باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **راضیه جهان آرای** متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه / رساله 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 دبیر شهید رجایی[1] می باشد.

راضیه جهان آرای

امضا

1- آدرس: تهران – لویزان - کدپستی 16788- صندوق پستی 163-16785 - تلفن9-22970060 (داخلی2347)- نمابر22970011 - پست الکترونیکی sru@sru.ac.ir

دانشکده علوم پایه

اثر بی نظمی گاف در رسانندگی الکتریکی گرافن

نگارش

راضیه جهان آرای

استاد راهنما: دکتر ایوب اسماعیل پور

استاد مشاور: دکتر مهدی سعادت

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک حالت جامد

آبان 1391

بسمه تعالی

شماره: ۲۲۸/۱۴
تاریخ: ۹۲/۶/۱۶
پیوست:

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

صورتجلسهٔ دفاع پایان‌نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خانم راضیه جهان‌آرای رشتهٔ فیزیک‌حالت‌جامد تحت عنوان اثر بی‌نظمی گاف در رساناهای الکتریکی گرافین،که در تاریخ: ۹۱/۸/۱۶با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر می باشد.

☐ قبول (بادرجه عالی امتیاز ۱۹/۲۰) ☐ دفاع مجدد ☐مردود

۱ ـ عالی (۲۰ – ۱۹)

۲ ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ – ۱۸)

۳ ـ خوب (۱۷/۹۹ – ۱۶)

۴ ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ – ۱۴)

۵- غیرقابل قبول (کمتر از ۱۴)

امضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر ایوب اسماعیل پور	استادیار	
استاد مشاور	دکتر مهدی ستادت	استادیار	
استاد داور داخلی	دکتر رویا مجیدی	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر غلامرضا جعفری	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر جاوید ضمیرانوری	استادیار	

دکتر ایوب اسماعیل پور
رئیس دانشکده علوم پایه

تهران، لویزان، کد پستی:۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸
صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۸۵
تلفن: ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۳۳
Email:sru@sru.ac.ir
www.srttu.edu

به پاس قلب های بزرگشان

به پاس ایثار و از خود گذشتگی شان

به پاس دعاهای خیرشان که بدرقه راهم بود

به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه تقدیم به:

حامیان همیشگی ام ، پدر و مادر عزیزم

مایه دلگرمی من ، همسرم

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمودو خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان‌ساخت.

از استاد گرامی جناب آقای دکتر ایوب اسماعیل پور که با حسن خلق و سعه صدر مرا از دانش، تجربه و راهنمایی های ارزنده خویش بهره مند ساخته اند.

از استاد فرزانه و دلسوز جناب آقای دکتر مهدی سعادت که زحمت مشاوره پایان نامه مرا متقبل شدند.

بینهایت سپاسگزارم

چکیده:

عبور الکترون و رسانندگی ابرشبکه ی گرافن را می توان به روش ماتریس گذار بررسی کرد. ابر شبکه گرافن شامل سد و چاههای پشت سر هم است.

گرافن بر خلاف رساناهای دیگر، بین باندهای هدایت و ظرفیتش فاصله ندارد. چنین فاصله ای برای کاربردهای الکترونیکی ضروری است. زیرا به ماده اجازه می دهد جریان الکترون ها را قطع و وصل کند. یکی از مشکلات وسایلی که با گرافن ساخته می شوند، وجود مینیمم رسانندگی در ولتاژ صفر است. یک راه برطرف کردن این مشکل ایجاد گاف در طیف گرافن است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی رسانندگی الکتریکی ابرشبکه ی گرافن با حضور بی نظمی در گاف انرژی است. تأثیر این بی نظمی روی احتمال عبور الکترون برای سیستم های با اندازه های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. یافته های این پژوهش نشان می دهد که در یک ابرشبکه ی بی نظم گرافن زمانی که اندازه ی سیستم خیلی بزرگ شود رسانندگی از بین می رود. بجز در شرایطی خاص که در آن طول موج ذره ی ورودی با اندازه ی پهنای چاه ها برابر است. که در این مورد رسانش سیستم مقداری محدود خواهد داشت. همچنین نشان دادیم که با افزایش شدت بی نظمی رسانندگی کاهش می یابد.

واژه‌های کلیدی: گرافن، گاف انرژی، ابرشبکه، بی‌نظمی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه‌ای بر گرافن و خصوصیات آن

1-1 مقدمه.....2

2-1 کربن و آلوتروپ‌های آن.....3

3-1 گرافیت.....5

4-1 گرافن.....7

1-4-1 ناپایداری بلور دوبعدی.....8

2-4-1 ساخت گرافن.....9

3-4-1 فرمیون بالستیک.....11

4-4-1 کمینه رسانش.....11

5-4-1 خواص الکترونیکی گرافن.....12

6-4-1 تولید گرافن در حجم انبوه.....13

7-4-1 تولید انبوه گرافن با ورقه ورقه کردن گرافیت.....14

8-4-1 کاغذ ضد باکتری ساخته شده از گرافن.....16

9-4-1 استفاده از گرافن به عنوان رابط الکتریکی.....17

10-4-1 استفاده از گرافن در تولید ماهیچه‌ی مصنوعی.....18

11-4-1 مواد گرافنی هیبریدی جدید برای استفاده در پیل‌های خورشیدی.....19

فصل دوم: پارادوکس کلاین و تقریب تنگ بست در گرافن

1-2 مقدمه.....22

2-2 پارادوکس کلاین در گرافن.....23

3-2 فیزیک پارادوکس کلاین.....24

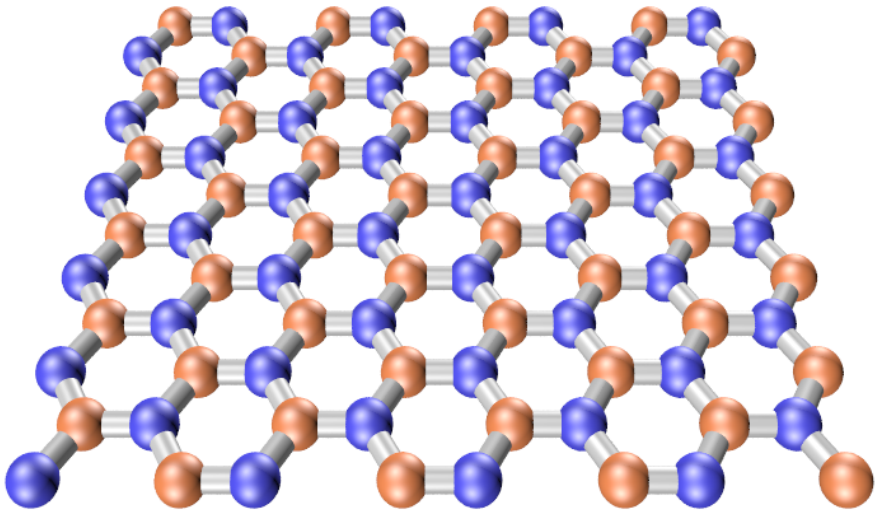
4-2 تقریب تنگ بست.....30
5-2 رابطه ی پاشندگی در گرافن.....34
فصل سوم: ابرشبکه گرافن و تأثیر بی نظمی گاف انرژی بر رسانش
1-3 مقدمه.....41
2-3 مدل.....42
3-3 محاسبه ضریب عبور برای یک سد.....43
4-3 ابرشبکه.....49
5-3 تأثیر گاف انرژی بر رسانش ابرشبکه ی گرافن.....52
6-3 نتایج عددی.....55
فصل چهارم: نتایج.....62
پیوست ها
الف- رابطه دیراک نسبیتی.....65
ب- ماتریس گذار.....67
منابع.....74

فصل اول

آشنایی با گرافن

1-1 مقدمه

گرافن[2] به صفحه‌ی تک لایه‌ی تخت از اتم‌های کربن گفته می‌شود که در یک شبکه بلوری دو بعدی لانه زنبوری شکل، پکیده شده‌اند (شکل 1-1). گرافن همان صفحه‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار گرافیت است. همچنین گرافن را می‌توان پایه‌ی ساختار فلورین و نانولوله‌ها دانست.



شکل 1-1 شکل ساختاری گرافن

با اینکه به صورت تجربی مدت کوتاهی است که این ساختار در آزمایشگاه به دست آمده است[8،7] ولی در تئوری سال‌هاست که در مورد آن مطالعه شده است[۳،۲،۱]. این مطالعات برای بررسی خواص مواد بر پایه‌ی‌کربن(مانندگرافیت، نانولوله‌های کربنی و...) به کار برده می‌شد. سال‌های بعد پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که گرافن نمی‌تواند شبیه‌ساز خوبی برای نظریه‌ی کوانتومی نسبیتی و الکترودینامیک 2+1 بعدی، باانرژی های پایین‌تر در ماده چگال باشد[٦،٥،٤]. با این حال تصور بر آن بود که گرافن یک

[2] - Graphene

ماده مطالعاتی است[5] ونمی‌تواند به صورت آزاد در طبیعت وجود داشته باشد. رویداد بزرگ زمانی رخ داد که گرافن آزاد[3] ساخته شد[۸،۷] و از نظر تجربی دیده شد که حامل‌های بار در گرافن به صورت فرمیون‌های دیراک بدون جرم رفتار می‌کنند[10،9]. از آن زمان توجه فیزیکدانان را به گرافن بیشتر جلب کرده است.

بخش بزرگی از پژوهش‌ها بر روی گرافن، بررسی خواص مکانیکی و الکترونیکی آن است. گرافن دارای ویژگی‌های غیر معمولی می‌باشد که برخی از آنها عبارتند از:

- اثر غیر معمول هال در گرافن[٤٦،٤٧].
- تونل زنی غیر عادی که تونل‌زنی کلاین نامیده می‌شود.
- تونل‌زنی در یک اتصال $p-n$ [١٣،١٤].
- رابطه انتشاری انرژی – اندازه حرکت خطی[15].

یکی از مهم‌ترین عواملی که بر خواص الکترونی گرافن تاثیر می‌گذارد، بی‌نظمی‌های ساختاری است[١٦،١٧]. بی‌نظمی ساختاری درگرافن می‌تواند افت وخیزهای دمایی آن نسبت به شبکه‌ی ایده‌آل، ناخالصی‌هایی از جنس اتم دیگر در شبکه، ناجایگاهی شبکه[4]، تهی‌گاهی شبکه[5] و غیره می‌باشد. بسیاری از این بی‌نظمی‌های ساختاری همیشه در نمونه‌های تجربی وجود دارند. بنابراین در نظر گرفتن این بی-نظمی ها در بررسی نتایج تجربی و همچنین در مهندسی حائز اهمیت است. جدا از تاثیر بی‌نظمی‌های ساختاری بر خواص الکترونی گرافن، برخی از محققان معتقدند که بی‌نظمی های ساختاری همچون افت و خیز دمایی بر پایداری چنین بلورهای دو بعدی ای موثراند[19]. از این رو این پژوهش به بررسی نمونه ای از بی‌نظمی و تاثیر آن بر خواص الکترونی گرافن می‌پردازد.

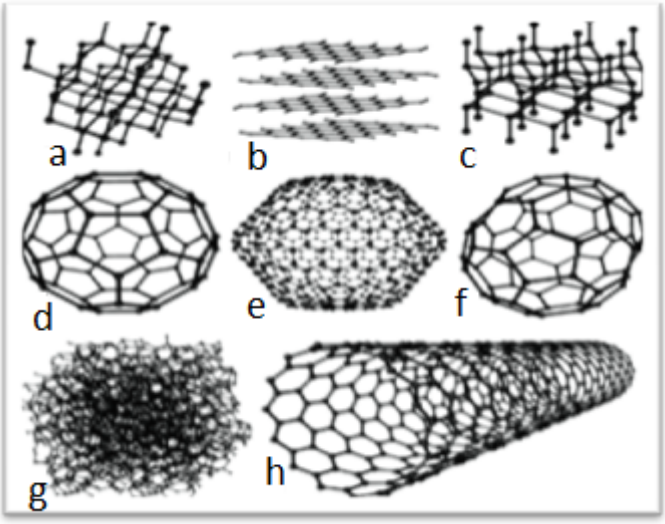
2-1 کربن[6] و آلوتروپ‌های[7] آن

کربن یک عنصر شیمیایی با نماد C و عدد اتمی 6 می باشد و به عنوان یک عنصر گروه 4 در جدول دوره ای، عنصری غیر فلزی است و چهار الکترون در لایه‌ی ظرفیت خود دارد. برای کربن 3 ایزوتوپ به

[3] - Free-Standing Graphene
[4] - Dislocation
[5] -Vacancy
[6] -carbon
[7] - Alotrope

طور طبیعی وجود دارد. C^{12} و C^{13} که موادی پایدار هستند و C^{14} رادیو اکتیوی با نیمه عمر در حدود 5730 سال می باشد. کربن اتمی، عنصر بسیار کم عمری می باشد، بنابراین کربن در ساختار های چند-اتمی با شکل‌های مولکولی مختلف که آلوتروپ‌های کربن نامیده می‌شود، یافت می شود که پایدار می باشند.

اولین آلوتروپهای شناخته شده از کربن، الماس[8]، گرافیت[9] و کربن بی‌شکل[10] می باشد شکل(1-2). آلوتروپ‌های جدید کربن شامل فلورین‌ها[11]، نانولوله‌های‌کربنی[12]، لانسدالیت[13]، کربن شیشه ای[14] و ... می باشد[18]. دلیل تشکیل ساختارهای گوناگون کربن این است که اتم های کربن می‌توانند به چندین شکل گوناگون باندهای گنجایش را تشکیل دهند. این باندهای شیمیایی، اوربیتال‌های هیبریدی[15] نامیده می-شوند.



شکل 1-2 بعضی آلوتروپهای کربن: a) الماس؛ b) گرافیت؛ c) لانسدالیت؛ d-f) فولرین(C_{60},C_{540},C_{70})؛ g) کربن بی شکل؛ h) نانولوله کربنی

[8] -Diamond
[9] - Graphite
[10] - Amorphous carbon
[11] - Fullerenes
[12] - Carbon nanotubes
[13] - Lansdaliet
[14] - Glassy carbon
[15] - Hybridization Orbitals

3-1 گرافیت

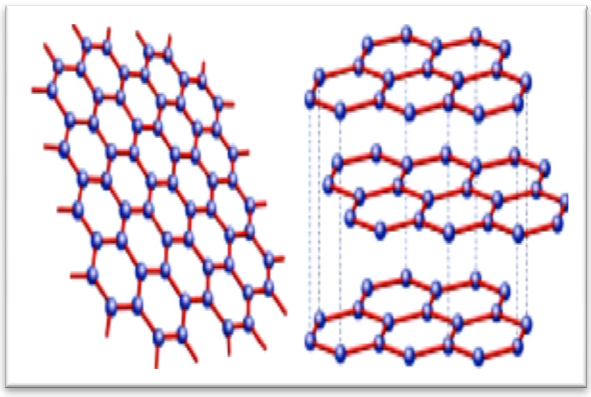
گرافیت یک آلوتروپ سه بعدی از کربن می‌باشد و توسط آبراهام گوتلب ورنر[16] در سال 1789 در یونان باستان نامگذاری شده است. گرافیت یک شکل پایدار کربن تحت شرایط استاندارد می‌باشد، بنابراین از آن در ترمو شیمی به عنوان حالت استاندارد برای تعریف گرمای تشکیل ترکیبات کربنی استفاده می شود. گرافیت یک ساختار صفحه ای – لایه ای دارد که در هر لایه اتم‌های کربن در شبکه های شش گوشه‌ای با فاصله 0/142 nm قرارگرفته‌اند و فاصله‌ی بین صفحه‌ها در حدود 0/335 nm می-باشد.

خواص آکوستیکی و گرمایی گرافیت کاملا ناهمسانگرد می‌باشد زیرا فونون‌ها در طول صفحه ها به سرعت گسترش می یابد اما از صفحه‌ای به صفحه‌ی دیگر به آرامی حرکت می‌کند. اتم‌های کربن در گرافیت با پیوند کووالانسی به هم متصلند و نمی‌توانند با کربن خارج از این لایه پیوندکووالانسی دهند بنابراین یک لایه‌ی گرافیت از طریق پیوند واندروالس (که پیوند ضعیفی است) به لایه‌های زیرین متصل است این خاصیت باعث می‌شود که لایه‌های گرافیت به راحتی روی هم بلغزند[19].

گرافیت الکتریسیته را می‌تواند به راحتی هدایت کند که ناشی از الکترون های لایه ظرفیت اتم های کربن موجود در لایه ها می باشد، زیرا این الکترون های ظرفیت به راحتی می توانند در طول لایه ها حرکت کرده و الکتریسیته را هدایت کنند. به هر حال الکتریسیته فقط توسط صفحه‌های لایه‌ها هدایت می شود و در شکل پودری الکتریسیته هدایت نمی شود.

گرافیت به عنوان روان کننده در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد و همچنین به عنوان مغز مداد کاربرد دارد[20]. در گرافیت کربن دارای هیبریداسیون sp^2 است. بدین ترتیب زوایای پیوند 120 درجه است. هر اتم کربن با سه همسایه‌ی نزدیکش پیوند σ با طول 1/421 آنگستروم را تشکیل می‌دهند. چهارمین الکترون ظرفیت وابسته به اوربیتال $2P_z$ می‌باشد که این الکترون با الکترون $2P_z$ اتم همسایه پیوند ضعیف π را تشکیل می دهند.

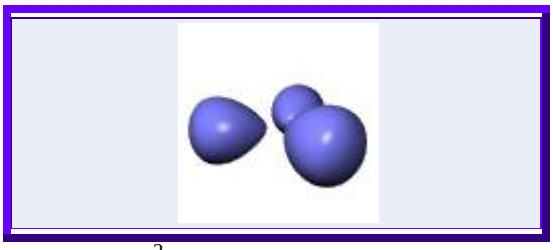
[16] - Abraham gottlob Werner



شکل1-3 ساختار کریستالی گرافیت

شکل1-4 شکل ظاهری گرافیت

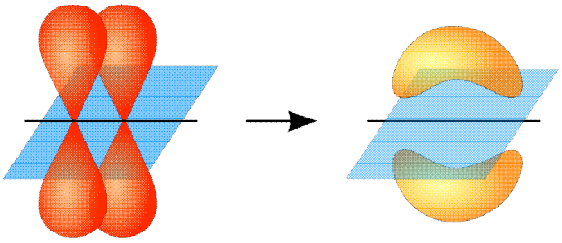
توابع موجی سه اوربیتال هیبرید یsp^2 را می‌توان از ترکیب ریاضی توابع موجی یک اوربیتال s و دو اوربیتال p بدست آورد. یکی از سه اوربیتال p، در این عمل شرکت نمی‌کند.



شکل1-5 اوربیتال هیبریدی sp^2

مطابق شکل (1-5) محورهای سه اوربیتال هیبریدی sp^2 در یک صفحه قرار دارند و به گونه‌ای به سه گوشه جهت گرفته‌اند که زوایای بین آنها 120° باشد.

پیوند π گونه‌ای پیوند کووالانسی است که از اوربیتال‌های p شکل می‌گیرد، شکل(1-6). این پیوند معمولاً از پیوند سیگما سست‌تر است و از دیدگاه مکانیک کوانتوم این سستی در نتیجه همپوشانی کمتر دو اوربیتال شرکت‌کننده در پیوند بدلیل آرایش موازی اجزایشان است. الکترون‌های شرکت کننده در پیوند را الکترون‌های π گویند.



شکل 1-6 شکل‌گیری یک پیوند π از دو اوربیتال p.

پیوند σ نیرومندترین نوع پیوند کوالانسی است که از همپوشانی محوری اوربیتال های دو اتم، تشکیل می‌شود. از این رو، از همپوشانی دو اوربیتال s با یکدیگر، همپوشانی محوری اوربیتال‌s با اوربیتال های‌p، اوربیتال s با اوربیتال هیبریدی، همپوشانی دو اوربیتال p با یکدیگر و یا از همپوشانی دو اوربیتال هیبریدی با یکدیگر حاصل می‌شوند.

4-1 گرافن:

یکی از آلوتروپ‌های دوبعدی کربن می‌باشد، که ساختار آن شامل ورقه‌های مسطح بـا ضـخامت یـک اتم است، که از اتم‌های کربن (که با یکدیگر هیبرید sp^2 دارند) تشکیل شـده و بـه طـور فشـرده در یـک شبکه کریستال لانه زنبوری(شش ضلعی منتظم) جمع شده‌اند. ساختار دوبعدی گرافن، در یک راستا نـانو مقیاس بوده در نتیجه گرافن یک نانو ماده محسوب می‌شود.

در سال 2004 فیزیکدانان در دانشگاه منچستر برای اولین بار صفحه‌های گرافن منفرد را بـا اسـتفاده از scotchtape (نوار چسب) جداسازی کردند.

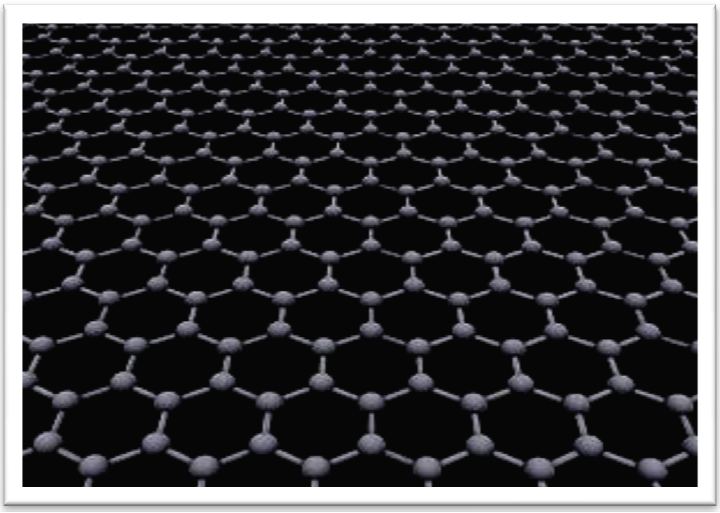
اگر ورقه‌های گرافن روی یکدیگر انباشته شوند گرافیت را می‌سـازند، البتـه بایـد 3000000 صـفحه‌ی گرافن روی هم قرار بگیرند تا یک گرافیت با ضخامت 1mm ساخته شود.

ضخامت هر صفحه گرافن =۰/۳۳۵nm

گرافیت یک میلی متری =۳×۱۰^{۶}×۰/۳۳۵nm =1 mm

گرافن نیمه فلزی بدون گاف انرژی است که ساختار نواری آن در منطقه بریلوئن مخروطی شکل است و نوار رسانش و ظرفیت آن فقط در یک نقطه به نام نقطه‌ی دیراک همدیگر را قطع می کنند. این لایه‌ی دو بعدی نه تنها پیوسته است بلکه یک بلور با کیفیت بالا است به طوری که حامل های بار می‌توانند بدون پراکندگی مسافتی حدود هزار برابر فاصله‌ی بین اتم را بپیمایند. به عبارتی تحریک پذیری حامل‌ها در این مواد بسیار بالاتر از بهترین فلز شناخته شده است.

گرافن خواص الکترونیکی، گرمایی و مکانیکی خوبی را داراست. در سال 2009 گرافن به عنوان یکی از محکم‌ترین مواد که تا حالا آزمایش شده ظاهر می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که گرافن مقاومت در برابر شکست 200 برابر بیش از فولاد را دارد[21].



شکل1-7 گرافن

1-4-1 ناپایداری بلور دوبعدی

لاندائو[17] و پایلز[18] اولین کسانی بودند که نشان دادند بلور دوبعدی از نظر ترمودینامیکی پایدار نیست و نمی تواند وجود داشته باشد[۲۲،۲۳]. تئوری آنها بر این پایه استوار بود که در دمای محدود در بلورهای کم بعدی(1 بعدی و 2 بعدی) جابجایی گرمایی اتم ها با فاصله ی بین شبکه ای قابل مقایسه است[24]. مرمین[19] پس از آنها نتیجه گیری آنها را گسترش داد[25] و تمامی تلاش های تجربی در

[17] - Landau
[18] - Peierls
[19] - Mermin

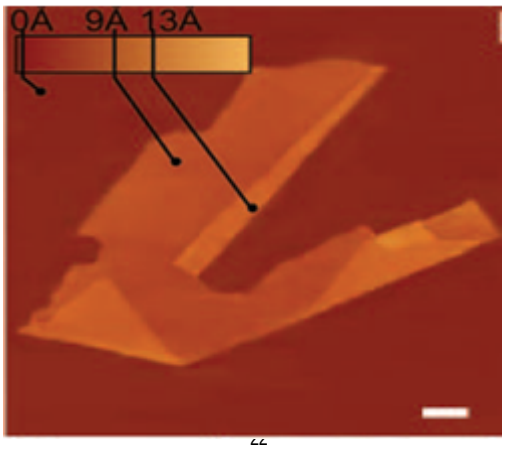
راستای ساخت بلور دو بعدی نیز این موضوع را تأیید می کرد. در سال 2004 به روش ورقه سازی میکرومکانیکی[20] گرافن به عنوان اولین بلور دوبعدی ساخته شد[7]. وجود این ساختار دوبعدی به ظاهر با تئوری در تناقض است. جدا ازینکه این مواد در واقع از درون یک ساختار 3 بعدی پایدار بیرون کشیده شده اند، به این پرسش که چرا وجود دارند اینگونه می توان پاسخ داد که این ساختارها در بعد سوم (که در آزمایش تا حدود 10 nm گزارش شده اند[26]) افت و خیز دارند، که به زیاد شدن انرژی الاستیک می انجامد ولی افت و خیز های گرمایی را کاهش می دهند. این فرایند انرژی آزاد کل را کاهش می دهد[11]. این امر دلیل پایداری چنین ساختار های دو بعدی ای است. به عبارت دیگر فرض پتانسیل هارمونیک درون صفحه ای برای گرافن درست نیست که قضیه ی ناپایداری برای آنها صادق باشد.

2-4-1 ساخت گرافن

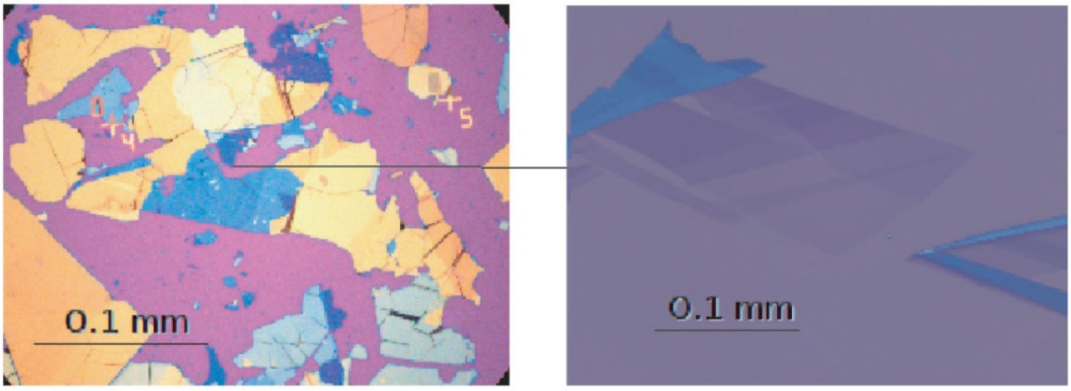
اولین بار گرافن با روش ورقه سازی میکرومکانیکی از توده ی گرافیت بدست آمد[7]. (شکل 1-8). با بهبود این روش توانستند بلورهای گرافن با کیفیت تا اندازه ی 100 میکرومتر تهیه کنند[8]. پیش از این روش های مشابهی به کار گرفته شده بود ولی فقط قطعه های گرافیت 20 تا 100 لایه بدست آمده بود[27]. مشکل اساسی این بود که اگر گرافنی هم بین نمونه های ساخته شده ایجاد می شد به سادگی قابل شناسایی نبود.

اتفاق مهم در راستای ساخت گرافن زمانی رخ داد که معلوم شد گرافن در زیر میکروسکوپ نوری وقتی که بر روی یک لایه ی sio_2 قرار بگیرد قابل مشاهده است به شرطی که نازکی لایه ی sio_2 با دقت انتخاب شود(شکل1-9). حتی اگر روش انجام این کار را به درستی و با جزئیات بدانیم [8] باز هم به دقت آزمایشگاهی و پشتکار زیادی برای بدست آوردن گرافن نیاز داریم. برای نمونه 5 درصد تفاوت در نازکی لایه ی sio_2 (315nm به جای 300nm مورد استفاده) می تواند تک لایه ی گرافن را کاملاً ناآشکار کند. لازم است گفته شود که بعدها کشف شد که گرافن در زیر میکروسکوپی رامان[21] یک نشانه ی بسیار آشکار دارد (یک قله اضافه نسبت به نمونه ی چند لایه بسته به جنس زیرلایه [28]) که این روش برای تشخیص سریع نازکی لایه به کار می رود ولی هنوز هم برای دیدن اندازه و یکنواختی بلور به میکروسکوپ اپتیکی نیاز است.

[20] - Micromechanical Cleavage
[21] - Raman microscopy



شکل1-8 اولین عکس چاپ شده ازگرافن. عکس به روش AFM[22]، میله‌ی مقیاس، یک میکرومتراست. ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده برروی شکل، نشان دهنده‌ی تعدادلایه‌های اتمی متفاوت ازکربن است [8].



شکل1-9 گرافن در زیر میکروسکوپ نوری. چپ : گرافن یک یا چند لایه روی اکسید سیلیکن که کاملا در زیر میکروسکوپ نوری متفاوت هستند. راست : گرافن تک لایه و چند لایه که مشخص است[29].

پس از کشف گرافن روش های دیگری نیز برای ساخت آن پیشنهاد شد (روش اپیتکسی[23][30]، روش های شیمیایی [۳۱،۳۲،۳۳] و روش های لایه نشانی بخار شیمیایی[24][۳٤،۳٥]) که هر یک از نظر هزینه ی ساخت و قابلیت انجام آزمایش تفاوت هایی با یکدیگر دارند. ساخت گرافن در ابعاد بزرگ می تواند قدم مهمی در راستای کاربردی کردن آن داشته باشد[34].

[22] -Atomic Force Microscopy
[23] - Epitaxial Growth
[24] - Chemical Vapor Deposition

3-4-1 فرمیون های بالستیک

پس از کشف روش ساخت گرافن بسیاری از بلورهای دوبعدی به این روش ساخته شدند. ولی تنها گرافن بود که بسیار مورد توجه قرار گرفت و سهم بسیاری از مطالعات را به خود اختصاص داد. این به خاطر خواص الکترونیکی یگانه ی گرافن است. از آنجایی که شبکه ی بلوری گرافن بسیار تمیز و پیوسته است حامل های بار در آن می تواند در بازه ی تا $10^{13}cm^{-2}$ و با تحرک پذیری $15000\ cm^2V^{-1}s^{-1}$ وجود داشته باشند. این تحرک پذیری[25] بسیار زیاد به دما بستگی ندارد و جالب است که در 300 درجه ی کلوین هم می توانیم همین تحرک پذیری را مشاهده کنیم. این نشان می دهد که تحرک پذیری بوسیله ی ناخالصی ها محدود شده است و می توان حتی آن را با بهبود نمونه تا $100000\ cm^2V^{-1}s^{-1}$ نیز افزایش داد. این در صورتی است که بیشینه ی تحرک پذیری برای نیمه رساناهای معمولی بسیار کمتر از این مقدار است. با اینکه برخی از نیمه رساناها تحرک پذیری بالایی (برای نمونه برای InSb برابر $cm^2V^{-1}s^{-1}$ 77000 است.) دارند ولی این تحرک پذیری برای حالت تزریق نشده[26] در آنها است. در صورتی که گرافن تا چگالی تزریق شده ی $10^{12}cm^{-2}$ هم همین تحرک پذیری را داراست که به آن گذردهی بالستیک در مقیاس میکرونی می گویند[36].

4-4-1 کمینه رسانش

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم گرافن داشتن رسانش محدود است (نزدیک به کوانتای رسانش $4e^2/h$)، این در زمانی است که هیچ حامل باری نداریم وگرافن درحالت خنثی است[9]. درشکل(1-10) مقدار اندازه گیری شده‌ی رسانش کمینه برای50 نمونه از گرافن خنثی نشان داده شده است. چنین رسانشی در دمای بسیار پایین برای تمامی مواد شناخته شده، تا کنون به گذار فلز- عایق منجر می‌شد ولی در گرافن هیچ نشانه‌ای از این گذار در دمای نزدیک به دمای هلیم مایع دیده نشده است. رفتار غیر عادی تونل‌زنی در گرافن، نقش مهمی در خصوصیات رسانندگی آن بازی می‌کند. خصوصاً در زمانی که چگالی حامل‌ها کم است. بی‌نظمی به طور محسوسی، سد پتانسیل القاء می‌کند در این حالت سیستم شبیه یک توزیع تصادفی از پیوندگاه‌های $p-n$ رفتار می‌کند. در سیستم‌های متداول دوبعدی، بی‌نظمی منجر

[25] - Mobility
[26] - Un-dopped