





## انتقال اسپین در ابر شبکه گرافین فرومغناطیس

نگارش

فهیمة اعظمی دولت آبادی

استاد راهنما: دکتر ایوب اسماعیل پور

استاد مشاور: دکتر مهدی سعادت

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک حالت جامد

دی ۱۳۹۲

باسمه تعالی



### تهدنامه اصالت اثر

اینجانب فهیمه اعظمی دولت آبادی معتمد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه/رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی میباشد.

فهیمه اعظمی دولت آبادی

امضاء

به پاس قلب های بزرگشان

به پاس ایثار و از خودگذشتگی شان

به پاس دعا های خیرشان که بدرقه راهم بود

به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه تقدیم به:

کنجینه های زندگی ام، پدر و مادر عزیزم

حامی بهیشتگی ام، همسر فداکارم

و

تک خواهر و برادر مهربانم

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونان شد و به بهمنشینی رحروان علم و دانش مستخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

از اساتد کرامی جناب آقای دکتر ایوب اسماعیل پور که با حسن خلق و سعه صدر مرا از دانش، تجربه و راهبانی های ارزنده خویش بهره مند ساختند.

از اساتد فرزانه و دلسوز جناب آقای دکتر مهدی سعادت که زحمات مشاوره پیمان نامه مرا منتقل شدند و بهواره در محضراتشان علاوه بر تحصیل علم، درس اخلاق نیز آموختم.

بی نهایت سپاسگزارم

## چکیده

در این اثر انتقال اسپین را در اتصالات گرافینی گرافین نورمال / گرافین فرومغناطیس / گرافین نورمال که یک الکتروود به گرافین فرومغناطیس ضمیمه شده است مطالعه و بررسی می کنیم.

سپس در می یابیم که یک میدان تبدلی از گرافین فرومغناطیس ناشی می شود و جریان اسپین در میان اتصال یک رفتار نوسانی دارد که با پتانسیل شیمیایی در گرافین فرومغناطیس رابطه دارد و قابلیت تنظیم با ولتاژ گیت را دارد. به طور خاص یک جریان اسپین به دست می آوریم که با ولتاژ گیت قابل کنترل است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی رسانندگی انتقال اسپین در ابرشبکه گرافین فرومغناطیس است. که با توجه به قابلیت کنترل بالایی از جریان اسپین در ابرشبکه گرافین فرومغناطیس می توانیم به گسترش علم اسپینترونیک کمک کنیم و مهم ترین نتیجه ای که می توانیم داشته باشیم درباره فیلتر اسپینی است.

واژه های کلیدی: گرافین، اسپین، ابرشبکه، رسانندگی، اسپینترونیک

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱: گرافین و خصوصیات منحصر به فرد آن.....
۲	مقدمه.....
۴	۱-۱- کربن و دگر شکل های آن.....
۶	۲-۱- بررسی پایداری و روش های ساخت گرافین.....
۹	۳-۱- پارادوکس کلاین در گرافین.....
۱۰	۴-۱- فیزیک پارادوکس کلاین.....
۱۵	۵-۱- تقریب تنگ بست.....
۱۹	۶-۱- رابطه ی پاشندگی در گرافین.....
۲۶	فصل ۲: انتقال اسپین در گرافین.....
۲۷	مقدمه.....
۲۸	۱-۲- گرافین بهترین مورد برای انتقال اسپین.....
۳۰	۲-۲- تزریق و آشکار کردن جریان اسپین.....
۳۴	۳-۲- هندسه دریچه اسپین غیر متمرکز.....
۳۶	فصل ۳: کنترل انتقال اسپین در اتصالات گرافین فرو مغناطیس.....
۳۷	مقدمه.....
۳۸	۱-۳- انتقال اسپین در اتصال گرافینی گرافین معمولی / گرافین فرومغناطیس / گرافین معمولی.....
۴۰	۲-۳- محاسبه توابع موج سیستم.....
۴۴	۳-۳- محاسبه ضریب عبور سیستم.....
۴۶	۴-۳- نتایج تحلیلی سیستم.....
۵۰	فصل ۴: انتقال اسپین در ابر شبکه گرافین فرو مغناطیس.....
۵۱	مقدمه.....
۵۲	۱-۴- مدل.....
۵۳	۲-۴- محاسبه ضریب عبور اتصالات ابر شبکه گرافین فرومغناطیس.....

۳-۴- بررسی انتقال اسپین در ابر شبکه گرافین فرومغناطیس با نتایج تحلیلی.....	۵۶
فصل ۵: نتایج و پیشنهادات.....	۷۰
۱-۵- نتایج.....	۷۱
۲-۵- پیشنهادات.....	۷۲
منابع.....	۷۳



## فهرست نمودارها

صفحه	عنوان
۴۷.....	نمودار (۱-۳): رسانندگی به عنوان تابعی از $\chi$ .....
۴۸.....	نمودار (۲-۳): رسانندگی اسپینی $G_S$ به عنوان یک تابع از $\chi$ .....
۴۹.....	نمودار (۳-۳): $G_S$ به عنوان یک تابع از $\chi_H$ .....
۵۸.....	نمودار (۱-۴): رسانندگی سیستم $G_{\uparrow, \downarrow}$ به عنوان تابعی از $U$ برای $N$ های مختلف.....
۵۹.....	نمودار (۲-۴): رسانندگی اسپینی $G_S$ بر حسب تابعی از $U$ .....
۶۰.....	نمودار (۳-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از انرژی شیمیایی برای دو مقدار مختلف طول چاه.....
۶۱.....	نمودار (۴-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از انرژی شیمیایی برای مقادیر مختلف انرژی فرمی.....
۶۲.....	نمودار (۵-۴): رسانندگی اسپینی ابر شبکه فرومغناطیس تابع انرژی شیمیایی برای $D=42.5, 60$ .....
۶۳.....	نمودار (۶-۴): رسانندگی اسپینی به عنوان تابعی از طول ناحیه گرافین معمولی.....
۶۴.....	نمودار (۷-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از طول سد.....
۶۵.....	نمودار (۸-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از میدان تبدلی.....
۶۶.....	نمودار (۹-۴): رسانندگی اسپینی بر حسب میدان تبدلی با مقادیر متفاوت پهنای چاه.....
۶۷.....	نمودار (۱۰-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از میدان تبدلی برای دو مقدار انرژی شیمیایی.....
۶۸.....	نمودار (۱۱-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از میدان تبدلی برای پهنای متفاوت سد مغناطیسی.....
۶۹.....	نمودار (۱۲-۴): رسانندگی اسپینی تابعی از میدان تبدلی برای $L$ و $D$ های مختلف.....

## فهرست شکل ها

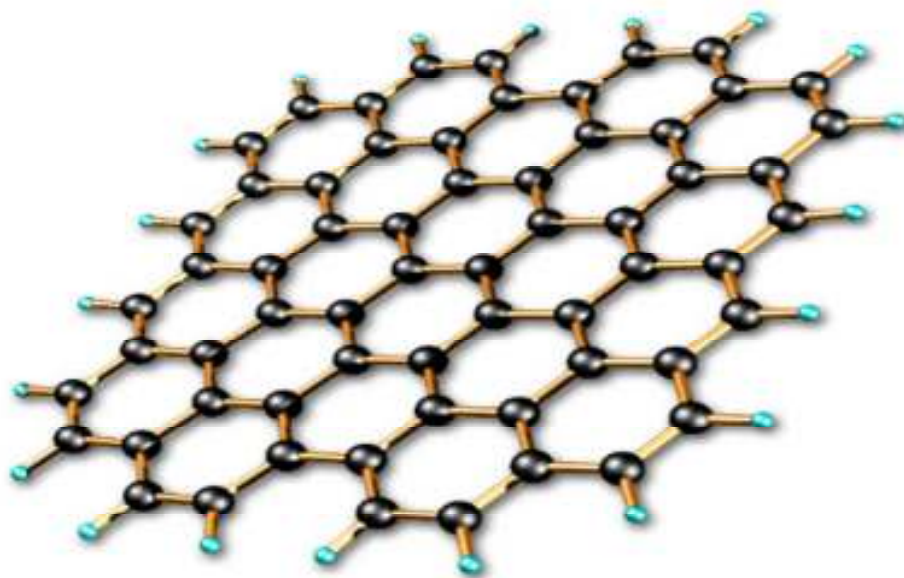
عنوان	صفحه
شکل (۱-۱): شکل ساختاری گرافین.....	۲
شکل (۲-۱): ساختار بلوری دگرشکل های کربن.....	۶
شکل (۳-۱): گرافین تولید شده به روش های مختلف.....	۹
شکل (۴-۱): شکل پراکنده شدن الکترون با انرژی $E$ از پله کلایین با ارتفاع $V > 2m$ .....	۱۳
شکل (۵-۱): نمایشی از بردارهای شبکه و بردارهای همسایگی در شبکه گرافین.....	۱۶
شکل (۶-۱): بردارهای شبکه وارون و نقاط مختلف ناحیه ی بریلوئن در شبکه وارون گرافین.....	۱۷
شکل (۷-۱): رابطه ی پاشندگی برای شبکه لانه زنبوری شکل در مدل تقریب تنگ بست.....	۲۱
شکل (۱-۲): رسانش کمینه گرافین.....	۳۰
شکل (۲-۲): مقاومت دریچه اسپین $GMR$ ، فرومغناطیسی / نرمال / فرومغناطیسی.....	۳۳
شکل (۳-۲): یک نوع چهار پایانه غیر متمرکز در ساختار دریچه اسپین گرافین.....	۳۵
شکل (۱-۳): مدل اتصال گرافین معمولی / فرومغناطیس / معمولی متناظر با مخروط های دیراک.....	۳۹
شکل (۱-۴): مدل ابر شبکه گرافین فرومغناطیس متناظر با مخروط های دیراک.....	۵۲
شکل (۲-۴): ابر شبکه گرافین فرومغناطیس.....	۵۲
شکل (۳-۴): مدلی از ابر شبکه گرافین فرومغناطیس.....	۵۴

## فصل اول

گرافین و خصوصیات منحصر به فرد آن

## مقدمه

گرافین<sup>۱</sup> به صفحه‌ی تک لایه‌ی تخت از اتم‌های کربن گفته می‌شود که در یک شبکه‌ی بلوری دو بعدی لانه زنبوری شکل، پکیده شده‌اند (شکل ۱-۱). گرافین همان صفحه‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار گرافیت است. همچنین گرافین را می‌توان پایه‌ی ساختار فلورین و نانو لوله‌ها دانست.



شکل (۱-۱): شکل ساختاری گرافین .

با اینکه به صورت تجربی مدت کوتاهی است که این ساختار در آزمایشگاه به دست آمده است [۱ و ۲] ولی در تئوری سال‌هاست که در مورد آن مطالعه شده است [۳ و ۴ و ۵]. این مطالعات برای بررسی خواص مواد بر پایه‌ی کربن (مانند گرافیت، نانو لوله‌های کربنی و...) به کار برده می‌شد سال‌های بعد پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که گرافین نمی‌تواند شبیه ساز خوبی برای نظریه‌ی کوانتومی نسبیتی و

---

<sup>۱</sup> - Graphene

الکترو دینامیک ۲+۱ بعدی، با انرژی های پایین تر در ماده چگال باشد [۸ و ۷ و ۶] با این حال تصور بر آن بود که گرافین یک ماده مطالعاتی است [۷] و نمی تواند به صورت آزاد در طبیعت وجود داشته باشد. رویداد بزرگ زمانی رخ داد که گرافین آزاد<sup>۱</sup> ساخته شد [۲ و ۱] و از نظر تجربی دیده شد که حامل های بار در گرافین به صورت فرمیون های دیراک بدون جرم رفتار می کنند [۹ و ۱۰] از آن زمان توجه فیزیکدانان را به گرافین بیشتر جلب کرده است.

بخش بزرگی از پژوهش ها بر روی گرافین، بررسی خواص مکانیکی و الکترونیکی آن است. گرافین دارای ویژگی های غیر معمولی می باشد که برخی از آن ها عبارتند از:

- اثر غیر معمول هال در گرافین [۱۱ و ۱۲].

- تونل زنی غیر عادی که تونل زنی کلاین نامیده می شود.

- تونل زنی در یک اتصال  $n-p$  [۱۳ و ۱۴]

- رابطه انتشاری انرژی-اندازه حرکت خطی [۱۵]

ساختار الکترونیکی گرافین از تقریب ساده نزدیکترین همسایه، یعنی از تقریب تنگ بست پیروی می کند. گرافین دارای دو اتم در یاخته ی واحد خود است که منجر به دو نقطه مخروطی برای هر منطقه ی بریلوئن می شود، نقاط  $k$  و  $k'$ ، جایی است که باند ظرفیت و رسانش همدیگر را قطع می کنند. در نزدیکی این نقاط، انرژی الکترون به طور خطی به بردار موج وابسته است. در واقع این رفتار از تقارن های مسأله ناشی می شود.

شبهت طیف انرژی گرافین در نقاط  $k$  و  $k'$  به معادله ی دیراک بدون جرم باعث جلب توجه بیشتر محققین شده است. برای ذرات دیراک با جرم  $m$ ، یک گاف انرژی بین کمینه انرژی الکترون  $E_0 = mc^2$  و انرژی بیشینه پوزیترون  $-E_0$ ، وجود دارد ( $c$  سرعت نور است). وقتی انرژی الکترون  $E \gg E_0$  باشد، انرژی به صورت خطی با بردار موج وابسته است ( $E = \hbar k$ ). برای فرمیون های بدون جرم دیراک، گاف انرژی صفر است و این رابطه ی پاشندگی خطی در هر انرژی ای برقرار است.

ساختار بلوری گرافین باعث شده است که حامل های بار در گرافین با طیف انرژی دیراک - گونه توصیف شوند و نمی توان آن را با معادله ی شرودینگر معمولی غیر نسبیتی تعریف کرد. ساختار گرافین جزء ساختار های شناخته شده ی براوه<sup>۲</sup> نیست. گرافین با دو زیر شبکه ی هم ارز  $a$  و  $b$  ساخته می شود.

<sup>۱</sup>- Free-standing Graphene

<sup>۲</sup>- Bravais lattice

برش کوانتوم مکانیکی الکترون ها بین دو زیر شبکه، باعث تشکیل دو نوار شده و تقاطع این دو نوار در نزدیکی لبه های منطقه ی بریلوئن موجب توزیع انرژی مخروطی می شود. در نتیجه، شبه ذرات در گرافین یک رابطه ی پاشندگی خطی را نشان می دهند  $E = \hbar k V_f$ ، که اگر این ذرات بدون جرم را به طور نسبی در نظر بگیریم سرعت فرمی نقش سرعت نور را بازی می کنند  $V_f \approx c/300$ . به دلیل طیف خطی در گرافین، انتظار می رود که شبه ذرات رفتاری متفاوت نسبت به آنچه در فلزات معمولی و نیم رساناها می شناسیم، داشته باشند که در این حالت رابطه ی پاشندگی به صورت سهموی تقریب زده می شود [۱۶].

## ۱-۱- کربن و دگر شکل های آن :

کربن ششمین عنصر جدول تناوبی و اولین عنصر گروه چهارم است که می تواند به صورت زنجیره های طولانی درآید، این فرآیند به تشکیل ترکیبات آلی گوناگون شامل مولکول های زیستی منجر می شود [۱۷].

سیلیسیوم دومین عنصر گروه چهار ساختار الکترونی با نوارهای نیمه پر مشابه کربن دارد ولی در مقایسه با کربن به راحتی زنجیر نمی شود، زیرا اثرات فضایی اتم های نسبتاً بزرگ آن مانع از هم پوشانی الکترون ها می شود، بنابراین تنها تعداد معدودی ترکیبات شامل پیوند های دوگانه و سه گانه از سیلیسیوم تا کنون گزارش شده است در حالی که اندازه کوچک و ساختار الکترونی کربن آن را به یک عنصر استثنایی با قابلیت تولید ساختارهای چند بعدی با خواص جالب توجه تبدیل کرده است.

کربن در چندین شکل مختلف می تواند وجود داشته باشد که آن ها را دگر شکل های ( آلوتروپ<sup>۱</sup> های) کربن می نامند، در شکل (۱-۲) ساختار بلوری آلوتروپ های مختلف کربن آمده است. ساختار سه بعدی کربن، گرافیت، شامل صفحات تخت از اتم های کربن در آرایش شش گوشه است که این صفحات به وسیله پیوندهای ضعیف واندروالس روی هم چیده شده اند.

الماس، ساختار سه بعدی دیگر کربن نیز با تبدیل پیوند دو بعدی  $sp^2$  به پیوند سه بعدی  $sp^3$  تحت فشار و دمای زیاد به دست می آید. ساختار صفر بعدی کربن، فولرین<sup>۲</sup>، در سال ۱۹۸۵ کشف شد، فولرین ها با ایجاد نقص توپولوژیکی از لایه های دو بعدی تشکیل دهنده گرافیت به دست می آیند [۱۸ و ۱۹ و ۲۰]. رایج ترین آن ها  $C_{60}$ ، حاوی ۶۰ اتم کربن است. شبیه توپ فوتبالی به نظر می رسد که از ۲۰ شش

<sup>۱</sup> - Allotrop

<sup>۲</sup> - Fullerene

وجهی و ۱۲ پنج وجهی ساخته و باعث شده به صورت کره باشد. دگر شکل ( آلوتروپ) یک بعدی کربن، نانو لوله ی کربنی [۲۱]، از دو دهه شناخته شده است (نانو لوله ی تک دیواره سال ۱۹۹۳ و تک لایه ۱۹۹۱)، نانو لوله ها می توانند از پیچیده شدن صفحات تخت دو بعدی تشکیل دهنده گرافیت ساخته شوند و بسته به جهش پیچش می توانند خواص الکترونی فلز یا نیم فلز داشته باشند، ویژگی های الکتریکی و مکانیکی نانو لوله تک دیواره فلزی بسیار با تک لایه ی دو بعدی سازنده گرافیت مشابهت دارد.

تا مدت ها گمان می رفت که نمی توان یک تک صفحه پایدار تولید کرد، طوریکه بتوان اندازه گیری های الکتریکی روی آن انجام داد، در واقع بیشتر فیزیکدانان معتقد بودند که یک بلور دو بعدی از لحاظ نظری پایدار نیست و نمی تواند به صورت یک صفحه تخت وجود داشته باشد و احتمالاً خمیده خواهد شد (مرمین - واگنر<sup>۱</sup>) [۲۲ و ۲۳].

بنابراین برای جامعه ی فیزیک بسیار شگفت آور بود زمانی که در اکتبر سال ۲۰۰۴ گروه آندره گایم<sup>۲</sup> و کنستنتین نووسلوف<sup>۳</sup> در دانشگاه منچستر نشان دادند که می توان چند لایه ای مجزا تولید کرده، آن را به بستره دیگر انتقال داده و مشخصه یابی الکتریکی روی این چند لایه ای ها، با تعداد بسیار کمی لایه، انجام داد [۲۴]. در جولای ۲۰۰۵ آن ها نتایج اندازه گیری های الکتریکی روی یک تک لایه دوبعدی از کربن که اکنون گرافین نامیده می شود را منتشر کردند [۲۵].

توجه به این مطلب جالب است که هر کس که به نوعی از مداد استفاده می کند در واقع بدون آن که مطلع باشد احتمالاً ساختار های شبه گرافیتی تولید می کند. یک مداد حاوی گرافیت است و زمانی که روی یک کاغذ حرکت داده شود گرافیت به لایه های نازکی می شکند که روی کاغذ قرار می گیرند و یک نوشته یا طراحی را شکل می دهند. فقط سهم کوچکی از این لایه های نازک شامل یک چند لایه ای یا حتی یک تک لایه از گرافیت مانند گرافین هستند.

مشاهده اثر کوانتومی هال<sup>۴</sup> در دمای اتاق، تحرک پذیری الکترونی بالا و ترابرد پروازی، مسیر پوشش آزاد میانگین<sup>۵</sup> طولانی در حدود ۰/۱ میکرومتر، جذب نور در بسامد های تراهرتز تا ماورا بنفش، رسانایی گرمایی بسیار بالا، مقاومت مکانیکی عالی، انعطاف پذیری زیاد از خواص منحصر به فرد گرافین هستند

<sup>1</sup>- Wagner- Mermin theorem

<sup>2</sup>- Andre Geim

<sup>3</sup>- Konstantin Novoselov

<sup>1</sup>- Quntum Hall Effect

<sup>2</sup>- Mean-free path

[۲۶]. گرافین در اتصال با ابر رسانا، ابر جریان از میان آن عبور می کند و فرایند بازتاب آندریو<sup>۱</sup> که مشخصه اثر مجاورت ابر رسانایی است در آن گزارش شده است [۲۷]، و اثر جوزفسون<sup>۲</sup> در آن قابل مشاهده است [۲۸]. هم چنین در اتصال با یک ماده فرومغناطیس، قطبیدگی اسپینی القا شده در این ماده به صورت تجربی مشاهده شده است [۲۹].



شکل (۱-۲): ساختار بلوری دگرشکل های کربن: گرافین (دوبعدی)، فولرن (صفر بعدی)، نانولوله (یک بعدی) و گرافیت (سه بعدی) [۳۰].

## ۱-۲- بررسی پایداری و روش های ساخت گرافین :

بر اساس نظریه ی مرمین- واگنر هیچ نظم بلند بردی در دو بعد وجود ندارد و یک بلور دوبعدی مانند گرافین نمی تواند از لحاظ ترمودینامیکی پایدار باشد [۲۲ و ۲۳]. تلاش جهت ساخت شکل دو بعدی کربن همواره با شکست مواجه می شد، زیرا رشد بلور مستلزم دماهای بالا بوده و افت و خیزهای گرمایی حاصل برای پایداری ساختارهای ماکروسکوپی یک و دوبعدی مضر است.

در ابعاد نانومتری می توان مولکول ها و بلورهای تخت را رشد داد، اما با افزایش ابعاد جانبی، نسبت محیط به سطح مرکز هسته زایی بزرگ شده در نتیجه چگالی فونونی ناشی از ارتعاشات گرمایی در فضای سه بعدی به سرعت رشد کرده و در ابعاد ماکروسکوپی واگرا می شود و سپس این بلورهای دو بعدی به اشکال متنوعی از ساختارهای سه بعدی پایدار تبدیل می شوند [۳۱].

ناممکن بودن رشد بلور دو بعدی به این معنی نیست که نمی توان آن را به طور مصنوعی ساخت، می توان تک لایه را در داخل یا بروی سطح یک بلور دیگر رشد داد و سپس ماده ی کپه ای را حذف کرد. این کار در دمای به اندازه کافی پایین صورت می گیرد که افت و خیزهای گرمایی قادر به شکستن

<sup>3</sup> - Andreev Reflection

<sup>4</sup> - Josephson Effect



پیوندهای اتمی در بلورهای دوبعدی ماکروسکوپی و تبدیل آن‌ها به ساختارهای سه بعدی نیستند [۳۱]. با توجه به مطالب بالا دو رهیافت جهت ساخت بلورهای دو بعدی گرافین وجود دارد:

روش اول تورق مکانیکی<sup>۱</sup> گرافیت به صفحات اتمی منفرد است. به وسیله ی این روش در سال ۲۰۰۴ گرافین توسط گروه گایم در دانشگاه منچستر ساخته شد [۳۱].

روش دیگر، رشد هم بافته ی<sup>۲</sup> لایه ها بر روی بلورهای دیگر است که توسط گروهی در مرکز فناوری جرجیا به کار برده شد [۳۲].

گروه گایم در دانشگاه منچستر با استفاده از نوار چسب، صفحات گرافین را از سطح گرافیت در آرایش منظم اتمی جدا کرده بر روی دو لایه ی دی اکسید سیلیکون ( $SiO_2$ ) / سیلیکون ( $Si$ ) نشانده و به کمک میکروسکوپ نوری<sup>۳</sup> مشاهده کردند [۲۴]، هم چنین بر روی این ساختار ترانزیستور اثر میدانی گرافینی ساخته شد. در واقع گروه گایم با استفاده از روش بالا به پایین<sup>۴</sup> و با شروع از بلورهای سه بعدی بزرگ از شکل عدم پایداری رشد بلورهای کوچک دو بعدی رهایی یافتند و با این روش بلورهای دوبعدی مواد دیگر مانند برم-نیتريد<sup>۵</sup>، میکا<sup>۶</sup>، و ابر رسانای دمای بالا *Bisr ca cuo* نیز ساخته شدند [۳۳]، بررسی ها به کمک میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده ی موجک های کوچکی<sup>۷</sup> در تک لایه ی گرافین است، این موجک ها، گرافین را از لوله شدن یا تبدیل شدن به سایر ساختارهای کربنی حفظ می کنند. به نظر می رسد وجود موجک ها و نقص های شبکه موجود در گرافین آن را از نظر ترمودینامیکی پایدار ساخته است [۳۴].

در روش تورق مکانیکی به وسیله ی نوار چسب قطعه های گرافینی با ابعاد در حدود ۷۰ تا ۱۰۰ میکرومتر ساخته می شوند که با نیروهای واندروالسی به سطح پیوند می خورند. با این روش، ممکن است ناحیه های گرافین چند لایه ای هم ایجاد شود، بنابراین در این مرحله تشخیص گرافین تک لایه و دو لایه از چند لایه ای ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۲۴ و ۲۵]. در واقع، مهم ترین رهاورد گروه منچستر کشف یک روش ساده برای دیدن گرافین بود. آن ها دریافتند که در تابش نور تک رنگ به سطح گرافین نشانده شده بر روی دو لایه ای دی اکسید سیلیکون/سیلیکون، تک لایه های گرافین با میکروسکوپ نوری قابل مشاهده هستند. برای شکافتن گرافیت به صفحات منظم اتمی و نشان دادن آن بر

<sup>1</sup> - Micromechanical cleavage

<sup>2</sup> - Epitaxial growth process

<sup>3</sup> - optical microscope

<sup>4</sup> - Up-down approach

<sup>5</sup> - Born- Nitride

<sup>6</sup> - Mica

<sup>7</sup> - Ripples

سطح زیرلایه، از میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱</sup> نیز استفاده می شود. به جای شکستن دستی لایه های گرافیت می توان این فرایند را با استفاده از شکست فراصوتی<sup>۲</sup> انجام داد، در این روش ابتدا صفحات گرافین را به روش های شیمیایی با جایگذاری مولکول های دیگر بین آن ها تا حدی سست می کنند تا بازده فرایند شکستن فراصوتی بیشتر شود. با این روش سوسپانسیون های پایدار از گرافین در ابعاد زیر میکرون به دست می آید (شکل ۱-۳ الف و ب).

روش دوم رشد هم بافته ی لایه های تک اتمی بر روی بلور های اتمی دیگر است (شکل ۱-۳ ج و د) [۳۱]. این یک رشد سه بعدی است که طی آن، لایه های هم بافته به لایه های زیرین پیوند می خورند و افت و خیز هایی که موجب شکست پیوند می شوند از بین بروند. پس از این که ساختار هم بافته خنک شد می توان زیر لایه را به روش قلم زنی شیمیایی<sup>۳</sup> جدا کرد. در رشد هم بافته ی گرافین، از یک زیر لایه ی کربید سیلیسیوم<sup>۴</sup> استفاده می شود و این عمل، در خلا و دمای بسیار زیاد- بالای ۱۰۰۰ درجه ی سلسیوس- انجام می گیرد، نتیجه این عمل تصعید اتم های سیلیسیوم از سطح و تشکیل یک لایه ی گرافین بر روی کربید سیلیسیوم است. عیوب شبکه ی تشکیل شده به این روش بسیار کمتر از روش تورق مکانیکی است.

این روش به دلیل آنکه کربید سیلیسیوم به طور ذاتی یک زیر لایه عایق را در دسترس قرار می دهد، در کاربردهای الکترونیکی متداول است. کیفیت نمونه های گرافین تولید شده چنان خوب است که ترابرد پروازی و اثر کوانتومی هال به خوبی در آن مشاهده می شود [۳۵ و ۳۶]. امکان ترابرد پروازی، گرافین را گزینه ی مناسبی برای کاربردهای الکترونیکی آینده مانند ترانزیستورها کرده است.

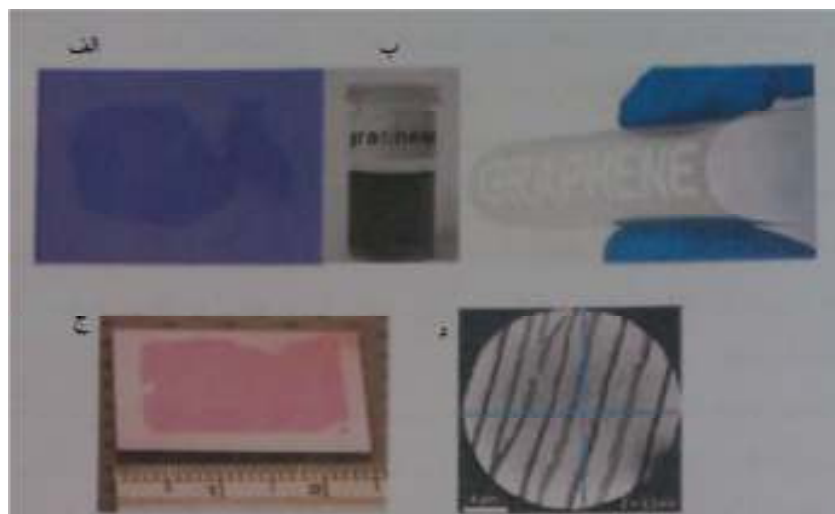
---

<sup>1</sup> - Atomic Force

<sup>2</sup> - Ultrasonic

<sup>3</sup> - Etching

<sup>4</sup> - sic



شکل (۱-۳): گرافین تولید شده به روش های مختلف. الف- بلور گرافین نشانده شده بر روی ویفر اکسید سیلیسیوم با استفاده از روش نوار چسب. ب- شکل چپ: محلولی از میکروبلورهای کربنی که با روش جداسازی فراصوتی در کلروفرم به دست آمده است. شکل راست: این محلول ها روی زیر لایه های مختلف نشانده می شوند. این فیلم ها حتی در هنگام خم شدن هدایت بالایی دارند. ج- اولین ویفر گرافینی که به صورت ساختار چندلایه ای نازک (۱ تا ۵ لایه) روی نیکل رشد داده شده و سپس به روی ویفر سیلیسیوم منتقل شده است. د- ویفر کربیدسیلیسیوم  $SiC$  با پله هایی که توسط تک لایه، دولایه و سه لایه ای های گرافین پوشانده شده است [۳۱].

### ۱-۳- پارادوکس کلاین در گرافین :

در نیمه رساناها هنگام عبور الکترون از سد پتانسیل، احتمال عبور با افزایش طول و ارتفاع سد به طور نمایی، کاهش می یابد. ولی در گرافین همواره احتمال عبور ذراتی که به طور عمود بر سد تابیده می شوند، فارغ از طول و ارتفاع سد یک است. این رفتار بسیار شگفت انگیز با معادله شرودینگر قابل توصیف نیست [۳۷ و ۳۸]. که از این مسأله در الکتروپدینامیک به عنوان پارادوکس کلاین یاد می شود.

در نیمه رساناها اگر گاف انرژی بین باندهای الکترون و حفره بیشتر از سد پتانسیل باشد احتمال نفوذ به طور نمایی با ارتفاع و پهنای سد افت می کند. یعنی تشدید تونل زنی وقتی ممکن می شود که انتشار الکترونها همزمان با وجود یک تراز حفره در داخل سد باشد. ولی در گرافین احتمال عبور الکترون های فرودی عمود برسد، به ارتفاع پهنای سد بستگی ندارد و برابر یک است. این رفتار همان پارادوکس کلاین در  $QED$  است. این پدیده به یک پدیده نسبیتی مربوط می شود که در آن یک الکترون به درون یک سد پتانسیل نفوذ می کند. در این حالت احتمال عبور  $T$ ، بر خلاف پدیده تونل زنی معمولی غیر

نسبیتی، به طور خیلی ضعیفی به ارتفاع و طول سد بستگی دارد و سدهای بسیار بلند، برای عبور الکترونها با تقریب خوبی شفاف می شوند که گرافین یک آزمایشگاه بسیار خوبی برای این پدیده است.

اگر ارتفاع سد دو برابر بیشتر از انرژی سکون ذره ورودی باشد، احتمال عبور به طور ضعیفی به ارتفاع سد وابسته خواهد بود که این مسئله با تونل زنی غیرنسبیتی در تضاد است. این اثر نسبیتی می تواند به این قانون که سد پتانسیل خیلی قوی، دافعی برای الکترون ها و جاذبی برای پوزیترونهاست تبدیل می شود و این منجر به حالت های پوزیترونی داخل سد می گردد که این حالتها همراستا با طیف پیوسته انرژی الکترون در بیرون سد هستند.

جفت کردن تابع موج الکترون و پوزیترون بیرون و داخل سد منجر به احتمال زیاد تونل زنی که همان پارادوکس کلاین است، می شود. که این امر باعث تفاوت بین مکانیک نسبیتی و غیر نسبیتی است. در مکانیک کوانتومی نسبیتی محل دقیق سرعت و محل الکترون ها حتی با دقت زیاد هم امکان پذیر نمی باشد و در مکانیک کوانتوم غیر نسبیتی قادریم این دو را نه همزمان ولی دقیق تعیین کنیم. اگر این کار را انجام دهیم یعنی جفت الکترون و پوزیترون از خلأ به وجود آوریم، نمی توان الکترون های اولیه مان را از این الکترون های خلق شده تشخیص دهیم. در گرافین ما قادریم این رفتارها را بررسی کنیم [۳۹].

## ۱-۴- فیزیک پارادوکس کلاین :

معادله دیراک و هامیلتونی ذره آزاد دیراک به صورت زیر است :

$$H\psi(x) = E\psi(x)$$

$$H_0 = -\sigma_y p + \sigma_z m$$

$$\Rightarrow (-\sigma_y p + \sigma_z m)\psi(x) = E\psi(x) \quad (1-1)$$

معادله دیراک به صورت زیر است :

$$\Rightarrow \left( i\sigma_y \frac{\partial}{\partial x} - \sigma_z m + E \right) \psi(x) = 0 \quad (2-1)$$

که در آن  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  ماتریس های پائولی هستند: