

نویسندگان

زهرا ثبات^۱سحر طیب‌طاهر^{۴۲}صدیقه صادق‌حسینی^{۴۳}

sadeghs@ripi.ir



میکروسکوپی پروبی روبشی از گرافن

چکیده

موادی با خواص بنیادی جدید که دانسته‌های ما را به چالش می‌کشاند، همواره مورد توجه محققین هستند. اگر ویژگی‌های بدیع این مواد به عرصه مهندسی دستگاه‌ها کشانده شده و کاربرد در خور توجهی بیابند، آنگاه دامنه این تحقیقات دیگر حد و مرزی نخواهد داشت. گرافن، شکل دو بعدی کربن، این مسیر را پیموده است. گرافن موضوع تعداد زیادی از تحقیقات نظری و عملی بوده است تا اینکه از سال ۲۰۰۴، هنگامی که از یک روش ساده و ظریف برای ساخت گرافن تک لایه‌ای استفاده شد، زمینه برای انجام تحقیقات بسیار گسترده فراهم گردید. روش‌های بسیار زیادی موازی با این روش برای ساخت گرافن توسعه یافته است. با آشکار شدن ویژگی‌های ساختاری و الکترونیکی منحصربه‌فرد گرافن، مشخص گردید که روش میکروسکوپی پروبی روبشی یک روش جالب و فوق‌العاده برای مطالعه این ترکیب است. در این مقاله مروری، روش میکروسکوپی پروبی روبشی و چگونگی استفاده از این روش به‌عنوان یک ابزار ضروری برای درک خواص گرافن و تحقیقات گرافن در آینده، بررسی شده‌است.

واژه‌های کلیدی

گرافن، میکروسکوپی پروبی روبشی،
AFM و SPM، STM

مقدمه

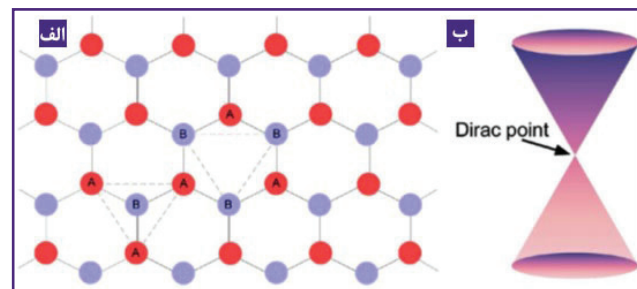
موادی با خواص بنیادی جدید که دانسته‌های ما را به چالش می‌کشاند، همواره مورد توجه محققین هستند. اگر ویژگی‌های بدیع این مواد به عرصه مهندسی دستگاه‌ها کشانده شده و کاربرد در خور توجهی بیابند، آنگاه دامنه این تحقیقات دیگر حد و مرزی نخواهد داشت. گرافن، شکل دو بعدی کربن، این مسیر را پیموده است. گرافن موضوع تعداد زیادی از تحقیقات نظری و عملی بوده است تا اینکه از سال ۲۰۰۴، هنگامی که از یک روش ساده و ظریف برای ساخت گرافن تک لایه‌ای استفاده شد، زمینه برای انجام تحقیقات بسیار گسترده فراهم گردید. روش‌های بسیار زیادی موازی با این روش برای ساخت گرافن توسعه یافته است. با آشکار شدن ویژگی‌های ساختاری و الکترونیکی منحصربه‌فرد گرافن، مشخص گردید که روش میکروسکوپی پروبی روبشی یک روش جالب و فوق‌العاده برای مطالعه این ترکیب است. در این مقاله مروری، روش میکروسکوپی پروبی روبشی و چگونگی استفاده از این روش به‌عنوان یک ابزار ضروری برای درک خواص گرافن و تحقیقات گرافن در آینده، بررسی شده‌است.

ماهیت نامتعارف گرافن

کربن عنصر بسیار فراوانی است که در همه جا یافت می‌شود و در شیمی زندگی نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. این عنصر می‌تواند در اشکال مختلفی مانند الماس، گرافیت و کربن آمورف یافت شود. اتم‌های کربن می‌توانند پیوندهایی با آرایش فضایی متنوعی را به نمایش گذارند. بنابراین، سامانه‌های بر پایه کربن می‌توانند به‌صورت ساختارهای پایدار با خواص مختلف مانند نانولوله‌های کربنی تک بعدی و گرافیت سه بعدی، وجود داشته باشند. کربن با ساختار دوبعدی گرافن نامیده می‌شود. گرافن شامل یک صفحه منفرد از اتم‌های کربن است که در یک شبکه لانه زنبوری به یکدیگر متصل شده‌اند که بلوک ساختمانی اصلی این سامانه محسوب می‌شود. گرافن می‌تواند غلطانده شود و نانولوله‌ای یک بعدی را به‌وجود آورد و یا این که در لایه‌هایی روی هم انباشته گردد و گرافیت سه بعدی را تشکیل دهد.

گرافن در اصل به‌صورت تئوری و به‌عنوان یک حالت دو بعدی از گرافیت سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۱) شبکه لانه زنبوری گرافن را که با شبکه‌ای از مثلث‌هایی براساس ۲ اتم در هر سلول واحد تشکیل شده‌است، نشان می‌دهد. هر اتم دارای چهار الکترون ظرفیتی، یک اربیتال s و سه اربیتال p است. یک اربیتال s و دو اربیتال p با یکدیگر هیبرید می‌شوند تا پیوندهای قوی کووالانسی را در یک صفحه به‌وجود آورند. اربیتال p ، خارج از صفحه در رسانایی مشارکت می‌کند.

ابتدا گرافن در آزمایش‌های مربوط به تهیه گرافیت تک لایه‌ای به روش حرارت دادن کربید سیلیسیم^۵ در خلأ فوق‌العاده بالا^۶ کشف گردید. در تحقیقات گرافن، با ابداع روش ورقه شدن مکانیکی گرافیت برای جداسازی گرافن، پیشرفت غیرمنتظره‌ای روی داد. ابداع‌کنندگان این روش، نوسلو^۷ و گییم^۸ برندگان جایزه نوبل سال ۲۰۱۰ در رشته فیزیک بودند. آنها با استفاده از یک نوار چسبناک روی سطح گرافیت، به راحتی ورقه‌های گرافن را کنده و با میکروسکوپ نوری شناسایی کردند. تجزیه گرافیت به ساختار دو بعدی پایدار، پیش‌بینی نظری مبنی بر این که بلورهای دو بعدی به لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار بوده و نمی‌توانند وجود داشته باشند را به چالش کشاند.



شکل ۱: (الف) شبکه لانه زنبوری گرافن که دو زیرشبکه مثلثی A و B را نشان می‌دهد. (ب) باندهای انرژی خطی در شبکه لانه زنبوری نزدیک به نقطه دیراک.

با استفاده از روش ورقه شدن مکانیکی، ساخت نمونه‌های گرافن برای اندازه‌گیری آسان‌تر شده و تحقیق در مورد گرافن به سرعت پیشرفت کرد. ورقه‌های گرافن روی پایه‌های دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) و الکترودهای طلا که به‌عنوان الگو به‌کار برده می‌شوند، ترسیب می‌گردند. آزمایش‌های بعدی خواص استثنایی گرافن مانند اثر کوانتومی هال در دمای اتاق، تقارن شبه ذره‌ای، تقارن و ویژگی شبه اسپینی آن را آشکار کرد.

به‌دلیل گستره وسیع ویژگی‌های مجذوب‌کننده گرافن، تحقیقات با سرعت در حال پیشرفت است. مقالات مروری زیادی در مورد گرافن منتشر شده‌است که عمدتاً بر ویژگی‌های الکترونیکی و خواص انتقالی گرافن تمرکز نموده‌اند. همچنین چندین مقاله در مورد چشم‌انداز کاربردهای گرافن از

کاربردهای الکترونیکی تا فوتونیکی بحث کرده‌است. در این مقاله مروری بیشتر بر خواص میکروسکوپی گرافن که با میکروسکوپ پروبی روبشی بررسی می‌شود، مورد بحث قرار گرفته‌است. مطالعات SPM، تصویربرداری از ابزارهای گرافنی را در فضای واقعی با مقیاس اتمی امکان‌پذیر نموده‌است. روش‌های میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی^۹ میکروسکوپ نیروی اتمی^{۱۰}، میکروسکوپ دریچه روبشی^{۱۱} و روش روبشی ترانزیستور الکترون منفرد^{۱۲} در آشکارسازی خواص بنیادی گرافن نقشی اساسی ایفا نموده‌اند.

با توجه به این که گرافن دارای شکاف باند نیست، تحقیقات بسیاری با تمرکز روی مهندسی شکاف باند گرافن و با اجرای عملیات شیمیایی روی گرافن انجام شده‌است. براین اساس، راهبرد جدیدی بر پایه استفاده از گرافن خنثی از نظر شیمیایی برای کاربردهای دستگاهی، پایه‌ریزی شده‌است که باز هم روش‌های میکروسکوپی روبشی به‌ویژه AFM و STM نقشی حیاتی را در درک سطوح پایه در این راهبرد دارند.

مروری بر روش‌های میکروسکوپی پروبی روبشی

میکروسکوپی پروبی روبشی^{۱۳} مجموعه‌ای از روش‌های ایده‌آل برای مطالعه ترکیبات با ابعاد کم (نظیر گرافن) هستند که به‌صورت مستقیم خواص الکترونیکی را در سطح بررسی می‌کنند. براساس نوع برهم‌کنش بین پروب و سطح، خواص مختلفی از سطح می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. لذا روش‌های SPM نقش عمده‌ای در پیشرفت درک ما از گرافن دارند. در بخش زیر، اصول اساسی عملکرد انواع مختلف SPM مورد استفاده در مطالعه گرافن، بحث می‌شود. انواع این روش‌ها عبارتند از:

- میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی (STM)
- میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)
- روش روبشی ترانزیستور الکترون منفرد^{۱۴}
- روش میکروسکوپی دریچه روبشی^{۱۵}

انواع گرافن

براساس روش‌های تهیه، می‌توان گرافن را به انواع مختلفی طبقه‌بندی نمود. در این بخش، این روش‌ها توضیح داده شده و در مورد فواید و اشکالات هر روش بحث می‌شود.

● روش مکانیکی ورقه کردن گرافن

- گرافن روی SiO_2
- گرافن معلق
- گرافن روی پایه‌های دیگر
- گرافن هم‌بافته روی SiC
- رسوب بخار شیمیایی روی پایه‌های فلزی

بررسی گرافن با میکروسکوپی پروبی روبشی

به‌منظور یادآوری در این مقاله مروری، نتایج روش‌های مختلف SPM در بررسی گرافن شرح داده شده‌است.

● بررسی توپوگرافی با STM

شبکه لانه زنبوری تک لایه گرافن، با اندازه‌گیری‌های STM روی انواع گسترده‌ای از نمونه‌های گرافن مشاهده شده‌است. این اندازه‌گیری‌ها در بخش‌های زیر شرح داده شده‌اند.

◀ گرافن ورقه‌ای روی پایه SiO_2

تصاویر STM گرافن ورقه‌ای روی پایه SiO_2 ، ساختار هگزاگونالی تک

نواحی متمرکزی با جابه‌جایی‌هایی به شکل پیچشی در مرکز هر ناحیه، رشد می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که این جابه‌جایی‌های پیچشی به‌عنوان مکان‌های هسته‌زایی در رشد گرافن عمل می‌کنند.

◀ پایه‌های فلزی

گرافن می‌تواند با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی روی پایه‌های فلزی نیز رشد کند. برای مطالعه گرافنی که با این روش ساخته می‌شود، دو راه وجود دارد. این نوع گرافن می‌تواند یا روی پایه‌ای که روی آن رشد پیدا کرده مطالعه شود و یا با فرآیند حکاکی شیمیایی از پایه فلزی جدا شده و بر پایه‌های دیگری مانند SiO_2 منتقل شود. در این جا برخی مطالعات انجام شده با STM بر گرافن رشد یافته روی برخی از پایه‌های فلزی شرح داده شده‌است.

تصاویر STM تهیه شده در UHV از گرافن رشد یافته روی $\text{Ir}(111)$ ، یک ساختار منسجم با تراس‌ها و لبه‌های پیش‌رونده پله در محدوده میکرون را نشان می‌دهد. این ساختار با نواحی مویر ۱۸ با زاویه‌های مختلف شناسایی می‌شود. مطالعه دیگری که بر گرافن روی $\text{Ir}(111)$ انجام شده‌است، برآمدگی‌هایی را روی سطح نشان می‌دهد که در زمان سرد شدن و به‌دلیل اختلاف زیاد انبساط حرارتی Ir و گرافن به‌وجود می‌آید.

نمونه‌ای از گرافن با انباشت اتیلن در دمای بین ۷۲۳ تا ۱۰۲۳ کلوین روی پایه $\text{Pd}(111)$ رشد داده شد. سپس این نمونه با UHV STM مورد مطالعه و شناسایی قرار گرفت. در این مطالعه مشخص شده‌است که صفحات گرافن دارای ماهیت نیمه‌رسانایی هستند. تصاویر گرافن تک لایه به ولتاژ بایاس وابسته بوده، همانند نیمه‌هادی‌ها، حالت‌های خالی و پر را به تصویر می‌کشد. اندازه‌گیری‌های dI/dV ، یک گاف نواری که به‌عنوان یک شبه فلز با گاف نواری صفر شناخته شده‌است، غیرعادی است. منشأ این گاف نواری بر اساس تغییر شکل اربیتال‌های π اتم‌های کربن در زمان برهم‌کنش با اتم‌های Pd پایه، توضیح داده می‌شود. این وضعیت به شکسته شدن متقارن دو زیرشبکه هگزاگونالی کربن منجر شده، باعث ایجاد گاف نواری می‌شود.

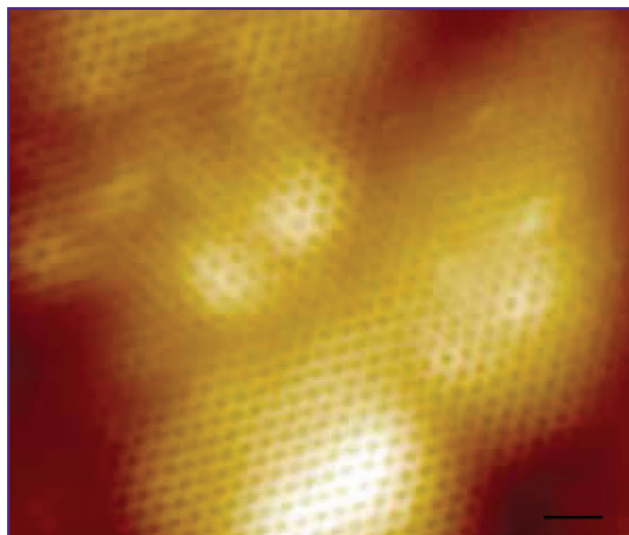
گرافن رشد یافته روی $\text{Cu}(111)$ ، توسط گائو^{۱۹} و همکارانش بررسی شده‌است. فرآیند رشد با تجزیه گرمایی اتیلن در محفظه UHV و در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. گرافن به شکل صفحاتی با چندین ناحیه مرزی روی سطح $\text{Cu}(111)$ تشکیل می‌گردد. تصاویر STM به‌دلیل عدم تطبیق شبکه‌ای بین گرافن ($2/46\text{\AA}$) و $\text{Cu}(111)$ ($2/56\text{\AA}$)، الگوهای مویر را نشان می‌دهند. برای الگوی مویر ۲ نانومتر، محققین یک زاویه جهت‌گیری نادرست 7° را مشاهده نموده‌اند. الگوی مویرهای که بیش از همه مشاهده شده‌است، یک حالت تناوبی در $6/6$ نانومتر و یک جهت‌گیری کامل شبکه گرافن با $\text{Cu}(111)$ را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که رشد گرافن به‌صورت یک تک صفحه همگن نیست. این گرافن با دانه‌ها، صفحات و نواحی مرزی شناخته می‌شود. دمای فوق‌العاده بالایی که گرافن در آن تشکیل می‌گردد، باعث حرکت پله‌های Cu و ایجاد برآمدگی‌های Cu زیر گرافن می‌شود که با استفاده از مطالعات میکروسکوپی الکترونی با انرژی پایین^{۲۰} اثبات می‌شود. این نقص‌های ساختاری مانع تحرک حامل در گرافن می‌شود. برای رفع این مانع، یو^{۲۱} و همکارانش، رشد طبق پیش الگوی دانه‌ای را مطرح کردند.

◀ پایه گرافیت

گرافن روی پایه گرافیت را در حالتی که بالاترین لایه آن از نظر الکتریکی از توده گرافیت جدا شده‌است نیز می‌توان بررسی

لایه را نشان می‌دهند. همچنین شیارهای پایه زیرین SiO_2 در تصاویر، مدرکی است که ترکیب جزیی گرافن را روی SiO_2 نشان می‌دهد. شکل (۲)، نمونه‌ای از تصاویر گرافن روی SiO_2 است که زبری سطح زیرین و همچنین ساختار هگزاگونالی را نشان می‌دهد. مشاهده شبکه هگزاگونالی، مشارکت الکترونیکی هر دو زیر شبکه اتم‌های کربن را تأیید می‌کند؛ در مقابل، همان‌طور که در تصویر گرافن دولایه‌ای مشاهده می‌شود و یا در مورد گرافیت سه بعدی که به‌صورت شبکه مثلثی به تصویر کشیده می‌شود، تنها یک زیر شبکه دارای مشارکت است، در حالی که دو صفحه روی یکدیگر انباشته شده‌اند.



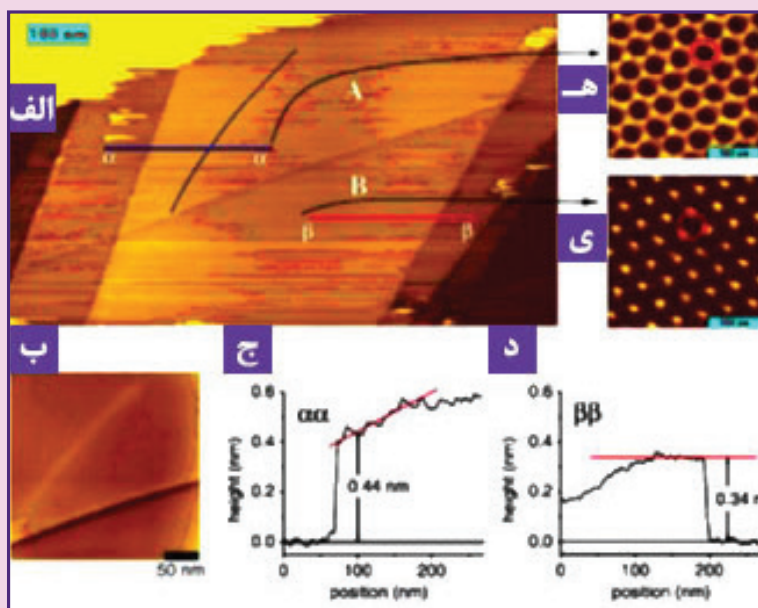
شکل ۲: تصویر توپوگرافی STM گرافن تک لایه‌ای که شبکه هگزاگونالی و همچنین شیارهای سطح زیرین را نشان می‌دهد. نوار مقیاس ۲ نانومتر است.

◀ گرافن روی پایه SiC

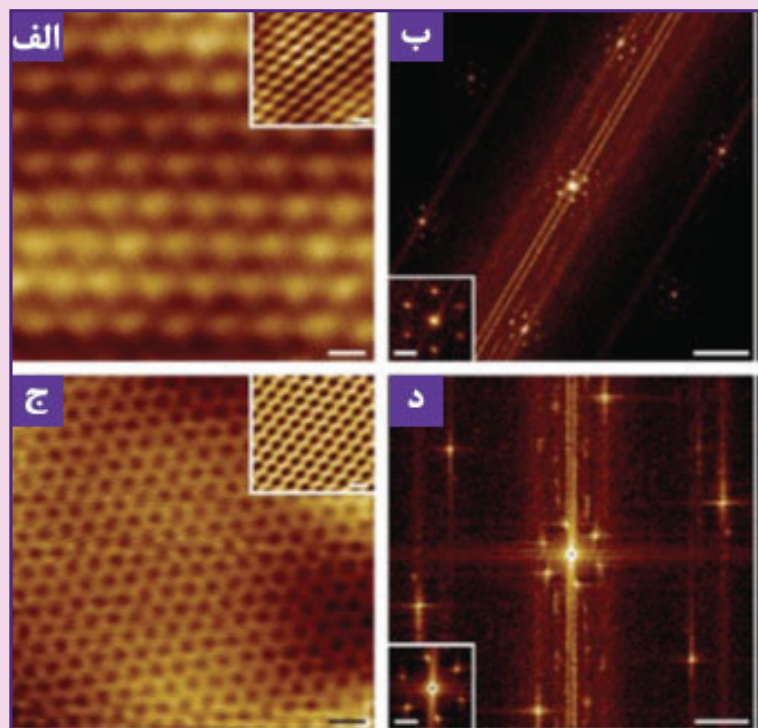
گرافن روی پایه SiC در شرایط UHV رشد می‌یابد. نخستین تصاویر STM گرافن تک لایه‌ای روی $4\text{H-SiC}(001)$ ، دو شیار در لایه میانی، شبکه مثلثی 6×6 با فواصل $1/8$ نانومتر و شبکه $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ با فواصل $0/54$ نانومتر که به سلول واحد SiC مربوط می‌شود، را نشان می‌دهد. این تصاویر همچنین رشد پیوسته شبکه گرافن را روی پایه‌های SiC نشان می‌دهد.

در بررسی دیگری با STM، سه نوع نقص حلقه‌ای، نقص پراکندگی شش برابری و نقص نانولوله کربنی، موازی با سطح مشاهده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که نقص‌ها در زیر بالاترین لایه گرافن قرار گرفته‌اند، زیرا فرآیندهایی مانند تبخیر سیلیسیم و هسته‌زایی کربن در طول فرآیند رشد گرافن روی می‌دهند.

گرافن رشد یافته روی صفحه C از SiC در کوره rf دارای کیفیت بسیار بالایی با ضخامتی در حدود ۴ تا ۵ لایه، اندازه متوسط منسجم $3000\text{\AA}$ و زبری RMS سطح $> 0/5\text{\AA}$ است. تصاویر AFM ورقه نازکی از گرافن با ۱۰ تا ۱۵ لایه روی سطح SiC ، نشان می‌دهد که تراکم در مرحله گرافیتی شدن اولیه پایه حفظ شده‌است. این تصاویر در زمان سرد شدن SiC و گرافن تهیه شده که به‌دلیل اختلاف انبساط حرارتی SiC و گرافن خطوط درخشانی روی آن مشاهده می‌شود که با نام پوکر شناخته می‌شوند. این پوکرها همچنین در وجه Si و صفحه Ni نیز دیده می‌شوند. مراحل نخست رشد گرافن روی صفحه C از پایه 6H-SiC ، با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۶} و تصویربرداری کنتراست کانال‌های الکترونی^{۱۷} بررسی و مشخص شده‌است که گرافن در



شکل ۳: (الف) توپوگرافی لایه گرافن روی سطح گرافیت، دو شیار را در طول یک قطر به سوی دو لایه بالایی و یک شیار ضعیف را زیر لایه بالایی نشان می‌دهد. (ب) تصویر از نزدیک، شیار ضعیف را نشان می‌دهد. (ج) یک برش عرضی در طول خط xx در (الف) نشان می‌دهد که جداسازی بین لایه بالایی و لایه دوم نزدیک به شیار ضعیف از مقدار تعادلی (۰/۳۴ nm) بزرگتر است. (د) برش عرضی در طول خط dd نشان می‌دهد که ارتفاع پله اتمی دور از شیار با گرافیت دو لایه‌ای توده شده برنال قابل مقایسه است. (ه) شبکه لانه زنبوری در ناحیه A. (ی) شبکه مثلثی در ناحیه B.



شکل ۴: (الف) و (ج) تصاویر توپوگرافی STM الگوهای مویره که با گرافن روی h-BN ایجاد شده‌است. نوار مقیاس ۲ نانومتر است. تصویر الحاقی دارای بزرگنمایی در محدوده ۲ nm بوده و نوار مقیاس آن ۰/۳ nm است. (ب) و (د) به ترتیب تصاویر تبدیل فوریه برای (الف) و (ج) است که نشان‌دهنده شبکه اتمی و همچنین الگوهای مویره است. نوار مقیاس در آن 10 nm^{-1} است. تصویر الحاقی با بزرگنمایی الگوی مویره بوده و نوار مقیاس آن 4 nm^{-1} است.

نمود. این نوع از گرافن نخستین بار توسط لی^{۲۲} و همکارانش مطالعه شد. این نوع جداسازی سطحی از توده در HPOG مشاهده می‌شود ولی در گرافیت کیش موجود نیست (گرافیت کیش^{۲۳} از آهن مذاب اشباع شده از کربن ساخته می‌شود که تک بلور است و HOPG از فرآیند پیرولیتیک گرافیت ساخته می‌شود که چند بلوری است).

مطالعه دیگری بر نمونه‌های مشابه گرافن انجام شده‌است؛ تصاویر STM به‌دست آمده، پوسته‌های گرافنی جدا شده را نشان می‌دهد که یک شبکه هگزاگونالی روی بالاترین لایه و یک شبکه مثلثی در زیر بالاترین لایه به‌وجود آورده‌اند. در شکل (۳) مشاهده می‌شود که لایه‌ها با شیارهای طولانی روی سطح گرافیت جدا شده‌اند.

◀ گرافن روی h-BN

همان‌طور که در تصویربرداری با AFM و STM نشان داده شده‌است، گرافن روی پایه‌های h-BN مقایسه با SiO_2 کاهش چشمگیری را در زبری نشان می‌دهد. شکل (۴-الف) و (۴-ج) تصاویر STM الگوهای مویره را نشان می‌دهند که نتیجه جهت‌گیری نسبی شبکه‌های گرافن و h-BN هستند. تبدیل فوریه در تصاویر STM (شکل‌های ۴-ب و ۴-د) الگوهای مویره را در نزدیکی مرکز تصویر و اطراف هر نقطه شبکه‌ای، نشان می‌دهد.

● توپوگرافی با AFM

AFM یک وسیله سودمند در مطالعات مربوط به گرافن است. این روش نخستین روش میکروسکوپی است که برای تصویربرداری از پوسته‌های گرافن ورقه‌ای استفاده شد و تغییر ضخامت ورقه‌های گرافن که با میکروسکوپ نوری روی لایه‌های مجزای گرافن مشاهده شده بود را تأیید می‌کند.

تصویربرداری AFM در حالت غیرتماسی (NC-AFM) در UHV توسط ایشیگامی^{۲۴} و همکارانش، نشان می‌دهد که گرافن تقریباً ۶۰ درصد از سطح اکسیدی صاف‌تر است. شیارهای گرافن به‌دلیل تشکیل جزئی آن در پایه SiO_2 است و به‌دلیل حالت موجی ذاتی گرافن نیست.

در بررسی دیگری از AFM و STM که توسط گرینجر^{۲۵} و همکارانش انجام شد، شیارهای تصویر STM گرافن با شیارهای تصویر AFM برای SiO_2 مقایسه شدند. آنها مشاهده نمودند که شیارهای SiO_2 در تصویر AFM نسبت به شیارهای گرافنی که ادعا شده در تک لایه‌های گرافنی آن هیچ شیار به‌وسیله پایه به‌وجود نیامده است، از نظر ارتفاع پایین‌تر بوده و دارای مقیاس طولی بزرگ‌تری است. این شیارها دارای طول موجی در حدود ۱۵ نانومتر و زبری (rms) ۰/۳۲ نانومتر هستند. مطالعات آنها نشان داد که گرافن دقیقاً از شیارهای پایه پیروی نمی‌کند. خصلت ذاتی موج‌دار بودن گرافن معلق در SiO_2 نیز همچنان باقی می‌ماند. متقابلاً این مطالعات متضاد با اندازه‌گیری‌های UHV با توان تفکیک بالا و با

سطح، دارای انحنای بیش از 1nm^{-1} است. آنها دریافتند که حالت موجی ذاتی گرافن روی SiO_2 به دلیل ملاحظات مربوط به انرژی، مجاز نیست. به علاوه، یک چسبندگی قوی هماهنگ از گرافن به پایه SiO_2 با صحت ۹۹ درصد وجود دارد که کوچکترین شکلها را نیز در برمیگیرد. خصلت ذاتی موجدار بودن گرافن حتی با وجود این نظریه که انرژی لازم برای غلبه بر انرژی انحنا و چسبندگی گرافن مانع موجدار شدن گرافن می شود، همچنان وجود دارد.

گرافن نشانده شده روی پایه میکا نیز با استفاده از روش تصویربرداری NC-AFM، با جزئیات، مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویر AFM نشان می دهند که پایه میکا از SiO_2 بسیار هموارتر است. میکا دارای انحراف استاندارد $34/3\text{ pm}$ است، در حالی که SiO_2 دارای انحراف استاندارد 168 pm است. در حالی که انحراف استاندارد ارتفاع برای هر پایه با گرافن اندکی کاهش می یابد، این همواری هنگامی که گرافن روی این پایه ها نشانده می شود نیز باقی می ماند. شکل (۶)، هیستوگرام سطوح مختلف را رسم نموده است. هیستوگرام ها به وضوح نشان می دهند که گرافن روی میکا فوق العاده صاف و هموار است. در اینجا نکته کلیدی، انتخاب یک پایه هموار مناسب است که می تواند با برهم کنش های واندروالس میان لایه ای، حالت موج گرافن را متوقف کند.

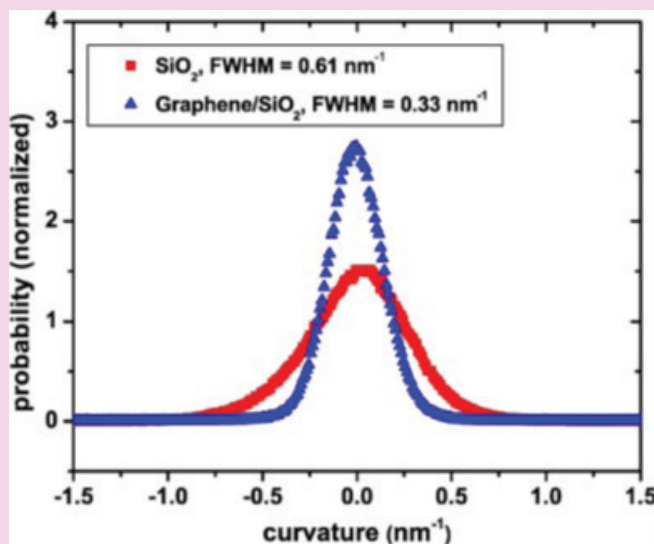
AFM برای رسم نقشه اصطکاک گرافن تک لایه ای ورقه ای نیز به کار برده شده است. تصاویر میکروسکوپی نیروی اصطکاک گرافن ورقه ای در شرایط محیطی و همچنین در خلأ بسیار بالا با استفاده از حالت تماسی AFM تهیه شده است. برای بررسی آنیزوتروپی اصطکاک، نمونه از 0° تا 184° چرخانده می شود. تصویر (۷)، نواحی میکرونی با ویژگی های اصطکاکی مختلف را نشان می دهد. آنیزوتروپی اصطکاک نیز به علت جهت گیری های متفاوت ساختارهای موجی در هر ناحیه است. موج ها یا در طول فرآیند ورقه ای شدن و یا به دلیل تنش های مکانی که در پوسته گرافن تغییر شکل ایجاد می کنند، به وجود می آیند.

سطوح $\text{SiC}(0001)$ که به صورت جزئی گرافیتی شده اند، با استفاده از روش های مختلف میکروسکوپی پروبی روبشی مانند STM، AFM، نیروی جانبی^{۲۸} و میکروسکوپ نیروی اتمی هدایتی^{۲۹} تصویربرداری شده اند. مشخص شده است که روش CAFM، روش بسیار سودمندی است زیرا در طول تصویربرداری در حالت تماسی، امکان کنترل و مشاهده جریان الکتریکی را از طریق سوزن AFM فراهم می آورد. تفاوت مشاهده شده در تصویر CAFM در مقایسه با گرافن همبافته، به افزایش مقاومت تماسی سوزن - نمونه در نواحی $3/6$ بستگی دارد. بنابراین، این یک روش سودمند برای تهیه نقشه فضایی نواحی گرافن همبافته است. شکل (۸)، تصاویر توپوگرافی و CAFM همان نواحی را در سطح $\text{SiC}(0001)$ رسم کرده و مناطقی از سطح را با خواص الکتریکی متفاوت نشان می دهد.

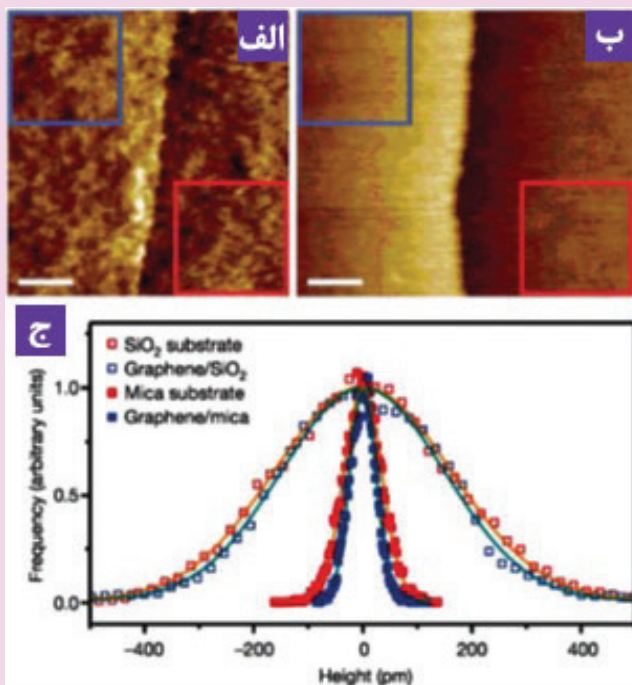
● طیف سنجی، تعیین نقطه دیراک

محاسبه های اتصال های سخت، گرافن را به صورت یک نیمه هادی با شکاف باند صفر پیش بینی می کند. با استفاده از STM، اندازه گیری های dI/dV طیف سنجی تونل زنی روبشی^{۳۰} می تواند اطلاعاتی را درباره چگالی ترازها فراهم کند. نقطه حداقل در چگالی ترازها، نقطه دیراک، در نقطه $K(K')$ در ساختار باند گرافن روی می دهد. تونل زنی الکترون ها از سوزن STM، معمولاً دارای $K=0$ است، بنابراین نمی تواند با الکترون ها در نقطه دیراک جفت شود. به

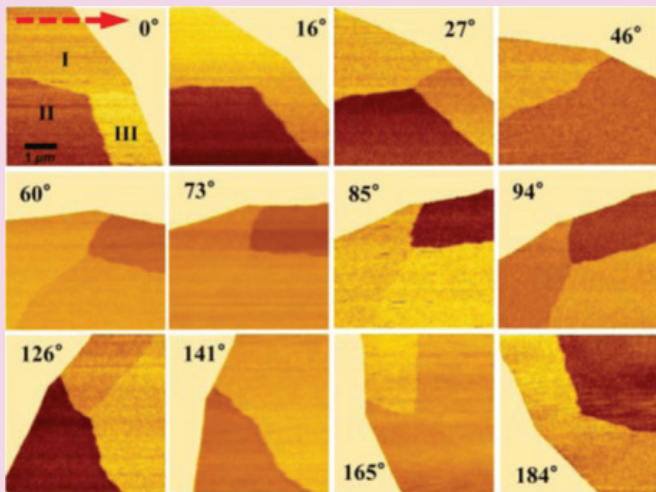
استفاده از NC-AFM و STM توسط کال^{۲۵} و همکارانش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. زبری (rms) برای SiO_2 ، $0/37$ نانومتر و برای گرافن $0/35$ نانومتر گزارش شده است. این موضوع نشان می دهد که گرافن اندکی از SiO_2 هموارتر است. شکل (۵)، هیستوگرام انحنای سطحی به دست آمده از تصویربرداری NC-AFM با توان تفکیک بالا برای SiO_2 را رسم کرده و نشان می دهد که کمتر از $0/1$ درصد



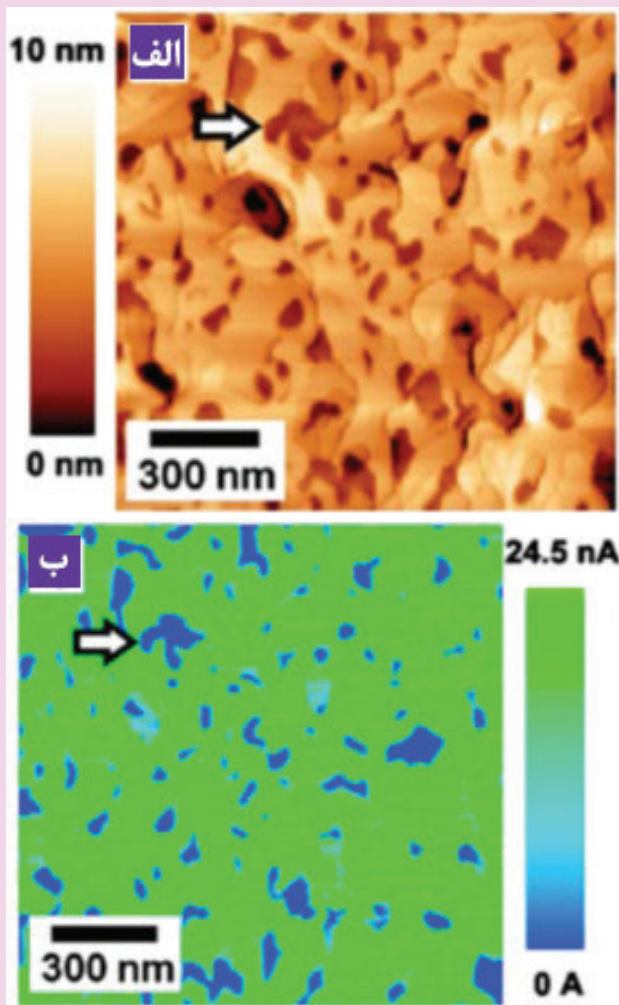
شکل ۵: هیستوگرام انحنایی که نسبت به واحد سطح نرمال سازی شده است، برای گرافن (توزیع باریک) و برای SiO_2 (توزیع پهن تر).



شکل ۶: (الف) تصویر AFM مرز میان گرافن تک لایه ای (سمت چپ) و پایه SiO_2 (سمت راست). نوار مقیاس 100nm است. (ب) تصویر AFM مرز میان گرافن تک لایه ای (سمت چپ) و پایه میکا (سمت راست). (ج) هیستوگرام ارتفاع که با لیگاند تعیین شده است. داده ها با استفاده از توزیع گوسین (خط توپر) با انحراف استاندارد σ برای گرافن روی پایه میکا برابر $24/1\text{ pm}$ ، برای میکا برابر $34/3\text{ pm}$ ، گرافن روی SiO_2 برابر با 154 pm و برای SiO_2 توصیف شده است.



شکل ۷: تصاویر نیروی اصطکاک هنگامی که نمونه گرافن ورقه‌ای در جهت عقربه‌های ساعت از 0° تا 184° نسبت به جهت افقی روبش چرخانده می‌شود (پیکان قرمز خط چین). سه ناحیه اصطکاکی I، II و III مشخص شده‌اند. تفاوت اصطکاک با اختلاف رنگ‌ها نشان داده شده‌است. نواحی روشن‌تر به اصطکاک بیشتر مربوط است.



شکل ۸: (الف) توپوگرافی حالت تماسی AFM سطح SiC(0001) که به صورت جزئی گرافیتی شده‌است. مقیاس رنگ، تغییرات ارتفاع در تصویر را نشان می‌دهد. (ب) تصویر AFM هدایتی همان ناحیه در ولتاژ بایاس $+0.37$ و مقیاس رنگ، جریان را نشان می‌دهد.

هر حال، در فرآیند تونل‌زنی، الکترون‌ها می‌توانند با کمک فنون‌ها از سوزن STM به سوی نقطه دیراک تونل بزنند. ژانگ ^{۳۱} و همکارانش انرژی نقطه دیراک را به صورت تابع ولتاژ گیت که چگالی حامل را تغییر می‌دهد، اندازه‌گیری نموده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رود، حداقل هدایت VD به دلیل ولتاژ گیت جابه‌جا می‌شود. در آنجا همچنین یک شکاف 130 mV وجود دارد که همانند طرح‌هایی که اطراف انرژی فرمی E_f متمرکز می‌شوند، با ولتاژ گیت یا موقعیت نمونه تغییر نمی‌کند. این شکل‌ها به فنون‌های بلوک شده منسوب هستند. حالت فنون 6 eV خارج از صفحه اکوستیک گرافن، احتمال الکترون‌های با انرژی بالاتر از 6 meV را در تونل گرافن افزایش می‌دهد که باعث افزایش dI/dV خارج از این محدوده انرژی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، هنگامی که به دلیل ایجاد یک کانال میانی انعطاف‌ناپذیر، افزایش فوق‌العاده زیادی در هدایت تونل روی می‌دهد، الکترون‌ها از این انرژی آستانه پیش می‌افتند. اندازه‌گیری‌های دیگر STS با تجزیه و تحلیل اتمی توسط دشنند ^{۳۲} و همکارانش روی نمونه‌های ورقه‌ای انجام شده‌است. استفاده از UHV STM در $4/5\text{ K}$ ، چگالی خطی ترازاها را در انرژی‌های پایین نشان داده و هیچ مانعی را در طیف dI/dV نشان نمی‌دهند. این امر احتمالاً به دلیل اختلاف در حالت انتهای سوزن و توانایی جفت شدن الکترون‌ها بدون فنون در نقطه دیراک است.

● الکترون - حفره‌های کوچک

در نقطه دیراک، جایی که باندهای هدایت و ظرفیت با یکدیگر برخورد می‌کنند، چگالی حامل‌های بار صفر است. به هر حال، اندازه‌گیری انتقالات نشان می‌دهد که رسانایی گرافن در نقطه دیراک محدود است. مشخص شده‌است که این رسانایی کم، ناشی از ناهمگن بودن الکترونی نمونه است. محاسبات تئوری، پیش‌بینی می‌کند که شکسته شدن سیستم حامل دویعدی به شبکه ناهمگنی از الکترون و حفره‌های کوچک، دلیل این رسانایی کم است. برای درک روشن این ناهمگنی بار، لازم است نقشه فضایی این حفره‌های کوچک ترسیم شود.

◀ اندازه‌گیری‌های SET

نخستین گزارش عملی برای آشکار کردن الکترون و حفره‌های کوچک، روش روبشی ترانزیستور الکترون منفرد (SET) است که نوسانات را در نقطه دیراک ترسیم می‌کند. این تصاویر دویعدی، الکترون و حفره‌های کوچک را در مقیاس طولی 150 نانومتر نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های SET برخلاف روش SEM که می‌تواند چگالی ترازهای ذرات منفرد را بررسی کند، می‌تواند چگالی بسیاری از ترازاها را مورد بررسی قرار دهد. اندازه‌گیری‌های SET، منشأ این حفره‌ها را بی‌نظمی می‌داند که در اثر پس‌ماندهای برجای مانده در طول فرآیند ساخت و اصلاح ساختار گرافن از پایه حاصل شده‌است.

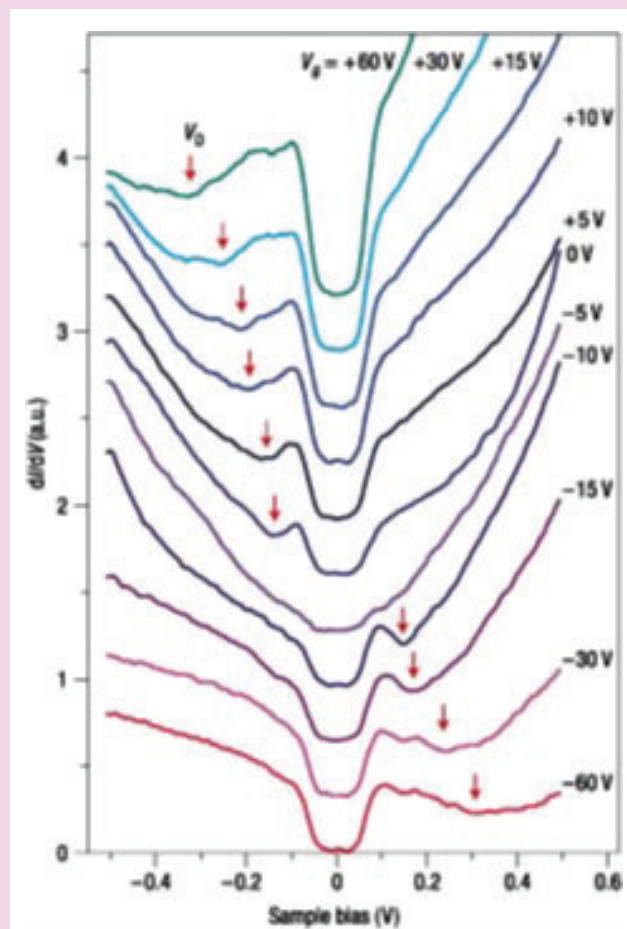
◀ اندازه‌گیری‌های STM روی SiO_2

فاصله بین پروب و نمونه که معمولاً در حد 100 نانومتر است، باعث می‌شود که تجزیه و تحلیل اندازه‌گیری‌های SET محدود شود. برای دستیابی به توان تفکیک فضایی بالاتر، روش طیف‌سنجی تونل‌زنی روبشی با تفکیک فضایی برای بررسی الکترون و حفره‌های کوچک به کار گرفته می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از STM در شرایط اجرایی $4/5\text{ K}$ روی گرافن ورقه‌ای بر پایه SiO_2 انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده‌است، نواحی بزرگی از گرافن تصویربرداری شده‌اند و نقشه چگالی موضعی

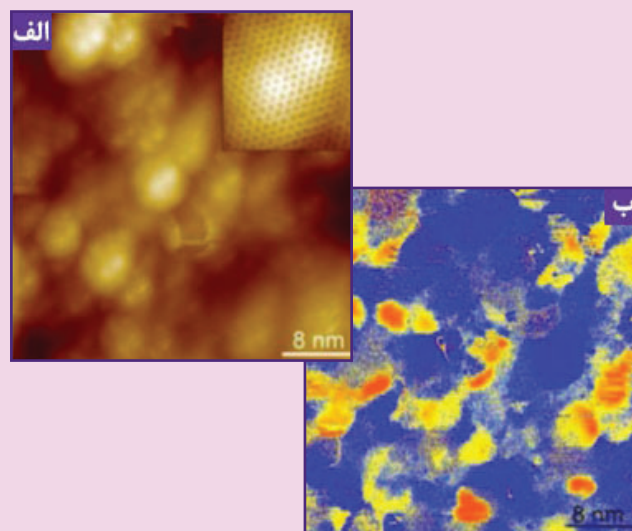
ترازها^{۳۳} نیز ثبت شده است. این امر با اجرای طیف سنجی dI/dV در هر نقطه از تصویر توپوگرافی گرافن قابل دستیابی است. تغییرات موضعی dI/dV به صورت نقشه های LDOS رسم می شوند. این تغییرات به دلیل انحراف از نقطه دیراک است. ایجاد کننده های پراش دور برد به شکل ناخالصی های باردار تصادفی، باعث به وجود آمدن پراش و انحراف از نقطه دیراک می شود. این امر همان طور که در نقشه های LDOS شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است، باعث به وجود آمدن الکترون و حفره های کوچک در گرافن می شود. نواحی قرمز، مناطقی هستند که نقطه دیراک به سمت ولتاژ مثبت نمونه جابه جا شده و از این رو، این نواحی حفره - آلاینده هستند. نواحی آبی با جابه جایی نقطه دیراک به ولتاژ منفی نمونه، الکترون - آلاینده هستند. ژانگ و همکارانش همچنین با استفاده از STM، منشأ ناهمگنی فضایی بارها را در گرافن بررسی نموده اند. آنها جابه جایی نقطه دیراک را رسم نموده و آن را به ناخالصی های تصادفی باردار در گرافن نسبت داده اند. یکی از ویژگی های جالب مطالعه ایشان، مشاهده پراش بازگشتی است. پراش بازگشتی در گرافن تک لایه ای، به دلیل تقارن باند انرژی تحت بازتاب آینه ای ممنوع است (ولی در گرافن دو لایه ای مجاز است). اندازه گیری گرافن روی پایه SiC، پراش بازگشتی را گزارش نمی کند. ژانگ و همکارانش، دلیل مشاهده های خود را نتیجه زوال سریع تر نوسانات فرایدل^{۳۴} چگالی الکترون در گرافن و امکان برخی فرآیندهای شکستگی متقارن توضیح داده اند. اندازه گیری های STM همراه با تجزیه و تحلیل فضایی، همچنین می تواند در بررسی اثر امواج روی الکترون و حفره مورد استفاده قرار گیرد. محاسبات تئوری نشان می دهد که حالت موج دار بودن در گرافن موجب تغییر پتانسیل الکتروشمیایی شده و باعث می شود که گرافن در نواحی الکترون - آلاینده به شدت خمیده شده و در نواحی حفره - آلاینده مسطح گردد. با استفاده از تصاویر توپوگرافی STM، خمیدگی های گرافن اندازه گیری شده و جابه جایی های پتانسیل الکتروشمیایی مورد انتظار محاسبه شدند. با مقایسه نقشه فضایی این جابه جایی با نقشه dI/dV که مستقیماً با STM ثبت شده است، مشاهده می شود که همبستگی بین خمیدگی و چگالی موضعی ترازها وجود ندارد. این مقایسه آشکار می کند که در نمونه های موجود، موج های گرافن منبع اصلی ناهمگنی بار نیستند. این امر مدارک بیشتری را برای این ایده فراهم می کند که پراش دور برد ناشی از ناخالصی های تصادفی باردار نقش مهمی را در ایجاد الکترون و حفره بازی می کند. با استفاده از طیف سنجی انسداد کلومی^{۳۵}، نوسانات پتانسیل محلی را می توان با توان تفکیک فضایی بیشتری ترسیم نمود. با استفاده از یک نانوذره طلا در نوک سوزن STM، یک حسگر بار ایجاد می شود که می توان سطح نمونه را با آن روبش کرد. با دو مانع تونلی، سوزن به نانوذره و نانوذره به گرافن، می توان در نواحی مختلف گرافن به پدیده انسداد کلومی دست یافت. پیک های CB ثبت شده در طیف سنجی dI/dV ، به ویژه به علت نوسانات پتانسیل در گرافن منحرف می شوند. همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، این پیک ها در نقشه dI/dV به صورت حلقه هایی که با تغییر ولتاژ سوزن تغییر می کنند، نشان داده می شوند. ویژگی برجسته این مطالعه، توان تفکیک بی سابقه (تقریباً ۱ نانومتر) در نقشه های پتانسیل منطقه ای است که یک پیشرفت بسیار بزرگ در گزارش های اخیر ۱۵۰ نانومتر از اندازه گیری های SET است.

اندازه گیری های STM روی h-BN

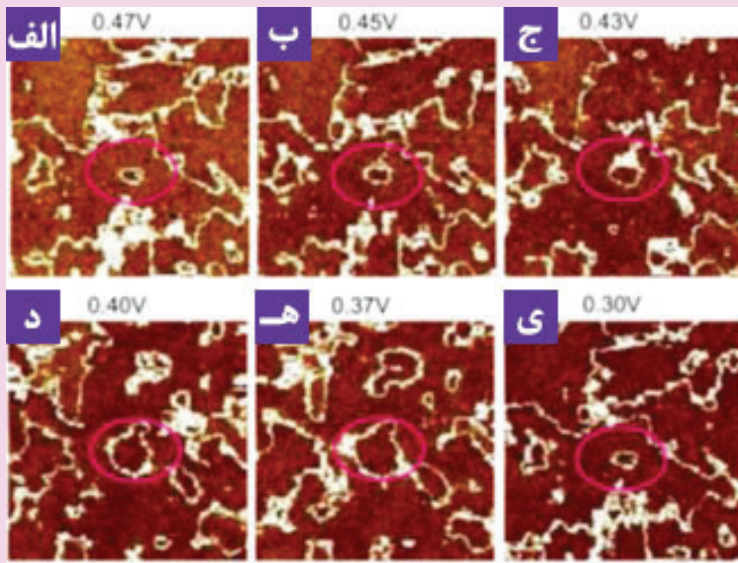
مسئله بی نظمی در نمونه های گرافن به دلیل ناخالصی های



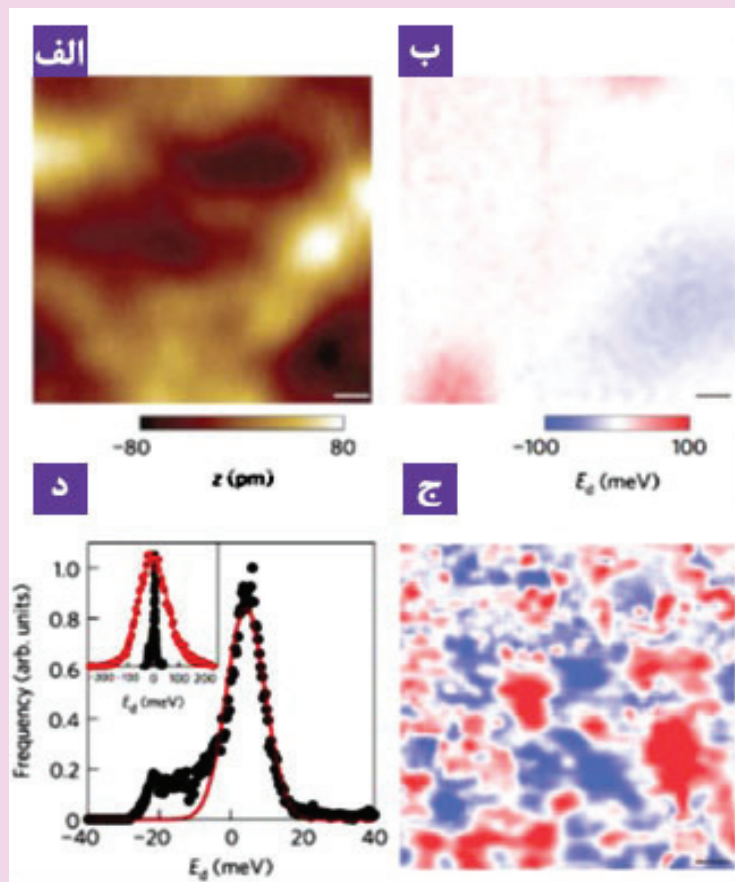
شکل ۹: وابستگی ولتاژ گیت به طیف dI/dV در گرافن. برای وضوح، منحنی ها به صورت عمودی جابه جا شده اند. به شکاف سازگار با شبه شکل ها در E_F که در همه ولتاژهای گیت مشاهده می شوند، توجه کنید. پیکان های قرمز، موقعیت حداقل هدایت V_D را مشخص می کنند که با ولتاژ گیت تغییر می کند.



شکل ۱۰: (الف) تصویر توپوگرافی STM با مساحت $4 \times 4 \text{ nm}^2$ تصویر الحاقی، تصویر از نمای نزدیک شبکه هگزagonalی است که در همه جای تصویر دیده می شود. (ب) نقشه پراکندگی dI/dV در ولتاژ نمونه ۰/۴V، الکترون ها و حفره ها را نشان می دهد.



شکل ۱۱: نقشه چگالی موضعی ترازها تهیه شده در مجموعه‌ای از ولتاژهای سوزن که برای هر نقشه نشان داده شده‌است. هر نقشه $100\text{nm} \times 100\text{nm}$ است. حلقه درون دایره، نشان می‌دهد که این حلقه چگونه با انرژی تغییر می‌کند. این حلقه‌ها با شکل دایره شروع می‌شوند (الف و ب) و به تدریج نامتقارن می‌شوند (ج و ه). سپس حلقه دوم (ی) هنگامی که بار نانوذره تغییر می‌کند، در همان ناحیه تشکیل می‌شوند.



شکل ۱۲: (الف) تصویر STM گرافن روی h-BN. (ب) ولتاژ سوزن در نقطه دایراک براساس تابع مکان برای گرافن روی h-BN. (ج) ولتاژ سوزن در نقطه دایراک براساس تابع مکان برای گرافن روی SiO_2 . نوار مقیاس برای همه تصاویر 10nm است. (د) هیستوگرام انرژی‌های نقطه دایراک از (ب) و (ج) و برازش گوسین^{۳۸}. تصویر الحاقی همان داده‌ها را در مقایسه با هیستوگرام SiO_2 که با رنگ قرمز نشان داده شده‌است، نمایش می‌دهد.

تصادفی است که قدرت تحرک حامل و توانایی رسیدن به نقطه دایراک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر می‌تواند کارایی ابزارهای گرافنی را دچار اختلال کند. یک راهبرد برای حل این مسئله، قرار دادن گرافن روی نیتريد بور هگزاگونال (h-BN) است. محاسبات تئوری پیشین، باز شدن یک گاف نواری 50meV را پیش‌بینی می‌کند که به دلیل شکستگی متقارن زیرشبکه است. اندازه‌گیری انتقالات الکترونی، یک پیشرفت چشمگیر در قدرت تحرک بدون گاف نواری^{۳۶} را نشان می‌دهد. ژو^{۳۷} و همکارانش، گرافن روی h-BN را با استفاده از طیف‌سنجی و میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی بررسی کردند. آنها الگوهای مویره را مشاهده نمودند که هماهنگی گرافن با h-BN را تأیید می‌کرد. آنها همچنین گاف نواری پیش‌بینی شده‌ای را که دلیل آن عدم تطابق گرافن و h-BN توضیح داده شده و تقارن زیرشبکه را حفظ می‌کند، مشاهده نکردند. با اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی منطقه‌ای مشخص شد که نوسانات بار الکترون - حفره در مقایسه با SiO_2 دو برابر کاهش می‌یابد. شکل (۱۲)، نوسانات پتانسیل را برای گرافن روی h-BN و SiO_2 رسم نموده و بهبود وضعیت را به‌هنگام استفاده از h-BN به‌عنوان پایه، نشان می‌دهد. بنابراین، کیفیت گرافن روی h-BN همانند کیفیت گرافن معلق است، از این رو آزمایش‌های متنوعی را برای بررسی فیزیکی نقطه دایراک امکان‌پذیر نموده است.

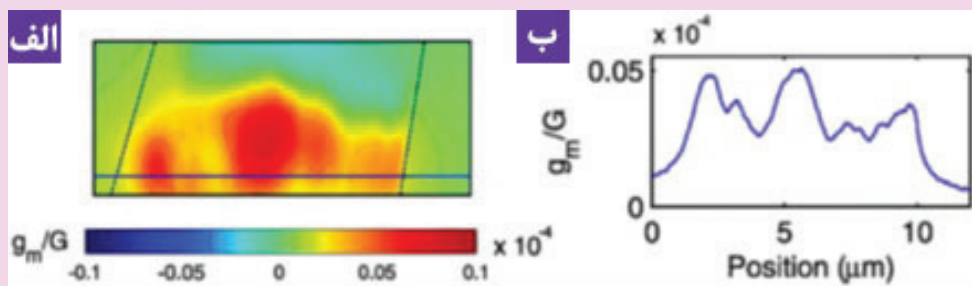
◀ اندازه‌گیری‌های SGM

روش میکروسکوپی روبشی گیت نیز یک روش قدرتمند در تهیه نقشه ناهمگنی بار موضعی در گرافن است. اندازه‌گیری‌های SGM روی ورقه گرافن پس از آنیل کردن آن در چگالی پایین جریان، انجام می‌شود. بار موضعی در نقطه خنثی ترسیم شده و ورقه گرافنی در رسانایی متقابل موضعی g_m

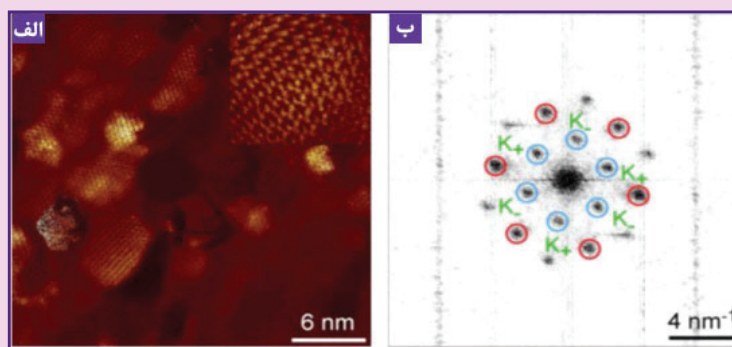
$$(g_m = \partial I_{DS} / \partial V_T \text{ به صورت})$$

که نسبت به رسانایی توده $G(V_{BG})$ نرمال‌سازی شده‌است، ناهمگنی بار را در اندازه میکرونی نشان می‌دهد. شکل (۱۳)، وابستگی فضایی g_m را در طول ورقه گرافن نشان می‌دهد. عمل آنیل کردن در جریانی با چگالی بالاتر سبب می‌شود که در بالاترین رده ناهمگنی قرار گیرد. محققین منشأ این وضعیت را حرارت دیدن نقاط داغ مقاومتی در لایه میانی گرافن - فلز یا مهاجرت الکترونی از محل‌های تماس دانسته‌اند. همچنین SGM برای بررسی ترازهای موضعی، نوسانات رسانایی عمومی، موضع‌یابی ضعیف و تماس‌های نقاط کوانتومی در ابزارهای گرافنی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

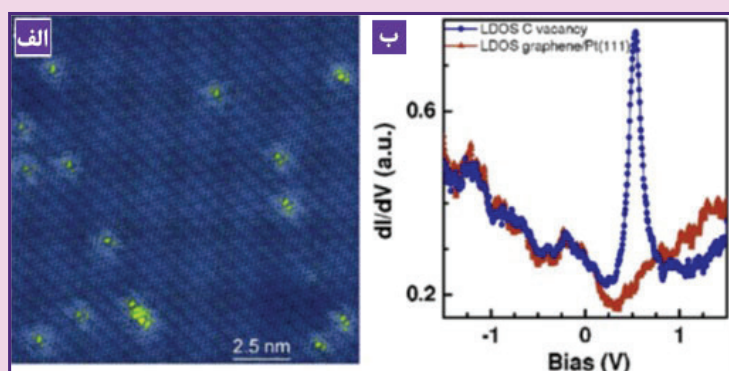
مطالعات SGM در حالت تماسی با استفاده از یک نانوسیم فلزی پوشش داده شده با عایق به‌عنوان گیت روبش، روی ترانزیستورهای گرافنی اثر میدان^{۳۹} انجام شده‌است. نواحی الکترون - آلاییده و حفره - آلاییده با SGM تصویربرداری شده‌اند. مشخص شده‌است که آلایندهای خارجی از محل‌های تماس، نقص‌ها و پس‌ماندهای مقاوم در نوسانات فضایی چگالی حامل شرکت می‌کنند.



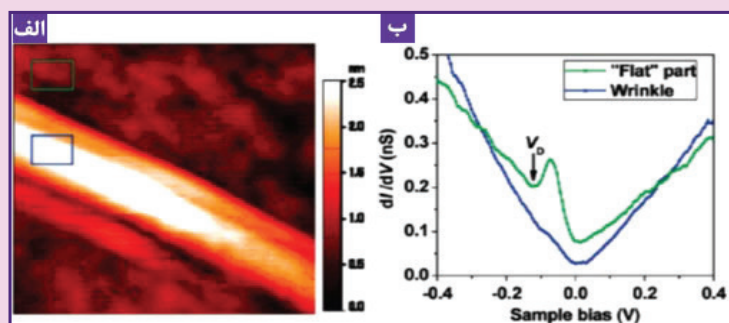
شکل ۱۳: (الف) تصویر SGM گرافن که نوسانات رسانایی را در $VBG=3V$ ترسیم می‌کند. (ب) برش عرضی g_m در طول خطی در (الف).



شکل ۱۴: (الف) پراش - نقشه dI/dV در ناحیه $230 \times 30 \text{ nm}^2$. تصویر الحاقی، تصویر از نمای نزدیک است که الگوهای تداخلی که در اثر پراکندگی ناشی از نقص‌ها به وجود آمده‌اند را نشان می‌دهد. (ب) تبدیل فوریه (الف). هگزگونال داخلی (دایره‌های آبی) الگوهای تداخلی ناشی از پراش را نشان می‌دهد. هگزگونال بیرونی (دایره‌های قرمز) به خاطر شبکه متقابل است.



شکل ۱۵: (الف) تصویر STM گرافن روی پایه Pt(111) بعد از بمباران Ar^+ . نواحی درخشان نقص‌هایی هستند که به علت Ar^+ ایجاد شده‌اند. (ب) پیک در dI/dV در ۵۰۰ mV، این حالت فقط در نقص‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶: (الف) تصویر STM گرافن که چین‌خوردگی را نشان می‌دهد. اندازه تصویر $50 \times 50 \text{ nm}$ است. (ب) متوسط طیف dI/dV است که در مستطیل‌ها در قسمت (الف) نشان داده شده‌است، منحنی آبی به متوسط منحنی‌ها در مستطیل آبی در بالای چین‌خوردگی مربوط است، منحنی سبز به متوسط منحنی‌ها در مستطیل سبز روی گرافن نزدیک به چین‌خوردگی مربوط می‌شود.

● پراش و نقص‌ها

هر گونه اختلال الکترونیکی یا ساختاری در شبکه لانه زنبوری گرافن با عنوان نقص بیان می‌شود. نقص‌ها در گرافن می‌توانند در طول فرآیند رشد و یا فرآوری گرافن به وجود آیند. بسته به دامنه نقص‌ها، نقص‌های موضعی یا نقص‌های گسترده، ویژگی‌های الکترونیکی، نوری و انتقالی گرافن تغییر می‌کند.

تصاویر STM گرافن ورقه‌ای روی SiO_2 ، نقص‌های نقطه‌ای را نشان می‌دهد. این نقص‌ها، همان‌طور که در شکل (۱۴-الف) مشاهده می‌شود، باعث پراکندگی کوتاه برد می‌شوند. نقشه‌های dI/dV ثبت شده در E_f ، با توجه به پراکندگی الکترون‌های ناشی از نقص‌های کوتاه برد، الگوهای تداخلی را نشان می‌دهند. شکل (۱۴-ب) تبدیل فوریه این نقشه را ترسیم کرده و الگوی تداخلی $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R 30^\circ$ را نشان می‌دهد. شش پیک در نقاط $\pm K$ نتیجه پدیده‌های پراش کوتاه برد است.

همچنین می‌توان نقص‌ها را به صورت عمدی وارد شبکه گرافن کرد تا در ساختار آن اختلال ایجاد کرده و اثر آن را در اختلال بررسی نمود. برای چنین موردی، گرافن رشد یافته روی Pt(111) که به منظور ایجاد نقص در معرض تابش یون‌های Ar^+ قرار گرفته است، با STM در UHV در ۶K مطالعه شد. شکل (۱۵-الف) توپوگرافی سطح را بعد از تابش نشان می‌دهد. یون‌ها به صورت برآمدگی‌های کشیده شده‌ای که بیش از ثابت‌های دو شبکه گسترش یافته و با ناحیه درخشان ۱ nm احاطه گردیده‌اند، مشاهده می‌شوند. نقاط طیفی dI/dV در شکل (۱۵-ب) ترسیم شده و یک رزونانس وسیع الکترونیکی که در ۵۰۰ meV متمرکز شده و به پیوندهای π غیرمستقر اتم‌های زیرشبکه نزدیک به محل ایجاد نقص نسبت داده می‌شود، قابل مشاهده است.

این نوع شیارها در گرافن ورقه‌ای روی SiO_2 با عنوان چین‌خوردگی 4° شناخته شده و در مطالعات STM گزارش شده‌اند. این شیارها دارای عرضی در حدود ۱۰ nm و ارتفاع ۳ nm هستند که به جای شبکه معمول هگزگونالی به صورت شبکه مثلثی شناسایی شده‌اند. شکل (۱۶-الف) تصویر توپوگرافی STM است که یکی از این چین‌خوردگی‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۱۶-ب) طیف dI/dV اندازه‌گیری شده در بالای این چین‌خوردگی را نمایش می‌دهد که رسانایی آن از طیف dI/dV روی گرافن کمتر است و ناحیه‌ای با رسانایی پایین را نمایان می‌سازد. این امر احتمالاً به دلیل اختلال ساختاری آشکاری است که پیوندهای π را غیرمستقر می‌سازد. نقطه دیراک را می‌توان با شیب dI/dV که در گرافن مشاهده می‌شود، شناسایی کرد که البته

در میدان مغناطیسی $T\delta$ ترسیم شده، نشان داده شده است. در این جا، پیک LL_0 در 7 meV و شکاف‌های بین LL_0 ، LL_1 ، LL_2 رفتار فرمیون بدون جرم دیراک را تأیید می‌کند. این امر همچنین نشان می‌دهد که بالاترین لایه گرافن به‌طور مؤثری از لایه‌های دیگر و نیز از لایه زیرین پایه SiC جدا شده است.

علاوه بر گرافن ورقه‌ای با پایه SiO_2 و گرافن هم‌بافته با پایه SiC، گرافن می‌تواند روی پایه گرافیت نیز مطالعه شود. این نوع از گرافن نخستین بار توسط لی^{۴۵} و همکارانش بررسی شد. آنها رفتار فرمیون‌های

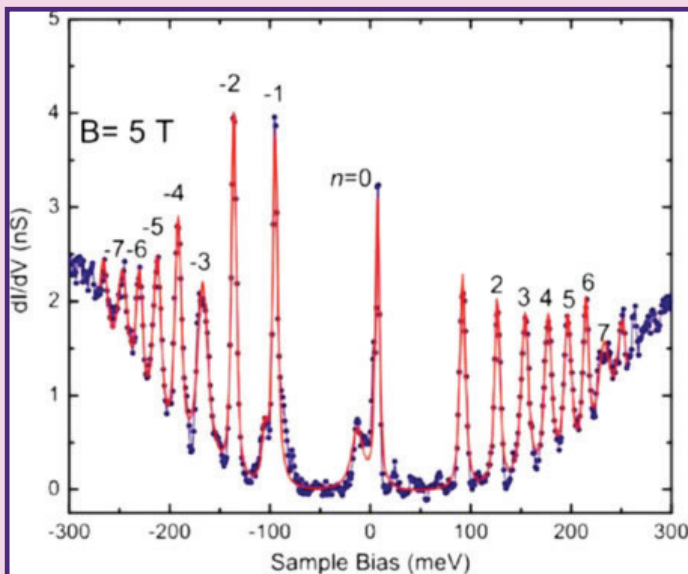
در این چین‌خوردگی وجود ندارد. این امر با احتمال تراز شکاف میانی که بر اثر چین‌خوردگی که موجب چگالی محدود ترازها در نقطه دیراک است، توضیح داده می‌شود. گرافن هم‌بافته نیز دارای موج است. لایه حائل کربنی نیز همواره در لایه میانی SiC- گرافن وجود دارد. این لایه، گرافن را از پایه جدا می‌کند. به دلیل برهم‌کنش ضعیف بین لایه گرافن و لایه حائل کربن، موج‌های $SiC\ 6\times 6$ به وجود می‌آیند. این موج‌ها دارای دامنه 0.4 nm و طول موج $1/9\text{ nm}$ است. در تولید گرافن هم‌بافته روی SiC، برای تصعید اتم‌های Si از SiC، دمای بسیار بالایی مورد نیاز است. این امر باعث ایجاد نقص‌هایی می‌شود که بر اثر جابه‌جایی اتم‌های کربن به وجود می‌آید.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که حلقه‌هایی با پنج و هفت عضو به صورت حلقه‌های بسته‌ای، گرد هم آمده و حلقه مرز دانه‌ای را در شبکه لانه زنبوری تشکیل می‌دهند. تصاویر STM حلقه مرز دانه‌ای را با شکلی شبیه به گل به تصویر می‌کشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که این نقص‌های به شکل گل دارای کمترین انرژی در هسته جابه‌جایی بوده و بنابراین فرآیند رشد را به صورت ترکیبی از جابه‌جایی‌های متحرک بیان می‌کنند.

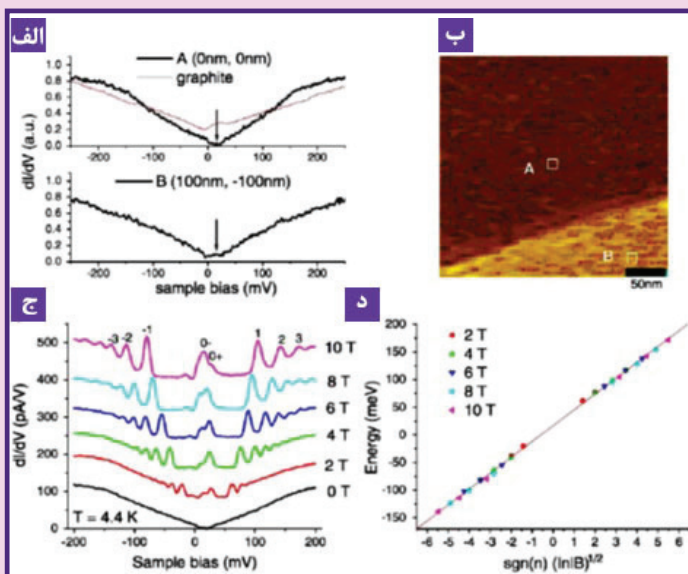
همچنین نقص‌های شبکه‌ای گرافن دو لایه‌ای روی SiC با استفاده از STM تصویربرداری شده‌اند. نقشه dI/dV که به صورت هم‌زمان با تصویر توپوگرافی ثبت شده است، الگوهای تداخلی که هم از پراکندگی دور برد و هم از پراکندگی کوتاه برد ناشی می‌شود را نشان می‌دهد. در مورد این موضوع بعداً در بخشی جداگانه در طیف‌سنجی دو لایه‌ای بحث خواهد شد.

● رژیم کوانتوم هال

اثر کوانتوم هال^{۴۲} در سامانه‌های دو بعدی گاز الکترون^{۴۳} در دمای پایین و در میدان مغناطیسی عمودی قوی مشاهده می‌شود. این اثر خود را به صورت مجموعه پله‌هایی در رسانایی هال σ_{xy} و به صورت تابعی از میدان مغناطیسی آشکارا می‌کند. د. م. د. گ. اف. تک لایه‌ای، رشته QHE با $\partial_{xy} = \pm 4e^2/h(n + \frac{1}{2})$ داده می‌شود که عدد ۴ به دلیل یک جفت اسپین و از بین رفتن شیار است، n شاخص سطح لاندو (LL) است. σ_{xy} به اندازه $1/2$ از رشته عادی 2DEG QHE به دلیل طبیعت فرمیون دیراک حامل‌های بار جابه‌جا می‌شود. همچنین وجود سطح کوانتیزه شده در $n=0$ ، که در آن الکترون‌ها و حفره‌ها از بین می‌روند، فقط به گرافن اختصاص دارد. نخستین بار، QHE در گرافن ورقه‌ای روی SiO_2 و در اندازه‌گیری‌های انتقالی روی نمونه‌ای به صورت الکترون نوری شکل هال^{۴۴} مشاهده شد. در میدان مغناطیسی بسیار بالا مقاومت طولی R_{xx} ناپدید می‌شود، در حالی که مقاومت عرضی R_{xy} همان‌طور که در QHE انتظار می‌رود، حالت مسطح را نشان می‌دهد. بررسی‌های سطوح لاندو (LL) در گرافن با STM، یک ویژگی مهم بنیادی گرافن را نمایان می‌سازد، که حالت انرژی صفر در گرافن، LL_0 است. سطوح لاندو در انرژی به صورت نابرابر تقسیم شده‌اند و هم با ریشه دوم میدان مغناطیسی و هم با شاخص LL تغییر می‌کنند. اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی تونلی (STS) در $4/3\text{ K}$ روی 1 ± 10 لایه گرافنی که روی صفحه کربنی ($4H$ -) $SiC(0001^-)$ حکاکی شده با هیدروژن نشانده شده است، انجام گردید. میدان مغناطیسی از T_1 تا T_8 تغییر داده شد. در شکل (۱۷)، dI/dV که به صورت تابعی از انرژی



شکل ۱۷: STS گرافن در $T\delta$ که سطوح کوانتیزه لاندو را نشان می‌دهد. نقاط آبی طیف STS و خط قرمز، خطی است که با مجموعه شکل‌های خط ویت^{۴۱} در هر LL پیک برازش شده است.



شکل ۱۸: (الف) طیف dI/dV در ناحیه‌های A و B نشان داده شده در (ب) و در غیاب میدان مغناطیسی. (د) نقشه dI/dV تهیه شده در نقطه دیراک (قابل مشاهده در منحنی‌ها) برای نواحی A و B که در (الف) نشان داده شده‌اند. (ج) رشته سطوح لاندو (LL) به صورت تابع میدان مغناطیسی. پیک‌ها با شاخص n سطح LL مشخص شده‌اند. (د) انرژی LL به ریشه دوم شاخص سطح و میدان وابسته است. علامت‌ها به پیک‌ها در (ج) مربوط هستند و خط توپر با معادله‌ای که در متن آمده است، متناسب است.

کوانتومی و β مربوط به تغییرات دامنه جهشی است که بین نزدیکترین اتمهای کربن مجاور روی می‌دهد. برای گرافن مقدار β بین ۲ و ۳ است، و برای شارش در موج در یک صفحه اعوجاج یافته گرافن کاربرد دارد. با رشد تک لایه پوششی گرافن در UHV با قرار دادن (111) Pt در معرض اتیلن و سپس آنیل نمودن آن، گرافن اعوجاج یافته با حباب‌های نانویی روی سطح Pt(111) به وجود می‌آید. نانو حباب‌ها به صورت ساختاری به بلندی ۲-۳ نانومتر و عرض ۱۰-۴ نانومتر به تصویر کشیده شده‌اند. شکل (۱۹-الف) توپوگرافی نانو حباب‌ها را نشان می‌دهد. طیف dI/dV که از روی یک نانوحباب تهیه شده است، پیک‌هایی را نشان می‌دهد که با فاصله بیش از ۱۰۰ meV جدا شده‌اند. این پیک‌ها به سطوح لاندو (LL) که از کرنش ناشی از میدان مغناطیسی به وجود آمده‌اند، نسبت داده می‌شوند. این پیک‌ها از رفتار مقیاس‌پذیری که برای فرمیون‌های بدون جرم دیراک در تک لایه گرافن انتظار می‌رود، پیروی می‌کنند. مقدار B_s از فاصله پیک در نقاط متفاوت روی حباب به دست می‌آید. در مرکز نانوحباب، مقدار B_s از ۳۰۰ T تا ۴۰۰ T تغییر می‌کند. شکل (۱۹-ب) وابستگی فضایی میدان مغناطیسی موثر را نشان می‌دهد. در لبه‌های نانوحباب، تغییرپذیری‌های بیشتری مشاهده می‌شود.

● طیف‌سنجی دو لایه‌ای

گرافن دولایه‌ای^{۴۶} شامل دولایه از گرافن تک لایه‌ای است که با ترتیب خاصی که با نام انباشتگی برنال^{۴۷} شناخته می‌شود، روی یکدیگر قرار می‌گیرند. در این‌جا، اتم‌های زیرشبه A از لایه بالایی روی اتم‌های زیرشبه B از لایه پایینی قرار می‌گیرند. از این رو، تصاویر STM برای BLG، برخلاف شبکه هگزagonal برای گرافن تک لایه‌ای، به دلیل تداخل الکترونیکی دو زیرشبه، شبکه مثلثی را نشان می‌دهد. یک لایه داخلی با شاخص جفت‌شدگی γ نیز وجود دارد که تقارن زیرشبه گرافن را می‌شکند. با توجه به مدل پیوند سخت، اعمال یک میدان الکتریکی عمود بر صفحه دولایه می‌تواند باعث باز شدن شکاف باند شود. به دلیل این ویژگی خاص، BLG برای کاربرد در ابزارها، بسیار مورد توجه است. اندازه‌گیری انتقالات مغناطیسی روی گرافن دولایه‌ای که تحت اعمال ولتاژ بایاس قرار گرفته است، در رسانایی صفر هال، حالت مسطح نشان می‌دهد که نشان‌دهنده باز شدن گاف نواری است. اندازه‌گیری‌های انتقالی با استفاده از ابزاری با دو گیت روی گرافن دولایه‌ای ورقه‌ای، شکاف باند کمتر از ۱۰ meV را نشان می‌دهد.

بدون جرم دیراک و فرمیون‌های عظیم دیراک را در سطح HOPG (گرافیت پیرولیتیک بسیار جهت یافته) با اندازه‌گیری‌های STS در ۴/۴ K و میدان‌های مغناطیسی بالاتر از ۱۲ T بررسی کردند. برای فرمیون‌های بدون جرم دیراک در گرافن تک لایه‌ای، انرژی LL با $\sqrt{B}$ و با شاخص سطح به صورت $\sqrt{n}$ تغییر می‌کند. برای فرمیون‌های عظیم دیراک در گرافن دو لایه‌ای، انرژی LL به صورت خطی با B و با شاخص سطح به صورت $\sqrt{(|n|+1)}$ تغییر می‌کند.

در مطالعه دیگری روی نمونه‌های گرافن مشابه، تصاویر STM از جدا شدن ورقه گرافن تهیه شده است که شبکه هگزagonalی بالاترین لایه و شبکه مثلثی در لایه زیر بالاترین لایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، هر دو لایه با مرزی طولانی از سطح گرافیت جدا شده‌اند. در یک بررسی جزئی‌تر طیف‌سنجی که در مورد جدایی لایه گرافن انجام شده است (شکل ۱۸-الف)، همه نشانه‌های ویژه گرافن مانند طیف خطی dI/dV مشاهده می‌شود. شکل (۱۸-ج) اثر تغییر میدان مغناطیسی از ۰ T تا ۱۰ T را ترسیم می‌کند. با افزایش میدان، طیف رشته پیک‌های به خوبی تعریف شده LL را نشان می‌دهد. شکل (۱۸-د) رسم پیک‌های انرژی به صورت تابعی از $\sqrt{(|n|B)}$ را نشان می‌دهد که همان‌گونه که انتظار می‌رود، اعداد در یک خط مستقیم قرار می‌گیرند. نشانه‌ها به پیک‌ها مربوط هستند. خط با رابطه

$$E_n = E_D + \text{sgn}(n) \sqrt{2e\hbar v_F^2 |n| B}$$

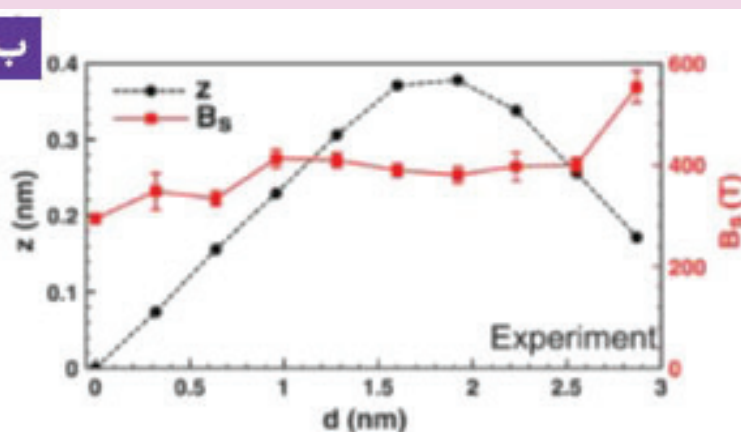
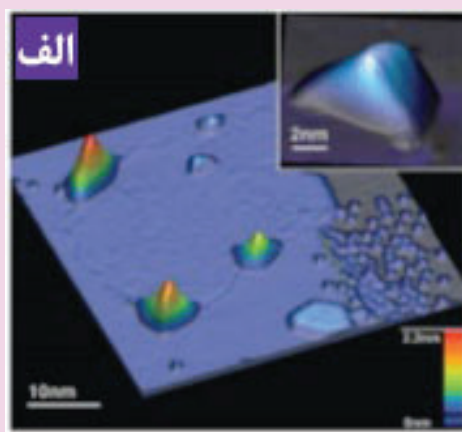
است. $n=0, \pm 1, \pm 2$ متناسب است. E_D انرژی نقطه دیراک و v_F انرژی فرمی

● کرنش و میدان شبه مغناطیسی

از گرافن رشد یافته روی صفحه Pt(111) برای سنجش این پیش‌بینی اساسی استفاده شد، که اعوجاج شبکه گرافن موجب به وجود آمدن میدان شبه مغناطیسی می‌شود. اعمال میدانی با تقارن مثلثی شکل، می‌تواند میدان شبه مغناطیسی B_s با بزرگی بیش از ده‌ها تسلا به وجود آورد. نیروی کرنش از میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$\Phi = \left(\frac{\beta \hbar^2}{la} \right) \Phi_0$$

که در آن h : ارتفاع، l : عرض، a : مرتبه طول پیوند Φ_0 : $C-C$ شارش



شکل ۱۹: (الف) تصویر STM که چهار نانوحباب گرافن را روی خط مرزی گرافن-Pt همراه با مولکول‌های اتیلن واکنش نداده و قطعات کوچک هگزagonalی در گوشه پایین سمت راست تصویر، نشان می‌دهد. تصویر الحاقی، تصویر از نمای نزدیک نانوحباب را نشان می‌دهد که در آن تغییر شکل شبکه لانه زنبوری بر اثر کرنش مشهود است. (ب) خط روبش تصویر STM و B_s که در ناحیه حباب و به صورت تجربی تعیین شده است.

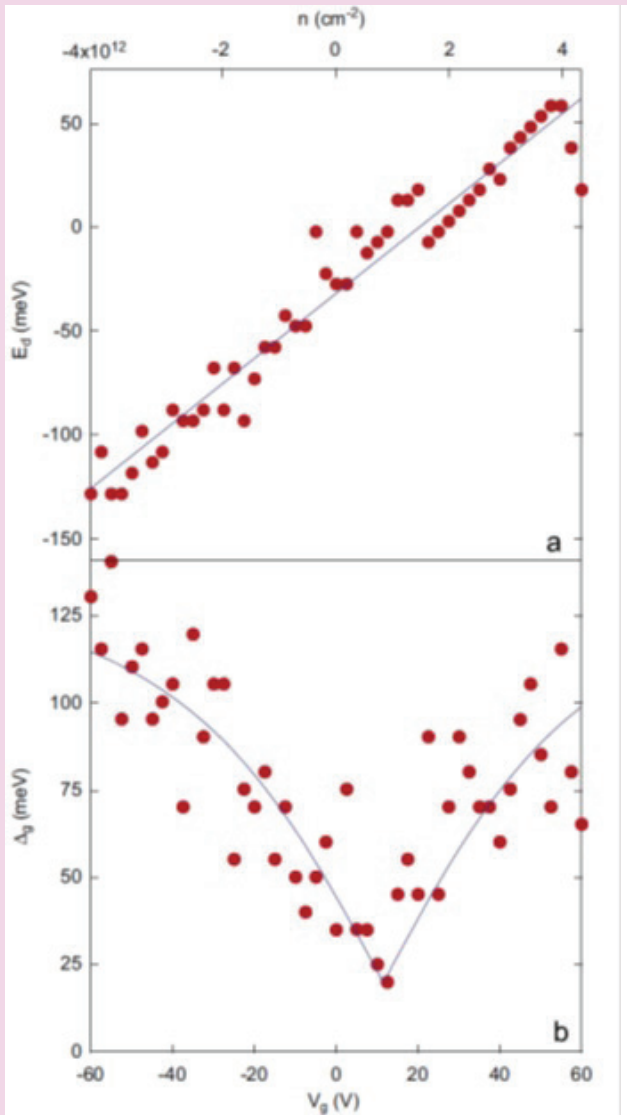
این مقدار کوچک بوده و بزرگی آن با مقدار انرژی اندازه‌گیری شده در نمونه گرافن اعوجاج یافته، قابل مقایسه است. با انجام اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی مادون قرمز در BLG ورقه‌ای، گاف نواری کاملاً تنظیم‌پذیری مشاهده شده است.

اندازه‌گیری‌های STM روی BLG ورقه‌ای در $4/5\text{K}$ نیز باز شدن گاف نواری را به محض اعمال میدان مغناطیسی متقاطع، تأیید می‌کند. شکل (۲۰-الف)، جابه‌جایی نقطه دیراک را به صورت تابع بار اعمال شده ترسیم کرده و وابستگی خطی را که مشخصه گرافن دولایه‌ای است، نشان می‌دهد. شکل (۲۰-ب) بزرگی گاف نواری را به صورت تابع ولتاژ گیت نشان می‌دهد. از این اندازه‌گیری‌ها، جرم مؤثر حامل‌های بار در گرافن دولایه‌ای که با فرمیون‌های بدون جرم در گرافن تک لایه‌ای متفاوت هستند، $m_e/0.22$ به دست آمده که با مقدار $m_e/0.33$ که از محاسبات مدل پیوند سخت به دست آمده است، تطابق نسبتاً خوبی نشان می‌دهد. شکل (۲۱)، تغییرات فضایی نقطه دیراک را نشان می‌دهد. این نقشه با ثبت منحنی‌های dI/dV با توان تفکیک فضایی و قرار دادن نقطه دیراک روی هر منحنی به دست آمده است. ناخالصی‌های تصادفی باردار که به دلیل پایه SiO_2 هستند، در جابه‌جایی نقطه دیراک مشارکت دارند.

فرآیندهای پرش و تداخل در گرافن دولایه‌ای هم‌بافته توسط روتر^{۴۸} و همکارانش با جزئیات مورد بررسی و کاوش قرار گرفته است. شبکه مثلثی گرافن دولایه‌ای همراه با بازسازی 6×6 SiC لایه میانی در زیر شبکه دولایه‌ای تصویربرداری شده‌اند. در ساختارهای پیوسته‌ای به شکل سطح - تپه همراه با شبکه گرافن و نقص‌های اتمی داخل شبکه (که در تصاویر STM تهیه شده از ساختار موضعی شبکه، اختلالات الکترونیکی ایجاد می‌کند) دو نوع نقص یافت می‌شود. نقشه‌های dI/dV و تبدیل فوری آنها، از صفحه نقص‌های اتمی حالت وقفه‌ای و پراکندگی وقفه‌ای را نشان می‌دهند. مطالعات STM دیگری که در دمای پایین انجام گرفته است، با استفاده از تصاویر توپوگرافی ناخالصی‌ها با توان تفکیک بالا، اختلالات اطراف آن و تبدیل‌های فوری مربوطه، تداخل کوانتومی ناخالصی‌ها را در گرافن دو لایه‌ای گزارش نموده است.

گرافن دو لایه‌ای هم‌بافته روی SiC با طیف‌سنجی نشر نوری تفکیک زاویه‌ای^{۴۹}، توسط اهتا^{۵۰} و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. گرافن دولایه‌ای تا حدودی n - آلاییده است. آنها همچنین با آلاییدن گرافن دو لایه‌ای با اتم‌های بیشتر پتاسیم و ایجاد میدان‌های دو قطبی سطحی و میان لایه‌ای، باعث شکستن تقارن دو لایه‌ای شدند. بنابراین، با کنترل چگالی حامل در گرافن دولایه‌ای، گاف نواری می‌تواند از ۰ تا 100 میلی‌الکترون‌ولت تنظیم شود. اندازه‌گیری‌های STM انجام شده توسط برابر^{۵۱} و همکارانش، طیف dI/dV را با گاف نواری 100 meV نشان می‌دهد که مشابه حالت ولتاژهای بایاس اطراف صفر در هر دو نوع گرافن تک لایه‌ای و دولایه‌ای است. در گرافن دولایه‌ای شکاف مورد انتظار است ولی در گرافن تک لایه‌ای غیرقابل توجه است. روتر و همکارانش، زیرپایه SiC بازسازی‌شده را یک بار بدون گرافن و بار دیگر با نخستین لایه گرافن تصویربرداری نموده‌اند. طیف dI/dV لایه بازسازی شده یک گاف نواری 300 meV را نشان می‌دهد، درحالی‌که طیف dI/dV برای گرافن همانند سطح فلزی یا سطح شبه فلز بدون شکاف است.

لایه‌های گرافنی رشد یافته با CVD، تمایل شدیدی به پیچ‌خوردگی دارند که در الگوهای مویره مشهود است. بررسی‌های STM روی چنین لایه‌هایی به وسیله لی^{۵۲} و همکارانش انجام شده است. STS در مرکز این لایه‌های پیچ‌خورده، دو پیک تیز در



شکل ۲۰: (الف) موقعیت نقطه دیراک E_d که از منحنی‌های dI/dV به صورت تابعی از ولتاژ گیت V_g (پایین) و چگالی حامل القایی n (بالا) تعیین شده است. خط مستقیم با داده‌های نشان داده شده مطابقت دارد. (ب) تغییرات گاف نواری با V_g . خط نقطه چین با تغییر گاف نواری مطابقت دارد.

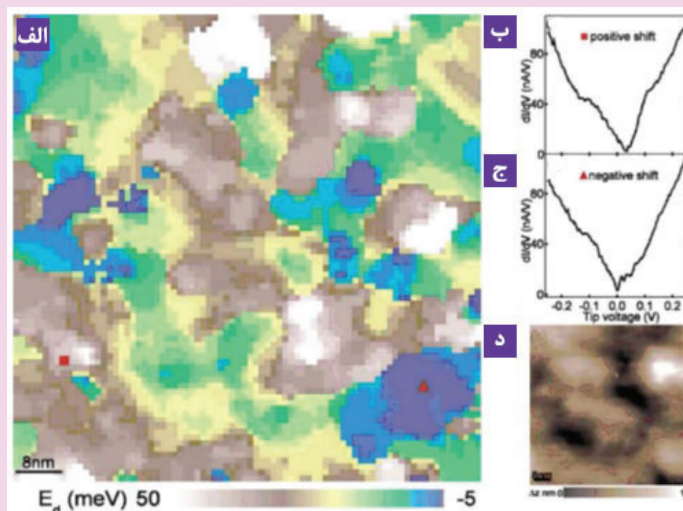
هر دو سوی نقطه دیراک نشان می‌دهد. این پیک‌ها به دلیل چرخشی است که از یگانگی وان هوف^{۵۳} ناشی می‌شود. VHS نقاط انشعاب در چگالی ترازها است. وجود لایه داخلی جفت شده برای VHS الزامی است. از سوی دیگر وجود الگوهای مویره برای تشکیل VHS کافی نیست. مطالعات STM و STS، موقعیت تنظیم‌پذیر VHS و E_f را برای دستکاری فازهای الکترونیکی در این سامانه‌های دو بعدی پیشنهاد می‌کنند.

مطالعه بسیار جالب دیگری با STM روی گرافن دولایه‌ای پیچ خورده (رشد یافته به روش CVD)، در حضور میدان مغناطیسی و در $4/4\text{K}$ انجام شده است. طیف‌سنجی سطح لاندو (LL) نشان می‌دهد که برای زاویه‌های پیچ‌خورده بزرگ‌تر از 20° ، طیف LL ویژگی‌های فرمیون‌های بدون جرم دیراک را دارد. لایه‌های پیچ‌خورده، همانند گرافن تک لایه‌ای رفتار می‌کنند. شکل (۲۲-الف)، تصویر توپوگرافی بخش بزرگی از ناحیه بی‌شکل و الگوی مویره را نشان می‌دهد. تفکیک فضایی بالاتر (شکل ۲۲-ب)، نشان می‌دهد که الگوی مویره به زاویه پیچ‌خوردن $3/5^\circ$ مربوط است. شکل‌های (۲۲-ج) و (۲۲-د)، طیف dI/dV را در دو میدان مغناطیسی متفاوت و روی نواحی مختلف نمونه را نشان می‌دهند. برای زاویه پیچ‌خورده کوچک، طیف در معرض VHS است و

STM انجام شده توسط برار و همکارانش، طیف dI/dV را با گاف نواری 100 meV نشان می‌دهد که مشابه حالت ولتاژهای بایاس اطراف صفر در هر دو نوع گرافن تک لایه‌ای و دولایه‌ای است. در گرافن دولایه‌ای شکاف مورد انتظار است ولی در گرافن تک لایه‌ای غیرقابل توجه است. روتر و همکارانش، زیرپایه SiC بازسازی شده را یک بار بدون گرافن و بار دیگر با نخستین لایه گرافن تصویربرداری نموده‌اند. طیف dI/dV لایه بازسازی شده یک گاف نواری 1 meV را نشان می‌دهد، درحالی که طیف dI/dV برای گرافن همانند سطح فلزی یا سطح شبه فلز بدون شکاف است.

لایه‌های گرافنی رشد یافته با CVD، تمایل شدیدی به پیچ‌خوردگی دارند که در الگوهای مویره مشهود است. بررسی‌های STM روی چنین لایه‌هایی به وسیله لی و همکارانش انجام شده‌است. STS در مرکز این لایه‌های پیچ‌خورده، دو پیک تیز در هر دو سوی نقطه دیراک نشان می‌دهد. این پیک‌ها به دلیل چرخشی است که از یگانگی وان هوف ناشی می‌شود. VHS نقاط انشعاب در چگالی ترازها است. وجود لایه داخلی جفت شده برای VHS الزامی است. از سوی دیگر وجود الگوهای مویره برای تشکیل VHS کافی نیست. مطالعات STM و STS، موقعیت تنظیم‌پذیر VHS و E_F را برای دستکاری فازهای الکترونیکی در این سامانه‌های دو بعدی پیشنهاد می‌کنند.

مطالعه بسیار جالب دیگری با STM روی گرافن دولایه‌ای پیچ‌خورده (رشد یافته به روش CVD)، در حضور میدان مغناطیسی و در $4/4 \text{ K}$ انجام شده‌است. طیف‌سنجی سطح لاندو (LL) نشان می‌دهد که برای زاویه‌های پیچ‌خورده بزرگ‌تر از 20° ، طیف LL ویژگی‌های فرمیون‌های بدون جرم دیراک را دارد. لایه‌های پیچ‌خورده، همانند گرافن تک لایه‌ای رفتار می‌کنند. شکل (۲۲-الف)، تصویر توپوگرافی بخش بزرگی از ناحیه بی‌شکل و الگوی مویره را



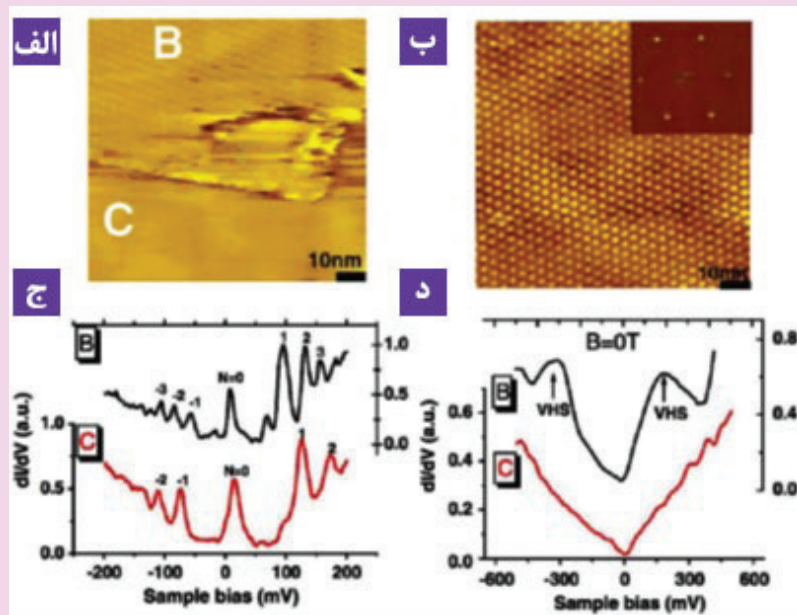
شکل ۲۱: (الف) نقشه دو بعدی $80 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$ که تغییرات فضایی نقطه دیراک محاسبه شده از نقشه dI/dV گرافن دولایه‌ای را نشان می‌دهد. رنگ‌ها به جابه‌جایی مثبت و منفی نقطه دیراک مربوط هستند. (ب) منحنی dI/dV به‌دست آمده از ناحیه جابه‌جایی مثبت که در (الف) با مربع توپر نشان داده شده‌است. (ج) منحنی dI/dV به‌دست آمده از ناحیه جابه‌جایی منفی که در (الف) با مثلث توپر نشان داده شده‌است. (د) توپوگرافی ناحیه نشان داده شده در (الف)، مقیاس رنگ‌ها تغییر ارتفاع 1 nm را نشان می‌دهد.

رفتار فرمیون دیراک نقض می‌شود.

فرآیندهای پراش و تداخل در گرافن دولایه‌ای هم‌بافته توسط روتر و همکارانش با جزئیات مورد بررسی و کاوش قرار گرفته است. شبکه مثلثی گرافن دولایه‌ای همراه با بازسازی 6×6 SiC لایه میانی در

زیر شبکه دولایه‌ای تصویربرداری شده‌اند. در ساختارهای پیوسته‌ای به شکل سطح - تپه همراه با شبکه گرافن و نقص‌های اتمی داخل شبکه (که در تصاویر STM تهیه شده از ساختار موضعی شبکه، اختلالات الکترونیکی ایجاد می‌کند) دو نوع نقص یافت می‌شود. نقشه‌های dI/dV و تبدیل فوریه آنها، از صفحه نقص‌های اتمی حالت وقفه‌ای و پراکندگی وقفه‌ای را نشان می‌دهند. مطالعات STM دیگری که در دمای پایین انجام گرفته است، با استفاده از تصاویر توپوگرافی ناخالصی‌ها با توان تفکیک بالا، اختلالات اطراف آن و تبدیل‌های فوریه مربوطه، تداخل کوانتومی ناخالصی‌ها را در گرافن دو لایه‌ای گزارش نموده است.

گرافن دو لایه‌ای هم‌بافته روی SiC با طیف‌سنجی نشر نوری تفکیک زاویه‌ای، توسط اهتا و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است. گرافن دولایه‌ای تا حدودی n -آلایده است. آنها همچنین با آلاییدن گرافن دو لایه‌ای با اتم‌های بیشتر پتاسیم و ایجاد میدان‌های دو قطبی سطحی و میان لایه‌ای، باعث شکستن تقارن دو لایه‌ای شدند. بنابراین، با کنترل چگالی حامل در گرافن دولایه‌ای، گاف نواری می‌تواند از ۰ تا 100 meV میلی الکترون ولت تنظیم شود. اندازه‌گیری‌های



شکل ۲۲: (الف) تصویر STM که توپوگرافی و الگوی مویره (ب) و نواحی بی‌شکل (ج) را نشان می‌دهد. (ب) توپوگرافی در مرکز الگوی مویره که به زاویه تابیده شدن $\theta = (3/5 \pm 0/3)^\circ$ مربوط می‌شود. (ج) طیف dI/dV که در (ب) و (ج) در 6 T گرفته شده‌است. (د) طیف dI/dV که در (ب) و (ج) در T گرفته شده‌است.

نتیجه گیری

در این مقاله، بررسی گرافن با روش‌های پروبی روبشی با جزئیات کامل شرح داده شده است. این روش‌ها در روشن نمودن ارتباط بین ساختار و خواص الکتریکی گرافن مفید هستند. تصویربرداری در مقیاس اتمی و اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی با توان تفکیک فضایی به درک مکانیسم پراکندگی در نمونه‌های گرافنی کمک می‌نماید. اطلاعات فضایی که با این اندازه‌گیری‌ها فراهم شده است، دارای مزیتی فراتر از اندازه‌گیری‌های انتقالی کلی است که موقعیت نقطه دیراک و قابلیت تحرک را برای کل نمونه گرافنی فراهم می‌آورد. در نظر گرفتن بی‌نظمی‌های میکروسکوپی داخلی به صورت تابعی از موقعیت، برگرفته از یک دیدگاه بنیادین است. چنین اطلاعات پایه‌ای برای پیشرفت این حوزه مهم است، به عنوان مثال، بررسی دقیق غیریکنواختی بار در نمونه‌های گرافنی روی SiO_2 منجر به رویکردی مانند استفاده از h-BN در زیر گرافن گردید تا نمونه‌هایی با بی‌نظمی‌های کمتر ساخته شود. روش STM تأیید پیش‌بینی‌های تئوری مانند کرنش ناشی از میدان مغناطیسی و کوانتیزه شدن سطح لاندو در گرافن کمک نموده است. روش STM یک ابزار تصویربرداری ایده‌آل برای بررسی کیفیت نمونه‌های گرافن است، به ویژه هنگامی که روش‌های جدیدی مانند تجزیه حرارتی اتیلن برای رشد گرافن کشف می‌شود. عامل‌دار نمودن شیمیایی گرافن برای دستیابی به هدف باز شدن گاف نواری در گرافن همچنان در حال پیشرفت است. بنابراین، میکروسکوپی پروبی روبشی یک وسیله ضروری برای پیشبرد تحقیقات در مورد گرافن است.

نشان می‌دهد. تفکیک فضایی بالاتر (شکل ۲۲-ب)، نشان می‌دهد که الگوی مویره به زاویه پیچ‌خوردن $3/5^\circ$ مربوط است. شکل‌های (۲۲-ج) و (۲۲-د)، طیف dI/dV را در دو میدان مغناطیسی متفاوت و روی نواحی مختلف نمونه را نشان می‌دهند. برای زاویه پیچ‌خورده کوچک، طیف در معرض VHS است و رفتار فرمیون دیراک نقض می‌شود.

اندازه‌گیری‌های STM روی گرافن دو لایه‌ای ورقه‌ای (گرافن روی پایه SiO_2) در حضور میدان مغناطیسی نشان داده است که ماهیت میکروسکوپی گاف نواری به بی‌نظمی پتانسیل در گرافن دو لایه‌ای وابسته است. طیف dI/dV برای الکترون و حفره در گرافن دو لایه‌ای به صورت تابعی از میدان مغناطیسی، پیک‌های سطح لاندو را نشان می‌دهد. از موقعیت این پیک‌ها می‌توان مقدار گاف نواری گرافن دو لایه‌ای را در حفره‌های مختلف تعیین نمود. مشخص شده است که تقارن مقادیر انرژی بین لایه‌ها به جدایی بین $LL_{(0,+);(1,+)}$ و $LL_{(2,+);(2,-)}$ وابسته است. همچنین الکترون و حفره‌ها، شکاف‌نگی $LL_{(0,+);(1,+)}$ را هنگامی که E_F را قطع می‌کنند، نشان می‌دهند. محققین ادعا می‌کنند که این نشانه با رفتار الکترونی مرتبط است. بررسی دقیق نشان می‌دهد که نمی‌توان قطبیده شدن لایه فضایی همگن را مد نظر قرار داد. چگالی بار کل و عدم توازن بار به صورت فضایی تغییر کرده و به تغییر بی‌نظمی‌های موضعی پتانسیل منجر می‌شود. ناخالصی‌های باردار بین گرافن و عایق می‌تواند عدم توازن بار را تحت تأثیر قرار دهند.

مرجع

Aparna Deshpande a, Brian J. LeRoy, Scanning probe microscopy of graphene Physica E 44 (2012) 743–759.

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد شیمی فیزیک، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانوفناوری
۲. کارشناس ارشد فیزیک حالت جامد، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده نیمه‌هادی‌ها، آزمایشگاه شناخت مواد
۳. کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده کاتالیست و نانوفناوری
۴. عضو کارگروه تخصصی دستگاه‌های SPM شبکه آزمایشگاهی فناوری‌نانو
5. silicon carbide (SiC)
6. ultra high vacuum (UHV)
7. Novoselov
8. Geim
9. Scanning tunneling microscope (STM)
10. Atomic force microscopy (AFM)
- * متن کامل این بخش در سایت مجله قابل دسترسی است.
11. Scanning Gate Microscopy (SGM)
12. Scanning Single Electron Transistor (SET)
13. Statistical Parametric Mapping)
- SPM)
14. Scanning single electron transistor (SSET)
15. Scanning gate microscopy (SGM)
16. scanning electron microscope (SEM)
17. Electron Channeling Contrast Imaging (ECCI)
18. Moire domains
19. Gao
20. Low Energy Electron Microscopy (LEEM)
21. Yu
22. Li
23. Kish
24. Ishigami
25. Geringer
26. Cullen
27. Friction Force Microscopy (FFM)
28. Lateral Force Microscopy (LFM)
29. Conductive AFM (CAFM)
30. Scanning Tunneling Spectroscopy (STS)
31. Zhang
32. Deshpande
33. Local Density Of States (LDOS)
34. Friedel oscillations
35. Coulomb Blockade (CB)
36. band gap
37. Xue
38. Gaussian fit
39. Graphene Field Effect Transistors (GFETs)
40. wrinkle
41. Quantum Hall Effect (QHE)
42. Dimensional Effect Gas (DEG)
43. Hall-bar-type electrode
44. Li
45. Voight line
46. Bilayer Graphen (BLG)
47. Bernal stacking
48. Rutter
49. Angle Resolved Photo Emission Spectroscopy (ARPES)
50. Ohta
51. Brar
52. Li
53. Van Hove Singularity (VHS)