



اثر آرایش نقاط کوانتومی گرافن با عناصر N، B، K و CI بر طیف گسیلی آن

امین کاظمی^۱، محمدرضا فدوی اسلام*^۱، غلامرضا یزدی^۲

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۲- گروه نيمرسانا، دانشکده فیزیک، دانشگاه ليشوپينگ، سوئد

(دریافت مقاله: ۹۹/۵/۲۹، نسخه نهایی: ۹۹/۸/۲۴)

چکیده: در این پژوهش، اثر آرایش نقاط کوانتومی گرافن بر طیف‌های گسیلی آن‌ها بررسی شده است. نخست گرافن بر زیرلایه کاربرد سیلیکون به روش روآرایی لایه نشانی شد. سپس نقاط کوانتومی گرافن آرایش شده بر زیر لایه گرافن به روش قطره چکانی توزیع شدند. ساختار نمونه‌ها توسط پراش سنج پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و طیف سنج رامان مشخصه یابی شد. طیف‌های گسیلی از نقاط کوانتومی گرافن در اثر تابش نور فرابنفش بررسی شدند. پراش پرتو ایکس از گرافن رشد داده شده بر زیر لایه کاربرد سیلیکون ساختار گرافن و کاربرد سیلیکون را تایید کرد. تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی یکنواختی سطح گرافن رشد داده شده بر کاربرد سیلیکون را نشان داد. نگاشت بازتابندگی به دست آمده از طیف‌سنج رامان وجود تک لایه‌ها و دولایه‌های گرافن را تایید کرد. تصاویر میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و نیروی اتمی نیز توزیع یکنواخت نقاط کوانتومی گرافن بر زیر لایه را نشان دادند. دیده شد که با افزایش آرایش نقاط کوانتومی توسط بور از ۰/۷۵٪ به ۱/۵٪ و برای پتاسیم از ۲٪ به ۴٪، شدت طیف گسیلی آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار آلاینده نیتروژن و کلر از ۲٪ به ۴٪، شدت طیف گسیلی کاهش یافت. افزون بر آن، شدت قله‌های طیف گسیلی نقاط کوانتومی آرایش شده با پتاسیم بیش از بور و شدت قله‌های نقاط کوانتومی گرافن آرایش شده با نیتروژن نسبت به کلر بیشتر است. به‌طور کلی، بیشترین و کمترین افزایش شدت طیف گسیلی در اثر آرایش به ترتیب با پتاسیم و کلر است.

واژه‌های کلیدی: گرافن؛ نقاط کوانتومی گرافن؛ طیف گسیلی.

مقدمه

شود تا به صورت حسگری زیستی بکار گرفته شود [۱۰]. افزون بر این، شفافیت نوری، رسانایی گرمایی و الکتریکی، چگالی حامل‌های بالا (10^{12} cm^{-3})، تحرک‌پذیری بالای الکترون ($2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V.S}$) و مقاومت الکتریکی پایین آن سبب شده است که یک انتخاب بسیار مناسب در قطعه‌های نانوالکترونیک باشد [۱۱]. اگرچه تک‌لایه گرافیت به ضخامت یک اتم به‌عنوان نیمرسانایی با گاف نواری صفر شناخته می‌شود، اما گاف نواری آن بستگی به اندازه و آرایش آن دارد [۱۲]. بنابراین نقاط کوانتومی گرافن به دلیل اندازه ویژه خود دارای ویژگی‌های فیزیکی بی‌مانندی هستند [۱۳]. به تازگی نقاط کوانتومی

نیمرساناها بدلیل دارا بودن ویژگی‌های متنوع و بی‌مانند اپتیکی، الکتریکی و مغناطیسی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱-۵]. گرافن نیمرسانا، دارای ساختار لانه زنبوری دوبعدی و پیوندهای sp^2 است و به‌دلیل ویژگی‌های نوری، الکتریکی، مکانیکی و گرمایی ویژه در قطعه‌های گوناگون بکار برده می‌شود [۶، ۷]. این نیمرسانا دارای سطح یکنواخت مناسب برای استفاده به‌عنوان یک سطح حسگر است [۸، ۹]. گرافن همچنین می‌تواند پیوندهای $\pi-\pi$ با برخی مولکول‌های زیستی از طریق نیروهای ضعیف و اندروالس ایجاد کند که باعث می

کاربردهایی چون حسگری گازی، تصویر برداری زیستی، آشکارسازهای نوری، تبدیل انرژی، دیودهای نور گسیل (LED) و سلول‌های خورشیدی آماده می‌کند.

روش آزمایش

سنتز گرافن بر زیرلایه کاربید سیلیکون

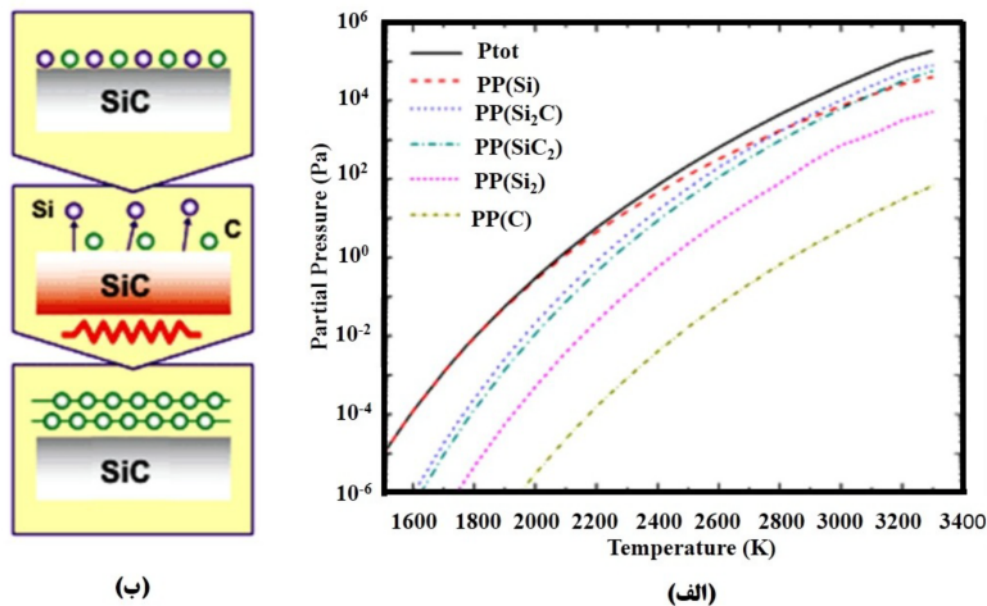
زیرلایه کاربید سیلیکون (SiC) از شرکت کری امریکا خریداری شد. پیش از رشد گرافن، وجه سیلیکونی زیر لایه 4H-SiC به روش پولیش مکانیکی شیمیایی (CMP) پرداخت و به ابعاد ۷ در ۷ میلیمتر مربع برش داده شد و طی چهار مرحله تمیز گردید. و سپس لایه گرافن در آزمایشگاه به روش تصعید بر زیرلایه 4H-SiC رشد داده شد [۳۲،۳۱]. برای از بین بردن آلاینده‌های شیمیایی روی سطح زیر لایه‌های کاربید سیلیکون از هپتان و روش غوطه وری استفاده شد. هر زیرلایه در استون و اتانول به مدت پنج دقیقه در معرض امواج فراصوت ۵۰ هرتز و دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. سپس آمونیاک (NH_3) و آب اکسیژنه (H_2O_2) به نسبت مساوی ۱:۱ در آب دو بار یونیده حل شده و زیر لایه‌ها در آن قرار گرفته و برای ۵ دقیقه بر گرمکن ۸۵ درجه سلسیوس گرمادهی شدند. در ادامه، زیر لایه‌ها ۱۰ مرتبه با آب دو بار یونیده شستشو داده شدند. همچنین به منظور از بین بردن آلاینده‌های معدنی از محلول اسید کلریدریک (HCl)، آب اکسیژنه (H_2O_2) و آب دو بار یونیده استفاده شد. به این منظور، آن‌ها در محلول غوطه‌ور کرده و به مدت پنج دقیقه روی گرمکن در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد گرمادهی کردیم. سرانجام آن‌ها را با آب دو بار یونیزه شسته و با استفاده از گازهای بی‌اثر نیتروژن و آرگون خشک نمودیم. در آخرین مرحله تمیز کاری با هدف زدودن لایه اکسیژن از روی زیر لایه کاربید سیلیکون، از مخلوط آب یونیده و فلورید هیدروژن به نسبت ۱:۳ به برای دو دقیقه استفاده شد. برای رشد لایه گرافن به روش تصعید (برآرایی)، زیر لایه-های کاربید سیلیکون در کوره القایی با دمای ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و در جو آرگون با فشار تقریبی یک اتمسفر قرار گرفتند. سنتز گرافن بر وجه سیلیکونی SiC در راستای بلوری (۰۰۱) آن انجام شد. در این فرایند، سیلیکون و کربن در دمای ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد تصعید شده و به دلیل بیشتر بودن فشار جزئی سیلیکون‌ها در مقایسه با کربن‌ها (شکل ۱ الف)، ذرات سیلیکون از سطح زیر لایه دور می‌شوند و کربن‌های باقی مانده لایه گرافن را تشکیل می‌دهند. شکل ۱ ب طرحواره سنتز لایه گرافن بر کاربید سیلیکون را نشان می‌دهد.

گرافن صفربعدی، به دلیل محدودیت‌های کوانتومی و آثار لبه‌ای توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱۴،۱۵]. گرافن به دلیل داشتن طیف نوری گسیلی مناسب در قطعه‌های اپتیکی نیز کاربردهای گوناگون دارد [۱۳]. آلاینش نیمرساناها می‌تواند منجر به تغییر ویژگی‌ها و حتی ایجاد ویژگی‌های جدید در آن‌ها گردد [۱۶-۱۹].

روش‌های متعددی برای تهیه تک لایه‌های گرافن وجود دارد؛ یکی از آن‌ها لایه‌برداری از گرافیت است که متاسفانه بزرگترین لایه‌های به دست آمده از این راه ابعاد ۱۰ در ۱۰ میکرومتر مربع دارند که برای مصارف صنعتی مناسب نیست [۲۰]. روش دیگر، لایه‌نشانی تبخیر شیمیایی (CVD) گرافن بر زیرلایه‌های فلزی چون مس، نیکل و روبیدیوم است [۲۱، ۲۲]. در این روش، ناخالصی‌های فلزی موجب نقص‌های بسیاری می‌گردند که بر ویژگی‌های الکترونی، الکتروشیمیایی و مکانیکی گرافن اثر دارد [۲۳]. افزون بر این، رشد گرافن به این روش نیازمند جابجا کردن گرافن بر یک زیرلایه نیمرسانای مجزای مطلوب برای کاربری صنعتی آن است که تا به امروز چنین جابجایی موثری گزارش نشده است [۲۴]. روش دیگر رشد گرافن، کاهش شیمیایی اکسید آن است [۲۵].

رشد برآرایی گرافن (EG) بر زیرلایه کاربید سیلیکون از روش‌هایی است که به تازگی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۲۶]. تشکیل ساختار گرافن بر زیرلایه کاربید سیلیکون ششگوشی به وسیله تصعید سیلیکون در خلا و یا در جو گاز آرگون، یک شیوه جذاب با مزایای متعدد است [۲۷، ۲۸]. نیمرسانای کاربید سیلیکون با گاف نواری بزرگ به عنوان یک زیرلایه مناسب، نه تنها دارای کاربردهای صنعتی متنوعی است، بلکه می‌توان گرافن را در ابعاد زیرلایه رشد داد [۲۶]. برآرایی گرافن بر زیر لایه کاربید سیلیکون دارای نقص‌های کمتری بوده و نیازمند هیچ‌گونه جابجایی نیست. بنابراین از آلودگی‌های ناشی از این فرآیندها و موثر بر ویژگی‌های الکترونی، الکتروشیمیایی و مکانیکی گرافن دور است [۲۹، ۳۰].

در این پژوهش، گرافن به روش برآرایی بر زیرلایه کاربید سیلیکون لایه نشانی شد. با توجه به اهمیت طیف گسیلی گرافن برای کاربردهای اپتیکی این طیف بررسی گردید. در این راستا، اثر آلاینش نقاط کوانتومی گرافن با عناصر بور، پتاسیم، نیتروژن و کلر بر طیف گسیلی آن‌ها بررسی شد. اهمیت این پژوهش از آنجاست که آلاینش اتم‌های مختلف، گاف نواری نقاط کوانتومی گرافن را به شدت تغییر داده و آن‌ها را برای



شکل ۱ (الف) وابستگی دمایی فشار جزئی بخار مواد مختلف در تعادل با یک بلور روی زیر لایه SiC [۳۳]، (ب) طرحواره سنتز لایه گرافن بر کاربرد سیلیکون به روش تصعید [۳۳].

برای هیدروکسید آمونیوم (NH₄OH) نیز انجام شد. سپس ۱۵ میکرولیتر از محلول‌های آرایش تهیه شده در وسط زیرلایه‌های گرافن به روش قطره چکانی و توسط نمونه گیر لایه نشانی شدند. سر انجام نمونه‌ها در اتاق تمیز و در محفظه هود و در دمای آزمایشگاه نگه داشته شدند تا کامل خشک شوند.

مشخصه‌یابی نمونه‌ها

برای تعیین ساختار بلوری نمونه‌ها از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل D8 ADVANCE-BRUKER استفاده شد. ریختار آن‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی Digital instrument مدل 3100, Veeco, CA و میکروسکوپ الکترونی روبشی زایس مدل LEO 1550 Gemini تعیین شد. همچنین سطح نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری نیکون Infinity1 بررسی گردید. برای بررسی یکنواختی ضخامت لایه گرافن، نگاشت بازتابندگی سطح نمونه با طیف سنج میکرو رامان kyoto مدل JobinYvon TRIAX 550, Kyoto با لیزر ۵۳۲ نانومتر (۲/۳۳ eV) و قدرت تفکیک فضایی کمتر از یک میکرومتر تهیه شد. با طیف‌سنج نورتابی (pL) طیف‌های گسیلی از نقاط کوانتومی در اثر تابش نور فرا بنفش بررسی شد.

آرایش زیر لایه گرافن با نقاط کوانتومی

نقاط کوانتومی گرافن (GQD) مورد نیاز در این پژوهش از شرکت ACS material با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تهیه شدند.

عناصر پتاسیم (K)، کلر (Cl)، نیتروژن (N) و بور (B) برای آرایش نقاط کوانتومی در نظر گرفته شدند. نقاط کوانتومی توسط هر یک از این عناصر با دو مقدار متفاوت آرایش شدند. منبع عناصر آرایش در جدول ۲ ارائه شده است. برای آرایش نقاط کوانتومی با پتاسیم، ۰/۳ گرم از پودر هیدروکسید پتاسیم (KOH) با ۱۵ میلی لیتر آب حل شد. این محلول به نسبت ۱:۱ با نقاط کوانتومی ترکیب گردید و سپس به مدت یک ساعت در معرض امواج فراصوت ۵۰ هرتز در دمای ۲۷ درجه قرار داده شد. محلول به‌دست آمده با ۱۱۰۰۰ rpm در دمای ۲۷ درجه سانتریفیوژ شد تا ذرات ریز و درشت از هم جدا گردند. سپس به آرامی ۰/۵ میلی لیتر از بالای محلول جدا شد تا به عنوان منبع آرایش مورد استفاده شود. فرآیند آرایش برای منبع پودری اسید بوریک (H₃BO₃) نیز به همین صورت بود. برای آرایش نقاط کوانتومی با کلر نیز یک میلی لیتر اسید کلریدریک (HCl) با ۳ میلی لیتر آب دو بار یونیده مخلوط و به نسبت ۱:۱ با نقاط کوانتومی ترکیب شد. این فرآیند آرایش

جدول ۱ مشخصه‌های نقاط کوانتومی گرافن.

نام ترکیب	نقاط کوانتومی گرافن
ظاهر	محلول بی رنگ
قله نورتابی	۵۳۰ نانومتر
اندازه ذرات	کمتر از ۶ نانومتر
چگالی	۱ میلی گرم بر میلی لیتر
حلال	آب (و مقدار کمی DMF)

جدول ۲ آلاینده‌های نقاط کوانتومی گرافن برحسب

غلظت آلیش (درصد وزنی)	منبع آلیش	آلاینده (D)
≈ ۰.۷۵	H ₃ BO ₃ (پودر)	بور (B)
≈ ۱.۵		
≈ ۲	HCl (37%)	کلر (Cl)
≈ ۴		
≈ ۲	KOH (پودر)	پتاسیم (K)
≈ ۴		
≈ ۲	NH ₄ OH (25%)	نیترژن (N)
≈ ۴		

بحث و نتیجه گیری

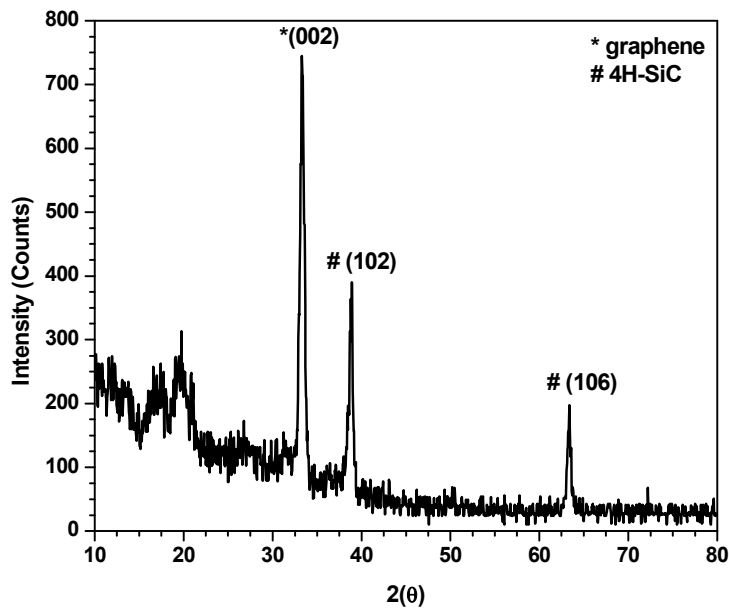
برای بررسی ساختار گرافن سنتز شده بر زیرلایه کاربرد سیلیکون، طیف سنجی XRD در زوایای خراشان^۱ انجام شد. نتایج این طیف‌سنجی در شکل ۲ نشان داده شده است. دیده می‌شود که قله ارجح در زاویه $2\theta = 33/3^\circ$ رخ داده که مربوط به صفحه (۰۰۲) ساختار گرافن است. افزون بر آن، قله‌هایی در زوایای 2θ برابر با $38/9$ و $63/35$ درجه دیده می‌شوند که به ترتیب با صفحه‌های (۱۰۲) و (۱۰۶) مربوط به 4H-SiC متناظر هستند. این قله‌ها ساختار تقریباً تک بلوری تراشه‌های کاربرد سیلیکون را تایید می‌کند. اندازه نانو بلورکها (D) با استفاده از رابطه شرر [۳۴]:

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

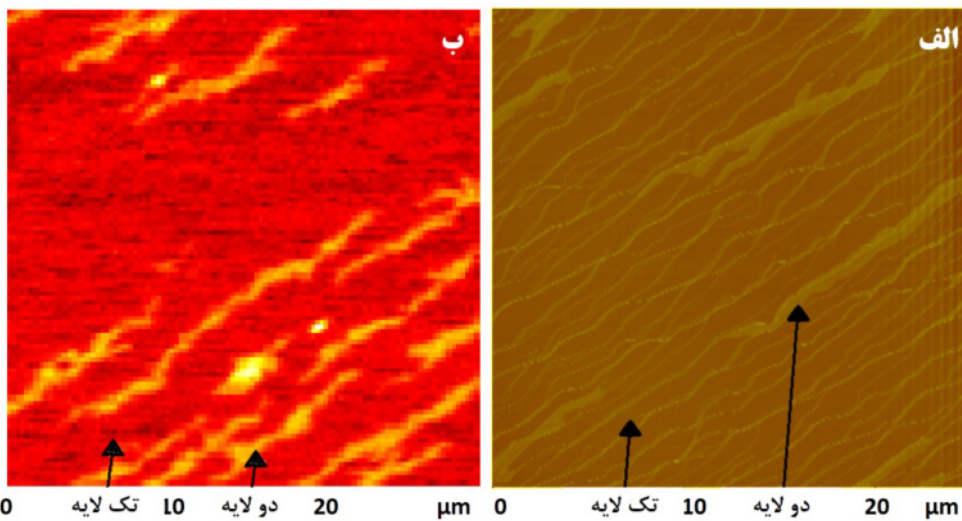
محاسبه شد که در آن، λ طول موج پرتو ایکس، β پهنا در نیم شدت قله (FWHM) و θ زاویه پراش قله‌هاست. اندازه دانه‌ها براساس قله (۰۰۲) در زاویه $33/34$ درجه مربوط به فاز گرافن و قله (۱۰۲) در زاویه $38/90$ درجه مربوط به فاز کاربرد سیلیکون به ترتیب برابر با $29/34$ و $29/81$ نانومتر است.

تصویر AFM نگاشت بازتابندگی^۲ از گرافن سنتز شده بر زیر لایه کاربرد سیلیکون به ترتیب در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب ارائه شده است. شکل ۳ الف یکنواختی و یکرختی نمونه را نشان می‌دهد. همچنین پله‌های مربوط به زیرلایه سیلیکون کاربرد نیز دیده می‌شود. تعداد لایه‌های گرافن در نگاشت بازتابندگی (شکل ۳ ب) مشخص شده است. نگاشت بازتابندگی بر پایه قدرت پرتو لیزر بازتابیده از نمونه در طیف سنج میکرو رامان تهیه شده و می‌تواند به دقت تعداد لایه‌ها را تا کمتر از ده لایه گرافن در نمونه‌ها شناسایی کند [۳۵].

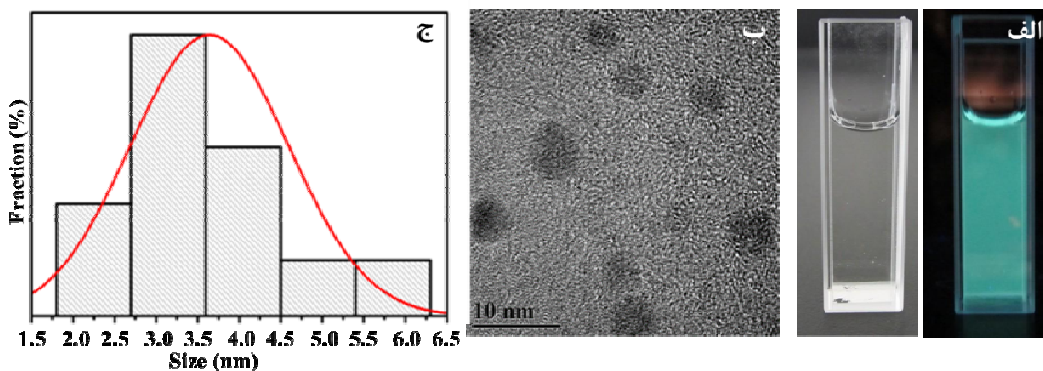
پیش از لایه نشانی، نقاط کوانتومی گرافن بررسی شدند. شکل ۴ الف محلول شامل نقاط کوانتومی گرافن را نشان می‌دهد که با نور معمولی و نور فرابنفش برانگیخته شده‌اند. نقاط کوانتومی در معرض نور فرا بنفش، نور با طول موج ۵۳۰ نانومتر گسیل کرده و سبز رنگ بنظر می‌رسند. برای بررسی اندازه نقاط، تصویر TEM نیز از آن‌ها گرفته شد که در شکل ۴ ب ارائه شده است. براساس این شکل و توزیع اندازه نقاط (شکل ۴ پ)، میانگین اندازه نقاط کوانتومی کمتر از ۶ نانومتر است.



شکل ۲ طیف XRD در زوایای خراشان از سطح گرافن رشد داده شده بر زیرلایه 4H-SiC



شکل ۳ (الف) تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از گرافن سنتز شده بر زیرلایه SiC و (ب) نگاهت بازتابندگی از نمونه در تصویر الف



شکل ۴ (الف) تصویر نورگسیل نقاط کوانتومی گرافن در معرض نور معمولی که شفاف دیده می‌شوند (چپ) و نور UV که به رنگ سبز دیده می‌شوند (راست)، (ب) تصویر TEM نقاط کوانتومی گرافن محلول در آب و (پ) نمودار توزیع اندازه نقاط کوانتومی گرافن.

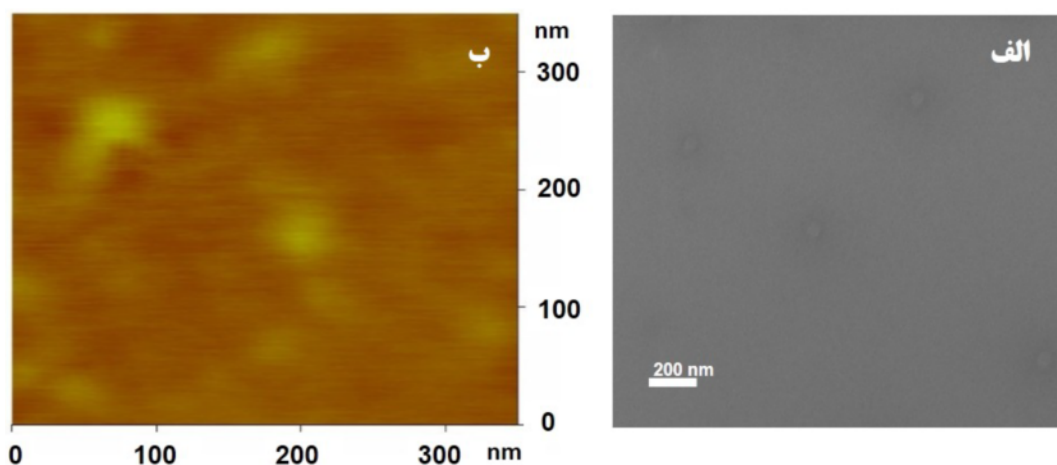
ریزتر برای لایه‌نشانی مناسبتر هستند، زیرا شامل مقدار بیشتری از تک لایه‌های گرافن هستند. پس از اطمینان از سونش نقاط کوانتومی، ۱۰ میکرولیتر از محلول نقاط کوانتومی گرافن با نمونه‌گیر در هر مرحله بر زیر لایه گرافن لایه نشانی شد. سرانجام زیر لایه‌ها در اتاقک تمیز خشک شدند دیده می‌شود.

شکل‌های ۶ الف و ۶ ب، به ترتیب نشان دهنده تصاویر SEM و AFM نقاط کوانتومی گرافن پس از فرآیند سونش بر زیرلایه هستند. چنان که در شکل ۶ الف دیده می‌شود، پخش نقاط کوانتومی مطلوب است. همچنین با توجه به شکل ۶ ب، نقاط کوانتومی گرافن از حالت کلوخه‌ای خارج شده‌اند و فاصله مناسبی از هم دیگر دارند.

پس از لایه‌نشانی نقاط کوانتومی بر زیرلایه، یک تصویر کلی از سطح نمونه توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی مناسب تهیه شد. این تصویر که در شکل ۵ ارائه شده است نشان می‌دهد که با گذر زمان، نقاط کوانتومی به صورت کلوخه‌ای در آمده‌اند. بنابراین برای تبدیل شدن به حالت آرمانی (شکل ۴ ب)، اثر فرایندهای مختلف سونش بر این ذرات بررسی شد. برای جلوگیری از کلوخه‌ای شدن نقاط کوانتومی سونش سه مرحله‌ای با امواج فراصوت ۵۰ هرتز (دو ساعت) و ۲۰ کیلوهرتز (نیم ساعت) دستگاه فرامرکز گریزی و (سانتریفیوژ) rpm ۱۱۰۰۰ در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه انجام شد. امواج فراصوت جهت اطمینان از پخش و باز شدن کلوخه‌های احتمالی و سانتریفیوژ برای جداسازی ذرات درشت‌تر و سنگین‌تر از ذرات ریزتر و سبکتر به کار رفتند. ذرات



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری از نقاط کوانتومی گرافن کلوخه شده بر زیرلایه.



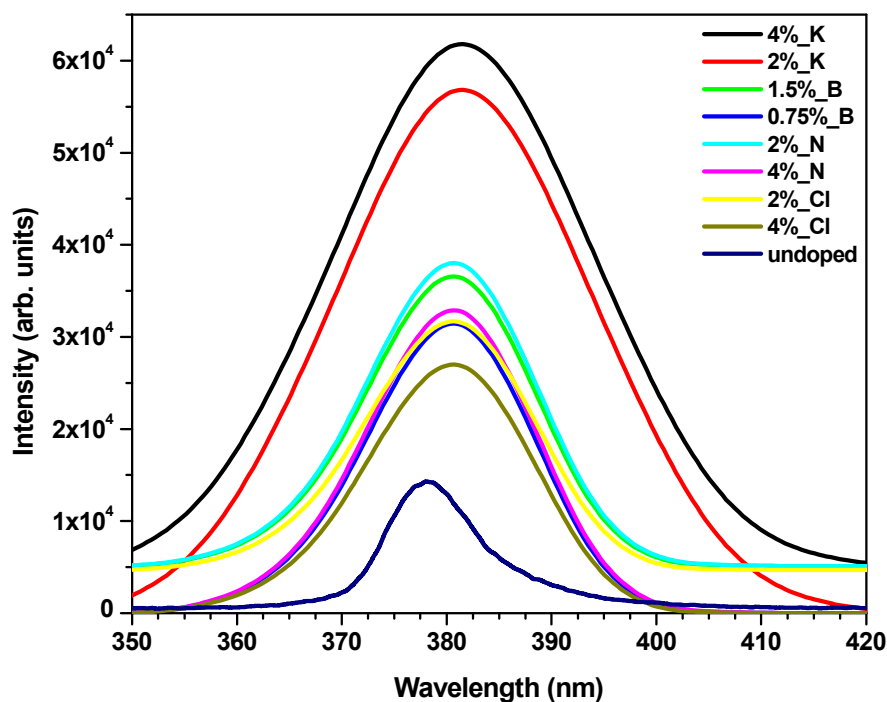
شکل ۶ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و (ب) تصویر AFM از نقاط کوانتومی گرافن نهشته شده بر زیرلایه گرافن.

گسیلی از نقاط کوانتومی آلاینش شده افزایش می‌یابد. مقایسه شدت نسبی طیف‌های گسیلی نقاط کوانتومی آلاینش شده (شکل ۷) نشان می‌دهد که شدت قله مربوط به پتاسیم از همه بیشتر بوده که به احتمال بسیار بدلیل شعاع اتمی بزرگتر آن است.

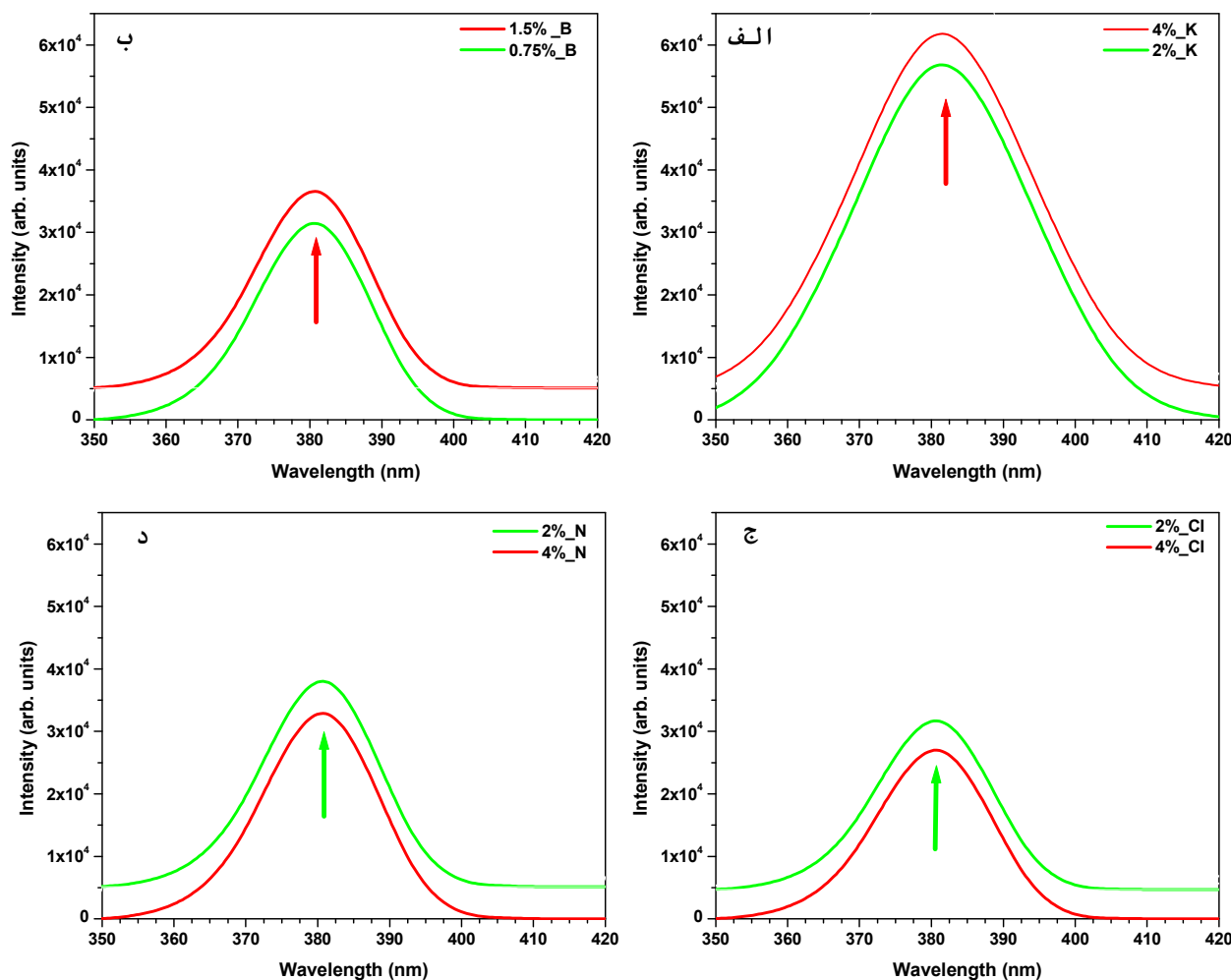
برداشت

اثر آلاینش نقاط کوانتومی گرافن نهشته شده بر زیر لایه گرافن رشد داده شده بر کاربید سیلیکون بر طیف‌های گسیلی از آن‌ها بررسی شد. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی یکنواختی سطح گرافن رشد داده شده بر کاربید سیلیکون را نشان می‌دهد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز توزیع یکنواخت نقاط کوانتومی گرافن بر زیر لایه را نشان می‌دهد. با افزایش میزان آلاینش عناصر بور و پتاسیم، شدت طیف‌های گسیلی از نقاط کوانتومی آلاینش شده افزایش و با افزایش آلاینده‌های نیتروژن و کلر، شدت آن‌ها کاهش می‌یابد. با آلاینش به مقدار یکسان از عناصر، شدت قله‌های مربوط به پتاسیم بیشتر از بور و شدت قله‌های نقاط کوانتومی گرافن آلاینش شده با نیتروژن نسبت به کلر بیشتر است. به‌طور کلی بیشترین افزایش شدت طیف گسیلی مربوط به پتاسیم و بیشترین کاهش مربوط به کلر است.

پدیده نورتایی (pL) در نیمرساناها اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پدیده الکترون‌های نیمرسانا با جذب فوتون‌های نور برانگیخته شده و طی فروانگیزش به تراز پایین تر نور گسیل می‌کنند [۳۶]. در اینجا به منظور بررسی اثر آلاینش نقاط کوانتومی با عناصر پتاسیم (K)، کلر (Cl)، نیتروژن (N) و بور (B) و همچنین میزان آلاینش، برای لایه‌های گرافن که نقاط کوانتومی آلاینش و سونش شده بر آن‌ها به‌طور یکنواخت توزیع شده‌اند طیف‌سنجی نور تابانی انجام شد. شکل‌های ۷ و ۸ طیف‌های نورتایی نقاط کوانتومی گرافن آلاینش شده با پتاسیم، بور، نیتروژن و کلر بر زیر لایه گرافن را نشان می‌دهند. از آنجا که از نور فرابنفش با طول موج ۳۸۰ نانومتر برای مشخصه‌یابی استفاده شد، طیف گسیلی در گستره نور مرئی قله‌ای ندارد و قله اصلی در حدود ۳۸۰ نانومتر است. دیده می‌شود که شدت قله‌های نقاط کوانتومی گرافن آلاینش شده با نیتروژن نسبت به کلر بیشتر است. این تفاوت در شدت قله‌ها به احتمال بسیار به دلیل بیشتر بودن الکترون‌های نیتروژن (۳/۴) و انرژی یونش آن در حالت مولکولی (۱۵۰۳ kJ/mol) و در حالت اتمی (۱۴۰۲ kJ/mol) از الکترون‌های کلر (۳/۱۶) و انرژی یونش آن (۳۴۹ kJ/mol) است. افزون بر آن، با افزایش آلاینش (برای بور از ۰.۷۵٪ به ۱.۱۵٪ و برای پتاسیم از ۰.۲٪ به ۰.۴٪) شدت طیف



شکل ۷ طیف نورتایی (PL) نقاط کوانتومی گرافن آلاینش شده با پتاسیم، بور، نیتروژن و کلر نهشته شده بر زیر لایه گرافن



شکل ۸ طیف نورتایی (PL) نقاط کوانتومی گرافن آلایش شده با (الف) پتاسیم (۲٪ و ۴٪)، (ب) بور (۰٫۷۵٪ و ۱٫۵٪)، (پ) کلر (۲٪ و ۴٪) و (ت) نیتروژن (۲٪ و ۴٪).

مراجع

Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 109-116.

[4] Khosroabadi S., Kazemi A., "High efficiency gallium phosphide solar cells using TC-doped absorber layer", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 104 (2018) 116-123.

[5] Fadavieslam M.R., Kazemi A., "Influence of Ag concentration on the structure, optical and electrical properties of SnS₂: Ag thin films prepared by spray pyrolysis deposition", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28 (2017) 3970-3977.

[6] Geim, A.K., "Graphene: status and prospects", science 324.5934 (2009) 1530-1534.

[1] Zargar S., Poormoghadam A., Farbod M., "Fabrication and study of structural, optical and magnetic properties of Zn_{1-x}Ni_xO nanoparticles", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 309-316.

[2] Fadavieslam M.R., "Deposition and characterization of SnO₂:Sb thin films fabricated by the spray pyrolysis method", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 739-746.

[3] Niyafar M., "Study of magnetic properties and Mössbauer spectroscopy of Y_{3-x}Bi_xFe₅O₁₂ prepared by sol-gel method", Iranian Journal of

- [17] Hasanpour A., Gharibshahi M., Niyarifar M., "Effect of cerium doping on the magnetic properties of yttrium iron garnet thin films on quartz substrates", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 23 (2015) 469-478.
- [18] Sarraf N., Hasanpour A., Hashemizade A., Akhound A., "Investigation of room temperature ferromagnetic behavior in Mn doped ZnO nanoparticles", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 23 (2015) 383-388.
- [19] Salimian S., Farjami S., "The effect of temperature and annealing on the structural properties of CdS: Mn semiconductor nanocrystals", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 17 (2010) 621-628.
- [20] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A., "Electric field effect in atomically thin carbon films", science 306, 5696 (2004) 666-669.
- [21] Li X., Cai W., Colombo L., Ruoff R.S., "Evolution of graphene growth on Ni and Cu by carbon isotope labeling", Nano letters 9, 12 (2009) 4268-4272.
- [22] Sutter P.W., Flege J.I., Sutter E.A., "Epitaxial graphene on ruthenium", Nature materials, 7 (2008) 406-411.
- [23] Lee S.M., Kim J.H., Ahn J.H., "Graphene as a flexible electronic material: mechanical limitations by defect formation and efforts to overcome", Materials Today 18, 6 (2015) 336-344.
- [24] Somani P.R., Somani S.P., Umeno M., "Planer nano-graphenes from camphor by CVD", Chemical Physics Letters, 430 (2006) 56-59.
- [25] Robinson JT, Perkins FK, Snow ES, Wei Z, Sheehan PE. "Reduced graphene oxide molecular sensors", Nano letters 8, 10 (2008) 3137-3140.
- [26] Berger C., Song Z., Li T., Li X., Ogbazghi A.Y., Feng R., Dai Z., Marchenkov A.N., Conrad E.H., First P.N., De Heer W.A., "Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics", The Journal of Physical Chemistry B 108, 52 (2004) 19912-19916.
- [27] Berger C., Song Z., Li X., Wu X., Brown N., Naud C., Mayou D., Li T., Hass J., Marchenkov [7] Fredrik S., Geim A.K., Morozov S.V., Hill E.W., Blake P., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., "Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene", Nature materials 6, 9 (2007) 652-655.
- [8] Kaushik P.D., Rodner M., Lakshmi G.B.V.S., Ivanov I.G., Greczynski G., Palisaitis J., Eriksson J., Solanki P., Aziz A., Siddiqui A.M., Yakimova R., "Surface functionalization of epitaxial graphene using ion implantation for sensing and optical applications", Carbon, 157 (2020) 169-184..
- [9] Kaushik P.D., Ivanov I.G., Lin P.C., Kaur G., Eriksson J., Lakshmi G.B.V.S., Avasthi D.K., Gupta V., Aziz A., Siddiqui A.M., Syväjärvi M., "Surface functionalization of epitaxial graphene on SiC by ion irradiation for gas sensing application", Applied Surface Science, 403 (2017) 707-716.
- [10] Ajayan, P.M., James M.T., "Nanotube composites", Nature 447, 7148 (2007) 1066-1068.
- [11] Buehler, M.J., "Nanomaterials: Strength in numbers", Nature Nanotechnology 5, 3 (2010) 172.
- [12] Young-Woo S., Cohen M.L., Louie S.G., "Erratum: Energy Gaps in Graphene Nanoribbons", Physical Review Letters 98, 8 (2007) 089901.
- [13] Raveendran N.R., Blake P, Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M., Geim A.K., "Fine structure constant defines visual transparency of graphene", Science 320, 5881 (2008) 1308-1308.
- [14] Çağlar Ö.G., Meyer J.C., Erni R., Rossell M.D., Kisielowski C., Yang L., Park C.H., Crommie M.F., Cohen M.L., Louie S.G., Zettl A., "Graphene at the edge: stability and dynamics", science 323, 5922 (2009) 1705-1708.
- [15] Ritter K.A., Lyding J.W., "The influence of edge structure on the electronic properties of graphene quantum dots and nanoribbons", Nature materials 8, 3 (2009) 235-242.
- [16] Rabiee F., Ghazi M.A., Izadifar M., "Investigation of sensing properties of cobalt doped nickel-ferrite nanostructures synthesized by microwave method", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 23 (2016) 689-698.

a comparison with other SiC polytypes", Carbon 57 (2013) 477-484.

[32] Yazdi G.R., Iakimov T., Yakimova R., "Epitaxial graphene on SiC: a review of growth and characterization", Crystals 5 (2016) 53.

[33] Backes C., Abdelkader A.M., Alonso C., Andrieux-Ledier A., Arenal R., Azpeitia J., Balakrishnan N., Banszerus L., Barjon J., Bartali R., Bellani S., "Production and processing of graphene and related materials", 2D Materials 2 (2020) 022001.

[34] Monshi A., Foroughi M.R., Monshi M.R., "Modified Scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD", World journal of nano science and engineering 3 (2012) 154-160.

[35] Ivanov I.G., Hassan J.U., Iakimov T., Zakharov A.A., Yakimova R., Janzén E., "Layer-number determination in graphene on SiC by reflectance mapping", Carbon 77 (2014) 492-500.

[36] Wang Z., Zeng H., Sun L., "Graphene quantum dots: versatile photoluminescence for energy, biomedical, and environmental applications", Journal of Materials Chemistry C. (2015) 1157-65.

A.N., Conrad E.H., "Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial graphene", Science 312, 5777 (2006) 1191-1196.

[28] Yakimova R., Virojanadara C., Gogova D., Syväjärvi M., Siche D., Larsson K., Johansson L.I., "Analysis of the formation conditions for large area epitaxial graphene on SiC substrates", Materials Science Forum, 645 (2010) 565-568.

[29] Suk J.W., Lee W.H., Lee J., Chou H., Piner R.D., Hao Y., Akinwande D., Ruoff R.S., "Enhancement of the electrical properties of graphene grown by chemical vapor deposition via controlling the effects of polymer residue", Nano letters 13, 4 (2013) 1462-1467.

[30] Pirkle A., Chan J., Venugopal A., Hinojos D., Magnuson C.W., McDonnell S., Colombo L., Vogel E.M., Ruoff R.S., Wallace R.M., "The effect of chemical residues on the physical and electrical properties of chemical vapor deposited graphene transferred to SiO₂", Applied Physics Letters 99, 12 (2011) 122108.

[31] Yazdi G.R., Vasiliauskas R., Iakimov T., Zakharov A., Syväjärvi M., Yakimova R., "Growth of large area monolayer graphene on 3C-SiC and