ۳۲
شکل ۳-۹- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش۳-۵- ج (نانو سیم-درحد پرش اتصال ضعیف) ۳۳
شکل ۳-۱۰- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش شکل۳-۵- د (نانو سیم) ۳۴
شکل ۳-۱۱- نمودار ضریب عبوربرحسب زاویه برای آرایش شکل۳-۵- د (نانو سیم) ۳۴
شکل ۳-۱۲- طرحواره‌ی دستگاه فیلتر اسپینی ۳۵
شکل ۳-۱۳- نمودارهای ضریب عبور الکترونی برحسب انرژی الکترون ورودی در دستگاه فیلتر اسپینی ۳۶
شکل ۳-۱۴- نمودار درجه قطبش بر حسب انرژی الکترون ورودی ۳۷
شکل ۳-۱۵- نمودار میانگین چگالی حالت‌های بر حسب انرژی ۳۸
شکل ۳-۱۶- نمودارهای ضریب عبور الکترونی برحسب انرژی دستگاه فیلتر اسپینی (حد پرش اتصال ضعیف) ۳۸
شکل ۳-۱۷- نمودار درجه قطبش بر حسب انرژی الکترون ورودی (در حد پرش اتصال ضعیف) ۳۹
شکل ۳-۱۸- نمودار میانگین چگالی حالت‌ها بر حسب انرژی (در حد پرش اتصال ضعیف) ۳۹
شکل ۴-۱- طرحواره‌ی ساختار استخوان ماهی مغناطیسی متصل به دو سیم غیرمغناطیسی ۴۱
شکل ۴-۲- نمایش ساختار استخوان ماهی ۴۲
شکل ۴-۳- طرحواره‌ی یکاياخته‌های مختلف در نانو ساختار استخوان ماهی ۴۳
شکل ۴-۴- نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی برای نانو ساختار استخوان ماهی غیرمغناطیسی ۴۴
شکل ۴-۵- نمودار ضریب عبور $T_{\uparrow\uparrow}$ برحسب انرژی برای آرایش شکل۴-۳- الف (ساختار استخوان ماهی) ۴۵
شکل ۴-۶- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش شکل۴-۳- ب (ساختار استخوان ماهی) ۴۵
شکل ۴-۷- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش شکل۴-۳- ج (ساختار استخوان ماهی) ۴۶
شکل ۴-۸- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای آرایش شکل۴-۳- ج (تغییر ترم پرش اتم اصلی و فرعی) ۴۶
شکل ۴-۹- نمودار ضریب عبور برحسب پارامتر تعویض اسپینی برای آرایش شکل۴-۳- ج ۴۷
شکل ۴-۱۰- نمودار ضریب عبور برحسب زاویه برای آرایش شکل ۴-۳- ج ۴۷
شکل ۴-۱۱- طرحواره‌ی دستگاه شانه- مانند مغناطیسی متصل به دو سیم ۴۸
شکل ۴-۱۲- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای نانو ساختار شانه- مانند غیرمغناطیسی ۴۹
شکل ۴-۱۳- نمودار ضریب عبور برحسب انرژی شانه- مانند مغناطیسی ۴۹
شکل ۴-۱۴- ساختار نانو بلور متصل به دو هادی غیرمغناطیسی نیمه متناهی ۵۱
شکل ۴-۱۵- نمایش آرایش فرو مغناطیس، پاد فرومغناطیس و فری مغناطیس ۵۱

شکل ۴-۱۶- نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی الکترون ورودی برای نانو بلور غیرمغناطیسی ۵۳
شکل ۴-۱۷- نمودار ضریب عبور بر حسب انرژی الکترون ورودی برای نانو بلور مغناطیسی ۵۴
شکل ۴-۱۸- نمودار ضریب عبور بر حسب زاویه (نانو بلور مغناطیسی) ۵۴
شکل ۴-۱۹- طرحواره‌ی حلقه بنزن با دو اتم مغناطیسی در دو انتها ۵۵
شکل ۴-۲۰- طرحواره‌ی تبدیل شدن یک حلقه بنزن به دو اتم ۵۵
شکل ۴-۲۱ - نمودار ضریب عبور برحسب انرژی برای حلقه بنزن ۵۶
شکل ۴-۲۲- نمودار ضریب عبور برحسب زاویه برای حلقه بنزن ۵۷
شکل ۴-۲۳- نمودار ضریب عبور برحسب پارامتر تعویض اسپینی برای حلقه بنزن ۵۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱- فناوری نانو

فناوری نانو واژه‌ای است کلی، که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. معمولاً منظور از مقیاس نانو ابعادی در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. اولین جرقه فناوری نانو در آن زمان که هنوز به این نام شناخته نشده بود در سال ۱۹۵۹ زده شد. در این سال ریچارد فاینمن[1] طی یک سخنرانی با عنوان «در مقیاس پایین فضای بزرگی وجود دارد» ایده‌ی فناوری نانو را مطرح ساخت، و پیش‌بینی کرد که روزی خواهد رسید که تمام محتوای کتاب‌های کتابخانه‌های بزرگ دنیا را بتوان درون وسیله‌ی به اندازه‌ی یک ذره‌ی غبار جای داد. وی این نظریه را ارائه داد که در آینده‌ای نزدیک می‌توان مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دست‌کاری کرد. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط کی‌اریک درکسلر[2] در کتابی تحت عنوان: «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری‌نانو» مطرح شد، وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله‌ی دکترای خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آن را در کتابی تحت عنوان «نانو دستگاه‌ها ماشین‌های مولکولی چگونگی ساخت و محاسبات آن‌ها» توسعه داد و ایده‌ی ساخت ماشین‌ها و ابزار مکانیکی از اتم‌های منفرد را مطرح کرد، چنین ماشین‌هایی در حقیقت ملکول‌های شبه مصنوعی بودند که اتم به اتم ساخته می‌شدند و ابعاد هر ملکول حاصل ممکن است که از نانو متر هم تجاوز نکند و همین ایده‌ی دست‌کاری اتم‌ها بود که جوهره‌ی فناوری نانو را شکل می‌داد[۱].

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای توسط فیزیکدان‌ها بر روی مواد انجام شده است و مهندسان نتایج حاصل از آن را در جهت تعمیم و به کارگیری در فناوری استفاده می‌کنند. یکی از این پیشرفت‌ها، دانش الکترونیک است که بر اساس فناوری حالت جامد و کوچک‌سازی تجهیزات الکترونیکی، موجب پیدایش قلمرو

[1] Richard Feynman
[2] K. E Drexler

تازه‌ای به نام میکرو الکترونیک گردیده است. هدف اساسی این دانش، تولید مدارها و ادوات الکترونی کوچک است که از ضریب اطمینان بالایی برخوردار بوده و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشند. تلاش در جهت رسیدن به این هدف باعث به وجود آمدن فناوری نانو شده است که به عنوان یک علم امروزی، حوزه‌ی گسترده‌ای از رشته‌های علمی را در بر گرفته، به طوری که روز به روز تأثیرات فزاینده خود را بر روی صنایع بیشتر می‌کند. این فناوری جدید به معنی کنترل مواد در مقیاس نانو یا به عبارتی تغییر ساختارهای نانومتری، که بتوان خواص مواد را تغییر داده و مواد جدیدی با خواص دلخواه در صنایع تولید کرد. نانو ساختارها از دو حیث مهم هستند:

الف) ابعاد نانومتری قابل مقایسه با طول موج الکترون در یک جامد هستند و در ساختارهای با ابعاد کم مانند ابرشبکه‌ها، دستگاه‌های چاه کوانتومی، لایه‌های خیلی نازک مغناطیسی و غیرمغناطیسی، اثرات تجربی و نظری جالبی وجود دارد.

ب) وقتی الکترون‌ها در ابعاد قابل مقایسه با طول موجشان محبوس می‌شوند نوارهای انرژی پیوسته توده ماده به حالات چاه کوانتومی گسسته تبدیل می‌شوند.

فناوری نانو در آینده‌ای نزدیک، بسیاری از شاخه‌های علوم را تحت پوشش قرار می‌دهد. با ظهور این علم جدید، الکترونیک نیز رشد کرد و دانشمندان برای رسیدن به اهدافشان در تولید ادوات نانو الکترونیک، تحقیق وسیعی را انجام داده‌اند. انتظار می‌رود که نانو الکترونیک بتواند دنیای محاسبه و فناوری اطلاعات را متحول سازد. مزیت فناوری نانو در علم الکترونیک، توانایی ساخت قطعات در مقیاس نانو (به وسیله نانو لوله‌های کربنی یا دیگر طرح‌های مولکولی) است به طوری که، بزرگ‌ترین رویا در پیوند نانو الکترونیک، الحاق مستقیم ادوات الکترونیکی به مولکول‌ها است. آخرین بازبینی در الکترونیک، الکترونیک مغناطیسی است که الکترونیک اسپینی یا اسپینترونیک نیز نامیده می‌شود [۲و۳].

۱-۲- اسپین الکترون

اسپین الکترون کمیتی ذاتی است، عدد کوانتومی اسپین ۱/۲ است، بزرگی اندازه حرکت زاویه‌ی اسپینی هرگز تغییر نمی‌کند، این اندازه حرکت زاویه‌ی دوران را به هیچ طریقی نمی‌توان تغییر داد زیرا مانند جرم یا بار الکترون خاصیت ذاتی آن است. اسپینترونیک یا الکترونیک اسپینی علم استفاده از اسپین الکترون‌ها در الکترونیک است. در اسپینترونیک، حالت بالا و پایین اسپینی به جای صفر و یک یا مثبت و منفی استفاده می‌شود و در آینده تحولی در دستگاه‌های میکرو الکترونیکی به‌وجود خواهد آورد. وسایل الکترونیکی امروزی بر مبنای انتقال دهنده‌های بار الکتریکی، الکترون‌ها و در یک نیمه هادی مانند سیلیکون ایجاد شده است، در سیلیکون معمولاً تعداد الکترون‌هایی که دارای اسپین بالا یا پایین هستند، برابرند. اکنون فیزیکدان‌ها سعی دارند برای ایجاد نسلی جدید و جالب از ادوات اسپینترونیکی، به جای بار الکترون از اسپین آن‌ها استفاده کنند. این وسایل جدید کوچک‌تر، تطبیق پذیرتر و قوی‌تر از وسایل حاضر هستند که بر مبنای تراشه‌های سیلیکونی و قطعات الکترونیکی قرار دارند [۴].

۱-۳- اثر مغناطو مقاومت بزرگ

بعد از کشف فرضیه وجود خاصیت اسپین برای الکترون، اولین اثر ترابرد مربوط به اسپین در سال

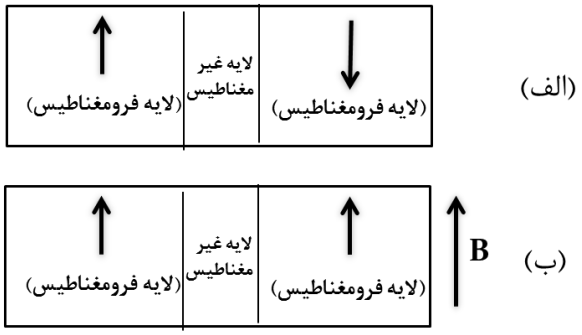
۱۹۶۴ مشاهده شد که در آن مقاومت الکتریکی یک ماده فرومغناطیسی به زاویه نسبی بین مغناطش و راستای جریان بستگی داشت. ریشه‌ی فیزیکی این اثر، که مقاومت مغناطیسی غیرعادی نامیده می‌شود مربوط به پاشندگی نوار است. از این اثر در حس‌گرهای مغناطیسی استفاده می‌کنند. در سال ۱۹۷۵، وسیله‌ای به نام اتصال تونل‌زنی مغناطیسی طراحی شد که از دو الکترود فرو مغناطیس جداشده با یک عایق نازک تشکیل شده بود. بعد از مدتی، بایبیچ[1] در سال ۱۹۸۸ پدیده‌ای به نام مقاومت مغناطیسی بزرگ (GMR[2]) در چند لایه‌ای‌های متشکل از دو فلز فرو مغناطیسی جدا شده با فلز غیرمغناطیسی به دست آورد. ریشه فیزیکی این اثر به پراکندگی از سطح مشترک دو ماده و همچنین توده ماده مربوط می‌شود. GMR در فیلم نازک مصنوعی تشکیل شده از لایه‌های فرومغناطیسی و غیر مغناطیسی مشاهده شده است. کمترین مقاومت در ماده وقتی است که گشتاورهای مغناطیسی در لایه‌های فرومغناطیس در یک جهت‌اند و بیشترین مقاومت وقتی است که آن‌ها در خلاف جهت هم هستند. جریان هم می‌تواند عمود بر سطوح میانی و هم موازی با سطوح میانی باشد. مواد جدید در دمای اتاق به کار گرفته می‌شوند و وقتی که در میدان‌های مغناطیسی کوچک قرار بگیرند، تغییرات قابل قبولی در مقاومت ویژه مشاهده می‌شود [۵و۶].

در شکل ۱-۱ آرایش ماده‌ای که دارای دو لایه فرومغناطیس و یک لایه غیرمغناطیسی هست، نشان داده شده است. وقتی یک میدان مغناطیسی خارجی به‌کار برده شود، گشتاورهای مغناطیسی در جهت میدان قرار می‌گیرند. در آرایش ۱-۱- الف مقاومت الکتریکی از آرایش ۱-۱- ب خیلی کوچک‌تر است. این تغییرات شدید در مقاومت به صورت اثر مغناطو مقاومت بزرگ شناخته شده است، که به صورت رابطه ریاضی زیر نوشته می‌شود

$$R = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}, \qquad (۱-۱)$$

که در این رابطه R_{AP} و R_P به ترتیب مقاومت الکتریکی ماده‌ای است که آرایش آن مطابق آرایش ۱-۱-الف و ۱-۱- ب است. در حالت استاندارد، چون $R_{AP} \gg R_P$ است، مغناطو مقاومت بزرگ به سمت بی‌نهایت می‌رود. تعریف دیگر مغناطو مقاومت بزرگ به صورت زیر است

$$R' = \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP}}, \qquad \Rightarrow 0 \le R' \le 1. \qquad (۲-۱)$$



شکل۱-۱- طرح‌واره‌ی دو لایه فرومغناطیس که بین آن‌ها یک لایه غیرمغناطیسی است.

[1] Baibich
[2] Gaint Magnetoresistive

در برخی مواد اثر مغناطو مقاومت بزرگ وارون یعنی حالتی که $R_P > R_{AP}$، مشاهده می‌شود. بنابراین اثر مغناطو مقاومت بزرگ بیان‌گر این موضوع است که اسپین یک الکترون نقش مهمی در پدیده انتقال دارد[۴].

۱-۴- وضعیت جاری وسایل اسپینترونیکی

استفاده اسپین در وسایل الکترونیکی پتانسیل‌های مفیدی در افزایش سرعت پردازشگر اطلاعات، کاهش توان مصرف الکتریکی و افزایش تراکم مدارهای مجتمع در مقایسه با وسایل مرسوم است. با در نظر گرفتن اسپین در وسایل نیمه‌رسانا بایستی موضوعاتی از قبیل ترابرد، کنترل، دست‌کاری و کشف قطبش اسپینی و جریان‌های قطبیده شده اسپینی حل شود. پیشرفت‌های اخیر در مهندسی مواد جدید وعده‌های از تحقق وسایل اسپینترونیکی را در آینده نزدیک می‌دهد[۵و۶].

قبلاً اسپین الکترون در الکترونیک مبتنی بر بار، نادیده گرفته می‌شد، فناوری به نام اسپینترونیک (الکترونیک مبتنی بر اسپین یا الکترونیک ترابرد اسپین) پدیدار شد که دیگر بار الکترون حامل نیست، بلکه این اسپین الکترون است که اطلاعات را حمل می‌کند و آن فرصت‌های برای نسل جدید وسایل میکرو الکترونیکی استاندارد با اثرهای وابسته به اسپین ناشی از برهم‌کنش حامل‌ها و ویژگی‌های مغناطیسی مواد را ارائه می‌دهد. روش‌های رایج در استفاده اسپین مبتنی بر جهت‌گیری اسپین (بالا و پایین) و جهت مغناطش فیلم فرو مغناطیسی است. در نظر گرفتن درجه آزادی اسپین در الکترونیک به طور مؤثر عملکرد و ظرفیت تولیدات الکترونیکی را افزایش می‌دهد. الکترونیک اسپینی یکی از شاخه‌های جوان علم نانو است. گسترش سریع این علم مانند شاخه‌های جدید الکترونیک، الکترونیک مولکولی، بیو الکترونیک و غیره، ریشه در کوچک‌سازی عناصر فعال (ترانزیستور و سلول‌های حافظه‌ای) دارد که منجر به ساختن تراشه‌هایی کوچک‌تر از ۱۰۰ نانو متر شده است[۵و۶].

هدف اصلی اسپینترونیک به دست آوردن دانش پدیده‌های وابسته به اسپین و به کار بردن آن‌ها برای کاربردهای بیشتر و جدیدتر است. در رساناها، جهت‌گیری اسپین‌ها کاتوره‌ای هستند. بنابراین، هیچ سهمی در خاصیت مغناطیسی خالص ندارند، ولی در مواد مغناطیسی مانند آهن، نیکل و کبالت که در قلب وسایل اسپینترونیک جای دارند، جهت گیری اسپین‌ها در یک راستای خاص است به طوری که در یک میدان مغناطیسی، الکترون‌های با اسپین بالا و پایین انرژی‌های مختلفی دارند، یعنی در نوار انرژی، شکافتگی وجود دارد. با اضافه کردن درجه آزادی اسپین به الکترونیک معمولی که مبتنی بر بار الکترون است، اسپینترونیک به وجود می‌آید. محققان شاخه‌ی اسپینترونیک امیدوارند که با درک رفتار اسپین الکترون در مواد بتوانند مطالب تازه و اساسی درباره فیزیک حالت جامد به دست آورند که منجر به تولید جدیدی از وسایل الکترونیکی مبتنی بر شارش اسپین علاوه بر شارش بار خواهد شد. در واقع رویای اسپینترونیک اجتماع یکپارچه‌ای از الکترونیک، اپتو الکترونیک و مگنتو الکترونیک است. یک دریچه اسپینی، یک وسیله مبتنی بر GMR، دارای دو لایه فرو مغناطیسی (آلیاژهای از نیکل، کبالت و آهن) است که بین آن‌ها یک لایه‌ی فلزی نازک غیر مغناطیسی (معمولاً مس) قرار دارد. یکی از دو لایه مغناطیسی، لایه گیر افتاده است، یعنی این که مغناطش در این لایه به میدان‌های مغناطیسی متوسط حساس است، لایه‌ی مغناطیسی دیگر، لایه آزاد نام دارد و مغناطش آن با به کار بردن میدان مغناطیسی کوچک تغییر می‌کند. با تغییر مغناطش در دو لایه از حالت موازی به حالت ناموازی، مقاومت دریچه اسپینی ۵ تا ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. برای تغییر نکردن مغناطش در لایه مغناطیسی گیر افتاده، معمولاً این لایه را با یک لایه غیر فرومغناطیس تماس داده می‌شود. به تازگی، یک لایه

گیر افتاده، با ترکیبی از مواد پاد فرومغناطیس جایگزین می‌شود که در آن دو لایه مغناطیسی با یک لایه رسانا غیرمغناطیسی خیلی نازک (۱۰ آنگستروم)، معمولاً روتنیوم جدا می‌شود. مغناطش در دو لایه مغناطیسی قویاً به صورت پاد موازی قرار گرفته و در برابر میدان‌های مغناطیسی خارجی محفوظ هستند. این ساختار هم دفع کردن میدان‌های مغناطیسی و هم دمای عملیاتی بهره برداری از دریچه اسپینی را اصلاح می‌کند[۷].

دومین نوآوری، لایه‌ی نانو اکسید است که در سطح بیرونی از فیلم مغناطیسی نازک تشکیل شده است، این لایه مقاومت را به خاطر پراکندگی سطح، کاهش می‌دهد. بنابراین کاهش مقاومت زمینه سبب افزایش در مقاومت مغناطیسی ساختار می‌شود[۸].

یک پیوندگاه تونل مغناطیسی (MTJ[1])، وسیله‌ی است که دو لایه درگیر و آزاد توسط یک لایه‌ی خیلی نازک عایق (معمولاً اکسید آلومنیوم) جدا شده است. مقاومت تونل‌زنی در میدان مغناطیسی در روش مشابه با مقاومت دریچه اسپینی مطابقت داده شده است و تغییرات ۲۰ تا ۴۰ درصدی در مقاومت مغناطیسی مشاهده شده است، و به میدان مغناطیسی برابر یا کم‌تر از میدانی که برای دریچه اسپینی اعمال می‌شد، نیاز است. به خاطر این که تونل‌زنی جریان کم است، وسایل MTJ مقاومت زیادی دارند. کاربرد ساختارهای GMR و MTJ در حال گسترش یافتن است. کاربردهای مهمی در حس‌گرهای میدان مغناطیسی، نوک‌خوان‌ها برای دیسک‌های سخت و حافظه قابل دسترس تصادفی مقاومت مغناطیسی (MRAM[2]) دارند. چندین شرکت در حال تولید کردن حس‌گرهای GMR برای مصارف داخلی هستند، هیچ حس‌گر تجاری با استفاده از ساختار MTJ در دسترس نیست، اما در حال توسعه هستند. نوک‌خوان‌های دریچه اسپینی GMR، کاربرد عمده‌شان در دیسک‌های سخت است. به‌تازگی، هدهای GMR تجاری از قالب دریچه اسپینی استفاده می‌کنند، هم مانند آن‌چه که توسط IBM پیشنهاد شده است. علاقه‌مندی زیادی در چند لایه‌های GMR و MTJ برای کاربرد نوک‌خوان شده است اما تولید آن‌ها هنوز شروع نشده است. مقاومت مغناطیسی دریچه‌های اسپینی به‌طور مشخص در هدهای اولیه‌ی درحدود ۵ تا ۱۰ درصد و نوع امروزی در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد با استفاده از ترکیب پاد فرومغناطیس‌ها و لایه‌های نانو اکسید افزایش یافته شده است. همچنین ظرفیت یک دیسک سخت در حدود ۱۰۰ گیگا بیت در هر اینچ مربع است[۹و۱۰].

عایق مبتنی بر GMR، ترکیبی از یک سیم پیچ و یک حس‌گر GMR بر روی یک تراشه مدار مجتمع است. عایق‌های GMR مناسب مدارهای مجتمع و بستن تعداد زیادی کانال مجزا بر روی یک تراشه تنها هستند. یک کانال تنها عایق GMR ساده، از یک تراشه محرک و یک تراشه دریافت کننده در قسمتی با ۸ اتصال تشکیل شده است[۹و۱۰].

MRAM ، پس‌ماند مغناطیسی را در ذخیره اطلاعات و مغناطو مقاومت را در خواندن اطلاعات استفاده می کند. MTJ مبتنی بر مغناطو مقاومت یا شبیه سلول‌های حافظه دریچه اسپینی بر روی یک تراشه مدار مجتمع بسته شده است و یا شبیه تراشه RAM یک نیمه‌رسانا کار می‌کنند که با اضافه کردن ترکیباتی، اطلاعات با خاموش شدن نیز محفوظ می‌مانند[۱۱و۱۲].

MRAM در مقایسه با حافظه فقط خواندنی قابل برنامه‌ریزی و قابل پاک شدن (EEPROM[3]) و حافظه‌ی

[1]Magnetic Tunnel Junction
[2]Magnetoresistive Random Access Memory
[1]Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

فلش، اطلاعات را ۱۰۰۰ برابر سریع‌تر انتقال می‌دهد و چرخه انتقال اطلاعات فرسوده نمی‌شود، در حالی که EEPROM و حافظه‌ی فلش با انتقال حدود ۱ میلیون بیت اطلاعات فرسوده می‌شوند، همچنین MRAM با کم‌ترین انرژی اطلاعات را انتقال می‌دهد و زمان دستیابی به اطلاعات در حدود۱/۱۰۰۰۰ دیسک سخت است. MRAM هنوز به صورت تجاری قابل دسترس نیست، اما تولید MRAM با حداقل حافظه ۴ مگابایت پیش‌بینی شده است. به کمک اثر مغناطو مقاومت در ساختارهای GMR و MTJ، و با ساخت مواد و ساختارهای جدید می‌توان روشن و خاموش کردن وسایل را با میدان مغناطیسی کنترل کرد[۱۱و۱۲].

موفقیت‌های چشم‌گیر به دست آمده در این زمینه باعث شده است که دانشمندان به جای فلزات جداکننده از مواد نیمه‌هادی‌ها استفاده کنند. اهداف آن‌ها از این عمل ساخت وسایلی است که با فناوری تراشه‌های موجود سازگار باشد. از آن‌جایی که نیمه‌هادی‌های به کار رفته در مدارهای مجتمع سیلیکونی و گالیوم آرسینید مغناطیسی نیستند، دانشمندان سعی کرده‌اند به نوعی نیمه‌هادی‌های مغناطیسی درست کنند. علاوه بر موارد مذکور کارآیی خوب در تزریق حامل‌های قطبش اسپینی به نیمه‌هادی‌ها، بلند بودن زمان واهلش اسپینی در آن‌ها انگیزه‌ای برای استفاده از این مواد شده است. از طرفی دیگر، پارامترهای دیگری نیز مانند طول همدوسی اسپینی، طول عمر حامل‌ها و غیره مطرح است که برای داشتن وسایلی کارآتر و مؤثرتر در الکترونیک مهم هستند. علاوه بر تلاش‌هایی که در زمینه ذخیره‌سازی اطلاعات در مقیاس فوق‌العاده کوچک (مبتنی بر اسپینترونیک) انجام شده است، بحث پردازش کوانتومی و انقلاب فناوری اطلاعات نیز مطرح است که می‌تواند باعث دگرگون کردن فناوری در قرن ۲۱ شود. با استفاده از کاربرد هوشمندانه مکانیک کوانتومی، ابعاد ترانزیستورها با گذشت زمان به صورت نمایی کوچک شده و قدرت محاسباتی آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد[۱۱و۱۲].

چالش‌های مهم در زمینه اسپینترونیک که بر اساس تجربه و آزمایش و نظریه شناخته شده است شامل، بهینه‌سازی عمر اسپین الکترون، تشخیص اسپین همدوس در ساختار نانو، ترابرد حامل‌های قطبیده شده اسپینی در سراسر طول‌های مشخصه و چندلایه، دست‌کاری اسپین الکترون و هسته در زمان سریع است. در مقابل، آزمایش‌های اخیر پیشنهاد کرده‌اند که زمان ذخیره اطلاعات کوانتومی دارای رمز در اسپین الکترون ممکن است به واسطه‌ی اثر متقابل هسته‌ها در حالت جامد طولانی‌تر شود. به هر حال، روش‌های نوری برای پیوند، استخراج و دست‌کاری کردن اسپین توسعه یافته‌اند تا توانایی در مهندسی دقیق اتصال بین اسپین الکترون‌ها و فوتون‌های نور را به کار گیرند. تصور شده است که ادغام الکترونیک، فوتونیک و مغناطیس منجر به ساخت وسایل جدیدی چندکاره مبتنی بر اسپین همچون ترانزیستورهای میدان مؤثر، دیودهای ساطع‌کننده نور، وسایل تشدیدکننده تونل زنی، قطع و وصل‌کننده عملیاتی نوری در بسامد ترا هرتز، رمزگذارها، رمزگشاها و بیت‌های کوانتومی برای محاسبات و ارتباطات کوانتومی شود. اگر درجه آزادی اسپین را در نیمه‌رساناها، نیمه‌رساناهای چند لایه‌ی و فرومغناطیس کنترل کنیم، پتانسیل کارآیی الکترونیک اسپینی زیاد می‌شود[۴].

حدود ۴۰ سال پیش، «گوردون مور»[1] از بنیان‌گذاران شرکت «اینتل» با در نظر گرفتن روند تغییر میزان پیچیدگی مدارهای میکرو الکترونیک پیش‌بینی کرد این میزان هر سال دو برابر شود. معیار اندازه‌گیری این پیچیدگی تعداد ترانزیستور در واحد سطح بود. براساس این پیش‌بینی، هر سال مدارهای مجتمعی به بازار

[1]Gordon Moor

می‌آمدند که تعداد ترانزیستورهای آن‌ها در واحد سطح، دو برابر سال قبل بود. این پیش‌بینی کم‌کم به‌عنوان شاخصی برای پیش‌بینی آینده‌ی صنعت میکرو الکترونیک تبدیل شد[۱۳].

با کوچک‌شدن ابعاد ترانزیستورها، فیزیک حاکم بر ابعاد اتمی دیگر از قوانین کلاسیک پیروی نمی‌کند، به طوری که اندازه‌ی تراشه‌های سیلیکونی سرانجام به جایی می‌رسد که از حدود ابعاد اتمی بزرگ‌تر نخواهد بود و مشکل دقیقاً از همین‌جا شروع می‌شود: از یک‌سو برای افزایش سرعت پردازش داده‌ها باید ترانزیستورهای تراشه‌ها کوچک‌تر شوند تا الکترون مسیر کوتاه‌تری بپیماید و از سوی دیگر کوچک شدن ابعاد تراشه‌ها سبب بروز مشکلات ترمودینامیکی می‌شود به این معنی که دمای تراشه‌ها به سرعت افزایش می‌یابد و در نهایت کارکرد کلی دستگاه را کاهش می‌دهد[۱۳و۱۴].

مجموعه‌ی تمام این مشکلات پرسش جدیدی را پیش روی دانشمندان نهاد: آیا می‌توان نوع جدیدی از رایانه براساس اصول مکانیک کوانتوم طراحی کرد؟ «ریچارد فاینمن»، در این راستا در سال ۱۹۸۲ میلادی مدلی انتزاعی برای چگونگی انجام محاسبات مبتنی بر اصول مکانیک کوانتوم ارائه کرد. رایانه کوانتومی باید با رایانه کلاسیک تفاوت اساسی داشته باشد. با توجه به این‌که اگرچه رایانه‌های کنونی بر قله‌ی پیشرفت فناوری‌های رایانه‌ای ایستاده‌اند، اما بر اساس اصول کارکرد با رایانه‌های قبلی تفاوت چندانی ندارند، یعنی اگرچه فشرده‌تر و نیز به‌طور چشم‌گیری در انجام فرآیندهای محاسباتی سریع‌تر شده است، ولی نحوه‌ی عمل‌کرد آن‌ها اصولاً ثابت مانده است[۱۵].

واحد اطلاعات در رایانه‌های کلاسیک بیت است که با ۰ و ۱ نمایش داده می‌شود و هر بیت به لحاظ فیزیکی در رایانه‌های کلاسیک به کمک یک دستگاه ماکروسکوپی مانند مغناطیدگی دیسک سخت یا باردارشدن خازن مشخص می‌شود اما در یک رایانه کوانتومی واحد اطلاعات کیوبیت است و مقادیر صفر، یک و یا حتی یک برهم‌نهی کوانتومی ازاین دو را در برمی‌گیرد و بنابراین دودویی نیست پس دیگر از چارچوب منطق «بولی» تبعیت نمی‌کند و به جای آن از چارچوب «منطق کوانتومی» پیروی می‌کند. یک مثال برای اجرایی کردن ایده‌ی طراحی رایانه‌های کوانتومی، استفاده از ذره‌هایی است که دو حالت اسپینی دارند. اسپین یک خاصیت ذاتی ذره است که مشابه کلاسیک ندارد و با یک تقریب ساده انگارانه می‌توان آن را هم‌چون حرکت وضعی زمین، چرخش الکترون به دور خودش دانست[۱۳].

در صورت ساخت رایانه‌های کوانتومی بزرگ، این رایانه‌ها قادر خواهند بود مسائلی را که رایانه‌های کنونی برای حل آن‌ها نیاز به زمان و حافظه‌ی زیادی دارند با صرف زمان و هزینه‌ی کم‌تر (به طور نمایی سریع‌تر) حل کنند. به عنوان مثال اگر فرض کنیم تجزیه یک عدد بسیار بزرگ به عوامل اول آن برای رایانه‌های کنونی به مدت زمانی از مرتبه‌ی طول عمر عالم نیاز داشته باشند، رایانه‌های کوانتومی این عمل را تنها در مدت چند ثانیه انجام می‌دهند[۱۳].

محاسبات کوانتومی در مرز مشترک فیزیک، علوم رایانه، فناوری اطلاعات، و فناوری نانو قرار دارد. این رشته‌ی نوظهور درطی ده سال گذشته توجه ویژه‌ی دولت‌ها و سرمایه‌گذاری‌های کلان صنایع را به خود اختصاص داده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای محاسبات کوانتومی، رمزنگاری کوانتومی است که در انتقال محرمانه‌ترین پیغام‌ها، نظیر پیام‌های بانکی و نظامی استفاده می‌شود[۴].

اگرچه محاسبات کوانتومی هنوز دوران کودکی خود را سپری می‌کند، پژوهش در هر دو حوزه‌ی نظری و عملی با سرعت چشم‌گیری پیش می‌رود. گوردن مور، در مقاله‌ی مشهور خود در آوریل ۱۹۶۵، در مجله

الکترونیک نوشت: مدارهای مجتمع منجر به شگفتی‌هایی بزرگ هم‌چون رایانه‌های خانگی (یا حداقل پایانه‌های متصل به یک رایانه‌ی مرکزی) کنترل‌های خودکار برای اتومبیل‌ها و تجهیزات ارتباطی قابل حمل شخصی خواهند شد. او با بررسی آینده‌ی صنعت چنین پیش بینی کرد که، «قیمت‌های کاهش یافته‌ی یکی از جذابیت‌های الکترونیک مجتمع است و این روند هم‌چنان ادامه پیدا خواهد کرد تا آنجا که فناوری به سوی تولید توابع مداری بزرگ‌تر و بزرگ‌تر بر روی تنها یک لایه‌ی نیمه هادی حرکت خواهد کرد. برای مدارهای ساده، قیمت هر قطعه تقریباً نسبت عکس با تعداد قطعات خواهد داشت». این بیان به قانون مور شهرت یافت. با گذشت چند سال از آن تاریخ، این قانون هم‌چنان معتبر است. اما آیا چند سال بعد از این نیز همین طور خواهد بود؟ با تعمیم این قانون نتیجه می‌شود که در قطعات الکترونیکی باید از اثرات کوانتومی استفاده شود[۱۳].

۱-۵- اساس کار وسایل اسپینترونیکی

تمام ادوات اسپینترونیکی بر اساس الگوی ساده زیر عمل می‌کنند:

الف- اطلاعات در اسپین‌ها که به صورت جهت اسپین (یعنی بالا یا پایین) ذخیره یا نوشته می‌شوند.

ب- الکترون‌های متحرکی که اطلاعات درون سیم را حمل می‌کنند دارای درجه آزادی اسپین هستند.

ج- اطلاعات در یک پایانه می‌تواند بازخوانی یا خوانده شود.

جهت اسپین الکترون‌های انتقالی برای زمانی نسبتاً طولانی ثابت می‌ماند، که این فرصت، ادوات اسپینترونیکی را برای ذخیره‌سازی اطلاعات و ادوات حس‌گر مغناطیسی و به طور بالقوه برای محاسبات کوانتومی مناسب می‌سازد. مهندسی رایانه از جنبه‌ای دیگر نیز به اسپینترونیک مربوط می‌شود. در این مورد عملکرد رایانه‌ها به دو حالت به سرعت تغییر پذیر مطابق با ۰ و ۱ احتیاج دارد که باید با تغییر زمان تغییر نکند و در برابر تغییرات گرمایی مقاوم باشد. این کارها توسط یک الکترون در یک دستگاه دو سطحی (مثل یک مولکول اتمی) به وسیله پرش بین اتم‌ها انجام می‌شود. صدها و هزارها الکترون برای یک فعالیت در وسایل الکترونیکی مصرف شوند. کوانتیدگی اسپین الکترون (با جهت اسپین بالا و پایین) نشان می‌دهد که اسپین به طور طبیعی و منطقی دارای دو حالت است که مطابق با ۰ و ۱ بدین صورت می‌توان به یک عملکرد منطقی توسط یک تک الکترون کد داد. بنابراین استفاده از اسپین الکترون بسیار سودمندتر از بار الکترون است[۱۶].

از لحاظ جنبه کاربردی باید گفت که هر وسیله‌ی الکترونیکی از اسباب بازی‌ها تا پیچیده‌ترین قطعات رایانه‌ی به وسیله شارش ذرات باردار کار می‌کنند. اما همان‌گونه که بیان شد دانشمندان در حال حاضر توجه‌شان را به مشخصه دیگر این حامل‌ها یعنی اسپین متمرکز کرده‌اند. اسپینترونیک انواع جدیدی از کاربردها را در ادوات میکرو الکترونیک به کار رفته در این وسایل پیشنهاد می‌کند. در اینجا این سوال مهم مطرح است که آیا روزی اسپینترونیک باعث مرگ میکرو الکترونیک معمولی که بر اساس ادوات سیلیکونی کار می‌کنند خواهد شد؟ به هر حال آن سبب شده است که الکترونیک از بند فناوری فیزیک کلاسیک خارج شده و به سوی طبیعت کوانتومی روی آورد تا شاید انگیزه‌ای برای اختراع رایانه‌های کوانتومی گردد. این همان چیزی است که از آن به عنوان آینده ادوات الکترونیکی و دیجیتالی نام می‌برند. بنابراین، در مقایسه با الکترونیک معمولی به آن الکترونیک فعال نیز می‌گویند. لذا، وسایل مبتنی بر اسپینترونیک می‌توانند گامی به سوی تحقیقات جدید موسوم به دریچه‌های اسپینی باز کنند[۱۶].

فصل دوم

بررسی رسانش الکترون و تولید پرتوهای الکترونی قطبیده

در این فصل رسانش الکترون در دستگاه‌های ماکروسکوپی و مزوسکوپیکی بررسی می‌شود و نشان داده می‌شود که رسانش الکترونی یک رسانای بزرگ به طول و سطح مقطع تماس بستگی دارد، در حالی که در یک رسانای کوچک که مقیاس اندازه‌ای بین یک نانومتر تا چند میکرو متر دارد، رسانش الکترونی مستقل از طول است و به تعداد مسیرهای انتقال و همچنین متوسط احتمالی که الکترون از یک طرف رسانا وارد می‌شود و از طرف دیگر خارج می‌شود، بستگی دارد. همچنین ساز و کار به دست آوردن الکترون‌های قطبیده شده از نیمه رسانا GaAs شرح داده شده است و در انتها قطبش الکترون در راستاهای مختلف به دست آورده می‌شود.

۲-۱- فیزیک مزوسکوپیک

حوزه فیزیک مزوسکوپیک طی دو دهه‌ی گذشته هم از لحاظ نظری و هم تجربی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به تازگی با توسعه فناوری‌های آزمایشگاهی، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در درک و فهم پدیده‌های کوانتومی در حوزه میانی دستگاه های فیزیکی میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک رخ داده شده است [۲۰-۱۷]. در این حوزه الکترونیک کوانتومی نیز مطرح شده است. دستگاه‌های مزوسکوپیکی معمولاً با مقیاس اندازه‌ای بین ۱ نانو متر تا چند میکرو متر تعریف می‌شوند، یعنی اندازه‌ی آن‌ها کمی بزرگ‌تر از چند اتم یا ملکول است، به اندازه کافی کوچک هستند به‌طوری که مکانیک کوانتومی حاکم است و از اشیا کلاسیکی (به‌گونه‌ای که رساناها رفتار اهمی دارند) تشخیص داده شوند[۲۱].

در رساناها با اندازه ماکروسکوپیکی، رسانندگی با قانون اهم $G = \sigma A/L$ مشخص می‌شود، که در این رابطه σ، رسانندگی ویژه مربوط به ماده و مستقل از ابعاد آن است، A سطح مقطع و L طول رسانا است، طبق این رابطه هرگاه L کاهش پیدا کند، رسانندگی بی‌نهایت می‌شود، اما از نظر تجربی مشاهده می‌شود که رسانندگی به مقدار حدی $2e^2M/h$ نزدیک می‌شود، که در این رابطه e، h و M به ترتیب اندازه بار الکترون،

ثابت پلانک و تعداد مدها یا مسیرهای انتقال هستند. عکس رسانندگی معادل با مقاومت رسانا است، بنابراین مقاومت رسانا به‌طور معکوس با تعداد مدها در ارتباط است، که برای یک تک مد این مقاومت تقریباً $12.9\mathrm{K}\Omega$ است. در مقیاس مزوسکوپیک موقعیت‌ها متفاوت‌اند، گوناگونی مقیاس طول یکی از چندین جنبه در این حوزه است. الکترون‌ها در رسانا مزوسکوپیکی معمولاً به صورت ذرات کلاسیکی منتشر نمی‌شوند، اما همچون امواج، با طول موج دوبروی (λ)، حدود چند آنگستروم در فلزات تا چند نانومتر در نیمه‌رسانا منتشر می‌شوند. به هر حال الکترون‌ها به صورت همدوس (یعنی بدون از دست دادن اطلاعات در فازشان) پخش می شوند. در مقابل، در پراکندگی ناکشسان فاز اولیه به هم می‌خورد، این طول (l_φ) عموما به دمای دستگاه و همچنین جزئیات مزوسکوپیکی (یعنی برهم‌کنش الکترون- فونون و برهم‌کنش الکترون- الکترون) وابسته است. سومین طول، مسیر آزاد میانگین (l) است، که میانگین فاصله‌ی است که یک الکترون بین برخوردهای کشسان با ناخالصی‌ها طی می‌کند.

یک رسانا به اندازه‌ی L وقتی رفتار اهمی دارد که ابعادش خیلی بزرگ‌تر از λ، l_φ و l باشد، در مقابل، رساناهای مزوسکوپیکی به اندازه‌ای کوچک هستند که دیگر اثرهای کوانتومی حکم‌فرما هست و رسانندگی با قانون اهم مشخص نمی‌شود، در عوض در رساناهای مزوسکوپیکی G به تعداد کانال یا مسیر انتقال وابسته است، فرمول $G=(e^2/h)T$ این واقعیت را در بر می‌گیرد. این فرمول معادل فیزیکی بین رسانندگی و احتمال کوانتومی یک الکترون منتقل شده در عرض دستگاه را برقرار می‌کند، T مجموع احتمالات تمامی کانال‌های ممکن را بیان می‌کند. ثابت (e^2/h) نقش مهمی را در فیزیک مزوسکوپیک دارد، که کوانتوم رسانندگی وابسته به یک کانال است.

در رساناهای مزوسکوپیکی به‌طوری که $l \ll L$ باشد، آن‌ها رسانای ساطع نامیده می‌شوند و در مقابل، در رساناهای که $L \ll l$ است، به‌طوری که پراکندگی ناخالصی‌ها خیلی کاهش می‌یابد، ما به آن‌ها رساناهای پروازی نسبت می‌دهیم.

اگرچه آزمایش‌های اولیه در مزوسکوپیک با استفاده از مواد فلزی انجام شده است، اما به‌تازگی بیشتر کارها بر روی نیمه‌رساناها همچون GaAs-AlGaAs انجام شده است. این ساختار چند لایه‌ی شامل یک اتم جدا بین دو نیمه‌رسانای متفاوت است، به‌طوری که یک لایه‌ی رسانای دو بعدی نازک ایجاد می‌کند، این لایه محدود شده معمولاً گاز الکترون دوبعدی نسبت داده می‌شود.

۲-۲-تولید پرتوهای الکترونی قطبیده شده اسپینی

وجود گشتاور اسپینی برای الکترون، اولین بار در سال ۱۹۲۱میلادی در یک آزمایش کلاسیکی توسط ا- اشترن[1] و و-گرلاخ[2] نمایش داده شد. در این آزمایش باریکه‌ی از اتم‌های نقره از یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت عبور می‌کنند و در روی یک صفحه جمع‌کننده آشکار می‌شود. اتم‌ها با گشتاور مغناطیسی خود مانند آهنرباهای میله‌ی بسیار کوچک عمل می‌کنند، در یک میدان غیر یکنواخت به هر آهنربای اتمی نیروی برآیندی وارد می‌شود که به سمت‌گیری آن بستگی دارد. اگر هر سمت‌گیری گشتاور امکان‌پذیر باشد، انحراف پیوسته باریکه در روی جمع‌کننده آشکار می‌شود، به خاطر کوانتش فضایی به جای این انحراف پیوسته،

[1] O- Stern
[2] W- Gerlach

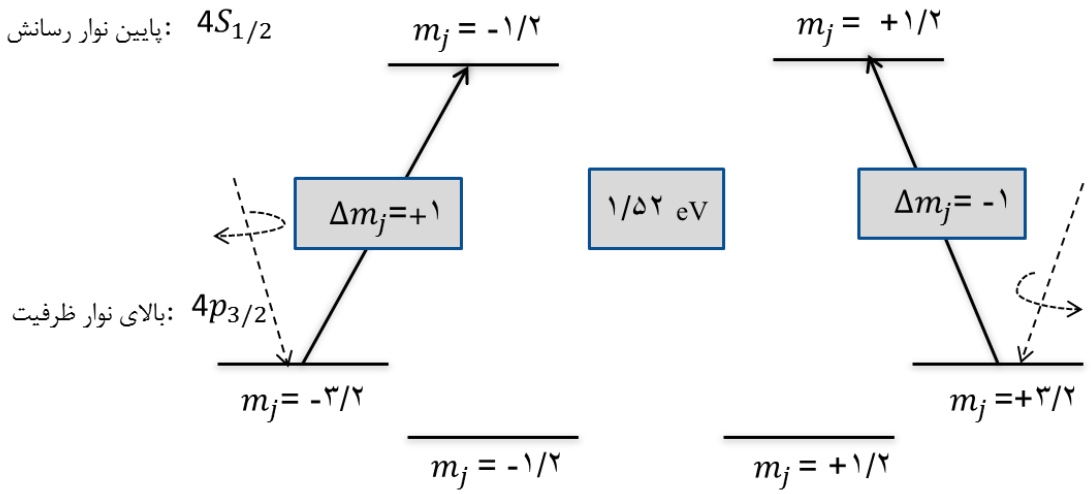
مجموعه‌ی از خطهای مجزا ظاهر می‌شود که هر یک از آن‌ها به یکی از سمت‌گیری‌های مجرد گشتاور در باریکه مربوط می‌شود و گشتاور مغناطیسی مشاهده شده در آزمایش اشترن-گرلاخ به اسپین خارجی‌ترین الکترون نقره نسبت داده شده است. در سال‌های اخیر برای تولید پرتوهای الکترونی قطبیده شده در نیمه رسانا GaAs به عنوان چشمه الکترونی قطبیده استفاده می‌شود، که در این بخش ساز و کار تولید الکترون‌های قطبیده به واسطه نور شرح داده می‌شود.

۲-۲-۱-جداسازی حالت‌های اسپین الکترون

برای آشکار شدن فعل و انفعالات اسپین الکترون‌های قطبیده شده در ماده ما به یک منبع از اسپین الکترون قطبیده شده نیاز داریم[۲۲]. در آزمایش اشترن-گرلاخ، دو حالت اسپینی از الکترون‌های ظرفیت بار اتم نقره خنثی با به کار بردن میدان مغناطیسی غیر یکنواخت جداسازی شده بود. آن به خوبی شناخته شده که مواد فرو مغناطیس منابع طبیعی از الکترون‌های قطبیده شده هستند و می‌توان با استفاده از انتشار نور یا به واسطه روش تونل‌زنی خاص الکترون‌های قطبیده را جدا کرد. در سال‌های اخیر، عموماً منبع استفاده از الکترون‌های قطبیده شده، نیمه‌رسانای GaAs است. اگرچه GaAs یک نیمه رسانا غیرمغناطیسی است اما تعداد زیادی از اسپین الکترون‌های قطبیده شده می‌توانند با تابش فرو سرخ استخراج شوند.

۲-۲-۲-نیمه‌رسانا GaAs به صورت منبع الکترونی قطبیده شده

در این جا ما به بررسی نیمه‌رسانای GaAs به عنوان یک چشمه الکترونی قطبیده می‌پردازیم. در ماده GaAs الکترون‌ها در بالای نوار ظرفیت به‌طور کامل پر شده، در محل‌های اتم As (Z=33) و الکترون‌ها در ته نوار رسانش بر روی محل‌های اتم Ga (Z=31) قرار گرفته شده‌اند، بنابراین الکترون‌ها می‌توانند متحمل انتقال از بالای نوار ظرفیت به ته نوار رسانش شوند. ساز و کار واقعی به دست آوردن الکترون‌های قطبیده شده از منبع GaAs به صورت طرح‌واره در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل۲-۱- طرح واره‌ی ساز وکار به دست آوردن الکترون‌های قطبیده شده از منبع GaAs[۲۳]

نوار ظرفیت نیمه‌رسانا GaAs از اوربیتال‌های اتمی $4p$ در اتم As تشکیل شده است و به وسیله برهم‌کنش چرخش اسپینی به حالت‌های $4p_{3/2}$ و $4p_{1/2}$ شکافته شده است، شکاف انرژی آن‌ها در حدود $0.34\text{eV}\sim$ است. در طرف دیگر نوار رسانش از اوربیتال‌های اتمی 4s اتم‌های Ga، حالت 4s را تشکیل می‌دهند. با انتخاب انرژی فوتون در حدود $1.5\text{eV}\sim$ و انرژی‌های بزرگ‌تر انتقال از $4p_{1/2}$ به $4s_{1/2}$ می‌تواند رخ دهد.

به خاطر وجود تقارن در میدان الکتریکی، حالت $4p_{3/2}$ تبهگنی چهارگانه در انرژی وجود دارد. پایستگی گشتاور زاویه‌ی در جذب نور قطبیده دایره‌ی، $\Delta m_j = \pm 1$ گذارهای مجاز رخ می‌دهد. با کمک نور قطبیده چپگرد (LCP[1]) تنها گذار $\Delta m_j = -1$، مجاز است، در حالی که برای گذارهای $\Delta m_j = +1$ نور قطبیده راستگرد (RCP[2]) نیاز است. بنابراین در مکعب GaAs تنها گذار $4p_{3/2}(m_j = +3/2) \to 4s_{1/2}(m_j = +1/2)$ و $4p_{3/2}(m_j = +1/2) \to 4s_{1/2}(m_j = -1/2)$ می‌تواند با کمک نور (LCP)، با تبعیت از قانون انتخاب شده $\Delta m_j = -1$ رخ دهد. در نوع مشابه از ترابرد همچنین از دو حالت در نوار ظرفیت به دو حالت دیگر در نوار رسانش با استفاده از نور (RCP)، با تبعیت از قانون انتخاب شده $\Delta m_j = +1$ رخ دهد. بنابراین هر دو حالت اسپینی در نوار رسانش موجودند. درجه قطبش اسپین می‌تواند با یک تغییر ناچیز در ماده GaAs، صد در صد شود. تقارن مکعب را می‌توان با قرار دادن مکعب در میدان الکتریکی GaAs به واسطه رشد هم‌بافته بر روی یک لایه (زیرلایه) نامتناسب، از بین رود.

۲-۳- توضیح منطقی الکترون‌های قطبیده شده اسپینی

در این بخش به کمک روابط مکانیک کوانتومی، قطبش الکترون‌ها در راستاهای مختلف به دست آورده می‌شود. برای به دست آوردن قطبش، یک تابع موج اسپینی بر حسب بردارهای پایه (بالا و پایین) در نظر گرفته می‌شود و با به دست آوردن مقدار انتظاری مؤلفه‌ی اسپین در راستاهای مختلف، قطبش الکترون در آن راستا به دست می‌آید.

۲-۳-۱- تابع موج اسپین

طبق مکانیک کوانتومی یک تابع موج $\psi(\vec{r},t)$ وابسته به ذرات میکروسکوپیک با داشتن اندازه حرکت $\vec{p}$ و انرژی E به صورت زیر توصیف می‌شود

$$\psi(\vec{r},t) = Ae^{i(\vec{k}.\vec{r}-\omega t)}, \qquad (۱-۲)$$

در حالی که A یک ثابت است، ω و $\vec{k}$ طبق روابط زیر تعریف می‌شوند

$$\hbar\omega = E, \qquad (۲-۲)$$

و

$$\hbar\vec{k} = \vec{p}, \qquad (۳-۲)$$

سرعت فاز بسته موج ω/k است. همچنین بخش‌های مکانی و اسپینی تابع موج را می‌توان به‌صورت جداگانه نوشت، بنابراین داریم

$$\psi(\vec{r},t,s) = \chi(s)Ae^{i(\vec{k}.\vec{r}-\omega t)}, \qquad (۴-۲)$$

[1] Left Circularly Polarized
[2] Right Circularly Polarized