

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

دانشکده علوم پایه

ترابری الکترون در پیوندگاه گرافین با فرومگنت کرافین

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته ی فیزیک حالت جامد

استاد راهنما

سرکار خانم دکتر سمیه احمدی سلطانسرایبی

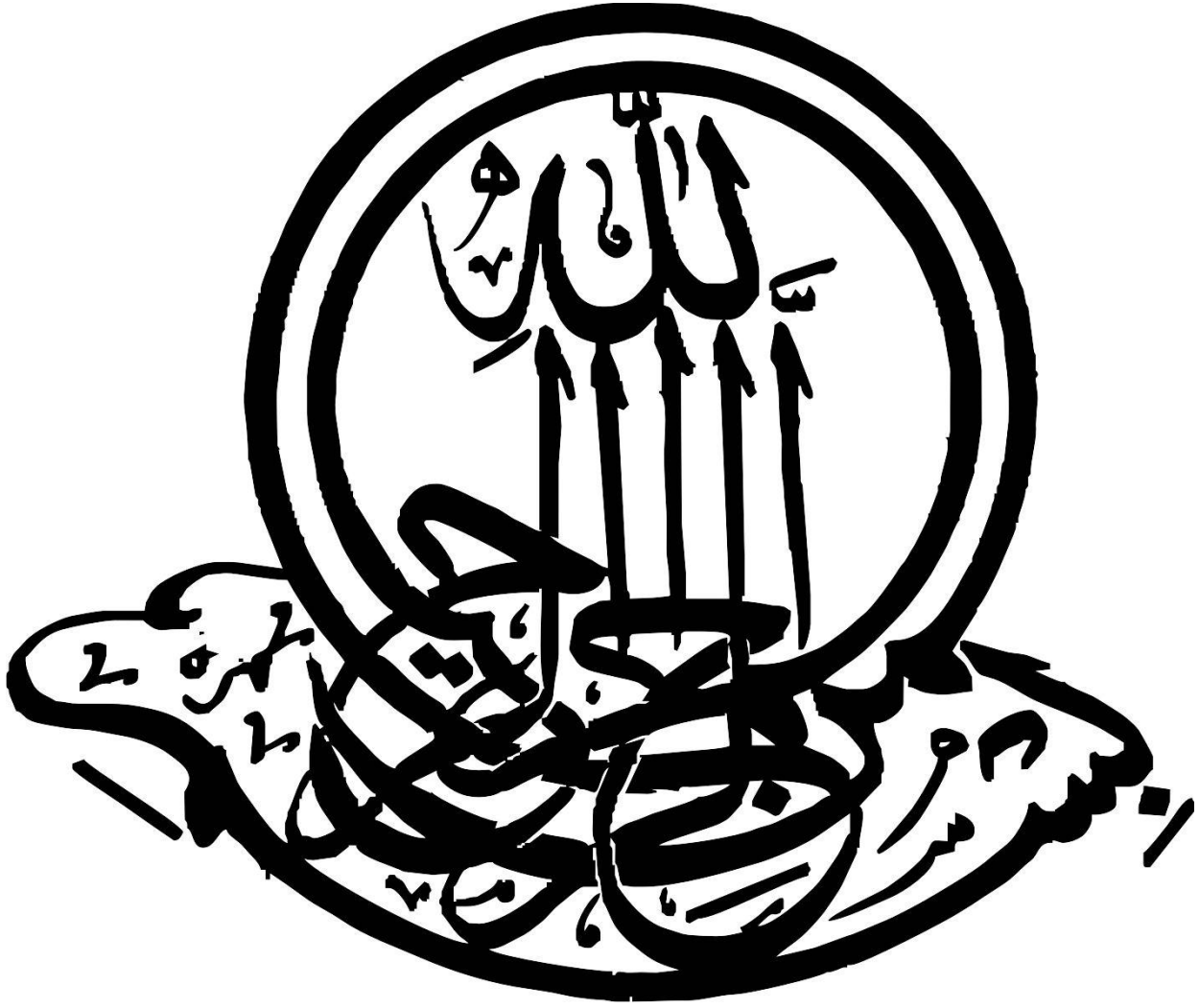
استاد مشاور

جناب آقای دکتر علی ریحانی

نگارش

احدخان پیآوری

اسفند ماه ۱۳۹۱



چکیده

در این پایان نامه به بررسی ترابرد اسپینی در اتصالات NG/FG/NG پرداخته ایم. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که به دلیل وجود یک درگاه فرومغناطیس EuO که یک میدان تبدلی با قدرت 5meV دارد، جریان اسپینی در قطعه طراحی شده به وجود می آید. این جریان اسپینی یک رفتار نوسانی با تغییر پارامترهای فیزیکی قطعه از خود نشان می دهد. جدا شدگی اسپینی در گرافین نوید بخش استفاده از این ماده در صنعت اسپیترونیک است.

لغات کلیدی: گرافین - معادله دیراک - پیوندگاه فرو مغناطیس - اسپیترونیک

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

فصل دوم: مروری بر منابع

۱-۲ مقدمه ۹

۲-۲ ساختار الکترونی کربن ۹

۱-۲-۲ هیبریداسون sp^2 کربن ۱۰

۳-۲ ساختار هندسی ۱۳

۱-۳-۲ یاخته ی واحد صفحه ی گرافین ۱۶

۴-۲ محاسبه ساختار نواری گرافین ۱۶

۱-۴-۲ مولکول های محدود ۱۷

۲-۴-۲ ترازهای انرژی گرافین ۱۹

۳-۴-۲ چگالی حالات در گرافین ۲۱

۵-۲ بدست آوردن نوار انرژی گرافین توسط معادله دیراک ۲۲

فصل سوم: روش تحقیق

۱-۳ مقدمه ۳۰

۲-۳ حل معادله دیراک برای ذرات بدون جرم در اتصالات گرافین ۳۰

۳-۳ اتصال " NG / FG / NG " گرافین با یک گیت اضافه ۳۷

فصل چهارم: نتایج

۴-۱ مقدمه	۴۱
۴-۲ نتایج	۴۱
نتیجه گیری	۵۶
پیشنهادات	۵۷
منابع	۵۸
Abstract	۶۱

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ در این شکل (الف): صفحات گرافین (ب): ساختار بلوری الماس (ج) نمونه ای از یک نانولوله‌ی آرمیچر و (د) مولکول C_{60} ، نشان داده شده است ۷
- شکل ۱-۲ اربیتال $2p_x$ دارای شکل دمبلی با دو بازو است بازوی تیره دامنه مثبت و بازوی روشن دامنه منفی دارد..... ۱۱
- شکل ۲-۲ ساختاری دوبعدی که نشان دهنده هیبرید sp^2 است..... ۱۳
- شکل ۳-۲ در این شکل دو بردار پایه‌ی صفحه‌ی گرافین و دو نوع کربن ' a ' و ' b ' نشان داده شده است. چهار همسایه اول برای اتم ' a ' نیز نشان داده شده است ۱۵
- شکل ۴-۲ (الف) یاخته واحد شبکه مستقیم گرافین. (ب) یاخته ویگنر - ساتیز شبکه وارون گرافین.. ۱۵
- شکل ۱-۳ پیوندگاه NG/FG/NG ۳۱
- شکل ۲-۳ پیوندگاه گرافین فرومغناطیس با دو درگاه ۳۷

فهرست نمودارها

نمودار ۱-۲ (الف) نمودار سه بعدی ترازهای انرژی گرافین. (ب) توزیع انرژی در اولین منطقه‌ی بریلوئن

صفحه‌ی گرافین به همراه نقاط مقارن در این شبکه..... ۲۱

نمودار ۲-۲ (الف) نمودار انرژی جسم جرم دار. (ب) انرژی جسم بدون بار ۲۲

نمودار ۳-۲ (الف) نمودار نوار انرژی برای نانوریون آرمیچر با $W_{ac} = \frac{47\sqrt{3}}{2}d$ و (ب) نمودار

نانوریون آرمیچر با $W_{ac} = \frac{49\sqrt{3}}{2}d$ ۲۶

نمودار ۴-۲ برای یک نانوریون با مشخصه $W_{zz} = 40.5d$ ۲۸

نمودار ۱-۴ رسانش پیوندگاه شکل (۳-۱) برای ماده عایق فرومغناطیس EuO ۴۳

نمودار ۲-۴ مقایسه رسانش در پیوندگاه شکل (۳-۱) برای مقادیر متفاوت طول گرافین فرومغناطیس ۴۴

نمودار ۳-۴ بررسی تغییرات رسانش با طول گرافین فرومغناطیس ۴۵

نمودار ۴-۴ بررسی تغییرات رسانش اسپینی با تغییر انرژی تبادل گرافین فرومغناطیس ۴۶

نمودار ۵-۴ در این نمودار رفتار رسانش اسپینی بیشینه را به ازای طول نمونه فرومغناطیس مشاهده می

کنید. در این قطعه از EuO با انرژی تبادل δmeV استفاده شده است ۴۷

نمودار ۴-۶ در این نمودار تغییرات رسانش اسپینی را نسبت به ولتاژ گیت U_g به ازای مقادیر متفاوت U_d

رسم نموده ایم. در محاسباتمان طول دو گیت را یکسان و برابر $d = L = \frac{3}{k}$ در نظر گرفتیم.....۴۸

نمودار ۴-۷ در این نمودار رسانش اسپینی را نسبت به ولتاژ U_d برای مقادیر متفاوتی از ولتاژ U_g رسم

نموده ایم. برای هر دو گیت طول مساوی $d = L = \frac{3}{k}$ را انتخاب کرده ایم ۴۹

نمودار ۴-۸ در این نمودار رفتار رسانش اسپینی و الکتریکی بیشینه را به ازای طول نمونه فرومغناطیس

مشاهده می کنید. در این قطعه از EuO با انرژی تبادل $5meV$ استفاده شده است.....۵۰

نمودار ۴-۹ در این نمودار تغییرات رسانش اسپینی را نسبت به ولتاژ گیت U_g به ازای مقادیر متفاوت

U_d رسم نموده ایم. در محاسباتمان طول دو گیت را یکسان و برابر $d = L = \frac{3}{k}$ در نظر گرفتیم.....۵۲

نمودار ۴-۱۰ در این نمودار تغییرات رسانش الکتریکی را نسبت به ولتاژ گیت U_g به ازای مقادیر

متفاوت U_d رسم نموده ایم. در محاسباتمان طول دو گیت را یکسان و برابر $d = L = \frac{3}{k}$ در نظر گرفتیم.

.....۵۳

نمودار ۴-۱۱ در این نمودار رسانش اسپینی را نسبت به ولتاژ U_d برای مقادیر متفاوتی از ولتاژ U_g رسم

نموده ایم. برای هر دو گیت طول مساوی $d = L = \frac{3}{k}$ را انتخاب کرده ایم.....۵۴

نمودار ۴-۱۲ در این نمودار رسانش الکتریکی را نسبت به ولتاژ U_1 برای مقادیر متفاوتی از ولتاژ U_2

رسم نموده ایم. برای هر دو گیت طول مساوی $d = L = \frac{3}{k}$ را انتخاب کرده ایم۵۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

ادوات الکترونیکی معمولی وابسته به ترابری حامل های بار الکتریکی در نیمه رساناهایی چون سیلیکان هستند. امروزه فیزیکدانان به فکر طراحی گونه دیگری از انتقال اطلاعات با روشهای نوین کوانتومی افتاده اند که وجه مشترک بسیاری از این روشها استفاده از خاصیت اسپین ذرات است و به عنوان شاخه ای از فیزیک معرفی می شود که با کنترل و دست کاری اسپین الکترون علاوه بر بار آن در ذخیره سازی و انتقال اطلاعات می تواند کاربرد فراوانی داشته باشد. یکی از مسائل مربوط به دست کاری اسپین، دست کاری جهت اسپینی یعنی توانایی قطبیده کردن اسپین است. اسپیترونیک یا الکترونیک اسپینی شاخه ای از فیزیک حالت جامد است که در آن به بررسی و کنترل درجات اسپینی یک سیستم می پردازد. بار و اسپین الکترون دو خصیصه جالب الکترون در امر ترابرد هستند. اهداف اصلی فیزیک ماده چگال بررسی خصیصه های الکترونی در مواد بالاخص موارد مربوط به ترابرد بار الکترون بوده است. علاوه بر این ویژگی، خاصیت اسپینی الکترون است که منجر به پیدایش مواد مغناطیسی می شود. اسپین خنثی نشده الکترون های تراز آخر باعث ایجاد رفتار مغناطیسی یک اتم می شوند. هرگاه یک جفت شدگی بین دو قطبی های مغناطیسی اتمهای همسایه وجود داشته باشد می توان در ابعاد ماکروسکوپی و دمای پایین خواص اسپینی جالبی را مشاهده کرد که همان امواج اسپینی یا مگنونها هستند. هرگاه ضریب جفت شدگی بین همسایه های مجاور مثبت باشد اتم ها یا همسایه ها تمایل به هم جهت شدن اسپین هایشان پیدا می کنند که منشا ایجاد فرومغناطیس ها می شوند و هرگاه این جفت شدگی منفی باشد همسایه ها تمایل به پادموازی شدن اسپین هایشان دارند که خود منشا ایجاد آنتی فرومغناطیس می باشد. این نظم اسپینی در

دمای خاصی از بین می‌رود و هر چه قدر قدرت جفت شدگی دوقطبی‌های همسایه بیشتر باشد این دما بالاتر می‌رود. دمایی که در آن خاصیت نظم اسپینی در فرومغناطیس‌ها از بین می‌رود را دمای کوری و دمایی که در آن نظم اسپینی در آنتی فرومغناطیس از بین می‌رود دمای نیل^۱ می‌نامند. تا قبل از کشف پدیده مقاومت مغناطیسی بزرگ^۲ دو خاصیت اسپین و بار الکتریکی الکترون در نظریه‌های تراپرد به صورت مجزا بررسی می‌شد و توجه بسیار اندکی به ارتباط بین بار و اسپین الکترون انجام می‌گرفت. مقاومت مغناطیسی عبارتی است که به صورت بسیار گسترده در مورد تغییرات مقاومت الکتریکی یک جسم در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی، می‌پردازد. مقاومت مغناطیسی به صورت بسیار گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و در اکثر کتب مرجع درسی به تفصیل به آن پرداخته‌اند. رفتار مقاومت مغناطیسی در مواد فلزی و نیمه‌رسانا و عایق تفاوت‌های زیادی با هم دارند.

ساده‌ترین روش تولید کردن یک جریان قطبیده اسپینی تزریق جریانی اسپینی از یک ماده فرومغناطیس است. این امر منجر به ایجاد یک مقاومت مغناطیسی بزرگ (GMR) می‌شود [۱]. نمونه GMR شامل دولایه از مواد فرومغناطیس است که توسط یک لایه جداکننده غیرمغناطیسی از هم جدا شده‌اند. وقتی هر دو بردار مغناطش لایه‌ها هم راستا باشند یک جریان الکتریکی آزادانه شارش می‌کند، درحالی‌که اگر بردارهای مغناطش دو لایه پادموازی باشند یک مقاومت بزرگ مانع از شارش جریان الکتریکی می‌شود. ساختاری که بدین گونه رفتار می‌کند والو اسپینی نامیده می‌شود، بنابراین این مقاومت مغناطیسی بزرگ (GMR) پدیده والو اسپینی را ایجاد می‌کند. این والو اسپینی از مواد مغناطیسی در مقیاس نانو ساخته

^۱ Neel^۲ Giant Magnetoresistance (GMR)

می‌شوند. اندازه لایه‌های مغناطیسی از مرتبه ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر و حتی کمتر است. موادی که بیشتر برای لایه‌های فرومغناطیسی استفاده می‌شوند کبالت یا یک آلیاژ از نیکل و آهن معروف به پرمالوی^۱، هستند. لایه جدا کننده غیر مغناطیسی می‌تواند از هر فلز غیر مغناطیسی مانند مس Cu باشد [۱].

ادوات اسپینترونیک نقش بسیار مهمی را در ذخیره سازی داده‌ها، صنعت میکروالکترونیک، حسگرها، کاربردهای زیست فناوری و از این قبیل را دارند. امروزه هرکس یک دستگاه اسپینترونیکی را روی میز خود دارد، زیرا تمامی رایانه‌های مدرن از والو اسپینی برای خواندن و نوشتن داده‌ها بر روی درایو سخت استفاده می‌کنند. کشف تونل زنی مقاومت مغناطیسی منجر به تولید نسل جدیدی از حافظه‌های رایانه‌ای شده است [۲].

از زمان‌های گذشته تا کنون مواد کربنی یک بستر بزرگ تحقیقاتی را در علم مزوسکوپیک به خود اختصاص داده‌اند. آنها خواص الکترونیکی بسیار جالبی عرضه می‌کنند که مربوط به پیکربندی‌های فروان حالت‌های الکترونیکی اتم‌های کربن می‌شود. کربن با عدد اتمی ۶ در گروه ششم جدول تناوبی قرار دارد. این عنصر ترکیب اصلی موجودات زنده را در بر گرفته است. بنابراین 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 سوختن ناقص بسیاری از هیدروکربن‌ها و یا مواد آلی (مثل چوب یا پلاستیک) ماده سیاه رنگی به جا می‌ماند که کربن بی‌شکل یا آمورف نام دارد. این ماده که پس مانده‌ی سوخت ناقص مواد آلی است از

^۱ Permalloy

دیر باز جهت تولید انرژی بشر به کار می‌رفت. ذغال چوب و ذغال سنگ از انواع کربن بی‌شکل هستند که سوزاندن آنها انرژی زیادی تولید می‌کند. الماس گونه‌ی 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 $a = 0.356 \text{ nm}$ قرار دارند. طول پیوند کربن - کربن در این ساختار برابر 0.15 nm گزارش شده است [۳]. این ماده به دلیل سختی بالا تمام عناصر موجود در طبیعت را می‌تراشد 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 سازی نیز مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

در سال ۱۹۸۵ ریچارد اسملی^۱ ساختاری جدید از کربن را کشف کرد که فلورن نامگذاری شد [۴]. C_{60} اولین فلورنی بود که کشف شد. این ملکول همانند یک توپ فوتبال کروی و شامل ۶۰ اتم کربن است. اتم‌های کربن در گوشه‌های ۲۰ شش ضلعی منظم و ۱۲ پنج ضلعی قرار می‌گیرند. بعد از گزارش کشف مولکول C_{60} دانشمندان زیادی شروع به انجام آزمایش‌های جدید جهت ساخت مولکول‌های جدید از کربن کردند. سرانجام در سال ۱۹۹۱ ایجیما^۲ موفق به کشف نانولوله‌های چند دیواره‌ی کربنی^۳ شد [۵]. دوسال بعد از گزارش کشف نانو لوله‌های کربنی چند دیواره، ایجیما و همکارانش موفق به ساخت نانو لوله‌های کربنی تک دیواره^۴ شدند [۷و۶]. نانو لوله‌های کربنی به دلیل خواص الکتریکی جالبی که دارند در ادوات الکتریکی موارد استفاده زیادی می‌توانند داشته باشند. این مواد به دلیل رسانش یک بعدی در مقیاس نانو می‌توانند جایگزین مناسبی برای فلزات و یا نیمه‌رساناها باشند.

^۱ Rick Smalley

^۲ Iijima

^۳ MWCNT

^۴ SWCNT

گرافیت از دیر باز جهت نوشتن به کار می‌رفته است. گرافیتی که در طبیعت یافت می‌شود معمولاً دارای ناخالصی‌هایی می‌باشد و کربن خالص نیست. گرافیت متشکل شده از صفحاتی است به نام گرافین که روی یک‌دیگر قرار گرفته‌اند. صفحات گرافین متشکل از اتم‌های کربنی هستند که با آرایش لانه زنبوری در دو بعد رشد کرده‌اند. اتم‌های کربن در صفحات گرافین پیوندهای قوی با هم دارند در حالی که پیوند بین اتم‌های کربن بین صفحات گرافین در گرافیت بسیار سست است به همین علت گرافیت بسیار نرم است.

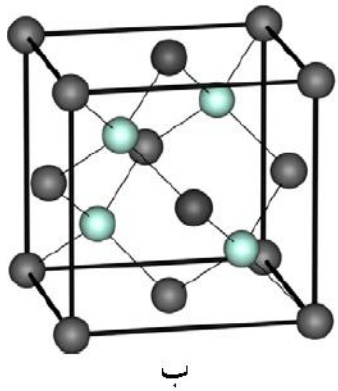
در سال ۲۰۰۴ گروهی از فیزیک دانان در دانشگاه منچستر موفق به مشاهده آرایه‌ای از اتم‌های کربن در یک شبکه لانه زنبوری دو بعدی شدند که ساختاری پایدار داشت و به این ترتیب رویای دستیابی به ساختاری دوبعدی محقق شد [۸]. این شبکه یک بعدی از اتم‌های کربن در یک شبکه دوبعدی لانه زنبوری تنها به ضخامت یک اتم کربن، گرافین نامیده شد. رسوب گذاری بخار شیمیایی^۱، لایه‌لایه کردن میکرومکانیکی^۲، رشد هم بافت روی سطوح عایق^۳ و ایجاد تعلیق‌های کلوئیدی^۴ عمومی‌ترین روش‌هایی هستند که جهت تولید گرافین به کار می‌روند [۹]. در شکل (۱-۱) انواع گوناگون کربن که در اینجا معرفی کردیم نشان داده‌ایم.

^۱ Chemical Vapor Deposition

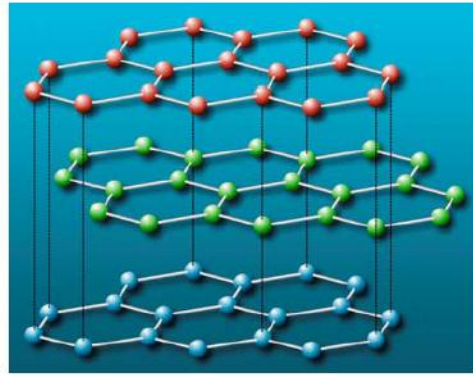
^۲ Micromechanical Exfoliation of Graphite

^۳ Epitaxial Growth on Electrically Insulating Surfaces

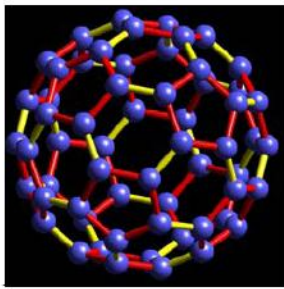
^۴ Creation of Colloidal Suspensions



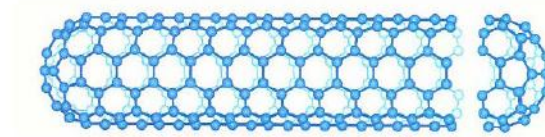
ب



الف



د



ج

شکل ۱-۱. در این شکل (الف): صفحات گرافین (ب): ساختار بلوری الماس (ج) نمونه ای از یک نانولوله ای آرمیچر و (د)

مولکول C_{60} ، نشان داده شده است [۷].

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱ مقدمه

بررسی خواص فیزیکی گرافین به صورت تئوری در سالهای قبل از کشف گرافین یعنی در سال ۱۹۴۷ توسط والاس^۱ مطرح شده بود. او خواص الکتریکی این ساختار و همچنین به رابطه پاشندگی خطی آن اشاره کرده بود [۱۰]. معادله موج این ماده توسط مک کلار^۲ در سال ۱۹۵۶ استخراج شده بود [۱۱]. شباهت رابطه پاشندگی گرافین به رابطه پاشندگی با معادله دیراک در سال ۱۹۴۸ توسط سمونوف^۳ بررسی شده بود. علت اینکه گرافین توانست بر خلاف تصور همگان با وجود افت و خیزهای گرمایی به حیات خود ادامه دهد وجود پیوندهای کوالانسی C-C در این ساختار می باشد. کربن با عدد اتمی ۶ دارای دو الکترون در اربیتال ۱s است که در ترابرد الکترونی هیچ نقشی ندارد. ۴ الکترون دیگر در نوار ظرفیت قرار می گیرند که با تشکیل هیبرید sp^2 ساختار گرافین را شکل می دهند. بررسی خواص هندسی و الکتریکی گرافین در منابع گوناگونی انجام شده است [۱۲-۱۸]. جهت درک روشنی از امر رسانش در صفحه گرافین ابتدا به بررسی ساختار الکترونی کربن در یک شبکه لانه زنبوری می پردازیم.

۲-۲ ساختار الکترونی کربن

در گونه های مختلف کربن بجز الماس الکترون های π هستند که در امر رسانش دخالت می کنند [۱۹]. اتم کربن شامل ۶ الکترون است که اربیتالهای $1s^2$ ، $2s^2$ و $2p^2$ را اشغال می کنند. به منظور بدست آوردن تابع موج $2p$ در اتم کربن معادله ی مستقل از زمان شرودینگر را باید برای اتم کربن حل نمود.

^۱ P.R.Wallace^۲ J.W. McClure^۳ G.W. Semenoff

جملاتی که در هامیلتونی مسئله ظاهر می‌شوند شامل قسمت مربوط به انرژی جنبشی، برهم‌کنش کولنی الکترون با هسته و برهم‌کنش کولنی الکترون‌ها با یکدیگر است. این هامیلتونی را در نهایت می‌توان به شکل زیر نوشت.

$$\hat{H} = \frac{-\hbar^2 \nabla^2}{2m_e} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \sum_{i=1}^5 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_i|} \quad (1-2)$$

جمله اول سهم مربوط به انرژی جنبشی است. جمله دوم مربوط به برهم‌کنش کولنی الکترون با هسته است و جمله سوم مربوط به برهم‌کنش کولنی الکترون با ۵ الکترون دیگر است. $|\vec{r} - \vec{r}_i|$ اندازه فاصله بین الکترون اربیتال ۲p و الکترون i ام است. معادله‌ی ویژه مقداری مستقل از زمان به صورت زیر می‌باشد.

$$\left\{ \frac{-\hbar^2 \nabla^2}{2m_e} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \sum_{i=1}^5 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}_i|} \right\} \Psi_{2p}(\vec{r}) = E_{2p} \Psi_{2p}(\vec{r}) \quad (2-2)$$

چون فاصله بین الکترون ۲p و سایر الکترون‌ها معلوم نیست این معادله به صورت معمول قابل حل نیست. به منظور حل این معادله بعضی از تقریب‌ها را باید منظور کرد.

۱-۲-۲ هیبریداسون sp^2 کربن

اربیتال ۲p اتم کربن در جامدات کربنی بر اساس تابع شعاعی اسلاتر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$u_{2p}(\vec{r}) = R_{2p}(r) Y_{1,m}(\theta, \varphi) \quad (3-2)$$

مؤلفه‌های اربیتال ۲p را در راستای محورهای مختصات دکارتی به صورت زیر می‌توان نوشت

$$u_{2p_x}(\vec{r}) = R_{2p}(r) \sin(\theta) \cos(\varphi) \quad (4-2 \text{ الف})$$

^۱ Hybridization

$$u_{r_{p_y}}(\vec{r}) = R_{r_1}(r) \sin(\theta) \sin(\varphi) \quad (ب-۴)$$

$$u_{r_{p_z}}(\vec{r}) = R_{r_1}(r) \cos(\theta) \quad (ج-۴)$$

اندازه این اربیتال‌ها در یکسری از نقاط ویژه در فضا مقدار قابل ملاحظه‌ای را اتخاذ می‌کند. اگر این نقاط

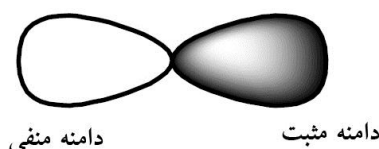
را در فضا رسم کنیم مشاهده می‌کنیم که این اربیتال‌ها به صورت دمبل‌هایی هستند که در امتداد

محورهای مختصات قرار گرفته‌اند [۲۰]. همان‌گونه که در شکل (۱-۲) نشان داده‌ایم اربیتال $2p_x$ دارای

یک بازو با دامنه‌ی منفی و بازوی دیگر با دامنه‌ی مثبت است. این موضوع را از رابطه‌ی (۴-۲ الف) به

سادگی می‌توان فهمید. تجزیه شدن اربیتال $2p$ در مولکول‌ها و جامدات کربنی منشأ پیدایش هیبریدهای

گونگون این عنصر می‌شود.



p_x

شکل ۱-۲. اربیتال $2p_x$ دارای شکل دمبلی با دو بازو است بازوی تیره دامنه مثبت و بازوی روشن دامنه منفی دارد

چون فاصله تراز بالاتر $2p$ از تراز پایین تر $2s$ چندان زیاد نیست بنابراین توابع موج این دو اربیتال

می‌توانند با هم به صورت خطی ترکیب شوند [۱۹]. از نحوه‌ی ترکیب شدن اربیتال $2s$ با سه مؤلفه‌ی

اربیتال $2p$ هیبریدهای گونگونی به وجود می‌آیند. به طور مثال اگر یک مؤلفه‌ی اربیتال $2p$ با اربیتال $2s$

ترکیب شود تابع موج جدید را هیبرید sp می‌گویند. استیلن با فرمول شیمیایی C_2H_2 دارای هیبرید sp