



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تربیت معلم آذربایجان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد
رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان

محاسبه تزریق اسپینی در نقطه‌های کوانتومی

استاد راهنما

دکتر آرش فیروزنیا

استاد مشاور

دکتر اسفندیار فیضی

پژوهشگر

سحر حسن پوربورخیلی

مهر ۱۳۸۹

تبریز- ایران

تقدیریم به :

آنانکه حضورشان
تنها دلیل بودن من

و یاد و خاطراتشان

آرامش بخش قلب و روح من است .

تشکر و قدردانی

قدردانم از

از تمامی آنانکه در آموختن بی دریغ یاری ام کردند .

استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر فیروزنیا که صبورانه در هر قدم یاری ام کردند و رویای آموختن بیشتر و بیشتر را در من زنده داشتند.

می بوسم دست پدر و مادرم را که نگاه نگرانیشان از همان آغاز پشتیبان من بود .

همسرم که مشوق در ادامه راه بود .

سپاسگزارم از دوستانی که در لحظه های تاریک نور را با مهربانی به من نشان دادند .

خالصانه ممنونم از یاران دیرینم که به یاد آوردن خاطرات شیرین سالهای دورشان شیرینی بخش امروز است .

و بزرگترین شکرها از آن خدایی که مرا در این راه قرار داد و هر نفس زندگی را به من هدیه داد.

سحر حسن پور

شهریور ۱۳۸۹
تبریز-ایران

چکیده

در این پایان نامه، ویژگی‌های تراپردی یک سیستم مزوسکوپییک دوبعدی شامل یک نقطه‌ی کوانتومی مغناطیسی، در حالت غیر تعادلی و با در نظر گرفتن اثر اسپینی زیمان، با استفاده از روش تابع گرین غیر تعادلی مورد بررسی قرار گرفته است. نقطه‌ی کوانتومی مغناطیسی سیستمی مزوسکوپییک با میدان مغناطیسی غیر یکنواخت فرض شده و محاسبات انجام شده در ولتاژهای بیاس و میدان‌های مغناطیسی در دماهای مختلف نشان‌دهنده‌ی تأثیر اندک میدان مغناطیسی در جریان عبوری و مغناطش سیستم و اثر قابل توجه دما و ولتاژ روی این مقادیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تراپرد کوانتومی؛ سیستم‌های مزوسکوپییک؛ نقطه‌های کوانتومی مغناطیسی؛ تابع گرین غیر تعادلی.

فهرست مندرجات

vi	چکیده
vii	مقدمه
۱	۱ مفاهیم و تعاریف
۱	۱.۱ مقدمه
۲	۲.۱ مروری بر تاریخچه سیستم های نانو
۴	۳.۱ سیستم های مزوسکوپیک
۶	۴.۱ گازهای الکترونی با ابعاد پایین
	۱.۴.۱ گاز الکترونی دوبعدی ($2DEG$): ساختار چندگانه
۶	$GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$
۸	۲.۴.۱ گاز الکترونی یک بعدی ($1DEG$): نانولوله ها

۳.۴.۱	گاز الکترونی صفر بعدی DEG °: نقاط کوانتومی	۱۰
۵.۱	تئوری اساسی در ترابرد کوانتومی در مقیاس نانو	۱۱
۱.۵.۱	فرمول لاندائ، <i>Landauer formula</i>	۱۱
۲.۵.۱	فرمول لاندائ در دمای غیر صفر	۱۳
۳.۵.۱	فرمول بوتیکر، <i>Büttiker formula</i>	۱۴
۴.۵.۱	شرایط استفاده از فرمول لاندائ - بوتیکر	۱۶
۶.۱	ماتریس پراکندگی، <i>Scattering matrix</i>	۱۶
۱.۶.۱	تابع عبور و ماتریس $S -$ ، <i>Transmission function and $S -$</i>	۱۶
	<i>matrix</i>	
۷.۱	تابع گرین، <i>Green's functions</i>	۱۸
۲	صورتبندی تابع گرین غیرتعادلی (<i>NEGF</i>)	۱۹
۱.۲	مقدمه	۱۹
۲.۲	خودانرژی و تابع گرین	۱۹
۱.۲.۲	توابع گرین <i>Advanced, Retarded</i> (G^A, G^R)	۱۹
۲.۲.۲	مقدار بی نهایت کوچک η	۲۲
۳.۲.۲	خودانرژی	۲۳
۳.۲	تابع همبستگی و پراکندگی	۲۴

۲۴	..... ماتریس چگالی	۱.۳.۲
۲۵	..... <i>Correlation function</i> ، تابع همبستگی	۲.۳.۲
۲۶	..... <i>Hole correlation function</i> ، تابع همبستگی حفره‌ها	۳.۳.۲
۲۶	..... کوانتش اولیه و ثانویه	۴.۳.۲
۲۸	..... توابع گرین در کوانتش ثانویه	۵.۳.۲
۲۸	..... <i>Scattering functions</i> ، توابع پراکندگی	۶.۳.۲
۲۹	..... معادله‌ی جنبشی	۴.۲
۳۱	..... یک مثال تحلیلی	۵.۲
۳۱	..... هامیلتونی	۱.۵.۲
۳۳	..... محاسبه تابع گرین نقطه کوانتومی	۲.۵.۲
۴۴	..... محاسبه تابع گرین غیرتعادلی	۳.۵.۲
۴۶		۳ ترابرد همدوس
۴۶	..... مقدمه	۱.۳
۴۷	..... ترازهای اشغال شده	۲.۳
۴۸	..... چه چیزی باعث شارش الکترون ها می شود؟	۳.۳
۴۸	..... محاسبه جریان برای سیستم تک تراز	۴.۳

۵۱	..... چگالی حالت ها	۵.۳
۵۳	..... ترابرد همدوس	۶.۳
۵۳	..... سیستم تک اتصالی	۷.۳
۵۶	..... ماتریس چگالی برای سیستم تک اتصالی	۱.۷.۳
۵۹	..... جریان ورودی و خروجی از یک سیستم تک اتصالی	۲.۷.۳
۶۱	..... سیستمی با دو اتصال	۸.۳
۶۲	..... ماتریس چگالی سیستمی با دو اتصال	۱.۸.۳
۶۴	..... جریان ورودی و خروجی سیستمی با دو اتصال	۲.۸.۳
۶۶	..... <i>Transmission</i> ، عبور	۹.۳
۴	مشخصات جریان و چگالی نقطه کوانتومی مغناطیسی متصل به دو کانال با حضور اثر زیمان	
۶۹		
۶۹	..... مقدمه	۱.۴
۷۰	..... مدل تنگابست، (<i>tight binding</i>)	۲.۴
۷۲	..... نمایش ماتریسی H_{op} در دو بعد ($2D$)	۱.۲.۴
۷۳	..... خود انرژی <i>Advanced, Retarded</i> (Σ^A, Σ^R)	۲.۲.۴
۷۴	..... معرفی سیستم مزوسکوپیک	۳.۴

۷۵	.....	محاسبات تئوری	۴.۴
۷۹	.....	محاسبات عددی	۵.۴
۷۹	.....	بحث روی نمودارهای جریان	۱.۵.۴
۸۳	.....	بحث روی نمودارهای مغناطش اسپینی	۲.۵.۴
۱۰۶	.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی	
۱۱۰	.....	منابع و مراجع	

مقدمه

در دهه‌های اخیر، پیشرفت در زمینه نانو تکنولوژی نیمه رساناها، پژوهشگران را قادر ساخت تا ساختارهایی در مقیاس نانو و ابعاد پائین با کنترل پذیری بالا بسازند. ساخت این ساختارها باعث ایجاد توجه جدی به مطالعه سیستم‌های مزوسکوپی، بخصوص در ارتباط با ترابرد الکترونی شد. گاز الکترونی دو بعدی ($2DEG$) که در فصل مشترک نیمه رساناهایی با ساختار چندگانه مثل $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ تشکیل می‌شود، یکی از منابع مهم سیستم‌های با ابعاد پائین است. نقاط کوانتومی^۱، سیم‌های کوانتومی^۲، حلقه‌های کوانتومی^۳ و پادنقطه‌های کوانتومی^۴ نمونه‌هایی هستند که از محدودسازی اضافی روی $2DEG$ بدست می‌آیند. در این نوع سیستم‌ها، اثرات کوانتومی مثل کوانتیدگی ترازها ناشی از پتانسیل‌های قیدی و میدان مغناطیسی، تداخل کوانتومی و اندرکنش قوی الکترون - الکترون، روی ترابرد الکترونی اثر می‌گذارد. فرمولبندی لاندائو - بوتیکر یکی از ابزارهای اساسی برای درک ترابرد الکترون در سیستم‌های مزوسکوپی است. ساختارهای کوانتومی مغناطیسی مثل نقطه‌های کوانتومی مغناطیسی اخیراً مرکز توجه فراوانی بوده است که با به کارگیری میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت فضایی تعدادی از این نوع ساختارها در محدوده $2DEG$ تعریف می‌شوند، مثل نقاط کوانتومی مغناطیسی تولید شده به روش حکاکی^۵ با استفاده از

quantum dots^۱

quantum wires^۲

quantum rings^۳

quantum antidots^۴

lithographic technique^۵

میکروسکوپ تونل زنی روبشی، ابر شبکه های مغناطیسی با نقش زدن مواد فرومغناطیسی مخلوط به نیمه رساناها، مواد ابر رسانای نوع II قرار گرفته روی ساختارهای چندگانه مرسوم. این ساختارهای کوانتومی بسیار متفاوت از ساختارهای کوانتومی الکتروستاتیکی بوده و انتظار ظهور گستره ای از پدیده های نو در مورد این ساختارهای مغناطیسی می رود. پایان نامه حاضر از چهار فصل تشکیل شده است.

فصل اول، مفاهیم و تعاریفی که در فصل های بعدی از آن ها استفاده خواهد شد، را در بر دارد.

در فصل دوم، توابع گرین مختلف مانند $G^R, G^A, G^<, G^>$ و همچنین خودانرژی های $\Sigma^>, \Sigma^<$ که در فرمالیزم ($NEGF$) نقش دارند، مطالعه و سپس معادله ی جنبشی، که توابع $G^<, G^>$ را به توابع پراکندگی $\Sigma^<, \Sigma^>$ مربوط می کند، و توابع مفید گاما و طیفی مورد بررسی قرار می گیرد. در پایان فصل، به منظور روشن شدن چگونگی استفاده از روش ($NEGF$)، مثالی از یک نقطه کوانتومی مطرح و چگالی اسپینی الکترون ها محاسبه خواهد شد.

در فصل سوم، مفهوم شارش الکترونی و به تبع آن مفاهیم مربوط به این شارش و ترابرد، برای شرایط گوناگون تک اتصالی و دو اتصالی و تک تراز و چند تراز، مورد بررسی قرار می گیرد و فرمول های اساسی و کاربردی در محاسبات تراپردی بدست خواهد آمد.

در فصل چهارم، ترابرد در یک سیستم مزوسکوپیک دو کاناله شامل یک نقطه ی کوانتومی مغناطیسی تحت حضور اثر زیمان، به روش تابع گرین غیرتعادلی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و مشخصات جریان و چگالی در بایاس های مختلف در دما و میدان های مغناطیسی متفاوت بدست خواهد آمد.

فصل ۱

مفاهیم و تعاریف

۱.۱ مقدمه

این فصل به بررسی برخی از مفاهیم اساسی که در فصل های بعد استفاده خواهد شد ، اختصاص یافته است . بخش (۲.۱) تاریخچه مختصری است از آنچه تاکنون در مورد سیستم هایی با ابعاد نانو انجام گرفته است . در بخش (۳.۱) در ارتباط با سیستم های مزوسکوپیک و طول های مشخصه ی مختلفی که در این سیستم ها مؤثر هستند توضیحاتی ارائه شده است . بخش (۴.۱) مروری است بر انواع گازهای الکترونی با ابعاد پائین ، آنچه بطور وسیعی در آزمایش ها و مباحث فیزیک مزوسکوپیک مطرح می شود و بخش (۵.۱) در ارتباط با یکی از اساسی ترین روش های پایه ای محاسبات ترابرد کوانتومی توضیحاتی ارائه می دهد و در پایان ، بخش (۶.۱) روشی برای محاسبه تابع عبور ، یکی از توابع پایه در محاسبات ترابردی ، و در پی آن بخش (۷.۱) کلیت یافته این روش یعنی تابع گرین را تعریف می کند .

۲.۱ مروری بر تاریخچه سیستم های نانو

در سال ۱۹۹۰ گروه فون - کلیتزی‌نگ^۱ گیت های نازکی از یک ماده ابررسانای نوع II را روی گازالکترونی دو بعدی مربوط به یک ساختار چندگانه $GaAs/AlGaAs$ ساختند تا بتوانند اثر نوسان فرکانسی^۲ یک میدان مغناطیسی اعمال شده به آن را مطالعه کنند. آن ها رسانندگی مغناطیسی^۳ متناسب با میدان مغناطیسی B برای میدان های ضعیف پیدا کردند. در همان سال مک کورد^۴ و آوشالوم^۵ از IBM روشی یافتند که در آن نقطه های کوانتومی مغناطیسی با استفاده از میکروسکوپ تونل زنی روبشی^۶ بطور مستقیم جایشانی می شد. آن ها از $Fe(co)$ به عنوان گاز منبع برای جایشانی استفاده کردند و نقاط کوانتومی با شعاعی در محدوده بین ۱۰ تا ۳۰ نانومتر بدست آوردند. نقاط بطور تخمینی شامل ۵۰ درصد آهن، باقی ناخالصی کربنی و کمی اکسیژن بودند. آن ها ادعا کردند که اندازه گیری های انجام شده روی ذره ها در دمای پایین نشان از مغناطیسی بودن این ذرات داشته و نام «نقاط مغناطیسی» یا «ذرات مغناطیسی» را جایگزین نام «نقاط کوانتومی مغناطیسی» کردند.

بعد از آن گروه های مختلفی از دانشمندان انواع مختلفی از این ساختارها را به منظور بررسی رفتار الکترون ها در میدان های مغناطیسی غیر هم دوس ساختند. لید بیتر^۷ لایه های تک بلوری از $MnAl - \tau$ روی زیر لایه ای از $GaAs$ ساخت تا بتواند حلقه پسماند مغناطیسی بزرگ با اثر هال غیر معمول را مطالعه کند. در سال ۱۹۹۲، کریشنان^۸ لایه های تک بلوری از $Mn_{1-x}Ga_x$ ساخت که از نظر ترمودینامیکی پایدار بودند. تحقیق در مورد اثر میدان های مغناطیسی تناوبی و متغییر مکانی، توسط کارمونا^۹ با قرار دادن یک نوار ابررسانا روی سطحی از یک ساختار چند گانه با گاز الکترونی

Von - Klitzing^۱

modulation^۲

magneto conductance^۳

Maccord^۴

Awschalom^۵

Scanning tunneling microscope^۶

Leadbeater^۷

Krishnan^۸

Carmona^۹

دو بعدی، انجام شد. این آزمایش‌ها تعدادی از دانشمندان را بر آن داشت تا دست به کشفیات نظری برای مطالعه خصوصیات تراپردی ساختارهای مغناطیسی بزنند. گروه پیتر^{۱۰} سیستم‌هایی از جمله پله‌های کوانتومی مغناطیسی^{۱۱}، سد‌های کوانتومی مغناطیسی^{۱۲} و چاه‌های مغناطیسی^{۱۳}، را مطالعه کرده و طیف انرژی و طبیعت حالت‌های پراکنده شده یا وابسته را پیدا کردند.

در سال ۱۹۹۴، چانگ^{۱۴} و نیو^{۱۵}، طیف انرژی یک گاز الکترونی دو بعدی قرار گرفته در یک میدان مغناطیسی تناوبی دو بعدی را بررسی کردند. [۱].

تمرکز در ساخت و اندازه‌گیری ابزارهای در اندازه نانوروی اجزا بطور مجزا قرار دارد، نه روی ساخت مدارهای پیچیده. برای نانو دستگاه‌های کوچک که شامل چند اتم یا مولکول هستند کنترل در ساخت کار آسانی نیست. حتی یک ناخالصی در یک مکان اشتباه می‌تواند اثر بزرگی روی رسانندگی داشته باشد. هدف از ساخت نانو دستگاه‌ها، در بسیاری از موارد، ساخت یک بلندگو یا هر دستگاه کاربردی دیگر نیست، بلکه هدف کشف خصوصیات اساسی فیزیکی مثل تراز میان اتمی است. [۲].

فرم سیستم می‌تواند موجب ساده تر شدن معادلات شود. عواملی مثل (i) الکترودهای متصل شده به سیستم، که می‌توانند به عنوان یک اختلال ضعیف در نظر گرفته شوند و (ii) عناصر غیر قطری ماتریس چگالی کاهش یافته که برای شرایط غیر همدوس می‌توانند قابل اغماض باشند. برای سیستم‌های بدون اندرکنش می‌توان مدل‌های زیادی در نظر گرفت ولی وقتی اندرکنشی وارد مسئله می‌شود برای حل آن نیاز به فیزیک غنی تر و تقریب‌های اضافی مختلف بوجود می‌آید.

یکی از روش‌های نظری برای مطالعه تراپرد کوانتومی در نانو سیستم‌ها در ولتاژ محدود، روش تابع گرین غیرتعادلی^{۱۶} ($NEGF$) است. این روش برای گستره وسیعی از مسائل فیزیکی مربوط به تراپرد کوانتومی در مقیاس مولکولی استفاده می‌شود. این روش برای شرایط بسیار غیرتعادلی با استفاده از

Peeter^{۱۰}magnetic quantum steps^{۱۱}magnetic quantum barriers^{۱۲}magnetic wells^{۱۳}Chang^{۱۴}Niu^{۱۵}Non Equilibrium Green Function Formalism^{۱۶}

فرمول بندی تابع گرین (GF) و روش شوینگر-کلدیش^{۱۷} بدست می آید و می تواند اثرات حاصل از اندرکنش هایی مثل اندرکنش الکترون - الکترون ، الکترون - فونون و... را نیز در بر بگیرد . این روش اولین بار برای ساختارهای مزوسکوپیک در نیمه اول دهه هفتاد توسط کارولی^{۱۸} پیشنهاد شد و توسط میر^{۱۹} و وینگرین^{۲۰} و جاهو^{۲۱} به شکل فرمول در آمد که عبارت دقیقی برای جریان غیرتعادلی یک نانوسیستم با اندرکنش و قرارگرفته میان دو کانال بدون اندرکنش بزرگ ، شامل جملاتی از تابع گرین غیرتعادلی نانوسیستم ، بدست آمد . [۳]

۳.۱ سیستم های مزوسکوپیک

مبحث فیزیک مزوسکوپیک طی دو دهه اخیر بطور فوق العاده ای مورد توجه فیزیکدانان ، از جنبه های نظری و تجربی ، قرار گرفته است . پیشرفت های اخیر در روش ها و دستگاه های آزمایشگاهی باعث ترقی قابل ملاحظه ای در درک این پدیده کوانتومی ، که در سیستم های فیزیکی مابین سیستم های ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک پدیدار می شود ، شده است . مبحثی که به دلیل کاربردهای آن در فناوری پیشرفت کرده و اغلب به عنوان الکترونیک کوانتومی^{۲۲} شناخته می شود .

سیستم های مزوسکوپیک در مقیاس ابعادی بین چند نانومتر (nm) تا چند میکرومتر (μm) قرار دارند یعنی چیزی میان ابعاد ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک . سیستم ها یا رساناهای مزوسکوپیک بزرگتر از چند اتم یا مولکول ، که مکانیک کوانتومی بطور مطلق در آن صدق می کند ، و کوچکتر از قابل مقایسه بودن با اجسام کلاسیک ، که رفتار اهمیک^{۲۳} (متناسب با قانون اهم) دارند ، هستند . [۴]

یک رسانا زمانی رفتار اهمیک از خود نشان می دهد که ابعادش از سه مقیاس طولی مشخصه بزرگتر باشد:

Schwinger – Keldysh^{۱۷}Caroli^{۱۸}Meir^{۱۹}Wingreen^{۲۰}Jauho^{۲۱}quantum electronics^{۲۲}Ohmic^{۲۳}

(۱) طول موج دو بروی ^{۲۴}، که وابسته به انرژی جنبشی الکترون است

(۲) مسافت آزاد میانگین ^{۲۵}، که مسافت طی شده توسط الکترون تا واهلش (نابودی) اندازه حرکت اولیه اش است

(۳) طول واهلش فاز ^{۲۶}، که مسافت طی شده توسط الکترون تا واهلش فاز اولیه اش است

این مقیاس های طولی بطور گسترده ای برای مواد مختلف متفاوت است و قویا تحت تأثیر دما، میدان مغناطیسی و ... می باشد. [۵]

در رساناهای مزوسکوپیک، الکترون مانند یک ذره کلاسیک منتشر نمی شود بلکه به شکل یک موج رفتار می کند مثل موج های الکترومغناطیسی در یک موجبر. طول موج دو بروی λ ، از چند آنگستروم (\AA) در فلزات تا 50 nm در نیمه رساناها تغییر می کند و کوتاهترین مقیاس طولی در سیستم های مزوسکوپیک محسوب می شود. الکترون ها در طول مشخصه L_ϕ ، طول واهلش فاز، بطور همدموس ^{۲۷} منتشر می شوند و بعد از آن یک برخورد غیرالاستیک باعث نابودی فاز اولیه شان می شود. این طول وابسته به دمای سیستم و جزئیات میکروسکوپیک آن مثل جفت شدگی الکترون - فونون و اندرکنش الکترون - الکترون می باشد. مسافت آزاد میانگین، (L_m) ، مسافتی است که الکترون میان دو برخورد الاستیک با ناخالصی ها طی می کند. [۴]

می دانیم که رسانایی در یک رسانای مستطیل شکل دو بعدی مستقیما متناسب با عرض رسانا، W و بطور معکوس متناسب با طول آن، L است یعنی:

$$G = \sigma \frac{W}{L}$$

که رسانندگی σ مربوط به خصوصیات ماده رسانا و مستقل از ابعاد آن است. [۵]

در مورد رساناهای مزوسکوپیک همدموس، که ابعادشان کوچکتر از طول واهلش فاز است، اثرات

^{۲۴} The deBroglie wavelength

^{۲۵} The Mean free path

^{۲۶} phase - relaxation length

^{۲۷} coherently

کوانتومی غالب بوده و رسانایی G وابسته به تعداد مدهای عرضی^{۲۸} است. فرمول لاندauer^{۲۹} یعنی $G = (e^2/h)\bar{T}$ ، تأیید کننده این مطلب است. این فرمول تساوی میان رسانایی و احتمال عبور الکترون از رسانا را نشان می دهد. تراپرد^{۳۰} \bar{T} مجموعه ای از این احتمال ها (عبور الکترون) روی همه مدهای عرضی ممکن است. ثابت $e^2/h \approx 1.26kw$. نقش مهمی در فیزیک سیستم های مزوسکوپیک بازی می کند و رسانندگی مربوط به یک مد عرضی است.

۴.۱ گازهای الکترونی با ابعاد پایین

در برخی از اولین آزمایش ها در زمینه فیزیک مزوسکوپیک از ساختارهای چندگانه نیمه رسانا مثل $GaAs/AlGaAs$ استفاده شده است. این ساختارهای چندگانه فصل مشترکی دارند که معرف یک لایه رسانای دو بعدی است که این لایه محدود از حامل های بار به عنوان گاز الکترونی دو بعدی^{۳۱} ($2DEG$) شناخته می شود. [۴] گازهای الکترونی در ابعاد پایین دارای اهمیت روزافزونی از لحاظ تجربی هستند.

۱.۴.۱ گاز الکترونی دو بعدی ($2DEG$): ساختار چندگانه $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$

در طی سه دهه اخیر، ساخت گاز الکترونی دو بعدی در فصل مشترک دو نیمه رسانا امکان پذیر شد و اولین نمونه از این نوع لایه ها MOSFET^{۳۲} های سیلیکونی، که جزء کلیدی مدارهای الکترونیکی یکپارچه^{۳۳} است، می باشد. جدیدترین نمونه از این دست، ساختار چندگانه $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ است. در این سیستم ها می توان به مسافت آزاد میانگین فوق العاده بالا (بیش از $10 \mu m$) رسید که برای مبحث الکترونیک سرعت بالا^{۳۴} بسیار مهم است و در تحقیقات اساسی روی بسیاری از اثرات

transverse modes^{۲۸}

landauer^{۲۹}

transmission^{۳۰}

2Dimensional Electron Gases^{۳۱}

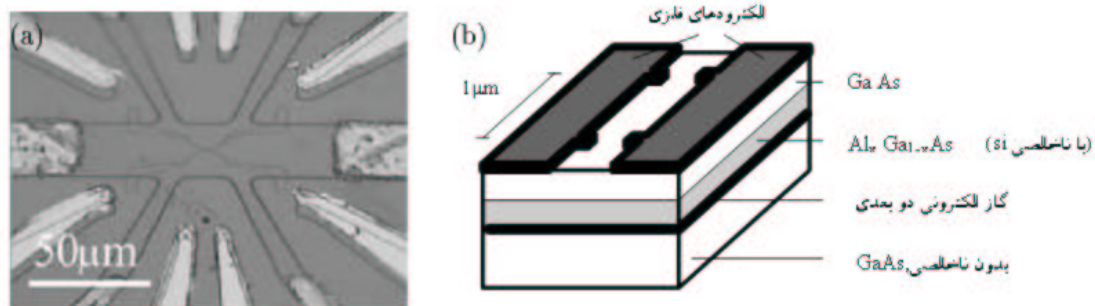
Modulation Doped Silicon Field Effect Transistor^{۳۲}

integrated electronic circuits^{۳۳}

high speed electronics^{۳۴}

کوانتومی در فیزیک ماده چگال مفید است. شکل (۱.۱) تصویری از یک دستگاه حقیقی و نمایی از لایه های مربوط به ساختار چندگانه را نمایش می دهد.

اختلاف مهم دو بلور نیمه رسانای سازنده این ساختار چندگانه در انتهای تراز رسانش آن ها است. برای $x = 0.3$ ، تراز رسانش بلور $Ga_{1-x}Al_xAs$ ، 300 meV بالاتر از تراز رسانش بلور $GaAs$ قرار دارد و نتیجه این اختلاف، حرکت الکترون های تراز رسانش بلور $Ga_{1-x}Al_xAs$ به تراز بلور $GaAs$ با کسب انرژی است. در دمای $T = 0$ مسلماً هیچ حامل بار آزادی در تراز های رسانش نیمه رسانا های خالص وجود ندارد ولی با تزریق اتم های Si به نیمه رسانای $Ga_{1-x}Al_xAs$ ، الکترون های رسانش فراهم و حرکت الکترون ها باعث تجمع آن ها در بخش $GaAs$ فصل مشترک ساختار چندگانه می شود. [۶] این عمل باعث تولید یک لایه رسانای نازک شده که به عنوان گاز الکترونی دو بعدی یا بطور خلاصه $2DEG$ شناخته می شود. تمرکز حامل های بار در یک $2DEG$ معمولاً در حدود $(1/cm^2) \times 10^{11}$ تا $(1/cm^2) \times 10^{12}$ است. اهمیت کاربردی این ساختارها استفاده آن ها به عنوان ترانزیستور اثر میدانی^{۳۵} است مثل $MODFET$ ^{۳۶} یا $HEMT$ ^{۳۷}. [۵]



شکل ۱.۱: (a) تصویری از یک دستگاه $GaAs$ ساخته شده در آزمایشگاه اورستد، انیستیتو نیلز بوهر (b) شمایی از دستگاه که لایه های مختلف را در ساختار نیمه رسانا نشان می دهد.

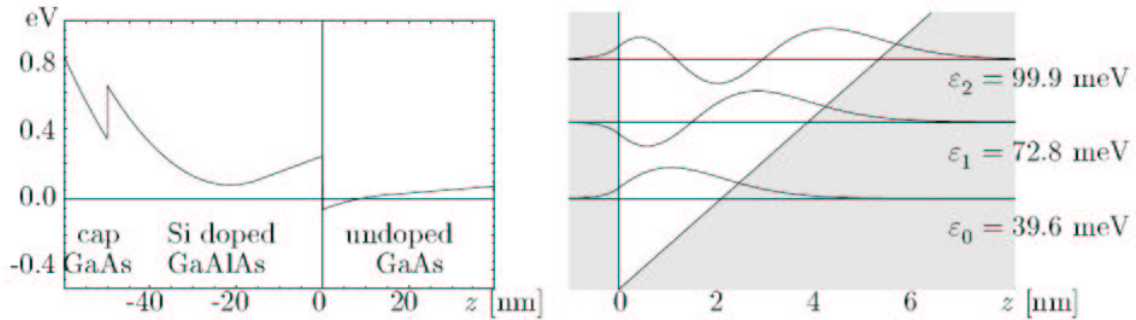
در شکل ۱.۲ نموداری به نمایش گذاشته شده است که در آن تراز رسانش حالت تعادلی، به شکل تابعی از موقعیت z موازی با فصل مشترک، کشیده شده است. نکته کلیدی در اینجا اطلاعاتی است

^{۳۵} Field effect transistor

^{۳۶} Modulation Doped Field Effect Transistor

^{۳۷} High Electron Mobility Transistor

که چاه پتانسیل تقریباً مثلثی^{۳۸}، در بخش $GaAs$ فصل مشترک در اختیار ما می‌گذارد.



شکل ۲.۱: تراز رسانش در $GaAs/GaAlAs$ یک ساختار چندگانه. چاه مثلثی در فصل مشترک وجود دارد. توابع موج $\zeta_n(z)$ و ویژه مقادیر مربوط به پایین‌ترین ۳ حالت چاه مثلثی

به دلیل وجود این چاه پتانسیل مثلثی باریک، تابع موج الکترون آزاد سه بعدی به شکل دو بعدی در می‌آید:

$$\psi_{\vec{k}\sigma}(\vec{r}) = 1/\sqrt{v} e^{ik_x x} e^{ik_y y} e^{ik_z z} \chi_\sigma \rightarrow \psi_{k_x, k_y, n, \sigma}(\vec{r}) = 1/\sqrt{A} e^{ik_x x} e^{ik_y y} \zeta_n(z) \chi_\sigma$$

که $\zeta_n(z)$ ویژه تابع n ام چاه پتانسیل مثلثی با ویژه انرژی ε_n است. با توجه به شکل ۲.۱، تنها در راستای محور z کوانتیدگی وجود دارد و انرژی کل برای هر ۳ راستای فضایی x, y, z به شکل:

$$\varepsilon_{k_x, k_y, n} = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) + \varepsilon_n$$

است. جرم مؤثر برای $GaAs$ طبق نتایج آزمایشگاهی مقدار $m^* = 0.067m$ بدست آمده است.

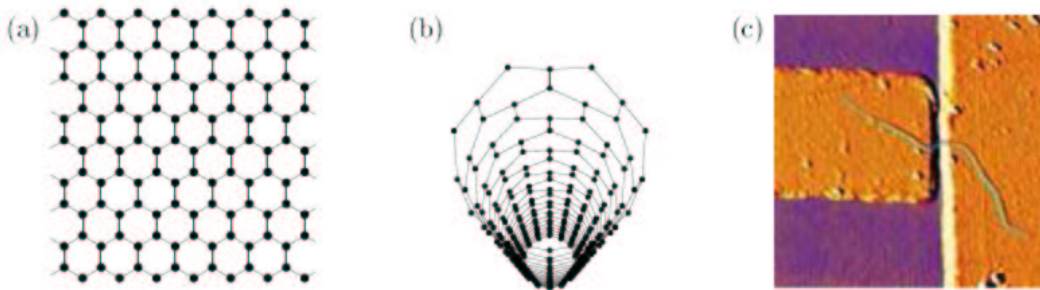
۲.۴.۱ گاز الکترونی یک بعدی ($1DEG$): نانولوله‌ها

در حدود نیمه دهه نود، زمینه تحقیقاتی جدیدی بر مبنای مطالعه روی مولکول‌های کربنی که شکل استوانه‌ای به خود گرفته و به عنوان نانولوله‌های کربنی شناخته می‌شوند، بناگذاری شد. نانولوله‌های کربنی را می‌توان به صورت صفحه گرافیتی معمولی دانست که به شکل استوانه‌ای لوله شده

^{۳۸}almost triangular quantum well

باشد و شعاعی در حدود $2nm \approx R_0$ و طولی بیش از صد برابر R_0 دارند (شکل ۳.۱). این مولکول های بلند و نازک برخی خواص غیر عادی دارند. چنین تصور می شود که این مولکول ها از مقاومترین مواد در جهان هستند و متناسب با نوع پیچش از خود خواص فلزی، نیمه رسانا یا عایق نشان می دهند. همانطور که یک ساختار چندگانه $GaAs$ یک صفحه فلزی دوبعدی است، یک نانولوله فلزی نیز تقریباً یک سیستم یک بعدی است که دو درجه آزادی فضایی آن مسدود شده باشد. تقارن استوانه ای نانولوله ها باعث می شود که تابع پایه موج تخت سه بعدی (x, y, z) تبدیل به تابع موج استوانه ای (x, r, ϕ) شود:

$$\psi_{\vec{k}\sigma}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{ik_x x} e^{ik_y y} e^{ik_z z} \chi_{\sigma} \rightarrow \psi_{k_x, n, l, \sigma}(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ik_x x} R_{nl}(\vec{r}) Y_l(\phi) \chi_{\sigma}$$



شکل ۳.۱: (a) اتم های کربن که یک صفحه گرافیتی را با شبکه های همگراگونالی می سازند. (b) یک مولکول نانولوله کربنی که از لوله شدن یک صفحه گرافیتی بدست می آید. (c) تصویر گرفته شده از آزمایشگاه اورستد، انیستیتو نیلز بوهر که نشان دهنده دسته ای نانولوله کربنی قرار گرفته میان دو الکترود فلزی است.

به دلیل وجود دو محدودیت در درجه آزادی شعاعی و سمتی (شکل ۴.۱.(a))، انرژی کل به شکل زیر خواهد بود:

$$\varepsilon_{k_x, n, l} = \frac{\hbar^2}{2m} k_x^2 + E_0^R + E_n^{\phi}$$