

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی

ترابرد کوانتومی در نانوساختارهای سیلیسین

تألیف:

دکتر سعیده محمدی

و

دکتر ایوب اسماعیل پور

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی

سرشناسه	: محمدی، سعیده، ۱۳۶۸ -
عنوان و نام پدیدآور	: ترابرد کوانتومی در نانوساختارهای سیلیسین / تألیف سعیده محمدی، ایوب اسماعیل پور.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۴۰۱.
مشخصات ظاهری	: ۲۹۰ص: مصور، جدول.
شابک	: ۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۴۱-۳
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: نانوسیلیسیوم Nanosilicon عایق‌های توپولوژیک Topological insulators
شناسه افزوده	: اسماعیل پور، ایوب، ۱۳۵۲ -
شناسه افزوده	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
شناسه افزوده	: Shahid Rajaee Teacher Training University
رده بندی کنگره	: TA۴۱۸/۹
رده بندی دیویی	: ۶۲۰/۱۹۳
شماره کتابشناسی ملی	: ۹۰۰۲۹۲۸
اطلاعات رکورد کتابشناسی	: فیپا



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

عنوان	: ترابرد کوانتومی در نانوساختارهای سیلیسین
تألیف	: دکتر سعیده محمدی / دکتر ایوب اسماعیل پور، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
ویراستار ادبی	: دکتر یداله بهمنی
نوبت چاپ	: پاییز - ۱۴۰۲
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
لیتوگرافی، چاپ	: نشر شریف
طراح جلد	: دکتر سعیده محمدی
ناظر چاپ	: محمد معتمدی‌نژاد
کارشناس چاپ و صفحه‌آرا	: نیره فیروزی
کارشناس انتشارات	: طاهره کبیا
شمارگان	: ۱۰۰ جلد
قیمت	: ۲۴۰۰۰۰ تومان
شابک	: ۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۴۱-۳
ISBN: 978-622-6589-41-3	

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفان و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی محفوظ است.
نشانی: تهران، لویزان، کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸، صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵، تلفن: (۲۶۳۲) ۹ - ۲۲۹۷۰۰۶۰.
۲۲۹۷۰۰۴۲، تلفکس: ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: publish@sru.ac.ir، وب سایت: <http://publish.sru.ac.ir>

پیشگفتار مؤلفان

اخیراً، نانونوار سیلیسین به دلیل داشتن جفت‌شدگی اسپین - مدار ذاتی قوی دارای کاربردهای فراوانی در طراحی نانو دستگاه‌ها و نقش به‌سزای در توسعه دانش اسپینترونیک دارند. در این نانوساختارها، با اعمال میدان الکتریکی می‌توان شاهد گذار فازهای توپولوژیکی متفاوتی مانند: گذار فاز از یک عایق توپولوژیکی به عایق و عایق شبه‌توپولوژیکی به عایق بود. همچنین در این نوع ساختارهای دوبعدی با اعمال میدان الکتریکی گاف انرژی را می‌توان کنترل کرد و گذار فازهای فلز - نیم‌رسانا و فلز - شبه‌فلز را مشاهده نمود. نتایج تحقیقات حاکی از آن است که در نانونوار سیلیسین با تنظیم قدرت جفت‌شدگی اسپین - مدار راشبا، جریان اسپینی معکوس و قابل کنترل می‌شود. این قابلیت کنترل جریان اسپینی یک گام مهم در توسعه علم اسپینترونیک می‌باشد. همچنین، برای ساخت قطعات الکترونیکی بر پایه سیلیکون بسیار مفید خواهد بود که این موضوع در فصل‌های اول و دوم بررسی خواهد شد. علاوه بر این، نانوفناوری دانش نوینی از حسگرهای زیستی ارائه داده است (این موضوع در فصل سوم آورده شده است) که بخش مهمی از این حسگرهای زیستی مربوط به توالی‌سنجی و حسگر *DNA* بر پایه مواد دوبعدی است. در فصل‌های چهارم و پنجم سعی شده است ابتدا ترابرد الکترونی حاکم بر مولکول *DNA* ارائه شود. در ادامه، به مطالعه روش جدید برای توالی‌سنجی بر پایه نانوساختارهای دوبعدی، یعنی ایجاد نانوحفره‌های بر پایه گرافین و سیلیسین پرداخته خواهد شد. در فصل ششم، به مطالعه ترابرد الکتریکی نانونوار سیلیسین سه‌لایه دو ترمیناله با الکترودهای تک‌لایه و دولایه در حضور و غیاب مولکول *DNA* پرداخته شده است. از طریق عبور مولکول *DNA* دورشته‌ای از یک نانوحفره در وسط نانونوار سیلیسین سه‌لایه مقدار گاف انرژی افزایش می‌یابد. ویژگی‌های تراپردی رشته *DNA* عبوری از نانوحفره سیلیسین به پهنای نانوحفره‌ها، الکترودها و موقعیت الکترودها وابسته است. این امر در ساخت سیستم‌های شناسایی توالی و حسگر *DNA* بسیار سودمند.

تقدیر و شکر

خدا را سپاس می‌گوییم که روزنهٔ علم را برای شکوفایی افکار کاوشگر آفرید و بر فرستادهٔ ایشان درود می‌فرستیم که بهترین سبک زندگی عالمانه را با مجاهدت خستگی‌ناپذیر به بشریت ابلاغ فرمود. در همین آموزه‌های نورانی « مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ، لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ » در راستای آموزش تقدیر، تبلور بی‌بدیلی پیدا کرد و به ما آموخت که قدردانی از بندگان به مثابه شکر خداست. لذا جهت امتثال این کلام نورانی بر خودمان وظیفه می‌دانیم که مراتب تقدیر، تشکر و سپاس خود را به محضر آقایان دکتر آرش فیروزنیا برای همکاری در فصل دوم، دکتر فرهاد خوئینی برای همکاری در فصل پنجم و دکتر محمد اسماعیل پور برای همکاری در فصل ششم تقدیم می‌کنیم.

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۱	فصل اول: عایق‌های توپولوژیکی دوبعدی
۳	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- تزریق اسپین در ساختارهای گرافین‌گونه
۶	۳-۱- گرافین
۸	۴-۱- روش‌های تولید گرافین
۸	۱-۴-۱- روش لایه‌نشانی الکترو استاتیکی
۸	۲-۴-۱- رشد گرافین روی سطح بلور کاربید سیلیکون
۹	۳-۴-۱- لایه‌برداری مکانیکی از گرافیت
۹	۵-۱- نانونوارهای گرافینی
۱۰	۱-۵-۱- روش سنتز نانونوارها در آزمایشگاه
۱۰	۶-۱- اتم سیلیکون
۱۱	۷-۱- تاریخچه سیلیسین
۱۳	۸-۱- زیرلایه‌ها
۱۵	۹-۱- خصوصیات و ویژگی‌های سیلیسین
۱۶	۱۰-۱- شبه‌ذرات بدون جرم کایرال
۱۶	۱-۱۰-۱- هامیلتونی دیراک‌گونه
۱۸	۲-۱۰-۱- شبه‌اسپین و کایرالیته در گرافین
۱۹	۱۱-۱- نانونوار سیلیسین

د ترابرد کوانتومی در نانو ساختارهای سیلیسین

- ۲۲-۱-۱۲- ساختار نوار انرژی
- ۲۵-۱-۱۳- جفت شدگی اسپین- مدار در سیلیسین
- ۳۱-۱-۱۴- هامیلتونی نقصانی و جفت شدگی بین اتمی
- ۳۳-۱-۱۵- اثر میدان الکتریکی در ساختار سیلیسین
- ۳۴-۱-۱۶- هامیلتونی نهایی برای این مدل سیلیسین
- ۳۹-۱-۱۷- جفت شدگی اسپین - مدار راشبا
- ۴۰-۱-۱۸- تأثیر جفت شدگی اسپین- مدار راشبا در گرافین
- ۴۳-۱-۱۸-۱- جفت شدگی اسپین- مدار راشبا در گرافین در مدل بستگی قوی
- ۴۴-۱-۱۹- نوارهای لبه در نانونوار سیلیسین
- ۴۵-۱-۲۰- مفهوم توپولوژی در مکانیک کوانتومی
- ۴۵-۱-۲۰-۱- فاز بری
- ۴۶-۱-۲۰-۲- اتصال بری
- ۴۸-۱-۲۰-۳- میدان پیمانهای
- ۴۸-۱-۲۱- عایق توپولوژیکی
- ۴۹-۱-۲۱-۱- طبقه بندی موادهای
- ۵۰-۱-۲۱-۲- فاز عایق
- ۵۲-۱-۲۱-۳- اثر حال کوانتومی
- ۵۵-۱-۲۱-۴- تفاوت عایق حال کوانتومی و عایق معمولی
- ۵۸-۱-۲۱-۵- عدد چرن
- ۶۱-۱-۲۲- اثر حال اسپینی کوانتومی
- ۶۵- فصل دوم: نانونوار سیلیسینی چندلایه**
- ۶۷-۱-۲- مقدمه
- ۶۷-۲-۲- ساختار شبکه در گرافین دولایه
- ۶۹-۲-۳- ساختار انرژی در گرافین دولایه
- ۷۱-۲-۴- روش های تعیین ساختار انرژی
- ۷۱-۲-۴-۱- روش طیف سنجی تابش فوتونی زاویه ای برای تعیین ساختار نواری

فهرست مطالب

۷۳	۲-۴-۲- جرم سیکلوترونی گرافین
۷۳	۲-۴-۳- اثر هال کوانتومی غیرعادی در گرافین تک‌لایه و دولایه
۷۵	۲-۵-۵- نانونوار سیلیسینی دولایه
۷۸	۲-۶-۶- نانونوار سیلیسینی چندلایه
۸۰	۲-۶-۱- اعمال میدان الکتریکی عمودی
۸۶	۲-۶-۲- اعمال جفت‌شدگی اسپین - مدار راشبا
۸۷	۲-۷- نتیجه‌گیری
۸۹	فصل سوم: حسگرهای زیستی و DNA بر پایه نانوساختارهای دوبعدی
۹۱	۳-۱- نانوفناوری
۹۳	۳-۱-۱- نانوزیست حسگرها
۹۳	۳-۱-۲- پزشکی فردمحور
۹۴	۳-۱-۳- ژنتیک مولکولی
۹۵	۳-۲- الکترونیک مولکولی
۹۵	۳-۳- طراحی حسگرهای زیستی و اصول عملکرد آنها
۹۸	۳-۴- زیست نانو فناوری DNA
۹۹	۳-۵- ساختار مولکول DNA
۹۹	۳-۵-۱- ساختمان اولیه DNA
۱۰۱	۳-۵-۲- ساختمان دوم DNA
۱۰۳	۳-۶- انواع شکل‌های DNA
۱۰۷	فصل چهارم: ترابرد بار در مولکول DNA
۱۰۹	۴-۱- مقدمه
۱۰۹	۴-۲- مزیت‌های منحصربه‌فرد قطعات ساخته‌شده با DNA
۱۱۰	۴-۳- خواص الکترونی مولکول DNA
۱۱۳	۴-۴- چگونگی ترابرد بار الکتریکی در مولکول DNA
۱۱۴	۴-۵- تأثیر نوع بازها در انتقال بار الکتریکی در طول مولکول DNA
۱۱۵	۴-۶- سازوکارهای انتقال بار از جنبه فیزیکی

و ترابرد کوانتومی در نانساختارهای سیلیسین

۱۱۶	۷-۴- معرفی مدل‌های فیزیکی DNA
۱۱۶	۴-۷-۱- مدل یک‌بعدی
۱۱۷	۴-۷-۲- مدل دوکانال
۱۱۸	۴-۷-۳- مدل استخوان ماهی
۱۱۸	۴-۷-۴- مدل نردبانی
۱۲۱	فصل پنجم: ترابرد الکترونی در مولکول DNA و گرافین
۱۲۳	۵-۱- توالی‌سنجی DNA
۱۲۷	۵-۲- گرافین تک‌لایه با DNA
۱۲۸	۵-۳- اثر نانوحفره و وجود DNA بر ویژگی‌های الکتریکی نانونوارهای گرافینی
۱۳۲	۵-۴- گرافین دولایه و سه‌لایه با DNA
۱۳۲	۵-۴-۱- ویژگی‌های الکتریکی نانونوارهای گرافینی دولایه
۱۳۴	۵-۴-۲- اعمال نانوحفره و حضور DNA در نانونوارهای گرافینی دولایه
۱۳۹	۵-۴-۳- نانونوارهای گرافینی سه‌لایه
۱۴۳	۵-۴-۴- اعمال نانوحفره و حضور DNA بر نانونوارهای گرافینی سه‌لایه
۱۴۸	۵-۵- نتیجه‌گیری
۱۵۱	فصل ششم: نانساختارهای سیلیسین-DNA
۱۵۳	۶-۱- مقدمه
۱۵۴	۶-۲- نانساختارهای سیلیسین-DNA
۱۵۵	۶-۲-۱- تک‌لایه نانونوار سیلیسین-DNA
۱۵۹	۶-۲-۲- نانونوار سیلیسین سه‌لایه-DNA
۱۶۵	۶-۳- جمع‌بندی نتیجه این فصل
۱۶۷	فصل هفتم: پارادوکس کلاین در گرافین
۱۶۹	۷-۱- مقدمه
۱۷۰	۷-۲- پارادوکس کلاین در گرافین
۱۷۱	۷-۳- فیزیک پارادوکس کلاین

۱۷۷	فصل هشتم: تأثیر بی‌نظمی در رسانندگی ابر شبکه سیلیسین
۱۷۹	۱-۸- مقدمه
۱۷۹	۲-۸- ابر شبکه سیلیسین بی‌نظم
۱۸۱	۳-۸- محاسبه ضریب عبور برای یک سد
۱۹۰	۴-۸- ابر شبکه سیلیسین بی‌نظم
۱۹۵	۵-۸- ترابرد الکترونی برای ابر شبکه سیلیسین بی‌نظم
۲۰۰	۶-۸- نتیجه‌گیری
۲۰۱	منابع و مآخذ
۲۱۵	پیوست الف: تقریب بستگی قوی
۲۱۵	الف- ۱- تقریب بستگی قوی
۲۱۵	الف- ۱- ۱- ساختار نواری
۲۱۹	الف- ۲- برهم‌کنش اسپین - مدار
۲۲۰	الف- ۱-۲- هامیلتونی اسپین - مدار
۲۲۲	الف- ۲-۲- هامیلتونی مؤثر
۲۲۳	الف- ۳- مدل بستگی قوی برای نانونوار سیلیسینی
۲۲۵	الف- ۴- جفت‌شدگی اسپین - مدار راشبا
۲۲۵	الف- ۴-۱- تئوری انرژی پایین دیراک
۲۲۶	الف- ۵- میدان تبادلی (زیمان)
۲۲۷	الف- ۶- مدل بستگی قوی نانونوار سیلیسینی چندلایه
۲۲۹	الف- ۷- کنترل گاف انرژی در سیلیسین دولایه
۲۳۲	پیوست ب: رهیافت تابع گرین غیر تعادلی
۲۳۲	ب- ۱- نظریه تابع گرین غیر تعادلی
۲۳۲	ب- ۲- رهیافت بس‌ذره‌ای تابع گرین غیر تعادلی
۲۳۳	ب- ۲-۱- تعاریف
۲۳۷	ب- ۲-۲- معادله‌های حرکت
۲۴۰	ب- ۲-۳- رابطه‌ها و ویژگی‌های تابع گرین‌های اصلی

ح ترابرد کوانتومی در نانو ساختارهای سیلیسین

۲۴۳	ب-۲-۴- چگالی جریان بار
۲۴۸	ب-۳- تکنیک‌ها و مدل‌های عددی برای روش تابع گرین غیرتعادلی
۲۴۸	ب-۳-۱- الگوریتم بازگشتی برای تابع گرین تأخیری (پیشرفته)
۲۵۱	ب-۳-۲- الگوریتم سانجو- روبیو
۲۵۴	پیوست ج: تقریب بستگی قوی در مدل‌های مختلف DNA
۲۵۴	ج-۱- مقدمه
۲۵۴	ج-۲- مدل بستگی قوی
۲۵۵	ج-۳- هامیلتونی در مدل بستگی قوی
۲۵۶	ج-۴- مدل بستگی قوی برای ترابرد الکترونی در طول مولکول DNA
۲۵۷	ج-۴-۱- مدل یک‌بعدی
۲۵۸	ج-۴-۲- مدل دو کانال
۲۵۸	ج-۴-۳- مدل استخوان ماهی
۲۵۹	ج-۴-۴- مدل نردبانی
۲۶۰	ج-۵- پیاده‌سازی تقریب بستگی قوی در مدل DNA دو رشته‌ای
۲۶۴	واژه‌نامه‌ها
۲۷۴	نمایه

عایق‌های توپولوژیکی

دو بعدی

فصل ۱

۱-۱- مقدمه

اخیراً، ترابرد اسپینی در مواد فوق نازک دوبعدی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. در این خصوص، گرافین به عنوان یک بلور دوبعدی با خواص اسپین-دره بسیار زیاد مورد توجه قرار گرفته است [۱]. گرافین، ماده‌ای بسیار مناسب برای انتقال اسپینی نیست زیرا اثر جفت‌شدگی اسپین-مدار ذاتی آن بسیار ضعیف است [۲-۴]. با این حال، تحقیقات نشان می‌دهد که می‌توان از گرهِ خوردگی درجات آزادی بین اسپین و اوربیتال گرافین برای قطبش جریان خروجی در یک مسیر قابل کنترل استفاده کرد. این ایده ابتدا برای کاربرد در ترانزیستورهای اثر میدانی اسپینی ارائه شد [۵، ۶]. ماده دوبعدی دیگری که جفت‌شدگی اسپین-مدار ذاتی نسبتاً قوی دارد، نمونه سیلیکونی گرافین است که سیلیسین نامیده می‌شود. سیلیسین می‌تواند بر روی سطوح $Ag(111)$ و MoS_2 سنتز شود [۷، ۸]. ساختار نواری سیلیسین مشابه ساختار نواری گرافین است و لبه‌های نوار رسانش و ظرفیت در گوشه‌های منطقه بریلوئن در اطراف نقاط K و K' واقع شده‌اند. برخلاف گرافین، سیلیسین دارای ساختاری خمیده است و جفت‌شدگی اسپین-مدار ذاتی آن گاف انرژی برابر با 1.55 (meV) را بین نوار رسانش و ظرفیت باز می‌کند. به دلیل این خمیدگی، لبه‌های گاف نواری سیلیسین توسط یک میدان الکتریکی عمودی خارجی برای هر اسپین و دره جدا می‌شوند [۹]. جالب‌تر این‌که، این گاف انرژی از نوع اسپینی است که برای دو دره مخالف بوده و می‌تواند با تغییر میدان الکتریکی کنترل شود [۱۰]. سازگاری سیلیسین با فناوری مبتنی بر سیلیکون همراه با قابلیت کنترل گاف نواری آن، آن را از سایر بلورهای دوبعدی مشابه مانند: MoS_2 ، که دارای یک اتصال اسپین-دره بسیار قوی هستند، متمایز می‌کند [۱۰]. تاکنون، این خصوصیات باعث علاقه‌مندی به تحقیقات گسترده‌ای در مورد اثر هال غیرعادی اسپین و دره [۹، ۱۱]، ترانزیستور اثر میدانی در دمای اتاق [۱۲] و ... شده است. علاوه بر این، مطالعات اخیر، سیلیسین را به عنوان یک کاندیدای بالقوه برای استفاده در دستگاه‌های ترابرد اسپینی و دره پیشنهاد داده‌اند [۱۳-۱۶]. مطالعات اخیر، در زمینه محاسبات و رایانه‌های توپولوژیکی - کوانتومی بر پایه سامانه‌های ماده چگال روندی رو به افزایشی نشان می‌دهد. پس از کشف اثر

حال کوانتومی، مفهوم توپولوژیکی بسیار محبوبیت یافت. دسته‌بندی فازهای الکترونی مطابق با ناوردهای توپولوژیکی ابزار قدرتمندی برای درک و پیش‌بینی رفتار مواد ایجاد می‌کند. فازهای توپولوژیکی و متعاقباً نوردایی مربوط با آن که مرتبط با طیف انرژی و ویژه‌حالت‌های یک سامانه است، می‌توانند در سامانه‌های ماده چگال آشکار شوند. فازهای توپولوژیکی به دلیل پایداری در برابر اختلال‌های محیطی، این پتانسیل را دارند که در محاسبات توپولوژیکی-کوانتومی مورد استفاده قرار گیرند. یکی از موادی که می‌تواند میزبان فازهای توپولوژیکی باشد، عایق توپولوژیکی نام دارد. عایق توپولوژیکی، ماده‌ای است که در نوارهای توده دارای گاف انرژی و در نوارهای لبه دارای نوارهای بدون گاف انرژی است که با تقارن‌های موجود در شبکه کریستالی محافظت می‌شوند.

۱-۲- تزریق اسپین در ساختارهای گرافین‌گونه

در عصر اطلاعات، علم جدیدی که به‌شدت مورد خطاب قرار گرفته است، اسپینترونیک نامیده می‌شود، که شکل مخفف شده اسپین الکترونیکی است. در یک تعریف ساده می‌توان اسپینترونیک را پدیده حامل اسپین قطبیده در فلزات و نیم‌رساناها نامید، برخلاف الکترونیک معمولی که در آن اسپین الکترون نادیده گرفته می‌شود. هدف از کاربرد اسپینترونیک پیدا کردن راهی برای کنترل خواص الکترونیکی همانند جریان یا بار انباشته‌شده به وسیله اسپین یا میدان مغناطیسی است و همچنین کنترل اسپین یا خواص مغناطیسی به وسیله جریان الکتریکی یا ولتاژ گیت صورت می‌گیرد. هدف نهایی، ساختن دستگاه‌هایی است که منجر به افزایش ویژگی‌های جریان بار الکترونیکی می‌شود.

در یک مفهوم گسترده‌تر اسپینترونیک را می‌توان مطالعه پدیده‌های اسپینی در جامدات، به-خصوص در فلزات و نیم‌رساناها و در ساختارهای گوناگون نیم‌رساناها تعریف کرد. چنین مطالعاتی خواص اپتیکی، الکتریکی و مغناطیسی جامدات، ناشی از وجود تعادل و عدم تعادل جمعیت اسپینی و همچنین دینامیک اسپینی را مشخص می‌کند. اسپینترونیک، در حال حاضر مهم‌ترین زمینه تحقیقات با کاربردهای عمده در تکنولوژی‌های متعدد است. اسپینترونیک، نوع جدیدی از علم الکترونیک است که علاوه بر بار، به‌دنبال بهره‌برداری از اسپین و درجه آزادی الکترون هست. این علم جدید، یکی از امیدوارکننده‌ترین راه‌حل‌های آینده، با سرعت عمل بالا و ذخیره‌سازی انرژی دستگاه‌های الکترونیکی را محیا می‌کند. در واقع، الکترونیک معمولی به‌دنبال استفاده از الکترون است، در حالی که اسپینترونیک به‌دنبال استفاده از اسپین الکترون است که زمینه

فصل اول: عایق‌های توپولوژیکی دوبعدی ۵

وسیع‌تری از موضوعات با جنبه‌های مختلف را شامل می‌شود. اولین نمونه‌های اسپینترونیکی، اثرهای مغناطومقاومت هستند. اثر مغناطومقاومت بسیار بزرگ و اثر تونل‌زنی مغناطومقاومت بسیار بزرگ از برجسته‌ترین نمونه‌های آن هستند. در هر دو مورد، مقاومت دو (یا بیشتر) لایه فرومغناطیسی بستگی به زاویه نسبی بین مغناطش در فرومغناطیس دارد. در اثر مغناطومقاومت می‌تواند هر دو مورد چگالی حالت‌های اسپین بالا و پایین نمایان شود. از آنجایی که مقاومت به شدت به جهت لایه‌ها بستگی دارد، اثر مغناطومقاومت بسیار بزرگ می‌تواند به‌عنوان یک سنسور بسیار حساس برای میدان مغناطیسی استفاده شود. در نتیجه، جایزه نوبل در سال ۲۰۰۷ به کشف اثر مغناطومقاومت بسیار بزرگ داده شده است. مهم‌ترین کاربرد اثر مغناطومقاومت بسیار بزرگ دسترسی مغناطیسی تصادفی به حافظه است.

اثرات مغناطیسی به‌طور عمده برای ذخیره‌سازی و بازیابی اطلاعات به‌کار برده می‌شود. به‌منظور استفاده از اسپین، برای عملگرهای منطقی باید امکان ذخیره‌سازی، انتقال و کنترل اسپین الکترون وجود داشته باشد. برای این منظور، مواد نیم‌رسانا شرایط خوبی دارند، زیرا آن‌ها به‌طور معمول یک زمان واهلش اسپینی بزرگی دارند که اجازه تنظیم اسپین از طریق جفت‌شدگی اسپین-مدار را می‌دهند. از این‌رو شکل‌گیری زمینه اسپینترونیکی نیم‌رساناها قابل درک است. ترانزیستور اثر میدانی اسپینی به‌وسیله داتا^۱ و داس^۲ پیشنهاد شد که مثال خوبی برای درک بهتر اسپین مبتنی بر منطق مشخص می‌کند. در ترانزیستور اثر میدانی اسپینی، منبع و درین^۳ شامل تماس فلز فرومغناطیسی با مغناطش موازی است. تزریق الکترون‌ها از منبع از یک الکترون‌گاز دوبعدی عبور می‌کند که جهت اسپین می‌تواند به‌وسیله ولتاژ گیت، تنظیم شود. از این‌رو اسپینترونیکی ممکن است منجر به یک منطقی با کاهش مصرف برق باشد، در حالی که به‌طور واضح ترانزیستور اثر میدانی اسپینی داتا و داس به‌صورت تجربی تشخیص داده نمی‌شود. تعدادی از ترانزیستور اثر میدانی مبتنی بر ایده‌های مشابه ایجاد شده است.

یکی دیگر از نمونه‌های بارز اسپینترونیکی اثر هال اسپینی کوانتومی است که در یک شارش جریان بار، اسپین بالا و پایین در جهت‌های مختلف، با توجه به جفت‌شدگی اسپین-مدار منحرف می‌شوند. در نوع غیرذاتی اثر هال اسپینی کوانتومی، انحراف اسپین وابسته، از پراکندگی ناخالصی‌ها به‌وجود می‌آید و در نوع ذاتی، حتی در غیاب ناخالصی‌ها، جفت‌شدگی اسپین-مدار در نیم‌رساناها به‌وجود می‌آید. اثر هال اسپینی کوانتومی منجر به کاهش اتلاف مدارهای منطقی

¹. Datta

². Das

³. Drain

و کنترل جریان اسپینی خالص می‌شود. یعنی جریان اسپینی بدون هر نوع جریان باری همواره برای کاهش اتلاف مدارهای منطقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فیزیک گرافین یکی دیگر از زمینه‌هایی است که از زمان کشف تجربی گرافین تک‌لایه در سال ۲۰۰۴، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. جدای از خواص الکترونیکی منحصر به فرد، گرافین نامزد امیدوارکننده‌ای برای اسپینترونیک و محاسبات کوانتومی مبتنی بر اسپین است. انتظار می‌رود که زمان واهلشی در گرافین خیلی طولانی باشد. به‌تازگی، مطالعاتی در مورد تزریق اسپین در گرافین با استفاده از الکتروود کبالت در دمای اتاق انجام شده است. اخیراً هان^۱ و همکارانش نشان دادند که بهره‌وری تزریق اسپینی از الکتروود فرومغناطیسی در گرافین، می‌تواند به‌وسیلهٔ سد تونل‌زنی افزایش یابد. تشخیص اسپین در گرافین نیز با استفاده از یک روش اندازه‌گیری غیرجایگزیده محقق شده است. در جریان اسپینی، اسپین بالا و پایین مشخص و به‌طور مستقل اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این، فرومغناطیس در دمای اتاق از گرافین توسط وانگ و همکارانش تشخیص داده شده است. همچنین، نانونوار گرافین به طول پخش اسپینی، زمان واهلش اسپینی و زمان همدوسی اسپین الکترون به‌شدت وابسته است. همه این‌ها نشان می‌دهند که گرافین وعدهٔ اسپینترونیک را منعقد می‌کند. انواع دستگاه‌های مبتنی بر گرافین پیشنهاد شده است. برای مثال، یک نانونوار گرافین مبتنی بر دستگاه مغناطومقاومت بسیار بزرگ به‌صورت نظری پیشنهاد شده است و همین‌طور به‌صورت تجربی نشان داده شده است که این دستگاه برای ذخیره‌سازی اطلاعات مفید می‌باشد. توسعهٔ چندمنظورهٔ گرافین مبتنی بر مؤلفه‌های اسپینترونیک، همانند دستگاه‌هایی که به‌طور مؤثر کنترل جریان اسپینی قطبیده را ارائه می‌دهند، برای تحقق کامل اسپینترونیک حیاتی است.

۱-۳- گرافین

در سال ۲۰۰۴، یک گروه فیزیک‌دان از دانشگاه منچستر انگلستان که توسط آندره گایم^۲ سرپرستی می‌شد، به‌کمک شیوه‌ای کاملاً متفاوت و طبیعی گرافین را ساختند و تحولی در بررسی‌های مربوط به کرین به‌وجود آوردند [۱۷، ۱۸]. آن‌ها از گرافیت سه‌بعدی شروع کردند و ورقه‌ای تک‌لایه (با یک لایهٔ اتمی) را با روشی که لایه‌برداری مکانیکی نامیده می‌شود، استخراج کردند. گرافیت، ماده‌ای لایه‌لایه از تک‌لایه‌های گرافین است که روی هم با نیروی ضعیفی قرار

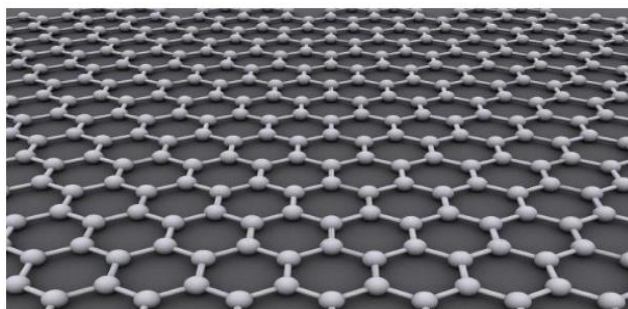
^۱. Han

^۲. Andre Geim

فصل اول: عایق‌های توپولوژیکی دوبعدی ۷

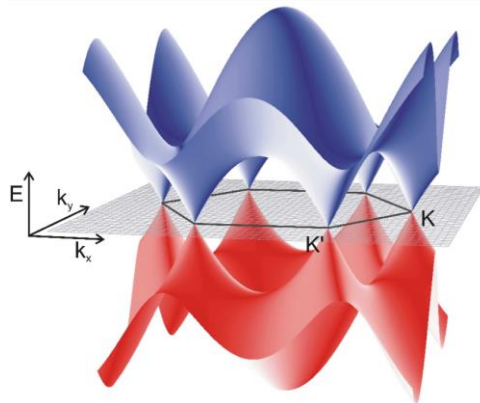
گرفته‌اند. همین اتصال ضعیف را گروه منچستر دست‌مایه کار خود قرار دادند. گرافین، صفحه‌ای مسطح از شش‌گوش‌هایی با اتم کربن است، این ماده دوبعدی از کربن خالص تشکیل شده است. اتم‌های کربن در این ماده به شکل لانه‌زنبوری در یک شبکه دوبعدی قرار دارند (شکل (۱-۱)). برای ساخت بلورهای کوچک، محققان در مقابل روش بالا به پایین از روش‌های دیگر چشم‌پوشی کردند. این رویکرد نه چندان پیچیده به‌آسانی قادر به تولید بلورهای گرافینی بزرگ (بیشتر از صد میکرومتر) و البته با کیفیت بالای بلور گرافیتی است و بلافاصله هدف فعالیت‌های تجربی بسیار زیادی قرار گرفت.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های گرافین ساختار دو اتمی سلول واحد در ساختار بلوری آن (ساختار شبکه‌ای تک‌لایه اتمی گرافین) است. گرافین خواص فیزیکی عجیبی از خود نشان می‌دهد که قبلاً در مقیاس نانو مشاهده نشده بود. هر اتم کربن چهار ظرفیتی در ساختار گرافین با اوربیتال-های پیوند sp^2 با ۳ اتم کربن در صفحه، پیوند σ تشکیل می‌دهد و یک تک الکترون در اوربیتال غیرپیوندی π که عمود بر صفحه گرافین قرار می‌گیرد، به‌صورت جفت نشده باقی می‌ماند. پیوندهای σ عامل اصلی استحکام دوبعدی ساختار گرافین می‌باشد.



شکل (۱-۱): نمایی از ساختار لانه‌زنبوری گرافین.

گرافین، با سایر مواد متداول دوبعدی متفاوت است. گرافین طبیعی یک رفتار نیم‌رسانا یا یک شبه‌فلز با گاف نواری صفر را از خود نشان می‌دهد. یک صفحه محدود از گرافین نشان‌دهنده یک گاف نواری صفر در محل تماس نوارهای رسانش و ظرفیت با الکترون‌هایی که اثرات جرمی صفر دارند [۱۹]، است، همان‌طور که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود. نوارهای رسانش و ظرفیت در ۶ نقطه از فضای K با هم مماس هستند (هم‌پوشانی ندارند) این نقاط را نقاط دیراک می‌نامند.



شکل (۱-۲): ساختار نواری گرافین در نقاط دیراک.

گرافین، به علت داشتن خواصی چون رسانندگی گرمایی خوب (در حدود 5000 W/Mk)، رسانندگی الکتریکی بالا (20000 Vc/cm)، مقاومت مکانیکی بالا در برابر شکست (125 گیگا پاسکال)، مدول یانگ بالا (حدود 1100 گیگا پاسکال)، چگالی بالا، تحرک پذیری حامل های بار، رسانندگی اپتیکی و ... به ماده ای منحصر به فرد تبدیل شده است. این ماده با کمترین ضخامت، مستحکم ترین ساختار را دارد، از نظر رسانندگی گرمایی از همه مواد شناخته شده بهتر عمل می کند و یک ماده چگال است.

۱-۴-۲- روش های تولید گرافین

۱-۴-۱- روش لایه نشانی الکترو استاتیکی

یک نمونه گرافیت روی یک زیرلایه که از جنس اکسید سیلیکون است، کشیده می شود و در مجاورت یک میدان الکتریکی خیلی قوی قرار می گیرد. این میدان باعث می شود یک لایه گرافین از گرافیت جدا شده و به زیرلایه بچسبد. تولید گرافین با این روش خیلی سخت است زیرا کنترل میدان برای تولید این تک لایه گرافین دشوار است.

۱-۴-۲- رشد گرافین روی سطح بلور کاربید سیلیکون

در این روش، با گرم کردن کاربید سیلیکون تا دمای 1300 درجه سانتی گراد سیلیکون از روی لایه زیرین جدا می شود و لایه های کمی از گرافین روی سطح باقی می ماند. کیفیت و تعداد