دانشگاه پیام نور استان تهران

مرکز تهران شرق

دانشکده‌ی علوم پایه

تاثیر فصل مشترک اتصالات گرافین مغناطیسی و ابررسانا روی ضریب عبور دهی الکترونی آن

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی

کارشناسی ارشد

در رشته‌ی فیزیک گرایش حالت جامد

نگارش:

سید حسین باقری

استاد راهنما:

دکتر علی اصغر شکری

تیر ماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

اینجانب سیدحسین باقری دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش حالت جامد گواهی می‌نمایم چنان‌چه در پایان‌نامه‌ی خود از فکر،ایده و نوشته‌ی دیگری بهره گرفته‌ام با نقل قول مستقیم یا غیر مستقیم منبع ومأخذ آن‌را نیز در جای مناسب ذکرکرده‌ام. بدیهی است مسوولیت تمامی مطالبی که نقل قول دیگران نباشد بر عهده‌ی خویش می‌دانم و پاسخ‌گوی آن خواهم بود.

نام ونام خانوادگی دانشجو: سیدحسین باقری

تاریخ وامضا:

اینجانب سیدحسین باقری دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش‌حالت جامد گواهی می‌نمایم چنان‌چه براساس مطالب پایان‌نامه‌ی خود اقدام به انتشارمقاله، کتاب، و ... نمایم ضمن مطلع نمودن استاد راهنما، بانظر ایشان نسبت به نشرمقاله، کتاب، و... وبه صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مبادرت نمایم.

نام ونام خانوادگی دانشجو: سیدحسین باقری

تاریخ وامضا:

(کلیـه‌ی حقـوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه پیام‌نور می‌باشد.)

تقدیم به همسر عزیز و مهربانم،

و فرزندانم ، عرفان و احسان

تشکر و قدردانی:

در این‌جا برخود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی وارجمند جناب آقای دکتر شکری که در ارائه سمینار و همچنین پایان نامه راهنمایی های مفیدی و ارزشمندی در طی یک سال گذشته به بنده داشتن کمال تشکر را دارم. امیدوارم ایشان در تمام مراحل زندگی موفق پیروز باشند

انشا الله

چکیده

پس از کشف گرافین توسط گایم و همکارانش در سال ۲۰۰۴ بررسی‌های بسیار زیادی بر روی این ساختارها گرافینی در سایر علوم انجام شده است. این ساختارها به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و الکتریکی که از خود نشان داده‌اند جایگزین مناسبی برای سیلیکون و ترکیبات آن در قطعات الکترونیکی خواهند شد. در این پایان نامه می خواهیم ضرایب انعکاس آینه ای آندریف و نرمال همچنیین ضرایب عبور الکترون و حفره حاصل از میدان تبادلی را برای اتصال مابین گرافین ابررساناشده و گرافین فرومغناطیس شده (**SG|FG**) را مورد بررسی و محاسبه قراردهیم و با استفاده از حل معادله دیراک – باگلیوف - دی دژن (**DBdG**) این ضرایب را بد ست آورده ونشان خواهیم داد این ضرایب وابسته به انرژی الکترون و میدان تبادلی است

واژه‌های کلیدی: ضریب بازتاب آندریف ، نانو ساختار، گرافین ، ابررسانا ، فرومغناطیس، میدان تبادلی

فهرست مطالب

پیش‌گفتار ۱

فصل اول: شناخت کربن و اشکال مختلف آن در طبیعت و کاربرهای آن ۵

۱-۱- مقدمه ٦

۱-۲- کربن بی شکل ٦

۱-۲-۱- الماس ،گرافیت ، گرافین ۷

۱-۳- کاربردهای محتمل گرافین ۹

۱-۴- روشهای تولید گرافین ۱۱

۱-۵- خواص ساختار اتمی گرافین ۱۳

۱-۶- خواص الکتریکی گرافین ۱۴

۱-۷- خواص اپتیکی گرافین ۱۵

۱-۸- نتیجه‌گیری ۱۶

فصل دوم: **هامیلتونی گرافین** ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۹

۲-۲- ساختارالکترونی کربن ۱۹

۲-۳- اربیتال 2p کربن ۱۹

۲-۳-۱-هیبریداسیون اربیتال‌های کربن ۲۰

۲ -۴- بردارهای شبکه گرافین ۲۵

۲-۴-۱-بردارهای بسیط شبکه لانه زنبوری گرافین ۲۶.

۲-۴-۲-بردارهای بسیط شبکه وارون گرافین..... ۲۷
۲-۵-هامیلتونی باند σ و باند π به روش تنگ بست (TB) در گرافین..... ۲۸
۲-۵-۱-هامیلتونی باندσ گرافین..... ۲۹
۲-۵-۲-هامیلتونی باند π گرافین..... ۳۵
۲-۶- رسم چگالی حالات در گرافین..... ۳۷
فصل سوم: هامیلتونی گرافین فرومغناطیس وگرافین ابررسانا ۳۹
۳-۱- اثر میدان تبادلی بروی گرافین..... ۴۰
۳-۲-هامیلتونی گرافین فرومغناطیس..... ۴۱
۳-۲-۱-ویژه مقادیرانرژی گرافین فرومغناطیس..... ۴۳
۳-۳-خاصیت ابررسانایی بروی گرافین..... ۴۵
۳-۳-۱-مدلBCS..... ۴۶
۳-۲-۳-ماتریس هامیلتونی بوگولیو بف..... ۴۷
۳-۳-۳-ماتریس هامیلتونی گرافین در محیط ابررسانا..... ۴۹
فصل چهارم: تاثیر فصل مشترک اتصال FG|SG برروی ضریب عبور الکترون ۵۱
۴-۱- ماتریس هامیلتونی اتصال گرافین فرومغناطیس وگرافین ابررسانا..... ۵۲
۴-۲-بازتاب آندریف وبازتاب نرمال..... ۵۵
۴-۳- ضرایب عبور الکترون و حفره..... ۵۹
۴-۴- نتیجه گیری و ادامه کار..... ۶۰
پیوستA: حل معادله آزاد هامیلتونی گرافین ۶۲
پیوست B : چگالی حالات در گرافین ۶۳
پیوست C : محاسبه ضرایب بازتاب و ضرایب عبور در اتصال FG|SG ٦٥
پیوست D : نتیجه فایل متلب مربوط به نمایش ساختار الکترونی باند σ در گرافین ۶۷

پیوست E : نتیجه‌ی فایل متلب مربوط به نمودارچگالی حالات درگرافین در شکل(۲-۶-۱) ۶۹
پیوستF : نتیجه‌ی فایل متلب مربوط به نمودار دامنه احتمال بازتاب نرمال و آندریف ۷۰
پیوست G :نتیجه‌ی فایل متلب مربوط به نمودار دامنه احتمال عبور الکترون و حفره ۷۱
مراجع ۷۱

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۵-۱) نمایش ساختار انرژی در گرافین ۱۳
شکل(۱-۶-۲)نمودارجهت گیری زیگ زاگی درگرافین ۱۴
شکل(۱-۶-۳)نمودارجهت گیری صندلی دسته دار گرافین ۱۵
شکل (۲-۳-۱-۱) نمایش آرایش الکترونی اتم کربن ۲۱
شکل(۲-۳-۱-۲)دونوع مختلف ترکیب شدن اربیتال $^{۲}p_x$ بااربیتال ^{۲}s ۲۱
شکل (۲-۳-۱-۳) نمایش هیبریداسیون $sp^{۲}$ ۲۲
شکل (۲-۳-۱-۴) نمایش هیبریداسیون $sp^{۳}$ ۲۲
شکل (۲-۳-۱-۵) نمایش پیوند σ در اتم کربن ۲۴
شکل (۲-۳-۱-۵) نمایش پیوند π در اتم کربن ۲۴
شکل(۲-۴-۱-۱)نزیکترین بردارهای همسایه اتمهای گرافین ۲۶
شکل (۲-۴-۲- ۱) نمایش بردارهای شبکه وارون اتمهای گرافین ۲۷
شکل(۲-۵-۱-۱)ساختارالکترونی باندانرژیσدرروش تنگ بست (TB) ۳۴
شکل (۲-۵-۱- ۲) ساختار الکترونی باند انرژی σدر حالت سه بعدی ۳۴
شکل (۲-۵-۲-۱) ساختار الکترونی باند π در گرافین ۳۵
شکل(۲-۵-۲-۲)ساختارنواری انرژی باندπدرگرافین ۳۶
شکل(۲-۶-۱)نمودارچگالی حالات درگرافین ۳۸

شکل(۳-۲-۱-۱)رسم نمودار ترازهای انرژی در گرافین فرومغناطیس ۴۵
شکل(۴-۱-۱)نمایش اتصال منطقه فرومغناطیس و ابررسانا در گرافین ۵۲
شکل(۴-۲-۱)نمایش بازتاب آندریف الکترون-حفره با اسپین های مخالف ۵۵
شکل (۴-۲-۲) نمایش زاویه تابش و بازتاب حفره در مرز اتصال ۵۶
شکل (۴-۲-۳) نمایش زاویه تابش و بازتاب حفره در مرز اتصال ۵۶
شکل (۴-۲-۴) نمایش بازتاب آینه ای و برگشتی آندریف ۵۷
شکل (۴-۲-۵) نمودار دامنه احتمال بازتاب نرمال ۵۸
شکل (۴-۲-۶) نمودار دامنه احتمال بازتاب آندریف ۵۸
شکل (۴-۳-۱) نمودار دامنه احتمال عبور الکترون ۵۹
شکل (۴-۳-۲) نمودار دامنه احتمال عبور حفره ۶۰

فهرست علائم اختصاری

عملگرهامیلتونی	$\widehat{H}$
ثابت پلانک	$\hbar$
ثابت بولتزمن	K_B
تراز فرمی	K_F
تعداد بوزون‌های چگالیده در ابررسانا	n.
چگالی الکترون‌های ابررسانشی	$n_s(T)$
عملگر تکانه	$\hat{p}$
دمای بحرانی(گذار فاز ابررسانا)	T_c
عملگر تحول زمانی	$\hat{\mathrm{T}}$
سرعت الکترون	v_F
انرژی برهم‌کنش الکترون‌های زوج کوپر	$V_{kk'}$
عملگر مکان	$\hat{x}$
گاف انرژی ابررسانا	$\Delta(T)$
انرژی فرمی	ε_F
طول همدوسی	ξ.
عدد پی	π
تابع چگالی توزیع ترازهای انرژی ذرات منفرد	$\mu(\epsilon)$

عملگر چگالی	$\hat{\rho}$
عملگر پائولی	$\hat{\sigma}_k$
بسامد دبای	ω_D

پیش گفتـــار

با گذر زمان و پیشرفت علم و تکنولوژی نیاز بشر به کسب اطلاعات و سرعت پردازش و ذخیره سازی آنها به صورت فزاینده‌ای بالا رفته است.[گوردن مور[۱] ۱۹۶۵]معاون ارشد شرکت اینتل نظریه‌ای ارائه داد مبنی بر اینکه در هر ۱۸ ماه تعداد ترانزیستورهایی که در هر تراشه به کار می‌رود دو برابر شده و اندازه آن نیز نصف می‌شود .این کوچک شدگی نگرانی‌هایی را به وجود آورده است. بر اساس این نظریه در سال ۲۰۱۰ باید ترانزیستورهایی وجود داشته باشد که ضخامت اکسید درگاه که یکی از اجزای اصلی ترانزیستور است به کمتر از یک نانومتر برسد. بنا بر این باید بررسی کرد، اکسید سیلیسیم به عنوان اکسید درگاه در ضخامت تنها کمتر از یک نانومتر انتظارات ما را در صنایع الکترونیک برآورده می‌کند یا نه. در راستای همین تحقیقات گروه دیگری از دانشمندان به بررسی نیترید سیلیکون به عنوان نامزد جدیدی برای اکسید درگاه پرداختند و نشان دادند که این ماده می تواند جایگزین مناسبی برای اکسید سیلیکون باشد. جهت تولید ترانزیستورهای نسل امروز احتیاج به دانشی داریم که بتوانیم در ابعاد نانو تولیدات صنعتی از تراشه‌ها را داشته باشیم. بسیاری از دانشمندان بر این باور هستند که ترکیبات کربنی به دلیل قابلیت رسانش ویژه ، به جای مواد سیلیکونی در تراشه‌های نسل آینده قرار خواهند گرفت. بنابراین توجه جوامع علمی و اقتصادی جهان بر این شاخه از علم که به فن آوری نانو[۲] معروف است، جلب شده است در این بین نانو کربن های دو بعدی به دلیل خواص منحصر به فرد الکتریکی و مکانیکی که از خود نشان داده اند توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده‌اند سالهای اخیر گرافین[۳] به دلیل ویژگیهای منحصربه فرد خود

۱.Gordon Moore

۲.Nanotechnology

۳.Graphene

بسیار مورد توجه واقع شده است .براساس نوع لبه ی نانونوارگرافینی آن را به دو گروه نانونوارگرافینی صندلی وار و زیگ زاگی دسته بندی می کنند، که هر کدام خواص خود را دارا می باشند که ما در این پایان نامه می توانیم از هر کدام شان استفاده کنیم .علاوه بر بار، از اسپین الکترون هم میتوان به عنوان یک درجه آزادی استفاده کرد .قطعاتی که براین اساس کار می کنند، در گروه قطعات اسپینترونیک [۱] قرار میگیرند .چون برای ساخت قطعات مورد نظر به یک تئوری دقیق نیاز است، باید تمام عوامل مختلف تاثیرگذار در ساخت قطعه لحاظ شود .به همین علت ما فرومغناطیس و ابررسانایی را به عنوان عوامل تاثیرگذارو با استفاده از هامیلتونی بستگی قوی تک باند و فرمولبندی دیراک ،آنها را وارد محاسبات کرده ایم. گام مهمی در نسل آینده ی محاسبات و تحقیقات محققان دانشگاه کمبریج ، به یافته های جدیدی در زمینه ی اسپینترونیک که قرار است جانشین ترانزیستورها شوند منجر شده است. محققان اخیرا گام هایی در زمینه ی افزایش کارایی اسپین ها برای استفاده در لوازم الکترونیک برداشته اند. برخلاف تکنولوژی مرسوم که به اتصال بارالکتریکی الکترونی وابسته است، اسپینترونیک به گشتاور الکترون ها وابسته است. یکی از ویژگیهای منحصر به فرد اسپینترونیک این است که اسپین ها می توانند بدون جریان بار الکتریکی منتقل شوند. این امر "جریان اسپینی" نامیده می شود و مانند الکترونهای جاری تولید گرما نمی کند. مانع اصلی در راه این تکنولوژی دشواری تولید حجم بزرگی از جریان اسپینی برای تامین وسایل الکترونیکی امروزی است. به گزارش گروه الکترونیک و صنعت هوشمند هیتنا، یکی از روشهای جدید و کارآمدتر برای تولید این جریان اسپینی استفاده از حرکت تناوبی اسپینها که امواج اسپینی نامیده می شود است. ایده ی این

۱.Spintronic

گروه از محققان استفاده از تبادلات میان امواج مختلف موجود در طبیعت است. دانشمندان اخیرا نوعی از تبادلات اسپینی (به نام جداسازی سه ماگنون[۱]) را شناسایی کرده اند که جریان اسپینی ای ده برابر کارآمدتر از سایر امواج اسپینی دارد. این یافته دو زمینه ی امواج اسپینی و جریان اسپینی را به هم متصل می سازد.

بنابراین درفصل نخست به مروری کوتاه بر شناخت کربن و اشکال مختلف آن در طبیعت و کاربرهای آن مورد نیاز دراین تحقیق می‌پردازیم. از بخش‌های مهم این فصل معرفی گرافین است ، یک شبکه دو بعدی که الکترون های آن با سرعت زیادو جرم صفر که از یک صفحه از اتمهای کربن به ضخامت یک اتم ، که در قالب یک شبکه ی شش گوشی به هم متصل شده اند .وجود گاف نواری صفر کاندیدای مناسبی در آینده به جای سیلیکون خواهد بود. در فصل دوم با هامیلتونی گرافین ونحوه استخراج این هامیلتونی و همچنین چگالی حالات گرافین آشنا می شویم. فصل سوم اختصاص به اثر فرومغناطیس و ابررسانا برروی گرافین داشته و هامیلتونی گرافین فرومغناطیس شده و همچنین گرافین ابررسانا شده را با استفاده از مدل BCS به دست می آوریم با استفاده از ماتریس هامیلتونی بوگولیوبف[۲] درفصل چهارم که هدف اصلی این تحقیق را تشکیل می دهد ابتداهامیلتونی اتصال گرافین فرومغناطیس و گرافین ابررسانا را به دست می آوریم سپس با اعمال شرایط مرزی برروی توابع موج در منطقه خط اتصال، ضرایب بازتاب آینه ای[۳] و بازتاب برگشتی آندریف[۴] و ضرایب عبور الکترون و حفره را محاسبه می کنیم و نشان می دهیم ضریب عبور الکترون وابسته به اسپین الکترون وانرژی گاف ابررسانای[۵] و همچنین انرژی تبادلی دارد

۱.Magnon

۲.Bogoliubov Hamiltoni Matrix

۳.Specular Reflection

۴.Andreev Retro Reflection

۵. Superconductivty Gap

فصل ۱

مقدمه ای بر کربن و اشکال مختلف آن

۱ –۱– مقدمه

کربن با عدد جرمی ۶ در گروه چهارم جدول تناوبی قرار دارد. این عنصر ترکیب اصلی موجودات زنده را در بر گرفته است. بنا براین بیشتر دانشمندان سعی می‌کنند ترکیبات کربنی را در شاخه‌ی شیمی آلی بررسی کنند. این عنصر از دیر باز برای انسان به صورت دوده و ذغال چوب شناخته شده بود. گونه‌های متفاوت دیگری از کربن نیز وجود دارند که تفاوت این گونه‌ها صرفاً به شکل گیری اتم‌های کربن نسبت به هم یا به ساختار شبکه‌ای آن‌ها بر می‌گردد. از آنجایی که سرعت الکترونهای رسانشی در گرافین بسیار بالاست و همانند ذرات بدون جرم دیراک رفتار می کنند خاموش و روشن شدن ترانزیستور برای ما در قطعات الکترونیکی و پردازنده‌های کامپیوتری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، انتخاب گرافین که تحرک پذیری بالایی داشته باشد بسیار مهم است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد تحرک پذیری الکترون در گرافین به ازای میدان‌های مختلفی که در طول گرافین اعمال شود، مقدار بیشینه‌ای را خواهد گرفت. بنا بر این در طراحی ترانزیستورها با توجه به مشخصه-های هندسی ترانزیستور و اختلاف پتانسیلی که بین چشمه و دررو آن اعمال می‌شود باید گرافین را انتخاب کرد که تحرک پذیری مناسبی داشته باشد.

۱–۲– کربن بی‌شکل

از سوختن ناقص بسیاری از هیدروکربن‌ها و یا مواد آلی (مثل چوب یا پلاستیک) ماده سیاه رنگی به جا می‌ماند که کربن بی‌شکل یا آموزف[۱] نام دارد. این ماده که پس مانده‌ی سوخت ناقص مواد آلی است از دیر باز جهت تولید انرژی بشر قرار می‌گرفت. ذغال چوب و ذغال سنگ از انواع مواد کربن بی شکل هستند که انسان با سوزاندن آن‌ها انرژی زیادی را بدست می‌آورد.کربن با توجه به پیوند شیمیایی که با اتمهای مجاور تشکیل می هد شبکه بلوری مختلفی را ایجاد می کند.

۱.Amorf

۱–۲–۱– الماس ، گرافیت ، گرافین

الماس

الماس گونه‌ی شناخته شده دیگری از کربن می‌باشد که دارای ساختار بلوری منظمی است. در این ساختار هر اتم کربن با چهار اتم کربن دیگر پیوند برقرار می‌کند. اتم‌های الماس در یک شبکه fcc با ثابت شبکه $a = ۰/۳۵۶\,nm$ قرار دارند. طول پیوند کربن کربن در این ساختار برابر $۰/۱۵\,nm$ گزارش شده است .این ماده به دلیل سختی بالا تمام عناصر موجود در طبیعت را می‌خراشد و از این رو در تراش فلزات سخت، سرامیک‌ها و شیشه از آن استفاده می‌کنند. این ماده به دلیل درخشش بالایی که دارد از دیرباز در جواهر آلات نیز مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

گرافیت

گرافیت یکی از آلوتورپ های کربن است که ساختار لایه–لایه داشته و به رنگ سیاه است واز قرار گرفتن ۶ اتم کربن به صورت ۶ ضلعی منظم پدید آمده این اتم‌ها با پیوند کوالانسی به هم متصلند و نمی توانند با کربنی خارج از این لایه پیوند کوالانسی دهندبنابراین یک لایه گرافیت از طریق پیوند واندر والس –که پیوند ضعیفی است– به لایه‌های زیرین متصل است این خاصیت سبب می‌شود لایه‌های گرافیت به راحتی به روی هم بلغزند. به همین دلیل از این ترکیب برای «روان کاری» و «روغن کاری» استفاده می شود. از گرافیت به عنوان الکترود کوره ، روان کننده، ماده نسوز، قطعات الکتریکی، رنگ فولاد های پرکربن، چدن ها ، مداد گرافیتی و ... استفاده می شود.

گرافین

گرافین نامِ یکی از آلوتروپ‌هایِ کربن است. یک کریستال دو بعدی از اتمهای کربن که با آرایش شبکه دو بعدی به فرم لانه زنبوری قرار گرفته انددر گرافیت (یکی دیگر از آلوتروپ‌هایِ کربن)، هر

کدام از اتم‌هایِ چهارظرفیتیِ کربن، با سه پیوندِ کووالانسی به سه اتمِ کربنِ دیگر متصل شده‌اند و یک شبکه گسترده را تشکیل داده‌اند. این لایه خود بر رویِ لایه‌ای کاملاً مشابه قرار گرفته‌است و به این ترتیب، چهارمین الکترونِ ظرفیت نیز یک پیوندِ شیمیایی داده‌است، اما این پیوندِ این الکترونِ چهارم، از نوع پیونذ واندروالسی است که پیوندی ضعیف است. به همین دلیل لایه‌های گرافیت به راحتی بر روی هم سر می‌خورند و می‌توانند در نوک مداد به کار بروند. گرافین ماده‌ای است که در آن تنها یکی از این لایه‌های گرافیت وجود دارد و به عبارتی چهارمین الکترون پیوندی کربن، به عنوان الکترون آزاد باقی مانده‌است.

هر چند نخستین بار در سال[۱۹۴۷- فیلیپ والاس[۱]] درباره گرافین نوشت محرّک او برای بیان این ایده، تحقیق و فعّالیّتش روی گرافیت (گرافینِ سه‌بعدی) بود. البته نام گرافین به‌طور رسمی تا چهل سال بعد، زمانی که به‌عنوان تک‌لایه‌ی تشکیل‌دهنده‌ی گرافیت به‌کار رفت، استفاده نشد.و سپس از آن زمان تلاش‌های زیادی برای ساخت آن صورت گرفته بود اما قضیه‌ای به نام قضیه مرمین–واگنر [۲] در مکانیک آماری و نظریه میدان‌های کوانتومی وجود داشت که ساخت یک ماده دوبعدی را غیرممکن و چنین ماده‌ای را غیرپایدار می‌دانست. اما به هر حال در سال[۲۰۰۴، آندره گایم و کنساتین نووسلف[۳]] از دانشگاه منچستر موفق به ساختِ این ماده شده و نشان دادند که قضیه مرمین–واگنر نمی‌تواند کاملاً درست باشد. جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۰ نیز به علت فعالیت برروی ماده‌ای دوبعدی به این دو دانشمند تعلق گرفت. در حقیقت گرافین، یک شبکه‌ی لانه‌زنبوری ۲بعدی است که از پیوندِ کووالانسی اتم‌های کربن به‌وجود آمده است و ضخامتش تنها یک‌اتم کربن است. به‌این علّت که با رویِ هم قرار گرفتن گرافین‌ها، گرافیت به‌وجود می‌آید. به‌عبارت دیگر یک‌گرافیت از گرافین‌هایی تشکیل شده است که به‌وسیله‌ی نیروهای جاذبه‌ی ضعیف بین مولکولی روی هم قرار گرفته‌اند.

---

۱. Phillip Vallas

۲.Mermin-Wagner

۳.Andre Gaym and Knsatyn Nvvslf