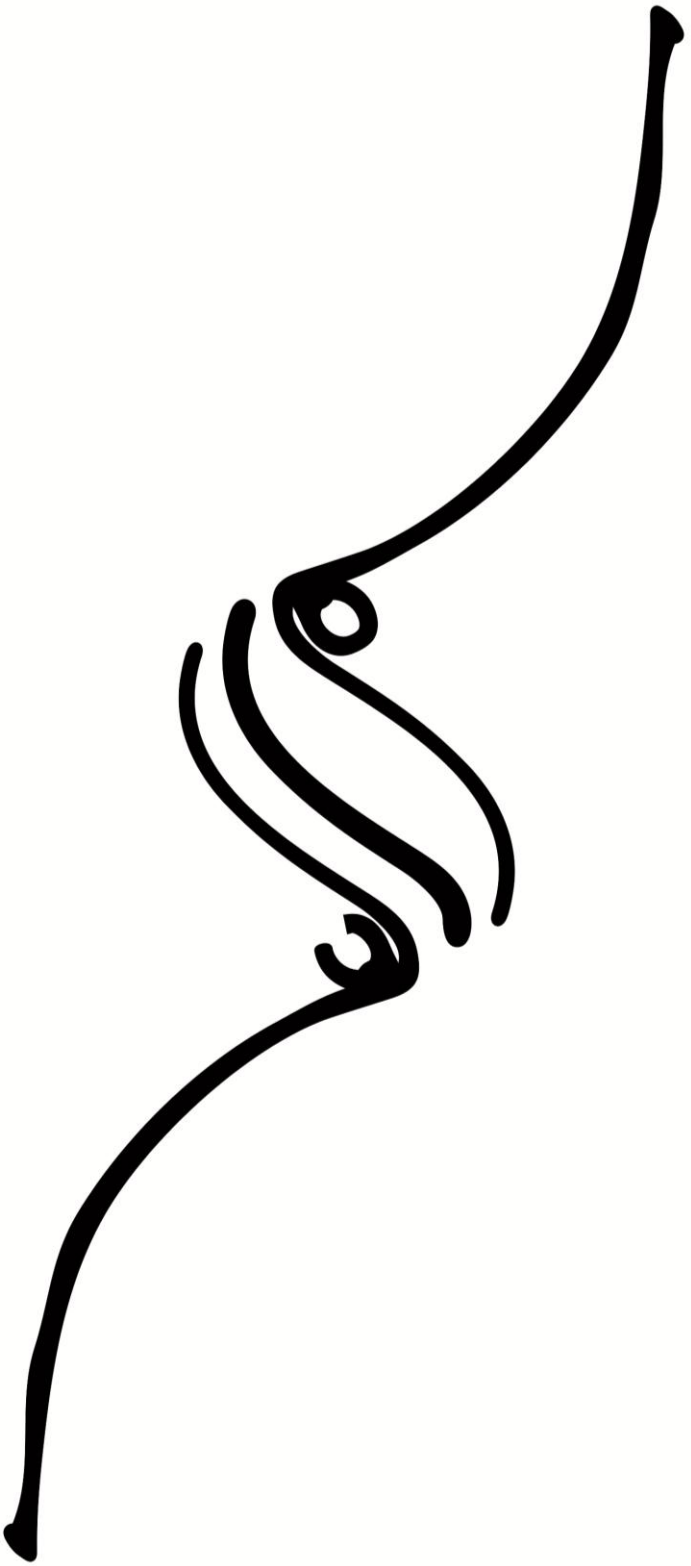


دانشکده فیزیک

گروه نانو فیزیک

عنوان:

بررسی خواص الکتریکی نانو ساختارهای کربنی برای کاربردهای صنعتی

دانشجو :

میثاق قزلو

استاد راهنما :

دکتر حمید هراتی‌زاده

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۹۲

برای پدرم به پاس نور و امیدش

مادرم به پاس مهر و عشقش

و همسرم به شکرانه شکیبایی‌اش در روزهای سخت

تقدیر و سپاسگذاری

سپاس خدایم را از آغاز تا انجام.

تجربه‌ای متفاوت بود، سرشار از شور و هیجان، روشنایی و امید به آینده، آکنده از طراوت و ترنم دانش‌اش، آزمایشگاه ۳۰۱. شگفت انگیز بود همکاری در این تیم. هدف های تبیین شده مشخص و تلاش و پشتکار برای نیل به آن‌ها. راهنمایی های ارزشمند معلممان، دکتر هراتی زاده بهترین مسیر بود برای پیمودن. بسیار سپاسگذارم از وجودش در کنارمان و خوشحال از اینکه بیش از دو سال از بهترین سال‌های عمرمان را در کنار هم به شادی گذراندیم. صبوری را از آرامشش آموختیم و انسانیت را از قلب پاکش. و اینگونه آغاز کردیم مسیر بی انتهای دانش‌اندوزی را.

محبت های بی دریغ عزیزترین دوستانم را هرچند که شایسته مهرشان نیست، اما تمام چیزیست که دارم، با زیباترین جمله در دنیایم جبران می کنم؛ "دوستتان دارم". یاشار، جواد، امید و بهاره، مرضیه، مهرداد، رویا، مریم، وحید، صادق، نرگس، سپاس از حضورتان!

بر خود لازم می‌دانم از دوست عزیزم مهرداد نجفی بخاطر همکاری اش در کسب نتایج فصل چهارم این پایان نامه و محبت هایش جهت تدوین آن کمال تشکر و تقدیر را اعلام دارم.

در انتها همچون همیشه قدردان حضور پر رنگ خانواده‌ام در تمام مراحل زندگی هستم.

چکیده:

نانو ساختارهای بر پایه کربن امروزه به دلیل روش‌های ساده و گاها ارزان تولید، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از انواع این نانو ساختارها که در سال‌های اخیر حجم گسترده‌ای از تحقیقات را در سرتاسر جهان به خود اختصاص داده است، گرافین می‌باشد. گرافین با ساختار sp^2، خواص بسیار جالبی از خود نشان می‌دهد که آن را برای استفاده در سطح گسترده‌ای از کاربردها مناسب کرده است.

در این پایان‌نامه نانو صفحات گرافینی با استفاده از روش شیمیایی هامرز[1] تولید شدند. برای اطمینان از تشکیل این نانو ساختارها، آنالیزهای XRD، SEM، Raman و OM مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور بررسی یکی از خواص الکتریکی نانو ساختارهای کربنی، پس از مراحل متعدد و ارزیابی‌های مختلف در مورد نوع زیر لایه و نیز روش لایه نشانی، قطعات حسگری بر پایه صفحات گرافینی ساخته شد و حساسیت آن‌ها نسبت به گاز آمونیاک، بخار اتانول، بخار استون مورد سنجش قرار گرفت. در یک مورد کاربری صنعتی، حسگر بر پایه گرافین سنتز شده، به گاز اتیلن متساعد از میوه‌جات در دمای اتاق واکنش مناسب و قابل ثبتی از خود نشان داد که این موضوع می‌تواند کمک موثری در تجاری سازی نتایج حاصل از این تحقیقات را به دنبال داشته باشد.

در یک کاربرد دیگر، نانو صفحات گرافینی در ترکیب دوگانه آن با اکسید روی جهت آشکارسازی نور فرابنفش مورد آزمایش قرار گرفت.

آنالیز نمونه‌های ساخته شده کیفیت صفحات تشکیل شده را تایید کردند و بررسی کاربردهای ذکر شده نیز قابلیت های ویژه نانو ساختارهای بر پایه گرافین را در طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی آشکار می کند.

[1] Hummers

فهرست مطالب

فصل اول ۱

۱- ۱مقدمه..... ۲

۱-۲ کربن..... ۲

۱-۳ کربن چگونه ساختارهای متفاوتی تشکیل میدهد ؟..... ۳

۱-۴ پیوند زنی اوربیتالهای اتم کربن در ساختار الماس..... ۴

۱-۵ پیوندزنی اوربیتالهای اتمی کربن در ساختار گرافیت..... ۵

۱-۶ گرافین..... ۶

۱-۷ نانو لوله‌های کربنی..... ۷

۱-۸ فولرین..... ۸

۱-۹ بررسی دقیقتر ابتدایی ترین ساختار کربن، گرافین..... ۹

۱-۹-۱ مورفولوژی و ساختار گرافین..... ۱۰

۱-۹-۲ خواص الکترونیکی..... ۱۱

۱-۹-۳ خواص مکانیکی..... ۱۳

۱-۹-۴ خواص اپتیکی..... ۱۳

فصل دوم..... ۱۵

۲-۱ گرافین همبافته.....۱۶

۲-۱-۱ گرافین همبافته با استفاده ازSiC ۱۷

۲-۲ لایه برداری میکرومکانیکی..... ۱۸

۲-۳ لایه برداری از گرافیت با استفاده از محلول ها..... ۱۹

۲-۴ سایر روش‌ها..... ۱۹

۲-۵ بررسی دقیق تر دو رهیافت نمونه پایین به بالا و بالا به پایین در تهیه صفحات گرافین
..... ۲۰

۲-۵-۱ CVD (رهیافت پایین به بالا)..... ۲۰

۲-۵-۲ رهیاف بالا به پایین (تهیه گرافین از اکسید گرافین)..... ۲۲

۲-۶ روش هامرز ۲۳

۲-۶-۱ سنتز اکسید گرافین با استفاده از روش هامرز بهبود یافته..... ۲۳

۲-۷ سنتز و مشخصه یابی صفحات گرافین در این پایان نامه..... ۲۴

فصل سوم.....۳۳

۳- ۱مقدمه ۳۴

۳- ۲ساخت قطعات حسگری..... ۳۵

۳-۲-۱ لایه فعال..... ۳۵

۳-۲-۲ زیرلایه ۳۵

۳-۲-۳ الکترودها ۳۷

۳-۲-۴ محفظه انجام حسگری..... ۳۸

۳-۳ آزمون حسگری قطعات ساخته شده..... ۳۹

۳-۳-۱ آزمون حسگری برای بخاراستون.....۳۹

۳-۳-۲ آزمون حسگری برای بخار اتانول..... ۴۱

۳-۳-۳ آزمون حسگری گاز آمونیا ($NH3$)..... ۴۱

۳-۳-۴ حسگری گاز اتیلن تولید شده از میوه‌ها..... ۴۴

۳-۴ نتیجه گیری.....۴۸

فصل چهارم.....۴۹

۴-۱ مقدمه..... ۵۰

۴-۲ تهیه نانو کامپوزیت اکسید روی گرافین..... ۵۱

۴-۳ مقایسه ویژگیهای حسگری فرابنفش اکسیدروی و نانوکامپوزیت اکسیدروی/گرافین.....۵۴

۴-۴ نتیجه گیری.....۵۵

۴-۵ پیشنهادات جهت ادامه کار.....۵۶

پیوست ۱ : طیف سنجی رامان
.....۵۸

پیوست ۲ : مقالات.....۶۰

مراجع ۶۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: انرژی اوربیتالهای اتم کربن در حالت کلی ۳

شکل ۱-۲ : انرژی اوربیتالهای اتم کربن در حالت الماسی ۴

شکل ۱-۳ : انرژی اوربیتالهای اتم کربن در حالت الماسی..... ۵

شکل ۱-۴ : تصویر میکروسکوپی از نمونه صفحات گرافیت ۶

شکل ۱-۵ : تصویر طرحوارهای از صفحات گرافیت ۷

شکل ۱-۶ : انواع مختلف نانو لولههای کربنی ۸

شکل ۱-۷ : یک نوع فولرین (C60) ۹

شکل ۱-۸ : گرافین، پایه نانو ساختارهای کربنی ۹

شکل ۱-۹ : الف) شماتیکی از ساختار بلوری، مناطق بریلوئن و طیف پخش شدگی در گرافین. ب) گرافین موج دار با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو. خطوط قرمز دارای طول ۸ نانومتر میباشند. ۱۰

شکل ۱-۱۰ : الف) شماتیک جفت پنج ضلعی-هفت ضلعی در شبکه گرافیتی. ب) تصویر HR-TEM از جفت پنج ضلعی-هفت ضلعی ۱۱

شکل ۱-۱۱ : عبور اپتیکی برای گرافین تک لایه و دو لایه ۱۴

شکل ۲-۱ : شماتیکی از رشد گرافین روی SiC ۱۷

شکل ۲-۲ : تصویر SEM گرافین رشد داده شده بر روی SiC ۱۸

شکل ۲-۳ : تصویر SEM از گرافین به وسیله لایه برداری میکرومکانیکی..... ۱۹

شکل ۲-۴ : گرافین سنتز شده به روش لایه برداری شیمیایی..... ۱۹

شکل ۲-۵ : گرافین سنتز شده به روش تخلیه الکتریکی ۲۰

شکل ۲-۶ : الف) تصویر SEM از سطح Cu، مرزدانه و پلهها را در سطح Cu و صفحات گرافینی و چین و چروکهای آن را نشان میدهد. شکل درونی تصاویر TEM از لبه های گرافین تا شده است. ب) تصویر میکروسکوپ نوری از گرافین انتقال یافته بر روی زیر لایه کوارتز (SiO_2) را نمایش میدهد. ۲۱

شکل ۲-۷ : تصویر اپتیکی از اکسید گرافین (سمت راست) و اکسید گرافین کاهش یافته (سمت

چپ) ۲۴

شکل ۲-۸ : تصویر محلول آبی اکسید گرافین سنتز شده در این پایان نامه (قبل از لایه برداری به وسیله امواج ماورای صوت) ۲۵

شکل ۲-۹ : تصویر میکروسکوپ نوری از صفحات جدا شده اکسید گرافیت. فاصله بین این مجموعه صفحات از هم در حدود ۸۰۰ نانو متر بدست آمد ۲۶

شکل ۲-۱۰ : دستگاه XRD الف) نمای کلی دستگاه. ب) محل قرار گیری نمونه. ۲۶

شکل ۲-۱۱ : الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) گرافیت، اکسید گرافین و اکسید گرافین کاهش یافته ۲۷

شکل ۲-۱۲ : الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) بدست آمده از نمونه اکسید گرافین نیمه کاهش یافته، سنتز شده در این پایان نامه. ۲۷

شکل ۲-۱۳ : الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از نمونه اکسید گرافین کاهش یافته، سنتز شده در این پایان نامه. ۲۸

شکل ۲-۱۴ : طیف رامان بدست آمده از نمونه اکسید گرافین نیمه کاهش یافته، سنتز شده در این پایان نامه. ۳۰

شکل ۲-۱۵ : طیف رامان بدست آمده از اکسید گرافین (سیاه)، اکسید گرافین کاهش یافته توسط هیدرازین به مدت دو ساعت (آبی)، هفت ساعت (قرمز)، اکسید گرافین کاهش یافته با اعمال حرارت در ۱۰۰۰ درجه (بنفش) و در ۲۴۰۰ درجه سانتیگراد (سبز) ۳۱

شکل ۲-۱۶ : تصاویر SEM بدست آمده از الف) گرافیت طبیعی دست نخورده، ب) اکسید گرافین کاهش یافته با پوشش طلا روی نمونه، پ) بدون پوشش طلا و ت) با پوشش طلا در بزرگنمایی بالاتر ۳۲

شکل ۲-۱۷ : تصاویر SEM از نمونه های اکسید گرافین کاهش یافته به روش شیمیایی ۳۲

شکل ۳-۱ : زیر لایه سرامیکی (ترکیب آلومینا و مولایت) استفاده شده برای لایه نشانی ۳۶

شکل ۳-۲ : الگوی الکترودهای شانه ای ۳۸

شکل ۳-۳ : منحنی جریان-ولتاژ ۳۸

شکل ۳-۴ : محفظه مورد استفاده جهت انجام آزمون های حسگری ۳۹

شکل ۳-۵ : نمودار حساسیت بر حسب زمان برای بخار استون ۴۰

شکل ۳-۶ : نمودار حساسیت بر حسب زمان برای بخار اتانول ۴۱

شکل ۳-۷ : نمودار حساسیت بر حسب زمان به ترتیب از چپ برای ppm ۳۰۰۰، ppm ۲۰۰۰ و ppm ۱۰۰۰ گاز آمونیا ۴۲

شکل ۳-۸ : چگالی حالتهای NH_3 روی گرافین. الف)HOMO و ب) LUMO ملکول NH_3. اتم نیتروژن آبی رنگ و اتمهای هیدروژن سبز رنگ نشان داده شدهاند. ۴۳

شکل ۳-۹ : نمودار مقاومت بر حسب زمان برای گاز آمونیا ۴۴

شکل ۳-۱۰ : نمودار حساسیت برحسب زمان برای الف) پرتقال، ب) نارنگی، پ) لیمو شیرین، ت) لیمو، ث) سیب زرد و ج) موز. ۴۷

شکل ۳-۱ : نمودار حساسیت بر حسب زمان برای میوه های مختلف در یک بازه زمانی مشخص ۴۸

شکل ۴-۱ : طیف XRD نانو پودر اکسید روی ۵۲

شکل ۴-۲ : تصویر SEM از نانوکامپوزیت اکسیدروی-گرافین ۵۲

شکل ۴-۳ : مقایسه طیف فتولومینسانس اکسیدروی با کامپوزیت اکسید روی/گرافین ۵۳

شکل ۴-۴ : مقایسه منحنی جریان بر حسب زمان اکسیدروی و کامپوزیت اکسیدروی/گرافین ۵۵

فهرست جداول :

جدول ۲-۱ : اطلاعات بدست آمده از طیف رامان گرافین ۲۹

جدول ۳-۱: زمان پاسخ و بازیابی برای مقادیر گاز وارد شده ۴۲

فصل اول

کربن و نانو ساختارهای آن

۱-۱ مقدمه

فراوانی یک ماده ضرورتا به معنای پر اهمیت بودن آن ماده نمی‌باشد. کربن با سهم ۰/۰۴۸ درصدی از پوسته زمین، پانزدهمین عنصر از لحاظ فراوانی محسوب می‌شود، اما بدون آن نابود خواهیم بود! چیزی که اتم کربن را خاص می‌سازد بی‌قاعدگی حیرت آور آن در برقراری پیوندهاست. به عبارت دیگر اتم کربن یک اتم عیاش در دنیای اتمی است! خودش را به همه اتم‌ها از جمله اتم‌های هم نوعش می‌چسباند و پیوندهای محکمی را ایجاد می‌کند. همچنین کربن خطوط ملکولی بسیار زیبا و هارمونیکی را شکل می‌دهد که حقه طبیعت در ساخت پروتئین‌ها و DNA هاست [۱].

۱-۲ کربن

کربن با نماد "C" و عدد اتمی ۶ در گروه ۱۴ جدول تناوبی قرار دارد. آرایش الکترونی آن به صورت $[He]2s^2 2p^2$ می‌باشد. همچنین این عنصر ۴ ظرفیتی و غیر فلز بوده و چهار الکترون در دسترس برای برقراری پیوند کوالانسی دارد.

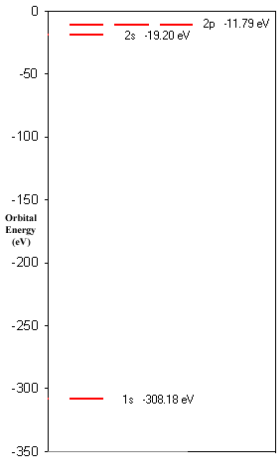
کربن در اشکال مختلفی (آلوتروپ) در طبیعت وجود دارد که از فولرین‌های صفر بعدی، نانو لوله-های یک بعدی و گرافن دو بعدی گرفته تا گرافیت و الماس سه بعدی را شامل می‌شود و خاصیت‌های این آلوتروپ‌ها می‌تواند به صورت گسترده‌ای تغییر کند [۲]. برای مثال الماس سخت‌ترین ماده است و این در حالیست که گرافیت نرم‌ترین می‌باشد. الماس به نور مرئی شفاف است اما گرافیت کدر می-باشد. الماس عایق الکتریسیته است و گرافیت رسانای آن. نکته جالب اینجاست که تمامی این خاصیت‌های متفاوت از یک نوع اتم، یعنی اتم‌های کربن ناشی می‌شود که فقط به صورت ساده‌ای در

قرارگیری ساختار اتمی متفاوتند.

۳-۱ کربن چگونه ساختارهای متفاوتی تشکیل می‌دهد [۳و۴]؟

آرایش الکترونی اتم‌های کربن تشکیل اوربیتال‌های اتمی متعددی را ممکن می‌سازد. اتم‌های کربن در حالت عنصری، پیوندهای کوالانسی برقرار می‌کنند که این عمل با به اشتراک‌گذاری جفت الکترون‌ها انجام می‌شود. پیوندهای کوالانس خاصیت‌های سمتی[1] دارند و به همین دلیل کربن قابلیت این را دارد که خود را با ساختارهای مختلف بلوری و مولکولی سازگار کند. در واقع آن‌چه پس زمینه-ی خواص مختلف فیزیکی و شیمیایی آلوتروپ‌های کربن است، طبیعت این پیوندهاست.

کربن نیز مانند سایر عناصر ردیف اول جدول تناوبی، اوربیتال‌های اتمی‌ای دارد که می‌توانند پیوند برقرار کرده و جفت شوند و این به دلیل آن است که اوربیتال‌های اتمی s و p در پوسته دوم الکترونی دارای انرژی‌های بسیار نزدیک به هم هستند. در نتیجه کربن می‌تواند برای تشکیل پیوندهای شیمیایی با هندسه‌های مختلف آمادگی کاملی داشته باشد.

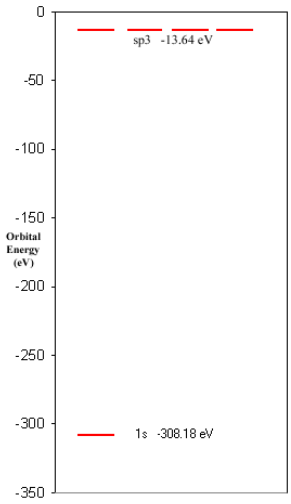


شکل ۱-۱: انرژی اوربیتال‌های اتم کربن در حالت کلی

[1] Directional properties

۴-۱ پیوند زنی اوربیتال‌های اتم کربن در ساختار الماس

در ساختار الماس، یک اوربیتال s و سه اوربیتال p از پیوند زنی sp^3 پیروی می‌کنند.



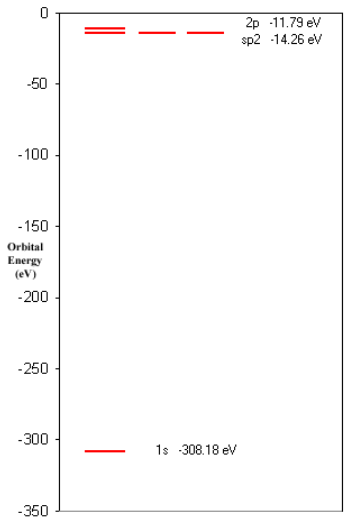
شکل ۱-۲ : انرژی اوربیتال‌های اتم کربن در حالت الماسی

هندسه اوربیتال‌های پیوندی در این حالت چهار وجهی[1] خواهد بود و به همین دلیل است که در ساختار الماس، هر اتم کربن چهار همسایه اول دارد. سختی الماس مربوط به ساختار کریستالی آن و استحکام پیوندهای شیمیایی بین اتم‌های کربن است. هر اتم کربن در این ساختار چهار همسایه اول دارد که با پیوند σ به آن‌ها متصل است. این شبکه متحد از پیوندهای کوالانسی ساختار الماس را بسیار سخت ساخته است. به دلیل این‌که الکترون‌های ظرفیت در ساختار الماس در تشکیل پیوندهای σ شرکت کرده‌اند و در این ساختار هیچگونه پیوند π غیر جایگزیده‌ای وجود ندارد، الماس دارای رسانندگی الکتریکی بسیار ضعیفی می‌باشد. الکترون‌ها بواسطه پیوند بین اتم‌های کربن، در درون الماس به سختی نگه داشته شده‌اند و بنابراین تنها در محدوده نور فرابنفش جذب داشته و در محدوده مرئی جذبی ندارند. به همین دلیل است که الماس خالص بسیار شفاف می‌باشد.

[1] Tetrahedral

۱-۵ پیوندزنی اوربیتال‌های اتمی کربن در ساختار گرافیت

در ساختار گرافیت یک اوربیتال s و دو اوربیتال p از پیوندزنی sp^2 پیروی می‌کنند.



شکل ۱-۳ : انرژی اوربیتال‌های اتم کربن در حالت الماسی

شکل هندسی این اوربیتال‌های پیوندی سه گوش دو وجهی[1] است. به همین دلیل است که هر اتم کربن در ساختار گرافیت دارای سه همسایه نزدیک در صفحه خود است. در این ساختار یکی از اوربیتال‌های p دست نخورده باقی می‌ماند. این اوربیتال p با اوربیتال‌های p دست نخورده اتم‌های کربن همسایه همپوشانی می‌کند و پیوندهای π را در بالا و پایین هر صفحه گرافیت تشکیل می‌دهد. اوربیتال‌های اتمی جفت شده، پیوندهای شیمیایی‌ای به وجود می‌آورند که ساختارهای متنوعی از گرافیت مانند فولرین‌ها و نانو لوله‌ها را تشکیل می‌دهد.

رسانش الکتریکی و نرمی گرافیت می‌تواند به ساختار کریستالی آن مربوط باشد. گرافیت بلوری از صفحات موازی اتم‌های کربن تشکیل شده است که هر صفحه، از آرایه‌های شش گوشی اتم‌های کربن ساخته می‌شود. پیوندهای برقرار شده بین اتم‌های کربن در این صفحات از پیوندهای هم نوعشان در الماس محکم‌تر هستند. همچنین پیوندهای π نیز بین صفحات موازی برقرار است. رسانندگی

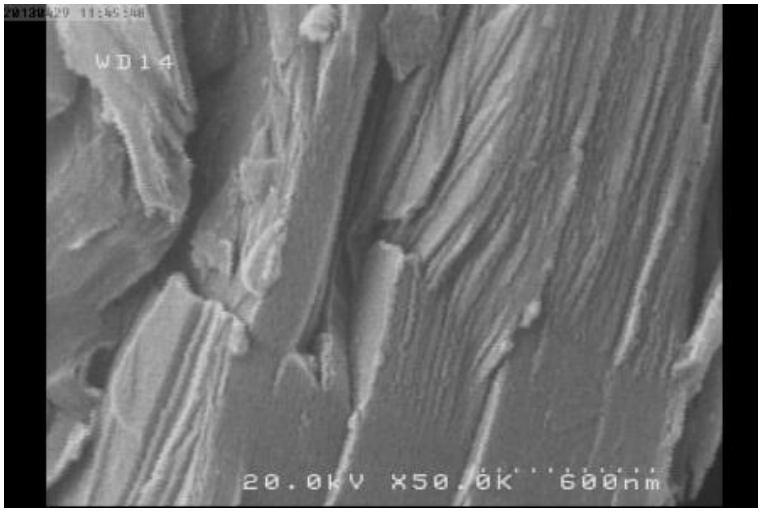
[1] Trigonal planar

الکتریکی در گرافیت به دلیل همین پیوندهای غیر جایگزیده π است. برهمکنش بین این پیوندها با نور مرئی نیز دلیل سیاه رنگ بودن گرافیت است. نرم بودن گرافیت نیز به دلیل پیوندهای ضعیف صفحات موازی با نیروی واندروالسی است [۳و۴].

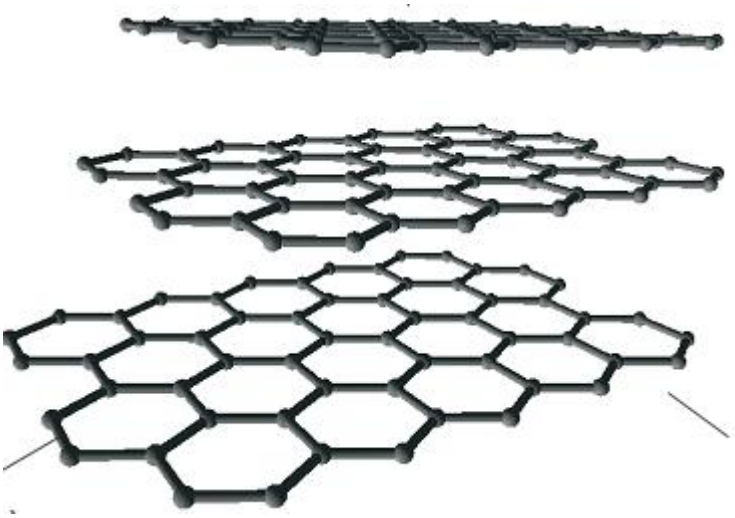
۱-۶ گرافین

گرافیت که معمول‌ترین آلوتروپ کربن است و به وفور در طبیعت یافت می‌شود، از بهم پیوستن صفحات دو بعدی مسطح لانه زنبوری شکل کربن تشکیل شده است.

این صفحات به اندازه یک اتم ضخامت دارند. در سال‌های اخیر جدا سازی و رشد این صفحات منفرد به وفور مورد بررسی قرار گرفته و به نتایج مطلوبی نیز رسیده است. این صفحات جدا شده گرافین نام‌گذاری شده‌اند [۵و۶]. شکل دو وجهی و ساختار شیمیایی گرافین مجموعه‌ای از خواص را به آن بخشیده‌اند که به آسانی در مواد دیگر یافت نمی‌شود. بررسی دقیق‌تر گرافین را در بخش (۱-۹) ادامه خواهیم داد.



شکل ۱-۴ : تصویر میکروسکوپی از نمونه صفحات گرافیت



شکل ۱-۵ : تصویر طرحواره‌ای از صفحات گرافیت

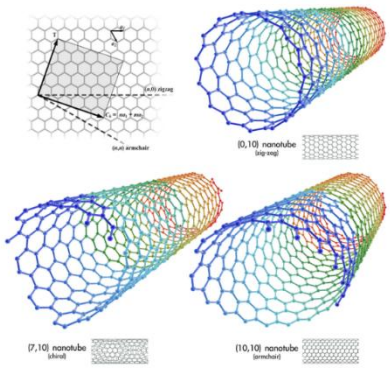
۱-۷ نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی با ضخامت یک اتم، و به شکل استوانه‌ای تو خالی ساخته شده‌اند. این استوانه ها دارای خواص ویژه‌ای چون استحکام بالا، رسانش الکتریکی و رسانش گرمایی مطلوب بوده و از همین رو کاربردهایی در نانو الکترونیک، اپتیک و علم مواد دارند. اکثر نانو لوله‌های تک جداره[۱] (SWNT) نزدیک به یک نانو متر قطر دارند و طول آن‌ها می‌تواند میلیون‌ها برابر این قطر باشند. نانو لوله‌های چند جداره[۲] (MWNT) نیز از چندین لایه پیچیده شده (استوانه‌های هم مرکز) گرافین تشکیل شده اند. فاصله بین لایه‌های گرافین در این نانو لوله‌ها تقریبا همانند فاصله بین صفحات گرافین در گرافیت می‌باشد، یعنی فاصله‌ای در حدود ۳۳۰ پیکومتر [۷].

پیش بینی شده است که خاصیت‌های رسانش در نانو لوله‌ها مربوط به هلیسیتی[۳] و قطر نانو لوله‌ها باشد [۸و۹]. نانو لوله‌ها می توانند بر اساس طرز پیچش لوله، رفتار فلزی یا نیمرسانایی داشته باشند.

[1] Single Walled Nano Tube
[2] Multi Walled Nano Tube
[3] Helisity

برای مثال نانو لوله صندلی راحتی[1] فلز است در حالی که باقی گونه‌ها نیمرسانا می‌باشند. از جمله موارد کاربری نانو لوله‌ها می‌توان استفاده آن‌ها در ترانزیستورها، حسگرها و همچنین به عنوان جزئی از مدارات مجتمع[2] را نام برد [۱۰].



شکل ۱-۶ : انواع مختلف نانو لوله‌های کربنی [۷]

۱-۸ فولرین

فولرین اولین بار در هنگام تبخیر گرافیت با استفاده از لیزر بدست آمد [۱۰]. کشف فولرین آغاز مطالعات جدید جهت کشف ساختار های دیگر کربن مانند نانو لوله‌ها و گرافین را به همراه داشت. فولرین نیز مانند دیگر ساختارهای کربن کاربردهای گسترده‌ای را داراست که از جمله آن‌ها می‌توان استفاده به عنوان رکتوفایرها و ترانزیستورها را نام برد. عمده‌ترین روش تولید فولرین استفاده از روش تخلیه الکتریکی می‌باشد. فولرین‌ها به دلیل توانایی در برقراری پیوند با گونه خاصی از آنتی بیوتیک‌ها، در حال حاضر در حال بررسی برای کاربردهای پزشکی نیز می‌باشند [۷].

[1] Armchair
[2] Integrated Circuit