

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال

بررسی اثر پارامتر نظم غیر قراردادی بر خواص تراپردی اتصالات نرمال -

فرومغناطیس - ابررسانا پایه‌ی گرافینی

استاد راهنما:

دکتر غلامرضا راشدی

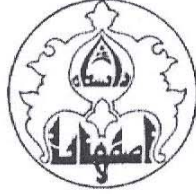
پژوهشگر:

فاطمه میرمجربیان

بهمن ماه ۱۳۹۰

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

پایان نامه
رعایت شده است

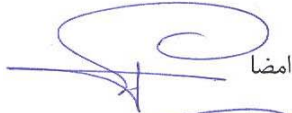




دانشگاه اصفهان
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال
خانم فاطمه میرمجربیان
تحت عنوان

بررسی اثر پارامتر نظم غیر قراردادی بر خواص تراپردی اتصالات نرمال -
فرومغناطیس - ابررسانا پایه‌ی گرافینی

در تاریخ پنجم بهمن ماه ۱۳۹۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

- | | | | | |
|---|------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
|  | امضا | با مرتبه‌ی علمی استادیار | دکتر غلامرضا راشدی | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
|  | امضا | با مرتبه‌ی علمی دانشیار | دکتر حشمت الله یآوری | ۲- استاد داور داخل گروه |
|  | امضا | با مرتبه‌ی علمی دانشیار | دکتر پرویز کاملی | ۳- استاد داور خارج از گروه |

امضای مدیر گروه



این اندک را

به دریای مهربانی و سخاوت مادرم

تقدیم می‌نمایم.

چکیده:

پس از آنکه در سال ۲۰۰۴ تک لایه دو بعدی گرافین در آزمایشگاه ساخته شد، توجه دانشمندان به بررسی ویژگی‌های این ماده معطوف گردید. القای خواص ابررسانایی و فرومغناطیسی بوسیله اثر مجاورت در گرافین، موجب شد تا زمینه‌ی مناسبی برای مطالعه ویژگی‌های تراپردی اتصالات پایه-گرافینی شامل ابررسانا، فرومغناطیس و عادی (گرافین در حالت عادی) پدید آید. همچنین مقاومت مغناطیسی غول‌آسا، GMR، پدیده دیگری است که کشف آن در اواخر قرن گذشته، موجب پیشرفت در تکنولوژی ساخت حافظه‌های مغناطیسی، حسگرها و ظهور صنعت اسپینترونیک شد.

در این پایان‌نامه ویژگی‌های تراپردی اتصالات گرافینی با استفاده از معادله‌ی دیراک-بوگلیوبوف-دوژن و رهیافت بلاندر - تینکهام - کلاپویچ مطالعه شده‌است. پیکربندی‌های موازی و پادموازی ساختار فرومغناطیس-عادی-فرومغناطیس پایه‌ی گرافینی (FNF) مورد بررسی تحلیلی قرار گرفته و اثر جهت‌گیری موازی و پادموازی میدان تبادل فرومغناطیس، ضخامت ناحیه‌ی عادی و دما روی رسانش بار، اسپین و حرارت مطالعه شده‌است. نتایج بررسی مقاومت مغناطیسی غول‌آسا (GMR) به خوبی نشان‌دهنده تفاوت رسانش حالت‌های موازی و پادموازی است، همچنین برای نخستین بار مقاومت مغناطیسی غول‌آسا حرارتی و اسپینی معرفی شده‌است. در ادامه، ساختار فرومغناطیس-ابررسانا با گاف d-wave مورد بررسی قرار گرفته و اثر چرخش پارامتر نظم بر روی خواص تراپردی این ساختار بررسی شده‌است. این چرخش مربوط به جهت‌گیری بلوری‌های ابررسانای دمای بالا مانند YBaCuO در مجاورت صفحات دو بعدی گرافین است.

کلید واژه‌ها: گرافین، رسانش دیفرانسیلی بار، رسانش دیفرانسیلی اسپین، رسانش دیفرانسیلی حرارت، شیر اسپینی، مقاومت مغناطیسی غول‌آسا

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: گرافین

- ۱-۱ کربن و دگرشکل‌های آن ۱
- ۲-۱ بررسی پایداری و روش‌های ساخت گرافین ۳
- ۳-۱ ساختار شبکه و بیناب انرژی گرافین ۶
- ۴-۱ دستوارگی در گرافین ۱۳
- ۵-۱ پارادوکس کلاین ۱۳
- ۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۴

فصل دوم: ابررساناهای متعارف و نامتعارف

- ۱-۲ مقدمه ۱۶
- ۲-۲ زوج کوپر ۱۸
- ۳-۲ اندازه‌ی زوج کوپر ۲۱
- ۴-۲ نظریه‌ی BCS تعمیم یافته و گاف انرژی ۲۱
- ۵-۲ نمونه‌هایی از تابع گاف ۲۴
- ۶-۲ نتیجه‌گیری ۲۵

فصل سوم: رهیافت بلاندر-تینکهام-کلاپویچ (BTK)

- ۱-۳ مقدمه ۲۶
- ۲-۳ معادلات بوگلیووف-دوژن ۲۷
- ۳-۳ تقریب شبه کلاسیک و بازتاب آندریو ۲۸
- ۴-۳ رهیافت بلاندر-تینکهام-کلاپویچ (BTK) برای اتصال فلز عادی-ابررسانا ۳۰

۳-۴-۱	توابع موج در ناحیه‌ی عادی	۳۱
۳-۴-۲	توابع موج در ناحیه‌ی ابرسانا	۳۲
۳-۴-۳	شرایط مرزی و ضرایب ماتریس پراکندگی	۳۳
۳-۴-۴	ضرایب بازتاب و عبور در تقریب آندریو	۳۵
۳-۴-۵	جریان و رسانش	۳۸
۳-۵	نتیجه‌گیری	۴۰

فصل چهارم: ویژگی‌های تراپردی اتصالات گرافینی

۴-۱	مقدمه	۴۱
۴-۲	نانونوارهای گرافینی و ترابرد پروازی	۴۲
۴-۳	بازتاب آندریو در گرافین	۴۲
۴-۴	اتصال گرافینی ابرسانا-عادی	۴۵
۴-۴-۱	معادله‌ی دیراک-بوگلیوبوف-دوژن (DBdG)	۴۵
۴-۴-۲	ویژه توابع (شبه اسپینورهای) ناحیه ابرسانا	۴۸
۴-۴-۳	ویژه توابع (شبه اسپینورهای) ناحیه عادی	۴۹
۴-۴-۴	شرایط مرزی و ضرایب بازتاب	۵۰
۴-۴-۵	رسانش الکترونی در یک اتصال N-S	۵۲
۴-۵	اتصال گرافینی فرومغناطیس-عادی-فرومغناطیس	۵۳
۴-۵-۱	مقاومت مغناطیسی گول‌آسا (GMR)	۵۴
۴-۵-۲	پیکربندی فرومغناطیس-عادی-فرومغناطیس	۵۶
۴-۵-۳	ویژه اسپینورها و احتمال عبور در ساختار گرافینی FNF	۵۸

۴-۵-۴	رسانش الکتریکی، اسپینی و حرارتی در ساختار گرافینی FNF	۶۰
۶-۴	اتصال گرافینی ابررسانا (d-wave) - فرومغناطیس	۶۹
۱-۶-۴	ویژه اسپینورها در ساختار گرافینی Fd	۷۰
۲-۶-۴	احتمال بازتاب آندریو و بازتاب عادی در اتصال گرافینی Fd	۷۱
۳-۶-۴	رسانش الکتریکی و اسپینی در اتصال گرافینی Fd	۷۲
۷-۴	نتیجه گیری	۷۵
	منابع و مآخذ	۷۷

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳	شکل (۱-۱) ساختار بلوری دگرشکل‌های کربن
۶	شکل (۲-۱) گرافین تولید شده به روش‌های مختلف
۷	شکل (۳-۱) اوربیتال هیبریدی sp^2 اتم کربن
۸	شکل (۴-۱) ساختار بلوری و شبکه گرافین
۱۲	شکل (۵-۱) ساختار نواری و شبکه وارون گرافین
۲۹	شکل (۱-۳) بازتاب آندریو در اتصال فلز عادی-ابررسانا
۲۹	شکل (۲-۳) بازتاب آندریو در مرز فلز عادی-ابررسانا و بازتاب آینه‌ای در مرز فلز عادی-عایق
۳۰	شکل (۳-۳) ساختار تک اتصالی فلز عادی-ابررسانا
۳۷	شکل (۴-۳) حالت مرز ایده‌آل در اتصال N-S
۳۸	شکل (۵-۳) احتمال بازتاب‌های آندریو و عادی بر حسب انرژی در مرز N-S
۴۰	شکل (۶-۳) نمودار جریان-ولتاژ اتصال N-S با استفاده از رهیافت BTK
۴۳	شکل (۱-۴) برانگیختگی‌های الکترون و حفره در ساختار نواری گرافین
۴۴	شکل (۲-۴) بازتاب آندریو آینه‌ای و بازگشتی در گرافین
۴۴	شکل (۳-۴) رابطه‌ی پاشندگی در گرافین
۵۱	شکل (۴-۴) احتمال بازتاب آندریو و احتمال بازتاب عادی در اتصال گرافینی N-S
۵۳	شکل (۵-۴) رسانش دیفرانسیلی اتصال N-S
۵۵	شکل (۶-۴) اندازه‌گیری مقاومت مغناطیسی چند لایه‌ایها توسط فرت و گرونبرگ
۵۶	شکل (۷-۴) شیر اسپینی
۵۷	شکل (۸-۴) چگالی حالت‌ها در ساختار FNF
۵۷	شکل (۹-۴) نمایی از ساختار FNF گرافینی
۶۲	شکل (۱۰-۴) احتمال عبور شبه ذرات الکترون-گونه در ساختار FNF

- شکل (۴-۱۱) احتمال عبور بر حسب زاویه‌ی تابش ۶۲
- شکل (۴-۱۲) رسانش الکتریکی ساختار FNF بر حسب اندازه میدان تبادلی فرومغناطیس ۶۳
- شکل (۴-۱۳) رسانش اسپینی ساختار FNF بر حسب اندازه میدان تبادلی فرومغناطیس ۶۳
- شکل (۴-۱۴) رسانش حرارتی ساختار FNF بر حسب اندازه میدان تبادلی فرومغناطیس ۶۴
- شکل (۴-۱۵) رسانش الکتریکی و اسپینی ساختار FNF بر حسب ضخامت ناحیه‌ی عادی ۶۵
- شکل (۴-۱۶) رسانش حرارتی ساختار FNF بر حسب ضخامت ناحیه‌ی عادی ۶۵
- شکل (۴-۱۷) رسانش حرارتی ساختار FNF بر حسب دما ۶۶
- شکل (۴-۱۸) احتمال عبور در ساختار FNF بر حسب ضخامت ناحیه‌ی عادی ۶۶
- شکل (۴-۱۹) احتمال عبور الکترون‌های اسپین پایین در ساختار FF ۶۷
- شکل (۴-۲۰) احتمال عبور الکترون‌های اسپین بالا در ساختار FF ۶۷
- شکل (۴-۲۱) رسانش الکتریکی ساختار FF بر حسب انرژی تبادلی ۶۸
- شکل (۴-۲۲) رسانش اسپینی ساختار FF بر حسب انرژی تبادلی ۶۸
- شکل (۴-۲۳) رسانش حرارتی ساختار FF بر حسب انرژی تبادلی ۶۹
- شکل (۴-۲۴) ساختار گرافینی Fd ۷۰
- شکل (۴-۲۵) احتمال بازتاب‌های عادی و آندریو در اتصال Fd بر حسب زاویه‌ی چرخش گاف ۷۲
- شکل (۴-۲۶) احتمال بازتاب‌های عادی و آندریو در اتصال Fd بر حسب انرژی برانگیختگی ۷۳
- شکل (۴-۲۷) رسانش الکتریکی اتصال Fd بر حسب انرژی برانگیختگی ۷۴
- شکل (۴-۲۸) رسانش اسپینی اتصال Fd بر حسب انرژی برانگیختگی ۷۴
- شکل (۴-۲۹) رسانش اسپینی اتصال Fd بر حسب انرژی تبادلی ۷۵

پیشگفتار

ساختار دو بعدی کربن، گرافین، صفحه‌ای تخت از اتم‌های کربن است که در آرایشی شش ضلعی در کنار یکدیگر واقع شده‌اند و در سال ۲۰۰۴ امکان ساخت آزمایشگاهی آن بوسیله‌ی روش تورق میکرومکانیکی فراهم شد. این روش که امکان ساخت غشایی با ضخامت تک اتمی را فراهم آورد نقطه‌ی عطفی در فناوری نانو است. گرافین، پس از کشف روش ساخت و مشاهده، بواسطه‌ی ویژگی‌های منحصر بفرد الکتریکی و مکانیکی خود مورد توجه دانشمندان فیزیک، شیمی و الکترونیک واقع شد، این ماده زیر بنای ساخت فولرین‌ها و نانولوله‌های کربنی است و ویژگی‌های خاص نانولوله-های کربنی ناشی از آن است.

از آنجایی که در نزدیک سطح فرمی گرافین رابطه پاشندگی الکترون‌ها و حفره‌ها خطی است و همچنین جرم موثر بوسیله خمش نوار انرژی داده می‌شود، این خطی بودن مطابق با جرم موثر صفر است و بنابراین معادله توصیف کننده برانگیختگی‌ها در گرافین همان معادله دیراک فرمیون‌های بدون جرم است که با سرعت ثابت حرکت می‌کنند و نقاط تماس مخروطها نقاط دیراک نامیده می‌شود. این معادله تا انرژی‌های در حدود ۱eV معتبر است. (برای انرژی‌های بیشتر از ۱eV غیر خطی بودن رابطه پاشندگی آغاز می‌شود).

یکی از نتایج رابطه پاشندگی خطی، تفاوت اثر کوانتومی هال در گرافین با حالت معمول آن است. همچنین گرافین در عمل شفاف است و در ناحیه اپتیکی فقط ۲/۳٪ از نور را جذب می‌کند. در تضاد با سامانه‌های نیم رسانای دو بعدی دمای پایین، گرافین ویژگی‌هایش را در دمای اتاق حفظ می‌کند، به طور قابل توجهی محکم‌تر از فولاد و بسیار انعطاف پذیر است و رسانایی حرارتی آن بسیار بزرگتر از نقره است. تحرک پذیری بالای حامل‌ها در دمای اتاق و ترابرد پروازی (بالستیک) در گرافین، آن را نامزد مناسبی برای جایگزینی سیلیکون در مدارهای مجتمع و ابزارهای میکروالکترونیکی کرده است، و انتظار می‌رود با استفاده از آن به ترانزیستورهای سریع‌تر و کوچک‌تر با مصرف انرژی کمتر نسبت به ترانزیستورهای سیلیکونی دست یافت.

در اتصال با ابررسانا، ابرجریان از میان گرافین عبور می‌کند، فرایند بازتاب آندریو که مشخصه اثر مجاورت ابررسانایی است در آن گزارش شده‌است و اثر جوزفسون در آن قابل مشاهده است. همچنین در اتصال با یک ماده فرومغناطیس، قطبیدگی اسپینی القا شده در این ماده به صورت تجربی مشاهده شده‌است. در واقع ابررسانایی تمایل به قرارگیری اسپین الکترون‌ها در راستای مخالف یکدیگر، برای ایجاد زوج کوپر و تشکیل حالت پایه‌ی پایدارتر و خاصیت فرومغناطیسی سعی در همسو نمودن جهت اسپین با جهت پتانسیل تبدالی دارد. برهمکنش این دو پدیده به واسطه‌ی ماهیت متفاوتشان همواره مورد توجه بوده است و پیش از این در اتصالات فلزی مطالعه شده است.

از آنجا که مطالعات نظری تأثیر بسزایی در مشخصه‌یابی سامانه‌های در ابعاد نانو دارند در این پایان نامه به بررسی

اتصالات گرافینی فرومغناطیس، ابرسانا (متعارف و نامتعارف) و گرافین عادی می‌پردازیم و با توجه به اینکه ساختارهای مورد بررسی، ساختارهای تمیز هستند از رابطه‌ی دیراک-بوگلیوبوف-دوژن استفاده شده است.

در فصل اول به معرفی برخی از ویژگی‌های گرافین، روش ساخت، همچنین ساختار شبکه آن و استخراج رابطه‌ی پاشندگی پرداخته شده‌است. در فصل دوم ابرساناهای متعارف و نامتعارف و نظریه‌ی میکروسکوپی ابرسانایی، نظریه‌ی BCS، به اختصار معرفی شده و تابع گاف برای ابرساناهای با تقارن جفت‌شدگی متفاوت بررسی شده است. همچنین از آنجاییکه برای مطالعه رسانش دیفرانسیلی اتصالات از رهیافت بلاندر-تینکهام-کلاپویچ BTK استفاده شده است، فصل سوم با معرفی مختصر معادلات بوگلیوبوف-دوژن آغاز شده، در ادامه حد نیمه کلاسیکی و بازتاب آندریو مرور شده است، بخش پایانی فصل سوم به بررسی رهیافت BTK و استخراج رابطه‌ی رسانش دیفرانسیلی در یک اتصال فلز عادی-ابرسانا اختصاص یافته است.

در نهایت در فصل چهارم از مطالب فصول قبل برای بررسی ویژگی‌های تراپردی اتصالات گرافینی بهره گرفته‌ایم. در ابتدای این فصل نانونوارهای گرافینی و تراپرد پروازی معرفی شده‌است، در بخش اصلی فصل چهارم ابتدا به بررسی اتصال عادی-ابرسانا (s-wave)، که توسط بینکر ارائه شد پرداخته‌ایم. در ادامه با معرفی اثر مقاومت مغناطیسی غول‌آسا GMR و شیر اسپینی، در ساختار دو اتصالی فرومغناطیس-عادی- فرومغناطیس به مطالعه رسانش‌های دیفرانسیلی الکتریکی، اسپینی و حرارتی پرداخته، اثر GMR در این ساختار بررسی شده است. در بخش پایانی فصل چهارم ویژگی-های تراپردی ساختار تک اتصالی فرومغناطیس- ابرسانا (d-wave)، Fd، بررسی شده است.

فصل اول

گرافین

۱-۱- کربن و دگرشکل‌های آن

کربن ششمین عنصر جدول تناوبی و اولین عنصر گروه چهارم است که می‌تواند به صورت زنجیره‌های طولانی درآید، این فرایند به تشکیل ترکیبات آلی گوناگون شامل مولکول‌های زیستی منجر می‌شود [۱]. سیلیسیوم دومین عنصر گروه چهار ساختار الکترونی با نوارهای نیمه‌پر مشابه کربن دارد ولی در مقایسه با کربن به راحتی زنجیر نمی‌شود، زیرا اثرات فضایی اتم‌های نسبتاً بزرگ آن مانع از همپوشانی الکترون‌ها می‌شود، بنابراین تنها تعداد معدودی ترکیبات شامل پیوندهای دو گانه و سه گانه از سیلیسیوم تا کنون گزارش شده‌است 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 می‌تواند وجود داشته باشد که آنها را دگرشکل-های (آلوتروپ^۱های) کربن می‌نامند، در شکل (۱-۱) ساختار بلوری آلوتروپ‌های مختلف کربن آمده است. ساختار سه بعدی کربن، گرافیت، شامل صفحات تخت از اتم‌های کربن در آرایش شش گوشه است که این صفحات بوسیله پیوندهای ضعیف واندروالس روی هم چیده شده‌اند. 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 بدست می‌آید. ساختار صفر بعدی کربن،

^۱ Allotrope

فولرین^۱، در سال ۱۹۸۵ کشف شد، فولرین‌ها با ایجاد نقص توپولوژیکی از لایه‌های دو بعدی تشکیل دهنده گرافیت بدست می‌آیند [۲-۴]. رایج‌ترین آنها C_{60} ، حاوی ۶۰ اتم کربن است و شبیه توپ فوتبالی به نظر می‌رسد که از ۲۰ شش‌وجهی و ۱۲ پنج‌وجهی ساخته و باعث شده سطح به صورت کره باشد. دگرشکل (آلوتروپ) شبه یک بعدی کربن، نانو لوله کربنی [۵]، از دو دهه پیش شناخته شده‌است (نانو لوله تک دیواره سال ۱۹۹۳ و دولایه ۱۹۹۱)، نانولوله‌ها می‌توانند از پیچیده شدن صفحات تخت دوبعدی تشکیل دهنده گرافیت ساخته شوند و بسته به جهت پیچش می‌توانند خواص الکترونی فلز یا نیم فلز داشته باشند، ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی نانو لوله تک دیواره فلزی بسیار با تک لایه‌ی دوبعدی سازنده گرافیت مشابهت دارد. تا مدت‌ها گمان می‌رفت که نمی‌توان یک تک صفحه پایدار تولید کرد، طوریکه که بتوان اندازه‌گیری‌های الکتریکی روی آن انجام داد، در واقع بیشتر فیزیکدانان معتقد بودند که یک بلور دو بعدی از لحاظ نظری پایدار نیست و نمی‌تواند به صورت یک صفحه تخت وجود داشته باشد و احتمالاً خمیده خواهد شد (مرمین-واگنر^۲) [۶، ۷]. بنابراین برای جامعه‌ی فیزیک بسیار شگفت‌آور بود زمانی که در اکتبر سال ۲۰۰۴ گروه آندره گایم^۳ و کنستانتین نوسلوف^۴ در دانشگاه منچستر نشان دادند که می‌توان چند لایه‌ای مجزا تولید کرده، آن را به بستره دیگر انتقال داده و مشخصه‌یابی الکتریکی روی این چند لایه‌ایها، با تعداد بسیار کمی لایه، انجام داد [۸]. در جولای ۲۰۰۵ آنها نتایج اندازه‌گیری‌های الکتریکی روی یک تک لایه دو بعدی از کربن که اکنون **گرافین**^۵ نامیده می‌شود را منتشر کردند [۹].

توجه به این مطلب جالب است که هر کس که به نوعی از مداد استفاده می‌کند در واقع بدون آنکه مطلع باشد احتمالاً ساختارهای شبه گرافینی تولید می‌کند. یک مداد حاوی گرافیت است و زمانی که روی یک کاغذ حرکت داده شود گرافیت به لایه‌های نازکی می‌شکند که روی کاغذ قرار می‌گیرند و یک نوشته یا طراحی را شکل می‌دهند. فقط سهم کوچکی از این لایه‌های نازک شامل یک چند لایه‌ای یا حتی یک تک لایه از گرافیت مانند گرافین هستند.

مشاهده اثر کوانتومی هال^۱ در دمای اتاق، تحرک پذیری الکترونی بالا و ترابرد پروازی، مسیر پویا آزاد میانگین^۲ طولانی در حدود ۰/۱ میکرومتر، جذب نور در بسامدهای تراهرتز تا ماورابنفش، رسانایی گرمایی بسیار بالا، مقاومت مکانیکی عالی و انعطاف پذیری زیاد از خواص منحصر بفرد گرافین هستند [۱۰]. گرافین در اتصال با

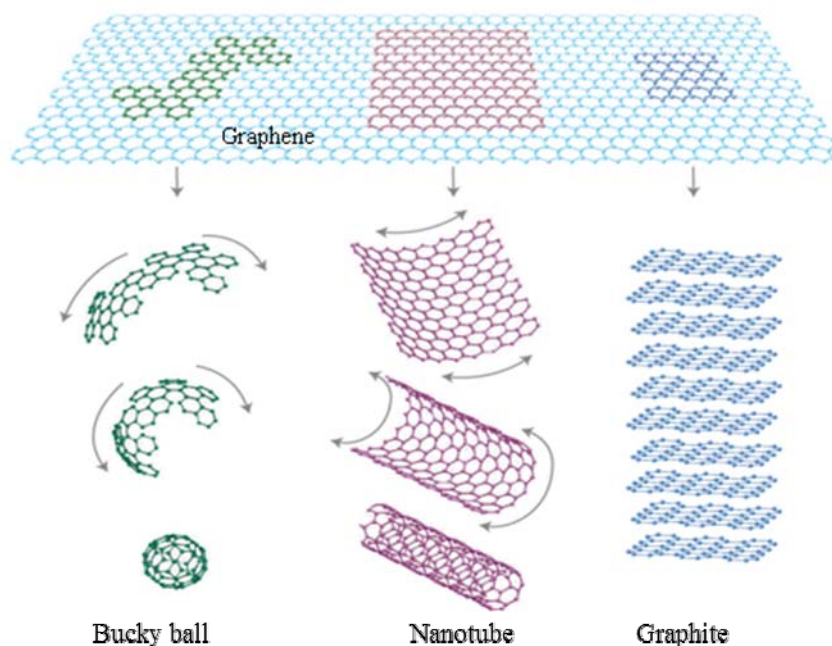
^۱ Bucky ball

^۲ Wagner-Mermin theorem

^۳ Konstantin Novoselov

^۴ Andre Geim

^۵ Graphene



شکل (۱-۱): ساختار بلوری دگرشکل‌های کربن: گرافین (دو بعدی)، فولرن (صفر بعدی)، نانولوله (یک بعدی) و گرافیت (سه بعدی) [۱۱].

ابرسانا، ابرجریان از میان آن عبور می‌کند و فرایند بازتاب آندریو^۳ که مشخصه اثر مجاورت ابرسانایی است در آن گزارش شده است [۱۲]، و اثر جوزفسون^۴ در آن قابل مشاهده است [۱۳]. هم‌چنین در اتصال با یک ماده فرومغناطیس، قطبیدگی اسپینی القا شده در این ماده به صورت تجربی مشاهده شده است [۱۴].

۲-۱ بررسی پایداری و روش‌های ساخت گرافین

بر اساس نظریه‌ی مرمین-واگنر هیچ نظم بلند بردی در دو بعد وجود ندارد و یک بلور دو بعدی مانند گرافین نمی‌تواند از لحاظ ترمودینامیکی پایدار باشد [۶، ۷]. تلاش جهت ساخت شکل دو بعدی کربن همواره با شکست مواجه می‌شد، زیرا رشد بلور مستلزم دماهای بالا بوده و افت وخیزهای گرمایی حاصل برای پایداری ساختارهای ماکروسکوپی یک و دوبعدی مضر است. در ابعاد نانومتری می‌توان مولکول‌ها و بلورهای تخت را رشد داد، اما

^۱ Quantum Hall Effect

^۲ Mean-free path

^۳ Andreev Reflection

^۴ Josephson Effect

با افزایش ابعاد جانبی، نسبت محیط به سطح مرکز هسته‌زایی بزرگ شده در نتیجه چگالی فونونی ناشی از ارتعاشات گرمایی در فضای سه بعدی به سرعت رشد کرده و در ابعاد ماکروسکوپی واگرا می‌شود و سپس این بلورهای دو بعدی به اشکال متنوعی از ساختارهای سه بعدی پایدار تبدیل می‌شوند [۱۵]. ناممکن بودن رشد بلور دو بعدی به این معنی نیست که نمی‌توان آن را به طور مصنوعی ساخت، می‌توان تک لایه را در داخل یا بر روی سطح یک بلور دیگر رشد داد و سپس ماده‌ی کپه‌ای را حذف کرد. این کار در دمای به اندازه کافی پایین صورت می‌گیرد که افت و خیزهای گرمایی قادر به شکستن پیوندهای اتمی در بلورهای دو بعدی ماکروسکوپی و تبدیل آنها به ساختارهای سه بعدی نیستند [۱۵].

با توجه به مطالب بالا دو رهیافت جهت ساخت بلورهای دو بعدی گرافین وجود دارد: روش اول تورق مکانیکی^۱ گرافیت به صفحات اتمی منفرد است. بوسیله‌ی این روش در سال ۲۰۰۴ گرافین توسط گروه گایم در دانشگاه منچستر ساخته شد [۱۵]. روش دیگر، رشد هم‌بافته‌ی^۲ لایه‌ها بر روی بلورهای دیگر است که توسط گروهی در مرکز فناوری جرجیا به کار برده شد [۱۶]. 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 لایه‌ی دی اکسید سیلیکون (SiO₂) / سیلیکون (Si) نشانده و به کمک میکروسکوپ نوری^۳ مشاهده کردند [۸]، هم‌چنین بر روی این ساختار، ترانزیستور اثر میدانی گرافینی ساخته شد. در واقع گروه گایم با استفاده از روش بالا به پایین^۴ و با شروع از بلورهای سه بعدی بزرگ از مشکل عدم پایداری رشد بلورهای کوچک دوبعدی رهایی یافتند و با این روش بلورهای دو بعدی مواد دیگر مانند برم-نیتريد^۵، میکا^۶ و ابررسانای دمای بالای BiSrCaCuO نیز ساخته شدند [۱۷]. بررسی‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده‌ی موجک‌های کوچکی^۱ در تک لایه‌ی گرافین است، این موجک‌ها گرافین را از لوله شدن یا تبدیل شدن به سایر ساختارهای کربنی حفظ می‌کنند. به نظر می‌رسد وجود موجک‌ها و نقص‌های شبکه موجود در گرافین آن را از نظر ترمودینامیکی پایدار ساخته است [۱۸]. در روش تورق مکانیکی به وسیله‌ی نوار چسب قطعه‌های گرافینی با ابعاد در حدود ۷۰ تا ۱۰۰ میکرومتر ساخته

^۱ Micromechanical cleavage

^۲ Epitaxial growth process

^۳ Optical microscope

^۴ Up-down approach

^۵ Boron-Nitride

^۶ Mica

می‌شوند که با نیروهای واندروالسی به سطح پیوند می‌خورند. با این روش، ممکن است ناحیه‌های گرافین چند لایه‌ای هم ایجاد شود، بنابراین در این مرحله تشخیص گرافین تک لایه و دو لایه از چند لایه‌ایها از اهمیت ویژه-ای برخوردار است [۸، ۹]. در واقع، مهم‌ترین رهاورد گروه منچستر کشف یک روش ساده برای دیدن گرافین بود. آنها دریافتند که در تابش نور تک رنگ به سطح گرافین نشانه شده بر روی دولایه‌ای دی اکسید سیلیکون/سیلیکون، تک لایه‌های گرافین با میکروسکوپ نوری قابل مشاهده هستند.

برای شکافتن گرافیت به صفحات منظم اتمی و نشان دادن آن بر سطح زیر لایه، از میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ نیز استفاده می‌شود. به جای شکستن دستی لایه‌های گرافیت می‌توان این فرایند را با استفاده از شکست فراصوتی^۲ انجام داد، در این روش ابتدا صفحات گرافین را به روش‌های شیمیایی با جایگذاری مولکول‌های دیگر بین آنها تا حدی سست می‌کنند تا بازده فرایند شکستن فراصوتی بیشتر شود. با این روش سوسپانسیون‌های پایدار از گرافین در ابعاد زیر میکرون بدست می‌آید (شکل ۱-۲ الف و ب). روش دوم رشد هم‌بافته‌ی لایه‌های تک اتمی بر روی بلورهای اتمی دیگر است (شکل ۱-۲ ج و د) [۱۵]. این یک رشد سه بعدی است که طی آن، لایه‌های هم‌بافته به لایه‌ی زیرین پیوند می‌خورند و افت و خیزهایی که موجب شکستن پیوند می‌شوند از بین بروند. پس از اینکه ساختار هم‌بافته خنک شد می‌توان زیر لایه را به روش قلم‌زنی شیمیایی^۴ جدا کرد. در رشد هم‌بافته‌ی گرافین، از یک زیر لایه‌ی کربید سیلیسیوم^۵ استفاده می‌شود و این عمل، در خلأ و دمای بسیار زیاد - بالای ۱۰۰۰ درجه‌ی سلسیوس - انجام می‌گیرد، نتیجه این عمل تصعید اتم‌های سیلیسیوم از سطح و تشکیل یک لایه گرافین بر روی کربید سیلیسیوم است. عیوب شبکه‌ی تشکیل شده به این روش بسیار کمتر از روش تورق مکانیکی است. این روش بدلیل آنکه کربید سیلیسیوم به طور ذاتی یک زیر لایه عایق را در دسترس قرار می‌دهد، در کاربردهای الکترونیکی متداول است.

کیفیت نمونه‌های گرافین تولید شده چنان خوب است که ترابرد پروازی و اثر کوانتومی هال به خوبی در آن مشاهده می‌شود [۱۹، ۲۰]. امکان ترابرد پروازی گرافین را گزینه‌ی مناسبی برای کاربردهای الکترونیکی آینده مانند ترانزیستورها کرده است.

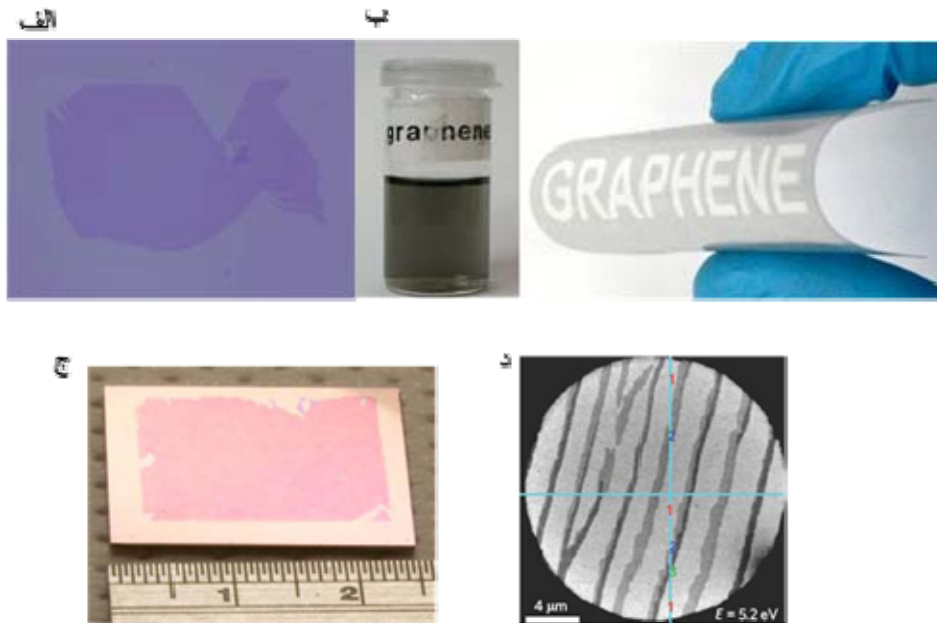
^۱ Ripples

^۲ Atomic Force Microscopy

^۳ Ultrasonic

^۴ Etching

^۵ SiC



شکل (۱-۲): گرافین تولید شده به روش‌های 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 آمده‌است. شکل راست: این محلول‌ها روی زیر لایه‌های مختلف نشانده می‌شوند. این فیلم‌ها حتی در هنگام خم شدن هدایت بالایی دارند. ج- اولین ویفر گرافینی که به صورت ساختار چند لایه‌ای نازک (۱ تا ۵ لایه) روی نیکل رشد داده شده و سپس به روی ویفر سیلیسیوم منتقل شده است. د- ویفر کریید سیلیسیوم SiC با پله‌هایی که توسط تک لایه، دولایه و سه لایه‌ای‌های گرافین پوشانده شده است [۱۵].

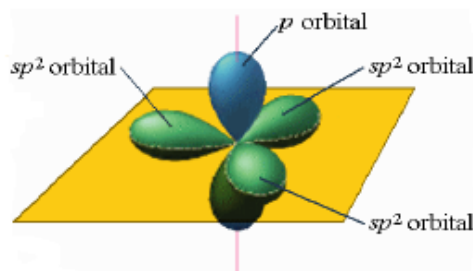
۳-۱ ساختار شبکه و بیناب انرژی گرافین

اتم کربن بدلیل تشکیل حالت‌های هیبریدی مختلف توانایی استثنایی در تشکیل انواع پیوند دارد. اتم کربن با ۶ الکترون، ساختار الکترونی پایه‌ی $1s^2 2s^2 2p^2$ دارد، اما در زمان ترکیب با دیگر اتم‌ها به حالت برانگیخته $1s^2 2s^1 2p^3$ در می‌آید که می‌تواند به دو صورت متفاوت هیبریدی شود که به ترتیب در هر یک با دو یا چهار اتم می‌تواند پیوند داشته باشد. مثلاً در مورد گرافین اوربیتال‌های $2s$ ، $2p_x$ و $2p_y$ هر اتم با یکدیگر ترکیب شده سه اوربیتال هیبرید sp^2 با زاویه 120° درجه نسبت به یکدیگر می‌سازند. اوربیتال sp^2 یک اتم با اوربیتال sp^2 مجاور که در راستای آن است پیوند σ تشکیل می‌دهند که به ساختار لانه زنبوری گرافین منجر می‌شود. هر یک از اتم‌ها یک اوربیتال $2p_z$ پر نشده نیز دارد که جهت‌گیری آن عمود بر صفحه گرافین است. این اوربیتال‌های $2p_z$ موجب

تشکیل پیوندهای اضافی π میان اتم‌های مجاور می‌شوند. همپوشانی اوربیتال‌های π کم است و در نتیجه پیوند تضعیف می‌شود. در حالی که الکترون‌های پیوند σ به مقدار زیادی تحت تاثیر هسته‌های مجاور هستند، جایگزیده‌اند، و بنابراین نقشی در رسانندگی الکترونی گرافین ندارند، الکترون اوربیتال p_z به دلیل جهش میان اتم‌ها به حالت‌های گسترده و یک نوار انرژی منجر می‌شود و در رسانش الکترونی شرکت می‌کند. بنابراین در انرژی‌ها یا ناخالصی‌های کم یک مدل تنگ بست^۱ تک اوربیتالی [۲۱]، تنها شامل جهش بین همسایگان اول، تقریب خوبی برای مطالعه‌ی خواص الکترونی گرافین است. انرژی جهش^۲ نزدیکترین همسایه در حدود ۳ الکترون ولت است.

برای بررسی ساختار شبکه گرافین، یک شبکه لانه زنبوری که به ازای هر نقطه یک الکترون دارد، در نظر می‌گیریم. شبکه لانه زنبوری یک شبکه براوه نیست ولی از دو زیرشبکه مثالی که براوه هستند تشکیل شده است [۲۱]، بنابراین هر اتم کربن سه همسایه نزدیک دارد که با فاصله‌های مساوی a_0 ($a_0 \approx 1.42 \text{ \AA}$) از آن قرار گرفته‌اند. این سه اتم مجاور در حالت متقارن نسبت به یکدیگر قرار دارند و می‌توان آن‌ها را جابجا کرد بدون اینکه به ساختار شبکه آسیبی وارد شود. با توجه به شکل (۱-۴) اگر یک اتم متعلق به زیر شبکه A باشد، سه اتم کربن دیگر که نزدیکترین همسایه آن محسوب می‌شوند متعلق به زیر شبکه B می‌باشند. بردارهای سلول واحد با توجه به شکل بالا به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= (\sqrt{3}a_0, 0) = \sqrt{3}a_0(1, 0) \\ \mathbf{a}_2 &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2}a_0, \frac{3}{2}a_0\right) \end{aligned} \quad (1-1)$$



شکل (۱-۳): اوربیتال‌های هیبریدی sp^2 اتم کربن

^۱ Tight Binding Approximation

^۲ Hopping energy