

به نام ایزد نیک پندار



دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

بررسی اثر میدان الکتریکی بر روی رسانندگی الکتریکی گرافن در شرایط محیطی
گوناگون

پژوهشگر :
سید محمد کاظم مدنی

استاد راهنما :
دکتر زهرا عالمی پور

استاد مشاور :
دکتر آرش سروری

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

شهریور ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه کردستان است.

*** تعهد نامه ***

اینجانب سید محمد کاظم مدنی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه گروه فیزیک تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

سید محمد کاظم مدنی

۱۳۸۹ / ۶ / ۲۲



دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش حالت جامد

عنوان:

بررسی اثر میدان الکتریکی بر روی رسانندگی الکتریکی گرافن در شرایط
محیطی گوناگون

پژوهشگر:

سید محمد کاظم مدنی

در تاریخ / / ۱۳ توسط کمیته تخصصی و هیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره
و درجه به تصویب رسید.

<u>امضاء</u>	<u>مرتبۀ علمی</u>	<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>هیات داوران</u>
	استادیار	دکتر زهرا عالمی پور	۱-استاد راهنما
	استادیار	دکتر آرش سروری	۲-استاد مشاور
	استادیار	دکتر مژگان نجفی	۳-استاد داور خارجی
	استادیار	دکتر محمد مهدی سلطان زاده	۴-استاد داور داخلی

مهر و امضاء معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

مهر و امضاء گروه

دانشکده

چکیده

کربن به عنوان یک عنصر منحصر به فرد در طبیعت همواره از دیرباز مورد توجه بوده است. ساختارهای جدیدی همچون نانولوله‌های کربن و فلورن با ویژگی‌های خاص خود، مطالعه روی ساختارهای متفاوت کربن را دوباره در کانون توجه قرار داد. در سال ۲۰۰۴ گرافن به عنوان یک تک لایه از اتم‌های کربن که یک پایه نظری برای سایر ساختارهای آن است کشف شد. بررسی خواص فیزیکی گرافن یکی زمینه‌های تحقیقاتی پر دامنه است. در این تحقیق ما با استفاده از روش شکست مکانیکی تماس به بررسی رسانش الکتریکی در گرافن می‌پردازیم. در این روش با قرار دادن لایه‌های نازکی از گرافیت حجیم بین رساناهای فلزی یک ریلی، و باز و بسته شدن ریلی، بر اثر شکسته شدن تماس، شاهد تغییرات ولتاژ دو سر تماس به صورت کوانتیده هستیم. داده‌های مربوط به تغییرات ولتاژ در هنگام شکستن تماس جمع‌آوری می‌شود و با رسم هیستوگرام‌ها و منحنی‌های رسانش در محیط‌های مختلف به بررسی رسانش الکتریکی لایه‌های گرافن می‌پردازیم. طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، به طور غالب قله $1G_0$ مشاهده می‌شود که در واقع می‌توان آن را به کمترین مقدار رسانش الکتریکی در گرافن نسبت داد که این مقدار مستقل از شرایط محیطی و ولتاژ اعمال شده به دو سر تماس است.

کلمات کلیدی: گرافن، رساناهای مزوسکوپیک، فرمول لاندائور، رسانش الکتریکی.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول (رسانش در سیستم‌های مزوسکوپیك).	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- گاز الکترون دو بعدی (2-DEG)	۳
۳-۱- زیر باندها	۵
۴-۱- مدهای عرضی یا زیر باندهای مغناطو الکتريکی	۷
۵-۱- سرعت فرمی و سطوح شبه فرمی	۱۰
۱-۵-۱- سرعت رانش یا سرعت فرمی؟	۱۱
۲-۵-۱- جدایی سطوح شبه فرمی	۱۳
۶-۱- رسانای بالستیک	۱۴
۱-۶-۱- مقاومت در رسانای بالستیک	۱۵
۲-۶-۱- محاسبه مقاومت اتصال در رسانای بالستیک	۱۷
۷-۱- فرمول لاندائو	۲۳
۸-۱- قانون اهم	۲۵
فصل دوم (گرافن: ساختار، خواص و ویژگی‌ها)	۲۸
۱-۲- مقدمه	۲۸
۲-۲- گرافن به عنوان بلور دو بعدی از اتم‌های کربن	۲۹
۳-۲- ساختار شبکه‌ای گرافن	۳۲
۴-۲- ساختار نواری گرافن	۳۶
۱-۴-۲- نوار π در گرافن	۳۶
۵-۲- خواص فیزیکی گرافن	۴۵
۶-۲- بررسی خواص الکترونی گرافن	۴۶
۷-۲- تاثیر مولکول‌های گاز در محیط بر رسانندگی گرافن	۵۳
۸-۲- گرافن راهی به سوی آینده الکترونیک	۵۷

فصل سوم (فرآیند انجام آزمایش، داده‌ها و نتایج).....	۵۹
۳-۱- مقدمه	۵۹
۳-۲- رسانش کوانتومی و روش‌های مطالعه آن	۶۰
۳-۲-۱- شکستن تماس و گسستگی رسانش	۶۱
۳-۲-۲- مشاهدات تجربی کوانتس در رسانش	۶۳
۳-۲-۳- بررسی رسانش کوانتومی با استفاده از روش <i>MCBJ</i>	۶۴
۳-۳- اصول و مبانی آزمایش	۶۶
۳-۴- هیستوگرام‌های رسانش	۷۶
۳-۴-۱- اسیلوسکوپ ذخیره کننده دیجیتالی (DSO)	۷۷
۳-۴-۲- تشکیل هیستوگرام‌های رسانش و تحلیل آن‌ها	۷۸
۳-۵- فرآیند انجام آزمایش	۸۰
۳-۵-۱- تجهیزات آزمایش	۸۱
۳-۵-۲- مراحل انجام آزمایش	۸۴
۳-۵-۳- اندازه‌گیری رسانش گرافن در فشار پایین	۸۷
۳-۵-۴- اندازه‌گیری رسانش گرافن در حضور گازهای آرگون و نیتروژن	۹۰
۳-۶- داده‌ها و نتایج	۹۱
۳-۶-۱- بررسی رسانش الکتریکی گرافن در محیط آزمایشگاه	۹۱
۳-۶-۲- بررسی رسانش الکتریکی گرافن در فشار پایین	۹۶
۳-۶-۳- بررسی رسانش الکتریکی گرافن در حضور گاز نیتروژن	۹۸
۳-۶-۴- بررسی رسانش الکتریکی گرافن در حضور گاز آرگون	۱۰۰
۳-۷- خلاصه و نتیجه‌گیری	۱۰۲
منابع	۱۰۴

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: نوار رسانش و ظرفیت در پیوند، (الف) قبل و (ب) بعد از انتقال بار [۲] ۴
- شکل ۲-۱: یک رسانای مستطیل شکل که دارای پتانسیل محدود کننده در راستای y است. ۷
- شکل ۳-۱: رابطه پاشندگی برای زیر باندهای الکترونیکی حاصل از قید الکترواستاتیک. زیر باندهای مختلف دارای اندیس n هستند. ۹
- شکل ۴-۱: حالتی که در دمای پایین در داخل دایره‌های به شعاع k_f هستند با اعمال میدان در جهت eE انتقال پیدا می‌کنند. ۱۲
- شکل ۵-۱: جریان خالص تنها به واسطه الکترونهای قرار گرفته در بین انرژی های F^+ و F^- ایجاد میشود. ۱۴
- شکل ۶-۱: یک رسانای بالستیک که بین دو اتصال بزرگ قرار گرفته است. ۱۶
- شکل ۷-۱: رابطه پاشندگی برای مدهای عرضی متفاوت در رسانای نازک. برای اتصال بدون بازتاب تراز شبه فرمی برای حالت $+k$ ، μ_1 و برای حالت $-k$ ، μ_2 است. ۱۸
- شکل ۸-۱: (الف) یک رسانای بالستیک بین دو اتصال قرار گرفته (ب) در رسانای عریض چگالی مدهای عرضی بسیار بالاست (قسمت پررنگ) (ج) تغییرات پتانسیل الکتروشمیایی از یک اتصال به اتصال دیگر. ۲۲
- شکل ۹-۱: رسانایی با احتمال انتقال T که به وسیله دو بست اتصال به دو اتصال بزرگ متصل شده است. ... **Error!**

Bookmark not defined.

شکل ۱-۲: گرافن به عنوان پایه دو بعدی برای سایر پیکربندیهای کربن. فولورن صفر بعدی (چپ)، نانولوله یک

بعدی (وسط) و گرافیت سه بعدی (راست) [۸] **Error! Bookmark not defined.**

شکل ۲-۲: گرافن به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی به تصویر کشیده شده. ناحیه تا خورده نشان دهنده ارتفاع نسبی

حدود 4 \AA است که به طور واضح یک تک لایه گرافن را نشان میدهد [۱۵] **Error! Bookmark not**

defined.

شکل ۳-۲: نحوه اشغال شدن اوربیتالهای اتمی بر اثر هیبریداسیون. **Error! Bookmark not defined.**

شکل ۴-۲: ساختار اوربیتالها پس از هیبریداسیون. اوربیتالهای سبز π و اوربیتالهای آبی σ هستند. **Error!**

Bookmark not defined.

شکل ۵-۲: (الف) شبکه مستقیم و یاخته بسیط در گرافن که شامل دو زیر شبکه A و B میشود. (ب) منطقه بریلون در

شبه وارون(ناحیه هاشور خورده) و نقاط با تقارن بالا در آن. **Error! Bookmark not defined.**

شکل ۶-۲: اتمهای کربن A و B در یاخته بسیط(لوزی به صورت خط چین) **Error! Bookmark not**

defined.

شکل ۷-۲: اتم کربن B در شبکه گرافن که با سه بردار m_1 ، m_2 و m_3 به سه اتم A مرتبط شده. **Error!**

Bookmark not defined.

شکل ۸-۲: ساختار نواری گرافن [۲۱]..... **Error! Bookmark not defined.**

شکل ۹-۲: منطقه بریلون در گرافن و نقاط K و K' روی آن [۲۲]..... **Error! Bookmark not defined.**

شکل ۱۰-۲: رابطه پاشندگی در گرافن حول نقطه K [۲۲]..... ۴۴

شکل ۱۱-۲: منحنی تغییرات مقاومت ویژه نسبت به ولتاژ گیت. مخروطهای داخل شکل نشان دهنده تغییرات انرژی

فرمی در دو ناحیه است [۸]..... ۴۵

شکل ۱۲-۲: تغییرات مقاومت ویژه در گرافن نسبت به ولتاژ گیت و دما [۲۲]..... **Error! Bookmark not**

defined.

شکل ۱۳-۲: (الف) طرحواره‌ای از روش کار میکروسکوپ (ب) نمونه‌های نازک گرافیت روی زیر لایه SiO_2/Si

(پ) یک وسیله مزوسکوپیک ساخته شده از نمونه مورد نظر [۲۶]..... ۴۷

شکل ۱۴-۲: رسانش نرمالیزه شده نمونه‌ها با ضخامتهای مختلف به صورت تابعی از ولتاژ گیت در دمای $T=1.7 K$

[۲۶]..... ۴۹

شکل ۱۵-۲: (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از تجهیزات گرافیتی ساخته شده. (ب) تغییرات

رسانندگی گرافن به صورت تابعی از ولتاژ گیت [۱۵]..... ۵۰

شکل ۱۶-۲: (الف) نمای طرحواره‌ای از یک وسیله گرافن معلق. (ب) تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی [۲۵] ... ۵۰

شکل ۱۷-۲: مقایسه بین مقاومت در نمونه‌های گرافن معلق (سمت چپ) و غیر معلق (سمت راست) **Error!**

Bookmark not defined.

شکل ۲-۱۸: الف) وابستگی تحرک به چگالی حامل برای گرافن معلق (منحنی قرمز) و غیر معلق (منحنی آبی) در دمای ۱۰۰K و در مدل بالستیک ب) وابستگی مسیر آزاد میانگین به چگالی حامل در دماهای مختلف [۲۵]..... ۵۳

شکل ۲-۱۹: حساسیت گرافن به مولکولهای گازی که به صورت شیمیایی تزریق شده است [۳۶] **Error!**

Bookmark not defined.

شکل ۲-۲۰: تغییرات رسانندگی با افزایش غلظت مولکولهای تزریق شده از صفر (منحنی سیاه) تا حدود $1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (منحنی قرمز) [۳۶]..... **Error! Bookmark not defined.**

شکل ۳-۱: یک نانو سیم که رابط بین دو منبع است [۴۷]..... ۶۲

شکل ۳-۲: شکستن تماس نقطه‌ای و تشکیل نانو سیم..... ۶۵

شکل ۳-۳: ریلی تجاری که در آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است..... ۶۶

شکل ۳-۴: آنچه در یک چرخه باز و بسته شدن در ریلی تجاری رخ می‌دهد. (الف) تغییرات ولتاژی که به سیم پیچ اعمال شده است. (ب) تغییرات زمانی مربوط به ولتاژ در دو سر تماس. (ج) نمایان شدن تحولات زمانی ولتاژ دو سر نانو سیم به صورت پله‌ای در لحظه شکست تماس [۵۴]..... ۶۹

شکل ۳-۵: طرح کلی چینش آزمایش: (الف) ریلی (ب) اسیلوسکوپ دیجیتالی و (ج) منبع تغذیه AC..... ۷۰

شکل ۳-۶: مدار معادل آزمایش، R_c مقاومت تماس، V_{D50} اختلاف پتانسیل دو سر R_2 و V_0 ولتاژ اعمال شده است..... ۷۴

شکل ۳-۷: رسم هیستوگرام رسانش در محیط نرم افزار *LabView*..... ۸۰

شکل ۳-۸: منحنی‌های متفاوت تغییرات ولتاژ در چرخه‌های مختلف باز و بسته شدن..... ۸۰

شکل ۳-۹: ریلی تجاری..... ۸۱

شکل ۳-۱۰: منبع تغذیه DC..... ۸۱

شکل ۳-۱۱: منبع تغذیه AC..... ۸۲

شکل ۳-۱۲: فشار سنج بر روی سر پوش سیلندر..... ۸۲

شکل ۳-۱۳: پمپ تخلیه..... ۸۵

شکل ۳-۱۴: اسیلوسکوپ دیجیتالی..... ۸۶

شکل ۳-۱۵: چینش کلی آزمایش..... ۸۵

شکل ۳-۱۶: الف) توده حجیم گرافیت (ب) لایه نازکی از گرافیت که با چسب نواری جدا شده است..... ۸۵

- شکل ۳-۱۷: دیود ساطع کننده نور (LED)..... ۸۸
- شکل ۳-۱۸: ریلی و LED داخل سیلندر قرار دارند. تابش پرتوها از LED باعث جدا شدن مولکول‌ها از سطح گرافن می‌شود..... ۸۹
- شکل ۳-۱۹: منحنی تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در طول مدت شکستن تماس برای ولتاژ ۱۲ ولت..... ۹۱
- شکل ۳-۲۰: منحنی رسانش نسبت به زمان در طول شکستن تماس در شرایط آزمایشگاه برای ولتاژ ۱۲ ولت..... ۹۲
- شکل ۳-۲۱: هیستوگرام رسانش الکتریکی گرافن در شرایط آزمایشگاه..... ۹۳
- شکل ۳-۲۲: هیستوگرام‌های رسانش در محیط آزمایشگاه برای ولتاژهای ۲ و ۴ ولت..... ۹۴
- شکل ۳-۲۳: هیستوگرام‌های رسانش در محیط آزمایشگاه برای ولتاژهای ۶ و ۸ ولت..... ۹۴
- شکل ۳-۲۴: هیستوگرام‌های رسانش در محیط آزمایشگاه برای ولتاژهای ۱۰ و ۱۲ ولت..... ۹۵
- شکل ۳-۲۵: مقادیر مربوط به قله $1G_0$ در ولتاژهای مختلف..... ۹۶
- شکل ۳-۲۶: منحنی تغییرات ولتاژ با زمان در فشار پایین..... ۹۷
- شکل ۳-۲۷: منحنی رسانش گرافن در فشار پایین..... ۹۷
- شکل ۳-۲۸: هیستوگرام رسانش در فشار پایین..... ۹۸
- شکل ۳-۲۹: منحنی تغییرات ولتاژ با زمان در حضور نیتروژن..... ۹۹
- شکل ۳-۳۰: منحنی رسانش در حضور گاز نیتروژن..... ۹۹
- شکل ۳-۳۱: هیستوگرام رسانش در حضور گاز نیتروژن..... ۱۰۰
- شکل ۳-۳۲: منحنی تغییرات ولتاژ با زمان در حضور آرگون..... ۱۰۱
- شکل ۳-۳۳: منحنی رسانش در حضور گاز آرگون..... ۱۰۱
- شکل ۳-۳۴: هیستوگرام رسانش در حضور گاز آرگون..... ۱۰۲

فصل اول

رسانش در سیستم‌های مژوسکوپیک

۱-۱- مقدمه

یکی از مهم ترین پیشرفت‌های فن آوری در دهه‌های اخیر، گسترش روز افزون سیستم‌های الکترونیکی است. در طول مدت زمان اندکی پس از سال ۱۹۴۸ که اولین ترانزیستور اختراع شد و انواع قطعات الکترونیکی به تبع آن ساخته شدند. در سال ۱۹۵۹ مدارهای مجتمع تحول عظیمی در کوچک کردن این قطعات ایجاد کردند و به همین ترتیب رشد سریع پیشرفت‌ها ادامه پیدا کرد. امروزه قطعات الکترونیکی در اندازه‌های میکرو ساخته می‌شوند و تلاش‌ها برای هر چه کوچک‌تر کردن و در عین حال افزایش کارایی آن‌ها در وسایل الکترونیکی باعث ایجاد رقابتی چشمگیر در صنایع الکترونیک شده است. ساخت قطعات الکترونیکی مثل ترانزیستورهایی در اندازه نانو شاید یکی از رویاهایی است که تحقق آن شکل زندگی در جوامع مدرن را کاملاً تغییر دهد.

آنچه در این راستا مورد توجه است تغییر نظام حاکم بر سیستم‌های کوچک مقیاس در مقایسه با نمونه‌های بزرگ‌تر می‌باشد به طوری که با کوچک شدن اندازه قطعات تا مرتبه مسیر آزاد میانگین الکترون و یا کوچک‌تر از آن دیگر قوانین متداول فیزیک مانند قانون اهم معتبر نیستند.

می‌دانیم که در یک رسانای اهمی روابط رسانندگی از قانون اهم به شکل زیر پیروی می‌کند:

$$V = IR \quad \text{و} \quad R = \rho L/A$$

که در این جا ρ مقاومت ویژه، A سطح مقطع و L طول رسانا است. همچنین در یک رسانای دو بعدی مستطیل شکل رسانش با عرض آن (W) رابطه مستقیم دارد در حالی که با طول آن (L) به طور معکوس

$$G = \sigma \frac{W}{L} \quad \text{متناسب است:}$$

رسانندگی (σ) یک خاصیت ذاتی برای رسانا و در نتیجه مستقل از ابعاد آن است. این که تا کجا قانون

اهم می‌تواند خواص رسانندگی را بیان کند مسئله ایست که تنها زمان پاسخگوی آن بود. در دهه ۱۹۸۰ با پیشرفت‌هایی که در زمینه ساخت رساناهایی در اندازه‌ی کوچک به وجود آمد، تحقیقات بر روی این موضوع رشد چشمگیری یافت و باعث شد از نقطه نظر مفهومی دید خوبی برای توصیف شارش جریان در اندازه‌های کوچک‌تر از مسیر آزاد میانگین الکترون به وجود بیاید.

با نگاهی به آنچه در مورد یک رسانای مستطیل شکل اهمی گفته شد انتظار می‌رود با کاهش طول

رسانا رسانندگی آن افزایش یابد تا جایی که با نزدیک شدن طول آن به صفر رسانندگی باید بی‌نهایت

شود. اما آنچه در عمل رخ می‌دهد این است که رسانندگی نه تنها بی‌نهایت نمی‌شود بلکه به یک مقدار

حدی میل می‌کند. در اینجا است که با ناتوانی فیزیک کلاسیک در توضیح پدیده‌هایی از این دست،

فیزیک کوانتومی و مفهوم احتمال گذار برای توصیف رفتار رساناهایی به اندازه‌ی مسیر آزاد میانگین

(*MeanFree Path*) الکترون به کمک ما می‌آیند.

در چنین رساناهایی پدیده‌های مزوسکوپیکی دیده می‌شود که ناشی از ابعاد کاهش یافته‌ای است که در مقایسه با مشخصه معیار طول برای الکترون‌های رسانشی در توده جامد به وجود آمده است. برخی از این معیارهای مهم طول عبارتند از: طول موج فرمی λ_F که با انرژی جنبشی الکترون متناسب است، مسیر آزاد میانگین l که الکترون قبل از این که اندازه حرکت اولیه‌اش را از دست بدهد می‌پیماید و طول واهلش فاز l_ϕ که به عنوان فاصله‌ای در نظر گرفته می‌شود که الکترون قبل از دست دادن فاز اولیه‌اش طی می‌کند. بنابراین طول یک سیستم مزوسکوپیکی به پارامترهای متعددی وابسته است و می‌تواند از چند نانومتر تا حدود ۱۰۰ میکرومتر باشد. زمانی یک رسانا رفتار اهمی از خود نشان می‌دهد که ابعاد آن از هر یک از سه معیار طول بالا بسیار بزرگتر باشد. این طول‌های معیار برای مواد گوناگون متفاوت است و به شدت با دما، میدان مغناطیسی و سایر عوامل خارجی تغییر می‌کند.

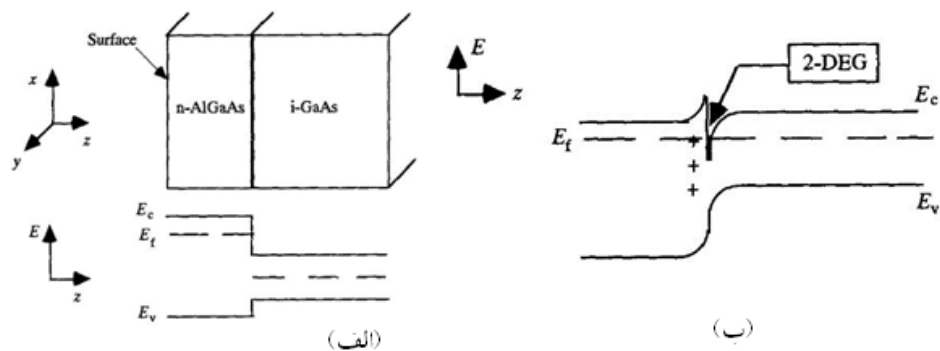
رسانش الکتریکی در رساناهای مزوسکوپیکی به صورت کوانتیده توصیف می‌شود که واحد آن $G_0 = \frac{2e^2}{h} = 77.4809 \times 10^{-6} \Omega^{-1}$ می‌باشد [۱]. در اینجا e بار الکتریکی و h ثابت پلانک است. با توجه به فرمول لاندائو-بوتیکر^۱ میزان مشارکت هر مد پیش رونده اشغال شده در رسانش کل دقیقاً $\frac{2e^2}{h}$ می‌باشد. بنابراین ما در این فصل به بررسی این کوانتس رسانش که نتیجه کاهش اندازه تا حد طول موج فرمی است می‌پردازیم و رویکرد لاندائو را برای توصیف ترابرد مزوسکوپیکی شرح می‌دهیم.

۲-۱- گاز الکترون دو بعدی (2-DEG)

برای روشن شدن مفهوم گاز الکترون دو بعدی نمونه متداولی را در نظر می‌گیریم که بسیاری از کارهای انجام شده در رابطه با رساناهای مزوسکوپیکی بر مبنای آن انجام شده است: پیوند $GaAs$ - $AlGaAs$ ، که در آن یک لایه رسانای نازک دو بعدی در فصل مشترک بین $GaAs$ و $AlGaAs$ تشکیل

۱. Landauer-Buttiker formula

می‌شود. فرض کنید در اولین تماس بین لایه‌ها، نوار رسانش در راستای Z قرار می‌گیرد (شکل ۱-۱)، از آنجا که انرژی فرمی λ_F در باند ممنوعه‌ی عریض لایه $AlGaAs$ بزرگ‌تر از باند ممنوعه‌ی باریک لایه $GaAs$ است، الکترون‌ها از $n-AlGaAs$ ریزش کرده و باعث ایجاد دهنده‌هایی با بار مثبت می‌شوند. این بار فضایی یک پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند که باعث می‌شود نوارها، تغییراتی مطابق شکل ۱-۱ داشته باشند. در حالت تعادل انرژی فرمی همه جا ثابت است.



شکل ۱-۱: نوار رسانش و ظرفیت در پیوند، (الف) قبل و (ب) بعد از انتقال بار [۲]

نزدیک فصل مشترک $GaAs-AlGaAs$ چگالی الکترونی در یک فضای کوچک، به شدت زیاد می‌شود و در حالی که انرژی فرمی داخل نوار رسانش قرار گرفته، لایه نازکی از رسانا تشکیل می‌شود که همان گاز الکترون دوبعدی تعبیر می‌شود. تراکم حامل‌ها در یک گاز دو بعدی نوعی $2 \times 10^{11} cm^{-2}$ تا $2 \times 10^{12} cm^{-2}$ می‌باشد. نرخ پراکندگی بسیار پایین یکی دیگر از ویژگی‌های این نمونه است. کمیتی که به خوبی می‌تواند نشان دهنده تاثیر نقایص و پراکندگی‌ها در سیستم باشد پویایی یا تحرک^۱ حامل‌هاست که به صورت نسبت سرعت رانش حامل‌ها به میدان الکتریکی خارجی نشان داده می‌شود:

$$\mu = \left| \frac{v_d}{E} \right| = \frac{e\tau_m}{m}$$

که در این جا τ_m زمان واهلش تکانه است. در یک گاز الکترون دو بعدی با تراکم

۱. Mobility

حامل‌های 10^{12}cm^{-2} و در ضخامت حدود 100Å حامل‌هایی با تحرک بیش از $10^6 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ مشاهده می‌شود [۲].

۱-۳- زیرباندها

رسانش الکترونی در نیمه رساناها هم به وسیله الکترون‌های نوار رسانش و هم به وسیله حفره‌های نوار ظرفیت انجام می‌شود. اما بیشتر آزمایش‌ها در رساناهای مزوسکوپییک شامل شارش الکترون در نوار رسانش می‌شود. دینامیک الکترون در نوار رسانش به واسطه معادله جرم موثر^۱ بیان می‌شود:

$$\left[E_c + \frac{(i\hbar\nabla + eA)^2}{2m^*} + U(r) \right] \Psi(r) = E\Psi(r) \quad (1-1)$$

که در آن داریم:

$U(r)$: انرژی پتانسیل مربوط به بار فضایی

A : پتانسیل برداری

m^* : جرم موثر

E_c : انرژی لبه نوار رسانش

این معادله با این که شبیه معادله شرودینگر است در واقع معادله جرم موثر تک نوار نامیده می‌شود. اثر پتانسیل دوره‌ای شبکه در مقیاس اتمی، به صورت جرم موثر m^* بیان می‌شود، یعنی در نوار رسانش، الکترونی که تحت تاثیر میدان دوره‌ای شبکه است، دارای جرم موثری است که به شکل زیر نشان داده می‌شود:

۱. Effective mass equation

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \quad (2-1)$$

که k بردار موج بلوخ مربوط به حالت انرژی E الکترون در نوار رسانش است. با در نظر گرفتن گاز الکترونی دو بعدی در شکل ۱-۱ (الف) می بینیم که الکترون‌ها در صفحه x - y آزادانه انتشار می یابند اما در راستای z با پتانسیل $U(z)$ محدود شده اند. توابع موج در چنین ساختاری با فرض صفر بودن میدان مغناطیسی ($A=0$) به شکل زیر نوشته می شود:

$$\Psi(r) = \phi_n(z) \exp(ik_x x) \exp(ik_y y) \quad (3-1)$$

همچنین رابطه پاشندگی به صورت:

$$E = E_c + \varepsilon_n + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) \quad (4-1)$$

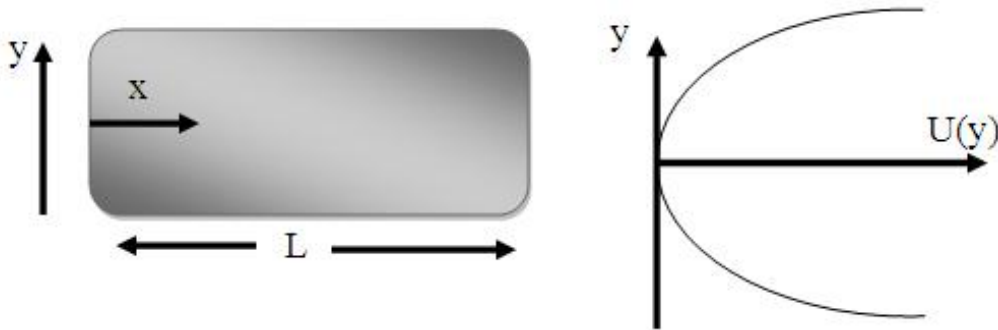
بیان می شود که در آن اندیس n زیرباندهای مختلف را نشان می دهد. این زیرباندها دارای توابع موج متفاوت $\phi_n(z)$ در راستای z و همچنین انرژی جدایی ε_n می باشند. معمولا در دمای پایین با چگالی حامل های کم فقط پایین ترین زیر باند با $n=1$ اشغال می شود و زیر باندهای بالاتر نقش چندانی ندارند. بنابراین با نادیده گرفتن جهت z ، رسانا را به یک سیستم دو بعدی در صفحه x - y ساده کرده و معادله (۱-۱) را به شکل زیر می نویسیم:

$$\left[E_s + \frac{(\hbar \nabla + eA)^2}{2m^*} + U(x, y) \right] \Psi(x, y) = E \Psi(x, y) \quad (5-1)$$

که در آن $E_s = E_c + \varepsilon_1$ می باشد.

۴-۱- مدهای عرضی^۱ یا زیرباندهای مغناطوالکتریکی^۲

یکی از ویژگی‌های رساناهای نازک این است که مدهای عرضی متفاوت به واسطه انرژی کاملاً از یکدیگر مجزا می‌شوند. چنین رساناهایی اغلب موجبرهای الکترونی^۳ نامیده می‌شوند. برای درک این موضوع کفایت یک رسانای دو بعدی یکنواخت در راستای x که در راستای y پتانسیل محدود کننده $U(y)$ بر آن اعمال شده در نظر بگیریم (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱: یک رسانای مستطیل شکل که دارای پتانسیل محدود کننده در راستای y است.

حرکت الکترون با معادله جرم موثر بیان می‌شود:

$$\left[E_s + \frac{(\hbar\nabla + eA)^2}{2m^*} + U(x, y) \right] \Psi(x, y) = E\Psi(x, y)$$

اگر میدان مغناطیسی B در راستای محور z عمود بر صفحه رسانا در نظر گرفته شود خواهیم داشت:

$$\vec{A} = \hat{x}By \Rightarrow A_x = -By \quad \text{و} \quad A_y = 0$$

و می‌توان معادله بالا را به شکل زیر نوشت:

$$\left[E_s + \frac{(p_x + eBy)^2}{2m^*} + \frac{p_y^2}{2m^*} + U(y) \right] \Psi(x, y) = E\Psi(x, y) \quad (۶-۱)$$

۱. Transverse modes

۲. Magneto-electric Subbands

۳. Electron Waveguides