

طراحی و ساخت دیود شاتکی نانوگرافین - سیلیکون و بررسی نقش نانولایه گرافین در پاسخ‌دهی نوری آن

مینا امیرمزلقانی^{۱*}، فرشید رئیسی^۱، فرشته قهرمانی^۲ و مهدی خواجه^۳

- ۱- دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- ۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، گروه فیزیک، تهران، ایران
- ۳- دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۱۱/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۱/۱۲/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۲/۰۲/۱۵

چکیده

در این پژوهش پاسخ‌دهی نوری نانولایه گرافین، به کمک ساخت دیود شاتکی نانوگرافین-سیلیکون مورد بررسی قرار گرفته است. جهت ایجاد پیوند شاتکی، نانولایه‌ای از گرافین بر روی زیرلایه‌ای از سیلیکون قرار گرفته است. زیرلایه سیلیکونی تا ضخامت ۲۷۰ نانومتر اکسید شده است و پس از لایه‌نشانی‌های کروم-طلا (ضخامت لایه‌های کروم-طلا به ترتیب ۵۰ و ۱۵۰ نانومتر است)، با استفاده از ماسک مخصوصی الگو شده است. منحنی مشخصه‌های (جریان-ولتاژ) دیود شاتکی نانوگرافین-سیلیکون تحت تابش‌هایی با طول موج‌های ۶۷۰، ۷۰۰ و ۱۱۰۰ نانومتر و نیز تحت تابش نور زرد مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. به منظور مشخص شدن نقش نانولایه گرافین در ایجاد جریان نوری، امواج ۷۰۰ و ۱۱۰۰ نانومتری به پشت قطعه ساخته شده نیز تابانده شده‌اند و جریان‌های نوری تولید شده از پشت و جلوی قطعه با هم مقایسه شده‌اند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که جریان نوری تولید شده تحت تابش‌های ۷۰۰ و ۱۱۰۰ نانومتری و از جلوی قطعه، به ترتیب ۲۳ برابر و ۱۷ برابر نسبت به پشت قطعه افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند تاثیر نانولایه گرافین را در امر آشکارسازی مشخص کند و همچنین مشخص کننده مقدار زیاد جریان نوری تولید شده در گرافین در حالت تابش از جلو است. منحنی مشخصه‌های قطعه تحت تابش‌های ۶۷۰ نانومتر و نور زرد، علاوه بر نشان دادن جریان نوری تولید شده، نشان دهنده ولتاژ نوری تولید شده در قطعه نیز است و کاربرد آن به عنوان سلول خورشیدی را آشکار می‌کنند. در این پژوهش، همچنین به تحلیل فیزیکی خواص نوری نانولایه گرافین پرداخته شده است و تئوری‌هایی که تولید جریان نوری در گرافین را بیان می‌کنند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: نانوگرافین، سیلیکون، دیود شاتکی، سلول خورشیدی.

۱- مقدمه

مثل الماس و گرافیت (آلوتروپ سه بعدی کربن) از زمان‌های قدیم شناخته شده‌اند و در طبیعت بیشتر یافت می‌شوند و برخی دیگر مثل فولرین (آلوتروپ صفر بعدی) و نانولوله‌های کربنی (آلوتروپ یک بعدی) از ۲۶-۲۰ سال پیش کشف شده‌اند، که تماماً به طور مصنوعی ساخته می‌شوند و یکی از زمینه‌های مهم در نانوفناوری را تشکیل

کربن یکی از مهمترین عناصر در جدول تناوبی است که ساختارهای هندسی مختلفی به خود می‌گیرد و رفتارهای غیرمعمول و پیچیده‌ای در تشکیل هر کدام از این ساختارها از خود نشان می‌دهد. برخی از این ساختارها

* عهده‌دار مکاتبات: مینا امیرمزلقانی

نشانی: تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده برق و کامپیوتر

تلفن: ۰۲۱-۸۸۸۸۲۹۹۱، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۸۸۲۹۹۱، پست الکترونیکی: mazlaghani@ee.kntu.ac.ir

ابعاد بسیار کوچک و مشخصه‌های ذکر شده در بالا، نقش مهمی در ساخت قطعات نانوالکترونیک ایفا می‌کند. ساخت گرافین، علیرغم ساختار بسیار ساده آن فرآیندی بسیار حساس است. تاکنون گرافین به روش‌های مختلفی از جمله ورقه ورقه کردن گرافیت، روش شیمیایی، روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی (CVD) ساخته شده است [۲۰]. کاربرد گرافین به سرعت رشد کرده و در زمینه‌های مختلفی از جمله نانوالکترونیک، الکترودهای شفاف و الکترونیک نوری مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. از سویی دیگر پیوندهای شاتکی بین گرافین/اکسید گرافین، نانونوارهای گرافینی و گرافیت HOPG/سطوح سیلیکونی گزارش شده‌اند [۲۵-۲۱]. استفاده از گرافین به عنوان الکتروود نامرئی در سلول‌های خورشیدی نیز گزارش شده است [۲۸-۲۶]. بطوریکه در این نوع از سلول‌های خورشیدی نور از گرافین عبور کرده و با سیلیکون برخورد می‌کند و موجب ایجاد جفت الکترون-حفره در زیرلایه سیلیکونی می‌گردد. نکته حائز اهمیت در این قطعات، استفاده از گرافین به عنوان لایه جمع‌کننده حامل‌های تولید شده است و نقش گرافین در تولید جریان نوری مورد بررسی قرار نگرفته است. آنچه که این مقاله درصدد بیان آن است نشان دادن خاصیت آشکارسازی ماده گرافین در دیود شاتکی گرافین-سیلیکون است. این خاصیت در این مقاله، به کمک تابش از جلو و پشت به دیود شاتکی، مورد بررسی قرار گرفته و اثبات شده است. نشان دادن خاصیت آشکارسازی نوری در گرافین در محدوده فرکانسی فروسرخ نزدیک (Near Infrared) از اهمیت خاصی برخوردار است چرا که این امر مقدمه‌ای برای استفاده از آن به عنوان آشکارسازهای محدوده‌های فرکانسی دیگر از جمله فروسرخ میانی و بالایی و همچنین محدوده فرکانسی تراهرتز است. در ادامه، مطالب به صورت زیر دسته‌بندی و بیان شده است. بخش ۱ به بیان تحلیلی از فیزیک گرافین و ذکر ویژگی‌های خاص آن اشاره دارد، خواص نوری گرافین بر اساس تئوری‌های موجود، در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش ۲ به توضیح نحوه ساخت قطعه می‌پردازد. در بخش ۳ نتایج بدست آمده از آزمایشات و منحنی مشخصه‌های قطعه تحت تابش‌های مختلف، مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

می‌دهند [۱]. نانولایه‌ای از کربن، گرافین نامیده می‌شود و ساختار اصلی سایر نانومواد کربنی را تشکیل می‌دهد. بطوریکه به زبان ساده می‌توان گفت: با لوله کردن آن "نانولوله‌های کربنی"، از پیچیدن آن بدور خودش تحت ساختار خاص "فولرین" و از روی هم انباشتن صفحات آن "گرافیت" تشکیل می‌شود. این بلور نانومتری به عنوان اولین بلور دو بعدی پایدار در سال ۲۰۰۴ میلادی در آزمایشگاه گروه گیم به روش ورقه ورقه کردن میکرومکانیکی ساخته شد [۲].

پس از ساخته شدن آن، به علت رفتار شگفت‌آور و غیرمعمول این سیستم دو بعدی و کاربردهای عملی بالقوه این نانوماده، تحقیقات گسترده‌ای بر روی آن صورت گرفت [۳،۴].

این ساختار کریستالی دو بعدی بدست آمده نه تنها شدیداً پایدار و پیوسته است بلکه یک کریستال با کیفیت بالا است، بطوریکه حامل‌های بار می‌توانند بدون پراکندگی مسافت حدود هزار برابر فاصله بین اتمی را بپیمایند، به عبارت دیگر موبیلیته (تحرك پذیری) حامل‌ها بالا است که باعث می‌شود برخی از پارامترهای این ماده بسیار بهتر از بهترین فلزات باشند. به عنوان مثال هدایت الکتریکی آن هزار برابر بزرگتر از بهترین فلز است. علاوه بر این هدایت گرمایی آن نیز بسیار بالاتر از مس است [۵،۶]. می‌توان گفت که دلیل اصلی توجه بسیار زیاد به گرافین از مشخصات فیزیکی نامتعارف آن نسبت به سایر مواد چگال ناشی می‌شود که خواص الکترونیکی و اپتیکی بی‌نظیر آن را نیز توجیه می‌کند. این خواص، گرافین را نامزد مناسبی برای جایگزینی سیلیکون و مس در مدارهای نانوالکترونیک و همچنین استفاده از آن در ساخت قطعات مختلف نانو قرار می‌دهد. علاوه بر این بسیاری از فیزیکدانان معتقدند که پتانسیل اصلی کاربرد گرافین در زمینه فوتوالکترونیک نهفته است [۷،۸] که جایگاه خوبی برای ترکیب مشخصات الکترونیکی و اپتیکی این نانومواد است، که از این مشخصات فوتوالکترونیکی، در ساخت افزاره‌هایی نظیر سلول‌های خورشیدی (Solar Cell)، پرده‌های لمسی (Touch Screen)، لیزرهای خیلی سریع و آشکارسازهای نوری (Photo Detectors) استفاده شده است [۹-۱۹]. گرافین به علت قابلیت ساخته شدن در

پدیده غالب در جذب امواج در محدوده فرکانسی فروسرخ و مرئی است. در حالیکه گزارهای درون بانندی عامل اصلی جذب امواج الکترومغناطیسی در محدوده تراهرتز است. رسانش دینامیکی (یا اپتیکی) جهانی گرافین (G) پارامتری است که برای توصیف مشخصات اپتیکی فیلم‌های نازک بکار می‌رود. زمانیکه μ پتانسیل شیمیایی صفر است، رسانش از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$G(\omega) = \frac{\pi e^2}{w} |V(\omega)|^2 D(\omega) \left[f\left(-\frac{\hbar\omega}{2}\right) - f\left(\frac{\hbar\omega}{2}\right) \right] \quad (2)$$

بطوریکه $V(\omega)$ المان ماتریس سرعت بین حالت اولیه با انرژی $\hbar\omega/2$ و حالت نهایی با انرژی $\hbar\omega/2$ است و $D(\omega)$ دانسیته حالت‌ها و $f(\omega)$ تابع توزیع فرمی دیراک است. این در حالی است که در تئوری برای فرمیون‌های دیراک دو بعدی با رابطه پاشندگی خطی، پیشگویی شده بود که اگر انرژی فوتون تابیده خیلی بیشتر از دما و انرژی فرمی باشد، هدایت اپتیکی G برابر مقدار ثابت جهانی $G_0 = e^2/4\hbar \approx 6.08 \times 10^{-5} (\Omega^{-1})$ است که اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هم این را تایید می‌کنند [۸]. اکنون با کمک رابطه ۲ نیز می‌توان این موضوع را نشان داد. بطوریکه اگر در گرافین تنها جهش بین نزدیک‌ترین همسایه‌ها مدنظر باشد، دانسیته حالت‌ها در $\varepsilon = E/2 = \hbar\omega/2$ برای فرمیون‌های دیراک دو بعدی برابر $D(\omega) = \hbar\omega/\pi\hbar^2 v_F^2$ می‌شود و $V(\omega) = V_F$ است [۸] که در دمای صفر رسانش را داریم:

$$G(\omega) = G_0 \propto \frac{e^2}{\hbar} \quad (3)$$

رابطه ۳ بیان می‌کند که هدایت اپتیکی جهانی مستقل از فرکانس است و به پارامترهایی که به طور معمولی مشخصات اپتیکی مواد را تعیین می‌کنند، وابسته نیست. این نتیجه‌ای از ساختار الکترونیکی غیرمعمول در انرژی کم گرافین تک لایه است که باندهای مخروطی الکترون و حفره همدیگر را در نقاط دیراک قطع می‌کنند. در سیستم‌های دو بعدی، رسانش اپتیکی با مشخصات اپتیکی ماده (میزان عبور T، جذب P و انعکاس R) رابطه مستقیم دارد [۸]. بنابراین با ثابت بودن G برای گرافین تک لایه

۱-۱- تحلیل فیزیکی و ویژگی‌های نوری گرافین

گرافین یک صفحه کریستالی مسطح شش گوشه به ضخامت یک اتم، ساخته شده از اتم‌های کربن است که با فاصله‌های مساوی a (تقریباً $a = 1/42 \text{ \AA}$) بوسیله پیوند محکم کووالانسی به هم متصل شده‌اند و در حالت متقارن نسبت به هم قرار گرفته‌اند. ساختار شبکه لانه زنبوری گرافین از ساختارهای شناخته شده شبکه براوه نیست، بنابراین منجر به دو اتمی شدن سلول واحد در آن می‌شود. که این امر خود منجر به هم‌پوشانی توابع موج الکترونی اتم‌ها و استفاده از تقریب تنگابست برای بررسی فیزیک حامل‌ها خواهد شد [۲۹]. از اینرو هامیلتونین گرافین برحسب دو زیر شبکه اتمی A و B به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = t \sum_{(i,j)} (|A_i\rangle\langle B_j| + |B_j\rangle\langle A_i|) \quad (1)$$

$\langle i, j \rangle$ جمع روی همسایه‌های نزدیک است. با جایگذاری ویژه مقادیر هامیلتونی از روی تابع بلوخ در رابطه ۱ و حل هامیلتونی در انرژی‌های کم، اثبات می‌شود که این هامیلتونی، همان هامیلتونی ذرات کوانتومی نسبیتی بدون جرم دیراک است که در آن سرعت نور با سرعت فرمی ذرات ($v_F \approx (1/300)c$)، جایگزین شده است. بنابراین ذرات گرافین، فرمیون‌های دیراک بدون جرم هستند که منجر به خطی شدن رابطه پاشندگی و مشاهده خواص الکترونیکی و اپتیکی متفاوت می‌باشند [۳۰]. چند نمونه مهم از این خواص الکترونیکی مانند اثر کوانتومی هال [۳۱]، پارادوکس کلایین [۳۲]، کمینه رسانش [۳۳] و انتقال بالستیک [۴] و چند نمونه از خواص اپتیکی بی‌نظیر آن مثل ثابت بودن رسانندگی اپتیکی و در نتیجه ثابت بودن ضریب جذب، عبور و انعکاس به صورت عبارتی از ثابت ساختاری خوب (Fine Structure Constant) [۸]، پهنای طیفی گسترده، میزان جذب قابل اشباع و اثر ترموالکتریک [۳۴] می‌توان اشاره کرد. جذب امواج الکترومغناطیسی در گرافین بر اساس گزارهای بین بانندی (Interband Transition) و درون بانندی (Intraband Transition) صورت می‌گیرد [۹]. گزارهای بین بانندی

و سیلیکون است که برای تحقق این امر ابتدا زیرلایه سیلیکونی اکسید شده و پس از لیتوگرافی به کمک ماسک طراحی شده، الگو شده است و سپس گرافین بر روی آن قرار می‌گیرد. گام نهایی در ساخت و تست قطعه، برقراری اتصالات الکتریکی به گرافین و سیلیکون برای مشاهده جریان عبوری از قطعه خواهد بود. در ادامه هر یک از مراحل ساخت، به طور کامل تری توضیح داده می‌شود.

۲-۱-۱- تولید گرافین

برای تولید گرافین به روش ورقه کردن مکانیکی ابتدا نیاز به گرافیت است.

گرافیتی که دارای سطح بسیار صاف و صیقلی باشد که با نام HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) شناخته می‌شود [۲۰]. برای شروع کار ابتدا ویفر سیلیکون از نوع p و آلیایده شده تا 10^{17} cm^{-1} پس از تمیزسازی، تا حدود ۲۷۰ نانومتر درون کوره اکسید می‌شود. مرحله بعد ورقه کردن گرافیت مورد نظر بر روی سطح ویفر آماده شده است که این کار با استفاده از نوار چسب صورت می‌گیرد که به روش ورقه کردن میکرومکانیکی معروف است. در این روش اساس کار شکستن باندهای واندروالس داخلی گرافیت برای تشکیل گرافین است.

لایه‌های گرافین تولید شده را می‌توان با استفاده از میکروسکوپ نوری مشاهده کرد. زمانی که نور میکروسکوپ نوری به نمونه مورد نظر می‌تابد، بسته به ضخامت اکسید، شکست نور به صورتی خواهد بود که می‌توان لایه لایه شدن گرافین را با میکروسکوپ نوری مشاهده کرد. بطوریکه رنگ لایه‌های مختلف در زیر میکروسکوپ نوری متفاوت خواهد بود. شکل ۱ چند نمونه از این لایه‌ها را که به کمک میکروسکوپ نوری تصویربرداری شده‌اند، نشان می‌دهد که قابل مقایسه با نمونه‌های مشابه تولید شده در مقالات است [۲۰]. اعداد نوشته شده بر روی شکل نشان دهنده تعداد لایه‌های گرافین است. بطوریکه می‌توان گفت که تعداد لایه‌های گرافین در قسمتی که با عدد ۲ نشان داده شده است ۲ برابر قسمتی است که با عدد ۱ نشان داده است و همینطور قسمتی که با عدد ۳ نشان داده شده است سه برابر قسمتی است که با عدد ۱ نشان داده شده است.

در انرژی‌های کم (که در این شرایط حاملان بار فرمیون‌ها هستند)، ضریب جذب، ضریب عبور و میزان انعکاس هم ثابت خواهد بود. بنابراین ضریب عبور از یک گرافین تک لایه معلق می‌تواند بوسیله بکار بردن معادلات فرسنل (Fresnel Equations) در محدوده فیلم نازک برای یک ماده با قابلیت هدایت اپتیکی ثابت جهانی به صورت زیر داده شود [۸]:

$$T = (1 + 2\pi \frac{G}{c})^{-2} = (1 + \frac{1}{2} \pi \alpha)^{-2} \cong 1 - \pi \alpha \cong 97.7\% \quad (4)$$

بنابراین میزان جذب (عبور) گرافین تک لایه در محدوده فوتون‌های تابیده شده در رژیم مرئی و فرسرخ مقداری ثابت و برابر $\frac{2}{3}\%$ است. از سوی دیگر، هدایت نوری گرافین در محدوده تراهرتز که بواسطه گزاره‌های درون بانندی صورت می‌گیرد با کمک رابطه Drude قابل بیان است [۹]:

$$G(\omega) = G(DC) \frac{E_f}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5)$$

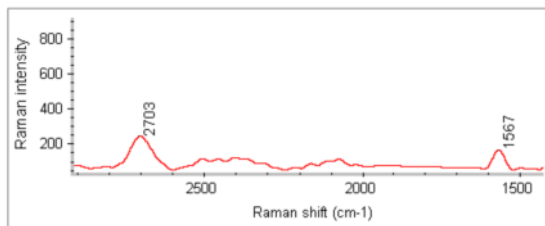
در حالیکه $G(DC)$ هدایت الکتریکی DC، E_f تراز فرمی و τ زمان پراکندگی اندازه حرکت حامل‌هاست. بنابراین گرافین در مقابل امواج الکترومغناطیسی در محدوده تراهرتز، همانند یک فلز عمل می‌کند، در حالیکه تحت تابش‌های مرئی و فرسرخ دارای هدایت نوری ثابت است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- فرآیند ساخت دیود شاتکی گرافین-سیلیکون

در این تحقیق ابتدا گرافین به روش ورقه کردن مکانیکی تولید شده و به صورت رندومی بر روی نقاط مختلف بستر سیلیکون قرار گرفته است که می‌توان با کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرافین‌های تولید شده را مشاهده نمود. استفاده از طیف‌نگاری رامان انجام شده، ابزاری برای تأیید تولید گرافین برای استفاده در قطعه مورد نظر است. پس از تولید گرافین، مرحله بعد، ایجاد پیوند شاتکی بین گرافین

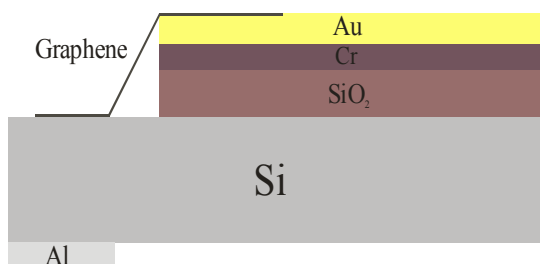
پیک باند G به سمت طول موجهای کوتاهتر و باند 2D به سمت طول موجهای بزرگتر منتقل می‌شوند.



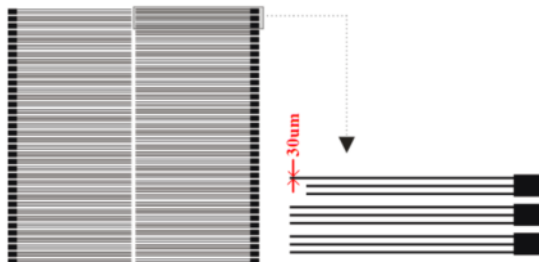
شکل ۳: طیف رامان لایه‌های گرافین تولید شده با دو پیک اصلی G باند و 2D باند.

۲-۱-۲- طراحی ماسک

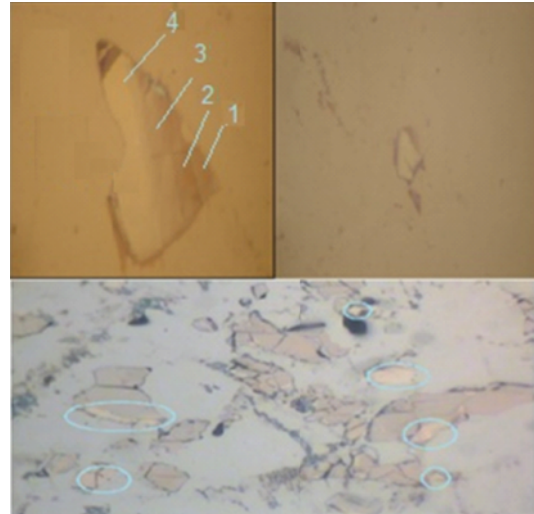
برای ایجاد پیوند شاتکی بین گرافین و سیلیکون لازم است که لایه‌های گرافین از یکسو به یکی از پایانه‌های دیود متصل باشد و از سوی دیگر با سیلیکون در تماس باشد. پایانه دیگر دیود از پشت ویفر سیلیکونی گرفته می‌شود. شکل ۴ نحوه برقراری این اتصالات را نشان می‌دهد. برای برقراری این اتصالات نیاز به لیتوگرافی نانومتری است. در این تحقیق، برای رفع این مشکل و استفاده از لیتوگرافی میکرومتری، ماسک‌هایی با طراحی‌های خاص تولید شد که نمونه‌ای از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. طراحی این ماسک‌ها به کمک نرم‌افزار Corel Draw صورت گرفته است.



شکل ۴: شماتیکی از چگونگی ساخت پیوند شاتکی.



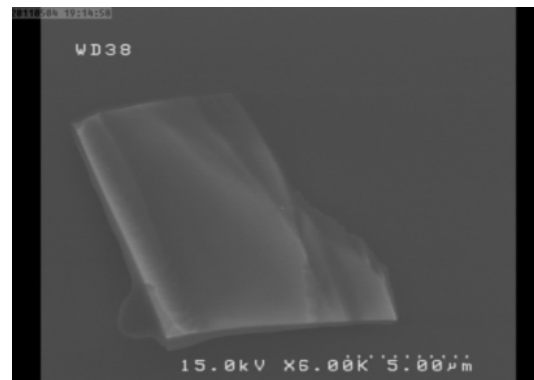
شکل ۵: ماسک طراحی شده که سطح ویفر به کمک آن الگو شده است.



شکل ۱: تصاویر گرافین بدست آمده در زیر میکروسکوپ نوری، ابعاد نمونه‌ها متفاوت و در حدود چند ده میکرومتر است.

شکل ۲ نیز تصویر SEM از نمونه چند لایه را نشان می‌دهد. در این شکل نیز لایه لایه بودن گرافین به وضوح قابل مشاهده است.

طیف‌سنجی رامان نیز ابزاری دقیق برای مطالعه مواد کربنی می‌باشد. شکل ۳ طیف رامان گرفته شده از نمونه را نشان می‌دهد که نشان دهنده صحت روش تولید و همچنین چند لایه بودن گرافین است.

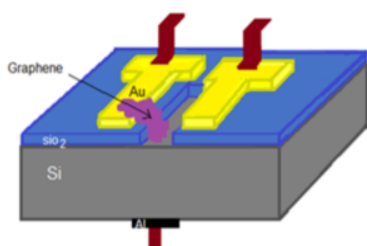


شکل ۲: تصویر SEM از گرافین.

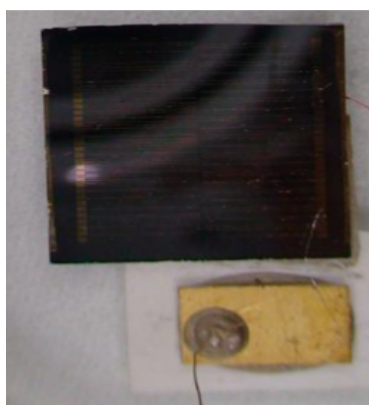
نتیجه رامان ارائه شده در این شکل دو پیک عمده مربوط به لایه گرافینی را در 1576 cm^{-1} (G باند) و 2703 cm^{-1} (2D باند) نشان می‌دهد که دلیل روشنی بر چند لایه بودن گرافین مورد نظر است. زیرا در گرافین تک لایه پیک مربوط به باند G و 2D به ترتیب در 1580 cm^{-1} و 2670 cm^{-1} دیده می‌شوند که با افزایش تعداد لایه‌ها،

اتصالات الکتریکی از یک سو به گرافین و از سوی دیگر به سیلیکون برقرار باشد. به منظور ایجاد اتصال بر روی سیلیکون، لایه‌نشانی آلومینیوم پشت ویفر صورت می‌گیرد و در دمای ۴۵۰ درجه و به مدت ۵ دقیقه فرآیند گرما دادن (Rapid Thermal Annealing) انجام می‌شود تا اتصال اهمی بین آلومینیوم و سیلیکون برقرار شود. از سوی دیگر از پدهایی که در انتهای هر نوار بر روی قطعه قرار دارند به منظور برقراری اتصال از گرافین استفاده می‌شود.

در انتها به کمک فرآیند Ultrasonic Wire Bonding، باندهایی با ضخامت ۱۷ میکرومتر از پدها گرفته شده و نمونه آماده تست می‌گردد و می‌توان مشخصات جریان-ولتاژ عبوری از آن را مشاهده نمود. شکل ۷ شماتیکی از قطعه مورد نظر و شکل ۸ یک نمونه از ویفر الگو شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷: شماتیکی از قطعه نهایی.



شکل ۸: تصویری از قطعه ساخته شده، ابعاد ویفر ۱۷ میلی‌متر در ۱۷ میلی‌متر است.

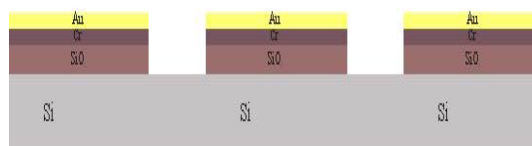
۳- نتایج و بحث

شکل ۹ منحنی مشخصه دیود شاتکی گرافین-سیلیکون ساخته شده را در بازه ولتاژی (۱،۱-) ولت نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود در این ماسک نوارهای ۲۰-۳۰ میکرومتری با فاصله حدود ۱۰۰ میکرومتر از یکدیگر قرار گرفته‌اند و هر سه نوار در انتها به یک پد متصل هستند و این طرح به طور متناوب بر روی ویفر تکرار شده‌اند. چنانچه بعد از لایه‌نشانی فلز بر روی ویفر، سطح ویفر با این ماسک الگو شود و سپس لایه‌نشانی گرافین صورت گیرد، در این شرایط گرافین از یک سو بر روی نوارهای فلزی قرار می‌گیرند و از سوی دیگر بر روی سیلیکون و پیوند شاتکی در این نقطه شکل خواهد گرفت.

۲-۱-۳- لایه‌نشانی، زدودن (Etching) و ایجاد اتصالات الکتریکی به پدها

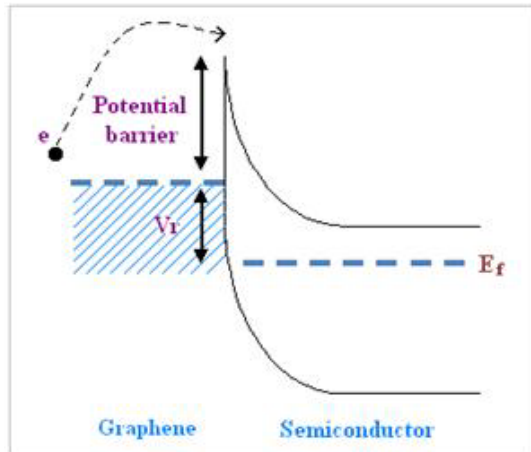
برای برقراری اتصالات مناسب به گرافین، لایه‌نشانی Cr/Au بر روی ویفر صورت می‌گیرد، علت این امر برقراری اتصال اهمی بین طلا و گرافین است. پس از لایه‌نشانی، لایه‌های Au، Cr، SiO₂ به کمک ماسک شکل ۵ زدوده می‌شوند. در این هنگام قطعه ساخته شده به آنچه که در شکل ۶ نشان داده شده است، شبیه است.



شکل ۶: شماتیکی از سطح ویفر پس از لیتوگرافی و زدودن (این طرح در تمام سطح ویفر تکرار می‌شود).

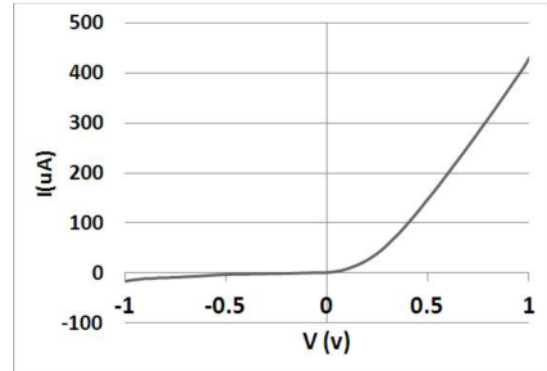
پس از آماده شدن زیرلایه به صورت آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است، مرحله بعد لایه‌نشانی گرافین به روش ذکر شده در بخش مقدمه است. پس از لایه‌نشانی، گرافین به صورت اتفاقی در نقاط مختلف ویفر قرار گرفته است که در این مرحله لازم است به کمک میکروسکوپ نوری سطح ویفر را پویش (Scanning) کرده و گرافین‌هایی را بیابیم که از یک سو بر روی یکی از نوارهای SiO₂/Cr/Au قرار گرفته و از سوی دیگر بر روی بستر سیلیکون قرار گرفته باشد، که به این ترتیب پیوند شاتکی بین گرافین و سیلیکون برقرار شده باشد. همانند آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است. در ادامه برای تست قطعه و بدست آوردن منحنی مشخصه آن، لازم است که

موج‌های کمتر از ۱/۱ میکرومتر را دارد و ممکن است این اشکال در آزمایشات پیش‌آید که جریان نوری (Photo Current) اندازه‌گیری شده تنها در زیرلایه سیلیکونی ایجاد شده باشد و گرافین نقشی در تولید آن نداشته باشد.



شکل ۱۰: دیاگرام انرژی برای پیوند شاتکی بین گرافین و سیلیکون.

مراجعی که تاکنون به فعالیت در این زمینه پرداخته‌اند [۲۵-۲۷]، از گرافین تنها به عنوان ITO یعنی الکتروود نامرئی استفاده نموده‌اند، بدین صورت که نور تابیده شده از لایه گرافین عبور کرده و در زیرلایه سیلیکونی ایجاد الکترون-حفره و جریان نوری نموده است و خود در امر آشکارسازی تأثیری ندارد. اگر چه این کاربرد از گرافین به جای ITO نیز به نوبه خود فوایدی دارد، اما آنچه این مقاله درصدد بیان آن است نقش خود گرافین و پاسخ‌دهی نوری آن و تأثیر آن در منحنی مشخصه جریان-ولتاژ قطعه است. در این تحقیق، روشی برای متمایز ساختن جریان نوری حاصل از گرافین از جریان نوری تولید شده در زیرلایه سیلیکونی بکار رفته است و آن تاباندن امواج الکترومغناطیسی از جلو و همچنین از پشت ویفر بوده است. بدین صورت که وقتی امواج الکترومغناطیسی از جلو به سطح قطعه تابانده می‌شود، جریان نوری تولید می‌شود در حالیکه نمی‌توان جریان نوری تولید شده را ۱۰٪ به گرافین نسبت داد، زیرا سیلیکون نیز می‌تواند به امواج الکترومغناطیسی با طول موج کمتر ۱/۱ میکرومتر (که ناحیه مرئی را نیز شامل می‌شود)، پاسخ دهد و حال اگر گرافین نیز بتواند به امواج الکترومغناطیسی در این بازه

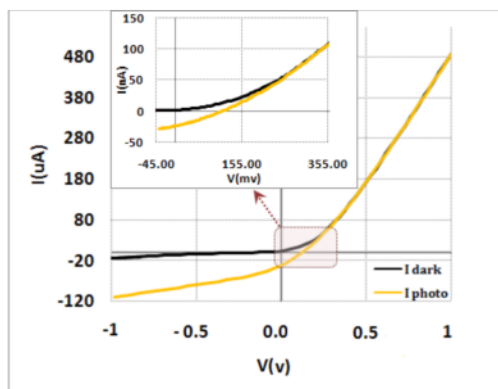


شکل ۹: نمودارهای جریان-ولتاژ دیود شاتکی گرافین-سیلیکون در بازه ولتاژی ۱- تا ۱ ولت.

همانطور که از این شکل مشخص است، خاصیت یکسوسازی و وجود سد شاتکی در منحنی مشخصه‌ها کاملاً آشکار است.

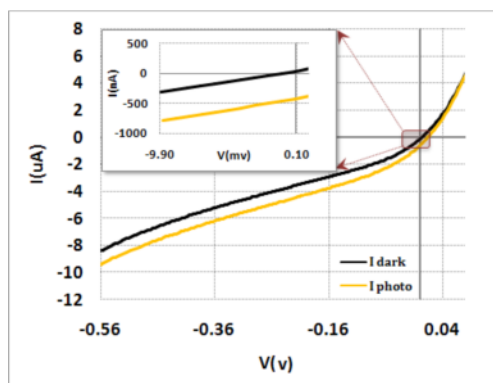
چنانچه مسیر حرکت الکترون از یک پایانه به پایانه دیگر را در نظر بگیریم، می‌توان گفت که الکترون در ابتدا از یک پایانه حرکت کرده (برای مثال از پایانه طلا) و به دلیل اهمی بودن پیوند بین طلا و گرافین، وارد گرافین می‌شود، در ادامه مسیر برای ورود به سیلیکون با سدی حدود ۰/۴۵ الکترون ولت مواجه می‌شود که با افزایش ولتاژ، ارتفاع سد کاهش یافته و از آن عبور می‌کند، سپس به پیوند بین سیلیکون و آلومینیوم رسیده و به دلیل اهمی بودن این پیوند نیز از آن عبور می‌کند و در نهایت به پایانه دیگر در آلومینیوم می‌رسد. به این ترتیب وجود سد پتانسیل موجب غیرخطی شدن منحنی جریان-ولتاژ یا به بیان دیگر یکسوسازی آن می‌شود. شکل ۱۰ چگونگی ایجاد سد شاتکی را نشان می‌دهد. ولتاژ شکست این دیود حدود ۴- ولت است و سد شاتکی آن حدود ۰/۴۵ الکترون ولت تخمین زده شده است.

مرحله بعد در آزمایشات، بررسی میزان پاسخ‌دهی نوری دیود ساخته شده است. منابع مورد استفاده در این آزمایشات منبع نور زرد، لیزر ۶۷۰ نانومتر با توان ۵ میلی‌وات و همچنین جسم سیاه در دمای ۱۰۰۰ درجه سیلسیوس بوده است. از فیلترهای بالاگذر ۷۰۰ نانومتر و ۱/۱ میکرومتر در مقابل جسم سیاه جهت محدود کردن فرکانس موج تابیده شده، استفاده شده است. این بخش از آزمایشات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که ماده سیلیکون خود قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی با طول



شکل ۱۲: نمودار جریان - ولتاژ قطعه تحت لیزر ۶۷۰ نانومتر با توان ۵ میلی‌وات.

برای اندازه‌گیری دقیق‌تر جریان نوری و یا به بیانی اختلاف جریان بین جریان تاریک (I_{dark}) و جریان ناشی از تابش نور (I_{photo})، منحنی مشخصه‌های نشان داده شده در شکل ۱۳ و ۱۴، تحت بازه‌های کوچکتری از ولتاژ (در بازه ولتاژی بین ۱۰- میلی‌ولت تا ۱ میلی‌ولت) نیز به صورت بزرگنمایی شده در این شکل‌ها نشان داده شده‌اند.



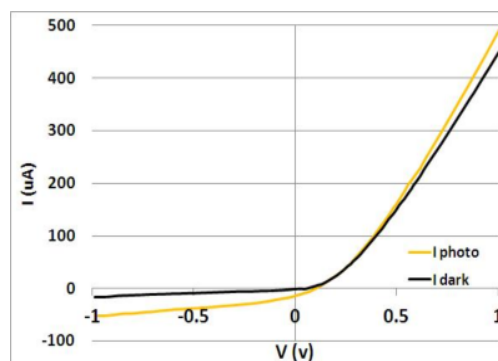
شکل ۱۳: نمودار جریان - ولتاژ دیود شاتکی گرافین - سیلیکون تحت تابش ۷۰۰ نانومتری از جلو و در بازه ۰/۶- تا ۰/۱ ولت.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نیز نمودارهای جریان - ولتاژ برای همین تابش‌ها و از پشت افزاره را نشان می‌دهد. از آنجایی که اختلاف بین جریان تاریک (I_{dark}) و جریان ناشی از تابش نور (I_{photo}) و یا به بیانی جریان نوری تولیدی در سیلیکون کم بوده و این اختلاف در بازه‌های ولتاژی کم قابل مشاهده نبوده است، لذا این نمودارهای جریان - ولتاژ در محدوده ولتاژی از ۱۰- میلی‌ولت تا ۵- میلی‌ولت نشان داده شده‌اند که با ناحیه بزرگنمایی شده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مقایسه می‌باشند.

پاسخ دهد، نمی‌توان مشخص کرد که جریان نوری تولید شده به کدام ماده، گرافین یا سیلیکون، مربوط است و یا شاید جمع جریان تولیدی در گرافین و سیلیکون باشد. حال اگر تابش‌ها به پشت قطعه نیز تابانیده شود (جایی که فقط سیلیکون وجود دارد) و جریان نوری ایجاد شده اندازه‌گیری شود، می‌توان با اطمینان خوبی گفت که جریان نوری تولید شده تنها به خاطر وجود سیلیکون بوده است و با مقایسه این جریان نوری با جریان نوری تولید شده در تابش از جلوی قطعه، می‌توان متوجه شد که آیا گرافین نیز در ایجاد جریان نوری نقش داشته و یا به بیان دیگر قابلیت پاسخ‌دهی نوری را دارا است یا خیر و چنانچه این قابلیت را داراست، میزان پاسخ‌دهی آن چقدر است.

وقتی امواج مرئی به پشت قطعه تابانده می‌شوند توسط سیلیکون جذب شده و دیگر امکان رسیدن به گرافین را پیدا نمی‌کنند. در واقع سیلیکون در اینجا همانند یک فیلتر ۱/۱ میکرومتر عمل می‌کند که امواج الکترومغناطیسی با طول موج‌های بیشتر از ۱/۱ میکرومتر را از خود عبور داده و کمتر از آن را جذب می‌کند.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب منحنی مشخصه قطعه را تحت تابش نور زرد و لیزر ۶۷۰ نانومتر نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نمودار جریان - ولتاژ قطعه تحت تابش نور زرد.

قرار گرفتن بخشی از منحنی مشخصه در ربع چهارم، نشان دهنده نقش این قطعه به عنوان منبع جریان - ولتاژ است و می‌تواند به عنوان سلول خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز به ترتیب نمودار جریان - ولتاژ تحت تابش‌های ۷۰۰ نانومتر و ۱/۱ میکرومتر از جلوی قطعه را، در بازه ولتاژی ۰/۶- تا ۰/۱ ولت نشان می‌دهد.

در واقع، جریان نوری تولید شده در فرآیند تابش از پشت در طول موج‌های ۷۰۰ نانومتر و ۱/۱ میکرومتر به ترتیب حدود ۲۳ برابر و ۱۳ برابر کاهش یافته است. این کاهش نشان دهنده تاثیر گرافین در امر آشکارسازی است و مشخص کننده مقدار زیاد جریان نوری تولید شده در گرافین در حالت تابش از جلو است.

۴- نتیجه‌گیری

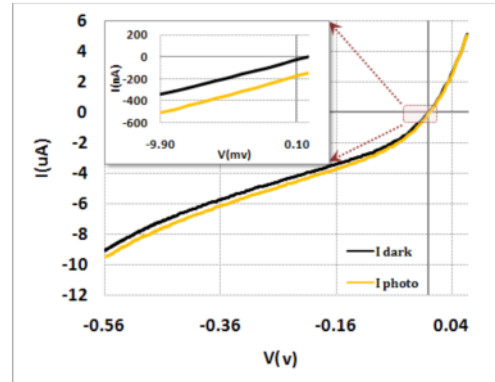
به طور کلی در این تحقیق ابتدا ویفر سیلیکونی تا ضخامت ۲۷۰ نانومتر اکسید شد و پس از لایه‌نشانی‌های Cr/Au به کمک ماسک مخصوصی الگو شد. سپس گرافین به روش ورقه کردن میکرومکانیکی بر روی آن قرار گرفت. پس از برقراری اتصالات الکتریکی نمودارهای جریان-ولتاژ از قطعه ساخته شده بدست آمد. نمودارها، خاصیت یکسوسازی دیود شاتکی ساخته شده را به خوبی نمایش می‌دهند. از سوی دیگر دیود شاتکی ساخته شده به نور مرئی زرد و همچنین لیزر ۶۷۰ نانومتر پاسخ نوری می‌دهد. برای مشخص شدن تفاوت میزان آشکارسازی گرافین از سیلیکون، تابش‌های ۷۰۰ نانومتر و ۱/۱ میکرومتر نیز از پشت به قطعه تابانیده شد. نتایج بدست آمده قابلیت کاربرد این دیود به عنوان آشکارساز مادون قرمز و امواج مرئی آشکار می‌کند. از سوی دیگر نتایج این آزمایشات، راه را برای کاربرد این دیود به عنوان آشکارساز مادون قرمز دور و همچنین ترانزستور هموارتر نموده است.

سپاسگزاری

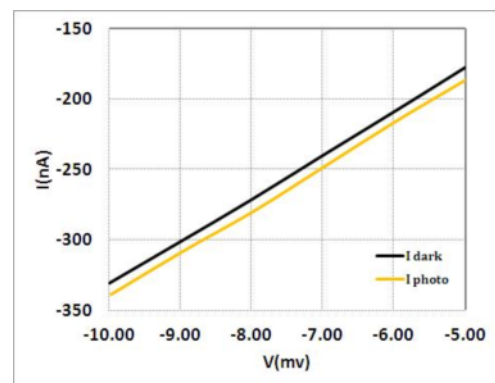
از همکاری صمیمانه رضا عسگری از پژوهشگاه دانش‌های بنیادی در تحلیل طیف رامان گرافین و ناصر جعفرزاده از دانشگاه تربیت مدرس در گرفتن طیف رامان و حامد مهرآرا از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در اصلاح و ویرایش مقاله کمال تشکر را داریم.

مراجع

- [1] S. Reich, C. Thomsen, J. Maultzsch, "Carbon Nanotubes: Basic concepts and physical properties", Wiley, New York, 2004.
 [2] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Grigorieva, A.A. Firsov, *Science*, **306**, 2004, 666.

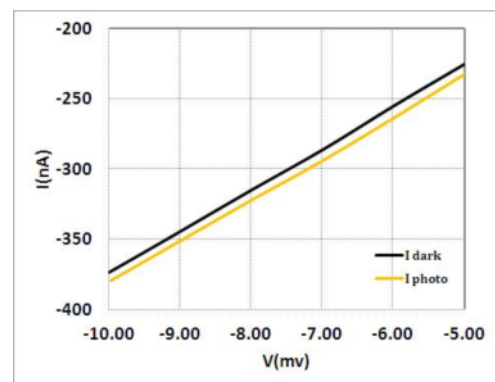


شکل ۱۴: نمودار جریان-ولتاژ دیود شاتکی گرافین-سیلیکون تحت تابش ۰/۱ میکرومتر از جلو و در بازه ۰/۶ تا ۰/۱ ولت.



شکل ۱۵: نمودار I-V دیود شاتکی گرافین-سیلیکون تحت تابش ۷۰۰ نانومتر از پشت افزاره و در بازه ۱۰- میلی‌ولت تا ۵- میلی‌ولت.

همانطور که از شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است، تفاوت I_{photo} و I_{dark} در تابش از جلو و تحت تابش‌های ۷۰۰ نانومتر و ۱/۱ میکرومتر به ترتیب حدود ۴۰۰ و ۲۰۰ نانوآمپر است که این تفاوت در تابش از پشت (شکل‌های ۱۵ و ۱۶) به مقادیر ۱۷ و ۱۵ نانوآمپر می‌رسد.



شکل ۱۶: نمودار I-V دیود شاتکی گرافین-سیلیکون تحت تابش ۱/۱ میکرومتر از پشت افزاره و در بازه ۱۰- میلی‌ولت تا ۵- میلی‌ولت.

- [18] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, T. Otsuji, *J. Appl. Phys.*, **107**, 2010, 054512.
- [19] M. Ryzhii, T. Otsuji, V. Mitin, V. Ryzhii, *Japanese Journal of Applied Physics*, **50**, 2011, 070117.
- [20] C. Soldano, A. Mahmood, *Carbon*, **48**, 2010, 2127.
- [21] X.S. Wu, M. Sprinkle, X.B. Li, F. Ming, C. Berger, W.A. De Heer, *Physical Review Letters*, **101**, 2008, 026801.
- [22] Y. Yoon, G. Fiori, S. Hong, G. Iannaccone, J. Guo, *Transactions on Electron Devices*, **55**, 2008, 2314.
- [23] D. Jimenez, *Nanotechnology*, **19**, 2008, 345204.
- [24] K. Alam, *Semiconductor Science and Technology*, **24**, 2009, 015007.
- [25] S. Tongay, T. Schumann, A.F. Hebard, *Applied Physics Letters*, **95**, 2009, 222103.
- [26] C. Chun-Chung, A. Mehmet, C. Chia-Chi, A.F. Levi, S.B. Cronin, *Nano Lett.*, **11**, 2011, 1863.
- [27] X. Li, H. Zhu, K. Wang, A. Cao, J. Wei, C. Li, Y. Jia, Z. Li, X. Li, D. Wu, *Advanced Materials*, **22**, 2010, 2743.
- [28] X. Li, H. Zhu, K. Wang, J. Wei, G. Fan, X. Li, D. Wu, *Chemical Doping and Enhanced Solar Energy Conversion of Graphene/Silicon Junctions*, Proceedings of the conference on China Technological Development of Renewable energy Sources, **1**, 2010, 387.
- [29] G. Grosso, G.P. Parravicini, *Solid State Physics*, Academic Press, USA, 2000.
- [30] Y. Barlas, T. Barnea, M. Polini, R. Asgari, A.H. MacDonald, *Physical Review Letters*, **98**, 2007, 6601.
- [31] J.K. Pachos, M. Stone, *International Journal of Modern Physics B*, **21**, 2007, 5113.
- [32] G. Giovannetti, P.A. Khomyakov, G. Brocks, P.J. Kelly, J.V. Brink, *Physical Review B*, **103**, 2007, 73.
- [33] K. Nomura, A.H. MacDonald, *Physical Review Letter*, **98**, 2007, 076602.
- [34] N.M. Gabor, J.C. Song, Q. Ma, N.L. Nair, T. Taychatanapat, K. Watanabe, T. Taniguchi, L.S. Levitov, P. Jarillo-Herrero, *Science*, **334**, 2011, 648.
- [3] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim, *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 2009, 109.
- [4] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, S.V. Grigorieva, A.A. Firsov, *Nature*, **438**, 2005, 197.
- [5] A.K. Geim, K.S. Novoselov, *Nature Mater.*, **6**, 2007, 183.
- [6] A.K. Geim, *Science Magazine*, **324**, 2009, 1530.
- [7] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A.C. Ferrari, *Nat. Photonics.*, **4**, 2010, 611.
- [8] R.R. Nair, P. Blake, A.N. Grigorenko, K.S. Novoselov, T.J. Booth, N.M. Peres, T. Stauber, A.K. Geim, *Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene*, Science Express, 2008.
- [9] B. Sensale-Rodriguez, R. Yan, M.M. Kelly, T. Fang, K. Tahy, W. Sik Hwang, D. Jena, L. Liu, H.G. Xing, *Nat. Commun.*, **3**, 2012, 780.
- [10] S. Thongrattanasiri, F.H. Koppens, F. Javier Garcia de Abajo, *Physical Review Letters*, **108**, 2012, 047401.
- [11] F.N. Xia, T. Mueller, Y.M. Lin, A. Valdes-Garcia, P. Avouris, *Nat. Nanotechnol.*, **4**, 2009, 839.
- [12] T. Mueller, F. Xia, P. Avouris, *Nature Photonics*, **4**, 2010, 297.
- [13] F. Xia, T. Mueller, R. Golizadeh-Mojarad, M. Freitag, Y. Lin, J. Tsang, V. Perebeinos, P. Avouris, *Nano Letters*, **9**, 2009, 1039.
- [14] M.C. Lemme, F.H. Koppens, A.L. Falk, M.S. Rudner, H. Park, L.S. Levitov, C.M. Marcus, *Nano Lett.*, **11**, 2011, 4134.
- [15] J. Park, Y.H. Ahn, C. Ruiz-Vargas, *Nano Lett.*, **9**, 2009, 1742.
- [16] K.W. Chiu Lai, N. Xi, C.K. Fung, H. Chen, L. Chen, R. Yang, B. Song, "Uncooled Infrared Sensing using Graphene (Presented Conference Paper style)", *Nanotechnology Materials and Devices Conference (IEEE 2011)*, Jeju, Korea, October 2011.
- [17] M. Sakowicz, M.B. Lifshits, O.A. Klimenko, F. Schuster, D. Coquillat, *J. Appl. Phys.*, **110**, 2011, 54512.