

## بررسی خواص آشکارکنندگی نوری گرافین به منظور استفاده از آن در آشکارسازهای IR

مینا امیرمزلقانی<sup>۱</sup>، فرشته قهرمانی<sup>۲</sup>، حامد مهرآرا<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، دانشکده علوم پایه، تهران، ایران

۳- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(mazlaghani@ee.kntu.ac.ir)

### چکیده

امروزه، آشکارسازهای امواج الکترومغناطیس در محدوده فرسرخ (IR)، بطور وسیع در صنایع نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله کاربردهای نظامی آشکارسازهای IR می‌توان به دوربین‌های دید در شب و همچنین دنبال‌کننده‌ی موشک‌ها، اشاره کرد. در این مقاله خواص نوری گرافین به منظور استفاده از آن در ساخت آشکارسازهای نوری، مورد بررسی قرار گرفته است. مزایای آشکارسازهای گرافینی نسبت به سایر آشکارسازها و مشخصات آشکارکنندگی افزاره‌های گرافینی مختلف آزمایش شده در بازه فرکانسی IR، بیان شده است. سپس مشخصات آشکارسازی یک نمونه آزمایشگاهی آشکارساز گرافینی ساخته شده توسط نویسندگان مقاله، ارائه شده و با سایر آشکارسازهای گرافینی در محدوده IR، مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: گرافین، آشکارسازهای نوری، فرسرخ

### مقدمه

پاسخ‌دهی به طیف فرسرخ مورد تحقیق قرار گرفته‌اند که در طی سال‌های اخیر محققان با پیشرفت صنایع و نیاز به افزاره‌هایی با سرعت عملکرد بالا و بهتر، تلاش‌هایی در سدد دسترسی به این تکنولوژی با استفاده از جدیدترین مواد و روش‌ها انجام داده‌اند. در این میان گرافین بعلت ویژگی‌های منحصر به فرد الکترونیکی، اپتیکی و فوتونیکی خود، هدف موسسات معتبر مثل موسسه علم ملی (NSF) (DARPA)<sup>۱</sup>، شرکت IBM و شرکت IQE (تولید کننده محصولات نیمه هادی) و گروه‌های تحقیقاتی مختلف قرار گرفته است [۱-۳].

این تک لایه از ماده‌ی کربن، می‌تواند پهنای باند وسیعی از امواج الکترومغناطیس را بدلیل گذارهای بین بانندی و درون بانندی جذب کند [۴،۵]. بطوری که گذارهای بین بانندی پدیده غالب در جذب امواج در محدوده فرکانسی مرئی و فرسرخ است. در حالی که گذارهای درون بانندی عامل اصلی جذب امواج الکترومغناطیس در محدوده گیگاهرتز و

از دیرباز در میان طیف امواج الکترومغناطیسی، محدوده فرکانسی فرسرخ (IR)، به علت داشتن فرکانس‌های بالا و انرژی فوتون‌های زیاد، توجه زیادی را در بخش‌های مختلف دفاعی، نظامی، صنعتی و دولتی به خود جلب کرده است.

در میان این محدوده‌های فرکانسی مختلف، آشکارسازی در محدوده‌ی طول موج‌های باند C از محدوده‌ی IR که برابر است با (1528-1561 nm) و نیز طول موج‌های باند L از محدوده‌ی IR که برابر است با (1561-1620 nm)، از دید مخابرات نوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۱]. از سوی دیگر، آشکارسازی در محدوده‌ی فرسرخ میانی (mid-IR) از نظر کاربرد در ساخت دوربین‌های دید در شب<sup>۲</sup> و بکارگیری از آنها توسط سربازان در نیروهای نظامی مورد توجه هستند. آشکارسازی در محدوده‌ی فرسرخ دور (far-IR) نیز در زمینه کاربردهای هوایی و فضایی اهمیت ویژه‌ای دارند.

از طرفی با نگاهی به تاریخ توسعه تکنولوژی آشکارسازهای IR، می‌توان فهمید که تاکنون مواد بسیاری برای بررسی

<sup>1</sup> National science foundation

<sup>2</sup> Defence advanced research projects agency

سال ۲۰۰۴ میلادی در آزمایشگاه گروه گیم ساخته شد [۸-۹] و به علت خواص فیزیکی منحصر به فرد، رفتار شگفت‌آور و کاربردهای عملی بالقوه این نانوماده، تحقیقات گسترده‌ای بر روی آن صورت گرفت [۱۰-۱۱].

این ساختار کریستالی دوبعدی به دست آمده نه تنها شدیداً پایدار و پیوسته است بلکه یک کریستال با کیفیت بالا است، به طوری که حامل‌های بار در آن می‌توانند بدون پراکندگی مسافت حدود هزار برابر فاصله بین اتمی را بپیمایند، به عبارت دیگر موبیلیته (تحرک پذیری) حامل‌ها بالا است که باعث می‌شود برخی از پارامترهای این ماده بسیار بهتر از بهترین فلزات باشند. به‌عنوان مثال هدایت الکتریکی آن هزار برابر بزرگتر از بهترین فلز است. علاوه بر این هدایت گرمایی آن نیز بسیار بالاتر از مس است [۱۲].

با نوشتن هامیلتونین گرافین در انرژی‌های کم، اثبات می‌شود که ذرات گرافین، فرمیون‌های دیراک بدون جرم هستند که منجر به خطی شدن رابطه‌ی پاشندگی با شکاف انرژی صفر و مشاهده‌ی خواص الکترونیکی و اپتیکی متفاوت می‌شوند که آن‌ها را برای ساخت افزارهای هایی نظیر سلول‌های خورشیدی (Solar cell)، لیزرهای خیلی سریع، پرده‌های لمسی (Touch Screen) و آشکارسازهای نوری (photo detectors) مناسب می‌سازد [۱۳]. چند نمونه از خواص اپتیکی بی‌نظیر آن مثل ثابت بودن رسانندگی اپتیکی و در نتیجه ثابت بودن ضریب جذب و عبور و انعکاس به صورت عبارتی از ثابت ساختاری خوب (Fine Structure Constant) [۱۴]، پهنای طیفی گسترده، میزان جذب قابل اشباع و اثر ترموالکتریک، می‌توان اشاره کرد.

رسانش دینامیکی (یا اپتیکی) جهانی گرافین (G) پارامتری است که برای توصیف مشخصات اپتیکی فیلم‌های نازک بکار می‌رود. هدایت اپتیکی G برای گرافین برابر مقدار ثابت جهانی  $G_0 = e^2/4\hbar \sim 6.08 \times 10^{-5} (\Omega^{-1})$  [۱۴] است. با کمک روابط مربوط به هدایت اپتیکی و ضریب جذب

تراهنز در گرافین است. براین اساس، انواع مختلفی از آشکارسازها بر پایه گرافین ساخته شده‌اند که در محدوده‌های مختلف فرکانسی کار می‌کنند [۵-۷]. این در حالی است که آشکارسازهای مختلف ساخته شده در حوزه IR، هیچ کدام کل پهنای IR را پوشش نمی‌دهند.

همچنین با توجه به بازدهی کوانتومی بالا و برانگیختگی گرمایی اندک در گرافین<sup>۳</sup>، آشکارسازهای گرافینی از سایر آشکارسازهای موجود در این بازه، پیشی خواهند گرفت. بنابراین با توجه به آنچه مطرح شد، انگیزه اصلی از نوشتن این مقاله، نیاز صنعت دفاعی کشور به آشکارسازهای سریع با بازده مناسب می‌باشد، بطوری که همزمان بتواند طیف فرکانسی گسترده‌ای را در حوزه IR آشکارسازی کند. این رو ما ابتدا به بیان مختصری از خواص نوری گرافین می‌پردازیم. در بخش بعدی به معرفی آشکارسازهای گرافینی در محدوده‌ی فرکانسی فرسوخ پرداخته و سپس با مقایسه آن‌ها و بررسی شرایط و عوامل مختلف، یک نوع از این آشکارسازها را به عنوان بهترین نوع شناخته شده معرفی می‌کنیم. سپس به بیان نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر روی نمونه ساخته شده می‌پردازیم. در نهایت نتیجه آزمایشات خود را با نمونه‌های ساخته شده مشابه مقایسه می‌کنیم.

## ۱-۱ مروری بر خواص نوری گرافین و مزایای

### آشکارسازی بر مبنای آن:

گرافین یک صفحه کریستالی مسطح شش گوشه به ضخامت یک اتم، ساخته شده از اتم‌های کربن است که ساختار اصلی سایر نانو مواد کربنی را تشکیل می‌دهد. این بلور نانومتری به عنوان اولین بلور دو بعدی پایدار در

<sup>۳</sup> اغلب آشکارسازهای IR که بالاتر از ۳ میکرومتر کار می‌کنند نیازمند به خنک سازی دارند تا از تولید حاملهایی با بار اضافی بصورت گرمایی جلوگیری کنند. در مقابل آشکارسازهای گرافینی نیاز به خنک سازی ندارند و به همین دلیل حجم این نوع آشکارسازها خیلی خیلی کمتر از آشکارسازهای IR دیگر است.

نوری تولید کنند. همین اتفاق در حضور میدان الکتریکی داخلی نیز خواهد افتاد. چنین میدان‌هایی در سطوح مشترک الکتروود فلزی و گرافین شکل می‌گیرند [۱۷]. این میدان‌های داخلی می‌توانند برای تولید پاسخ جریان نوری فوق سریع در گرافین استفاده شوند. سرعت بالای انتقال حامل‌های آن (در حدود  $10^6$  m/s) حتی در حضور میدان الکتریکی متوسط باعث می‌شود برای تولید جریان نوری فوق سریع و کارآمد (با بازده کوانتومی داخلی 6-16% در ناحیه تابش) احتیاجی به ولتاژ بایاس مستقیم بین سورس و درین (مسیر تولید جریان نوری) نباشد. محدودکننده‌ی اصلی پهنای باند کاری گرافین، ثابت زمانی افزاره (ناشی از مقاومت R و ظرفیت C) است. ثابت زمانی  $\tau_d$  (زمان پاسخ) نیز توسط قابلیت حرکت حامل تعیین می‌شود.

$$\tau_d = RC = \frac{\epsilon}{en_o\mu} \quad (1-1)$$

که  $\epsilon$  ضریب نفوذپذیری و  $n_0$  ضریب شکست است. در افزاره‌های گرافینی (یک لایه یا چند لایه) بعلت موبیلیته‌ی بسیار بالای حاملان بار، ثابت زمانی طبق رابطه (1-1) کم، در نتیجه محدودیت کمی برای پهنای باند وجود خواهد داشت. از طرفی این امر موجب افزایش سرعت افزاره است که منجر به استفاده از آن‌ها بعنوان افزاره‌های فوق سریع می‌شوند [۱۸]. ماکزیمم پهنای باند کاری ممکن نیز توسط زمان گذر (زمان محدودی که طول می‌کشد تا جریان الکتریکی ناشی از نور برخوردی تولید شود) محدود می‌شود به:

$$f_t = \frac{3.5}{2\pi t_{tr}} \quad (1-2)$$

که  $t_{tr}$  زمان گذر حامل‌ها از ناحیه‌ی آشکارسازی است. از آنجایی که زمان گذر حامل‌ها در گرافین بعلت ابعاد آن به مراتب کمتر از نیمه‌هادی‌های متداول است، پس ماکزیمم پهنای باندی نیز در گرافین بیشتر از سایر آشکارسازها خواهد شد.

(عبور) مواد، میزان جذب (عبور) گرافین تک لایه در محدوده‌ی فوتون‌های تابیده شده در رژیم مرئی و فروسرخ مقداری ثابت و برابر ۲.۳٪ (۹۷.۷٪) است. این ضریب عبور در مقایسه با ضریب عبور مواد متداول استفاده شده در آشکارسازهای نیمه‌هادی، بیشترین میزان را دارد. علاوه بر میزان عبور، ضریب جذب گرافین نیز بالا است که باعث تولید زوج الکترون  $\pm$  حفره‌ی بیشتر و در نتیجه تسهیل در فرآیند اصول عملکرد آشکارسازهای نوری می‌شود. گرافین تک لایه، با وجود ضخامت بسیار کم، بعلت خطی بودن رابطه پاشندگی انرژی و شکاف انرژی صفر و گذارهای بین باندی و درون باندی، می‌تواند فوتون‌هایی از محدوده‌ی فرکانسی تراهرتز تا فرابنفش (مادون قرمز UV) را جذب کند و یکی از قوی‌ترین گذارهای بین باندی را بین تمام مواد شناخته شده داشته باشد [۱۵]. بنابراین، این ویژگی منجر می‌شود که آشکارسازهای نوری مبتنی بر گرافین (GPD) توانایی کار در گستره‌ی طول موجی وسیعتری را داشته باشند (همان طور که در مقدمه نیز بیان شد).

ضریب جذب گرافین، بالا و متناسب با تعداد لایه‌ها است و محدوده‌ی جذب سیستم (گذارهای بین زیرلایه‌ها) نیز با تغییر انرژی فرمی توسط یک میدان گیت خارجی مثل میدان الکتریکی و مغناطیسی تغییر می‌کند و امکان تغییر بازه‌ی آشکارسازی با استفاده از میدان‌های خارجی را ممکن می‌سازد [۱۶]. از طرفی گرافین چند لایه ضریب جذب بالاتری دارد، بنابراین با اعمال میدان خارجی احتمال گذارهای مختلف افزایش می‌یابد و امکان آشکارسازی در پهنای باند بیشتری را فراهم می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که آشکارسازهای گرافینی قابلیت تنظیم‌پذیری بالایی دارند.

در جذب نور، جفت الکترون-حفره تولید شده در گرافین بطور معمول در چند ده پیکوثانیه، بسته به کیفیت و تراکم حامل‌ها در گرافین، باز ترکیب می‌شوند. اگر میدان خارجی اعمال شده باشد، جفت‌ها می‌توانند جدا شده و جریان

کم (سرعت بالای آشکارسازی)، قابلیت تنظیم پذیری بالا با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، محدوده‌ی بالای تشخیص طول موج‌های خیلی عریض (مثل تراهرتز) و عملکرد در بایاس درین/سورس صفر، بازده کوانتومی داخلی مناسب و ساخت آسان می‌باشند که آن‌ها را یک آشکارساز نوری ویژه و بسیار قابل توجه در سال‌های اخیر ساخته است.

دو مشخصه سرعت بالا و پهنای باندهای بسیار زیاد آشکارسازی (پهنای باند ذاتی آشکارسازهای گرافینی ممکن است تا 500GHZ نیز برسد)<sup>۶</sup>، استفاده از آشکارسازهای گرافینی را در صنایع دفاعی و نظامی، پزشکی، مخابراتی، حسگرهای متحرک، نظارت و نمایش محیط بسیار ضروری می‌سازد.

#### ۱-۲. آشکارسازهای گرافینی در حوزه IR :

در چند سال اخیر پژوهش‌های مختلفی بر پایه گرافین در زمینه‌ی ساخت آشکارساز در حوزه فرکانسی فروسرخ صورت گرفته است و آشکارسازهای مختلفی مثل دیودها و ترانزیستورهای مختلف گرافینی مطرح شده‌اند [۲۱-۲۲].

پاسخ‌های نوری آنها نیز تحت طول موج‌های  $0.514\mu m$ ،  $0.633\mu m$ ،  $1.5\mu m$ ،  $2.4\mu m$  گزارش شده است. از آن جمله می‌توان به آشکارساز ترانزیستوری بر اساس گرافین اشاره کرد که در طول موج ۱.۵۵ میکرومتر و پاسخدهی برابر  $0.5mA/W$  در ولتاژ گیت ۸۰ ولت داشته و بازدهی کوانتومی آن در محدوده  $(6-16)\%$  تخمین زده شده است. [۲۱]. یکی از مشکلات این آشکارساز، کوچک بودن مساحت موثر آشکارسازی است. بدین صورت که تنها قسمتی از گرافین که در اطراف ناحیه الکترودها هستند در آشکارسازی شرکت می‌کنند، زیرا حامل‌های نوری تولید شده در گرافین در نواحی دورتر از الکترودها، پیش از رسیدن به الکترودها بازترکیب می‌شوند. بنابراین مساحت

صفحات گرافین بدلیل ساختار دوبعدی با ابعاد سطحی و ضخامت بسیار کوچک (به ترتیب در حدود میکرو و انگسترم) به عنوان نانوساختار معرفی می‌شود که استفاده از آنها به دو دلیل زیر می‌تواند باعث افزایش حساسیت در آشکارسازهای نوری شود: ۱- نسبت سطح به حجم بالای این نانوساختارها و حالت‌های تله سطحی عمیق‌تر، عمر حامل‌های تولید شده در اثر نور را طولانی می‌کند. ۲- کاهش ابعاد، زمان انتقال حامل‌های تولید شده به وسیله‌ی نور را کاهش می‌دهد<sup>۵</sup> [۱۹]. بنابراین آشکارسازهای نوری بر پایه گرافین و بخصوص نانوساختارهای آن دارای حساسیت خوب در آشکارسازی هستند.

بازده کوانتومی آشکارسازهای نوری بستگی به احتمال بازترکیب نسبت به تفکیک حامل‌های تولید شده توسط نور دارد. در افزاره‌های با ابعاد کوچک این نسبت نیز به عرض ناحیه تهی‌شده در آشکارساز (یا به عبارت بهتر سطح موثر آشکارسازی) مربوط می‌شود که با کاهش عرض ناحیه تهی‌شده، این احتمال بعلاقی قرارگیری اکثر زوج الکترون-حفره<sup>۴</sup> های تولید شده در ناحیه تهی (تحت میدان الکتریکی داخلی) افزایش و در نتیجه بازده کوانتومی داخلی کاهش می‌یابد. سطح موثر کوچک میدان الکتریکی داخلی (تقریباً  $200nm$ ) مربوط به فصل مشترک گرافین و الکترودهای فلزی، می‌تواند منجر به کاهش بازده کوانتومی آشکارسازی شود [۱۸]. اما تاکنون بیشترین بازده جریان نوری داخلی مربوط به آشکارسازهای گرافینی بین ۳۰٪ تا ۱۵٪ گزارش شده است [۲۰] که در نوع خود بازده کوانتومی داخلی مناسبی محسوب می‌شود.

در مجموع با توجه به آنچه ذکر شد، در این آشکارسازهای نوین، چون برهم‌کنش فوتون‌ها و گرافین، خواص حامل‌های نوری تولید شده و انتقال حامل‌های نوری بصورت اساسی با آشکارسازهای گروه IV و III-V متفاوت هستند، پس دارای مشخصات ویژه‌ای مثل پهنای باندهای بسیار بالای آشکارسازی و زمان پاسخ

<sup>۶</sup> آشکارساز گرافینی با پاسخ نوری ماگزیمم 40GHZ [۲۳]، پهنای باند محدود شده در حدود 640 GHZ [۲۴] و ماگزیمم پهنای باندهای فراتر از 1500GHZ (فراتر از پهنای باند آخرین فوتون‌تکتورهای موجود) در دمای اتاق گزارش شده است.

<sup>۵</sup> این یکی از دلایلی است که در سالهای اخیر ساخت آشکارسازهای نوری برپایه نانوساختارها را بسیار مورد توجه قرار داده است.

مانند گرافین، به عنوان آشکارسازی جدید، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

دیود شاتکی گرافین-سیلیکن که در این مقاله معرفی می‌شود، نه تنها ساختاری جدید از آشکارسازهای IR که با سیلیکن سازگار هستند را معرفی می‌کند، بلکه مشکلاتی نظیر کوچک بودن سطح موثر آشکارسازی و همچنین عمر کوتاه حامل‌های نوری را، که در مورد سایر آشکارسازهای گرافینی مطرح بوده است، حل می‌نماید. این دیود، ساختار بسیار ساده‌تری نسبت به ترانزیستورهای گرافینی دارند و هزینه‌ی تولید آن‌ها پایین‌تر است. بازده کوانتومی بالا، آشکارسازی در دمای اتاق امواج IR، سادگی فرآیند ساخت به همراه سازگار بودن با سیلیکن، می‌تواند دیود شاتکی گرافین-سیلیکن را به عنوان یک آشکارساز نوظهور در حوزه IR معرفی کند.

### بخش تجربی

در این تحقیق از میان آشکارسازهای مختلف گرافینی، پیوند شاتکی گرافین-سیلیکن به عنوان ساختار اصلی آشکارساز، علاوه بر مزیت‌های فیزیکی که به آن اشاره شد، از دید فراهم بودن امکانات ساخت نیز، در اولویت قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا گرافین به روش ورقه کردن مکانیکی تولید شد و به صورت رندومی بر روی نقاط مختلف بستر سیلیکن قرار گرفت و با کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرافین‌های تولید شده مشاهده شد. استفاده از طیف نگاری رامان انجام شده، ابزاری برای تأیید تولید گرافین برای استفاده در قطعه‌ی مورد نظر است. پس از تولید گرافین، مرحله‌ی بعد، ایجاد پیوند شاتکی بین گرافین و سیلیکن بود که برای تحقق این امر ابتدا زیر لایه سیلیکنی اکسید شده و پس از لیتوگرافی به کمک ماسک طراحی شده، الگو شد و سپس گرافین بر روی آن قرار گرفت. گام نهایی در ساخت

فعال و موثر در آشکارسازی بسیار کوچک بوده و تنها شامل نواحی اطراف گیت‌ها می‌شود [۲۱]. این مشکل تا حدودی در مقاله‌ی بعدی از این گروه با افزایش سطح موثر آشکارسازی و نیز افزایش میدان الکتریکی در گیت به کمک استفاده از الکترودهای شانه‌ای، بهبود پیدا کرد [۲۲]. پاسخدهی این قطعه در محدوده‌ی 1.5- (mA/W) 6.1 در ولتاژ گیت ۱۵ ولت گزارش شده است، اما همچنان پاسخدهی این قطعه، با کوچک بودن سطح موثر آشکارسازی، کوتاه بودن عمر حامل‌های نوری تولید شده و نیز محدود بودن جذب امواج در گرافین، محدود شده است [۲۱-۲۲]. اخیراً کارهای مختلفی برای بهبود جذب امواج الکترومغناطیس در گرافین انجام شده است و با استفاده از روش‌هایی نظیر انعکاس مجدد، جذب صد درصدی در گرافین حاصل شده است [۲۵]. اما مشکلاتی نظیر کوچک بودن سطح موثر آشکارسازی و کوتاه بودن عمر حامل‌ها در گرافین، همچنان باقی است.

برای آشکارسازی امواج الکترومغناطیس در مخابرات نوری با استفاده از چیپ‌های سیلیکنی، از آشکارسازهای IR دیگری نیز، نظیر آشکارسازهای بر پایه ژرمانیوم، آشکارسازهای تمام سیلیکنی<sup>۷</sup> و آشکارسازهای شاتکی نیز استفاده می‌شود [۸]، [۲۶ و ۲۷]. آشکارسازهای ژرمانیومی، که از نظر آشکارسازی، یکی از بهترین انتخاب‌ها در این زمینه هستند، بدلیل عدم تطبیق گرمایی و فرآیند پیچیده‌ی تمیزسازی زیر لایه آن، با سیلیکن سازگار و منطبق نیستند و نمی‌توان از آن‌ها براحتی در کنار چیپ‌های سیلیکنی استفاده کرد [۲۸ و ۲۹]. آشکارسازهای تمام سیلیکنی نیز، پاسخدهی بسیار کمی دارند، بطوریکه پاسخدهی آن‌ها در بهترین حالت به 0.08 mA/W می‌رسد [۸]. آشکارسازهای شاتکی نیز معمولاً بازدهی کوانتومی پایین و زیر ۱٪، در عموم موارد، دارند که علت آن با تئوری Fowler توضیح داده می‌شود [۲۷ و ۳۰]. بنابراین استفاده از ماده‌ای جدید که سازگار و منطبق با سیلیکن باشد،

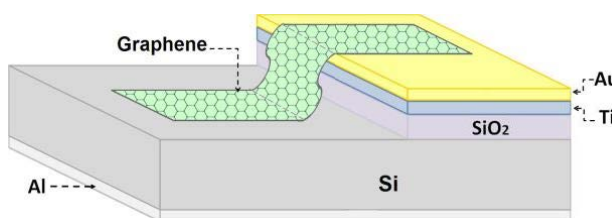
<sup>7</sup>All-Si Photodetectors

نداشته باشد. اما 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. وقتی امواج مرئی به پشت قطعه تابانده می‌شوند توسط سیلیکن جذب شده و دیگر امکان رسیدن به گرافین را پیدا نمی‌کنند. در واقع سیلیکن 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.

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 نانو لایه گرافین را در امر آشکارسازی مشخص کند و هم چنین مشخص کننده مقدار زیاد جریان نوری تولید شده در گرافین در حالت تابش از جلو است.

مرحله بعد در انجام آزمایشات، تست آشکارسازی قطعه تحت تابش‌های ۲ و ۳.۵ میکرومتری است. این طول موج‌ها از شکاف باند انرژی سیلیکن که حدود ۱.۰۵ الکترون ولت است، بیشتر هستند، بنابراین در سیلیکن جذب نخواهند شد و اگر جذبی اتفاق بیفتد، بواسطه گرافین خواهد بود. از سویی دیگر انتظار می‌رود که سیگنال نوری ایجاد شده، بسیار کمتر از سیگنال نوری تولید شده تحت تابش‌های ۷۰۰ نانومتر و ۱.۱ میکرومتر باشد، زیرا دیگر سیلیکن در ایجاد سیگنال نوری نقشی ندارد. شکل ۳، نمودار جریان-ولتاژ قطعه، تحت تابش‌های ۲ و ۳.۵ میکرومتری را نشان می‌دهد.

و تست قطعه، برقراری اتصالات الکتریکی به گرافین و سیلیکن برای مشاهده‌ی جریان عبوری از قطعه بود. شکل ۲ شماتیکی از قطعه ساخته شده را نشان می‌دهد.



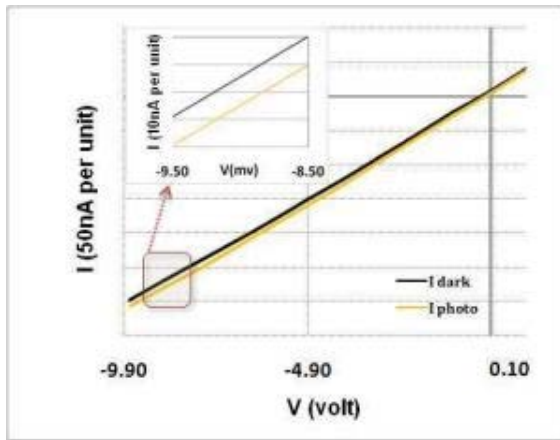
شکل ۲: شماتیکی از آشکارساز گرافینی ساخته شده

منحنی مشخصه‌های (جریان-ولتاژ) دیود شاتکی نانوگرافین-سیلیکن تحت تابش‌هایی در محدوده‌ی فرسرخ نزدیک و میانی با طول موج‌های ۶۷۰، ۷۰۰ و ۱۱۰۰ و ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ و ۳۵۰۰ نانومتر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که در جدول ۱ میزان فوتوجریان تولیدی هرکدام از بازه‌ها آورده شده است. اما آنچه این مقاله درصدد بیان آن است، مشخص کردن نقش نانو لایه گرافین در ایجاد جریان نوری و ویژگی‌های آشکارسازی آن در محدوده فرکانسی مورد نظر است.

۱-۲. قابلیت آشکارسازی نوری گرافین ساخته شده در محدوده ی IR:

به منظور مشخص شدن نقش نانو لایه 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. این بخش از آزمایشات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که ماده سیلیکن خود قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی با طول موج‌های کمتر از ۱.۱ میکرومتر را دارد و ممکن است این اشکال در آزمایشات پیش آید که جریان نوری (Photocurrent) اندازه‌گیری شده تنها در زیر لایه سیلیکونی ایجاد شده باشد و گرافین نقشی در تولید آن

(ب)



شکل ۳: نمودار جریان-ولتاژ دیودشائکی گرافین-سیلیکن تحت تابش‌های الف (۲ میکرومتری وب) ۳.۵ میکرومتری.

۲-۲. مشخصات آشکارکنندگی آشکارساز ساخته شده :

در این مرحله به بررسی میزان پاسخدهی نوری ، بازده کوانتومی و آشکارسازی دیود ساخته شده می‌پردازیم و در نهایت نتایج کار خود را با نتایج آخرین کارهای انجام شده در این زمینه در خارج از کشور مقایسه می‌کنیم.

پاسخدهی این آشکارساز، که با نسبت جریان نوری تولید شده در آشکارساز به توان رسیده به سطح آشکارساز محاسبه می‌شود، طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{\Delta I_p}{P} \quad (2)$$

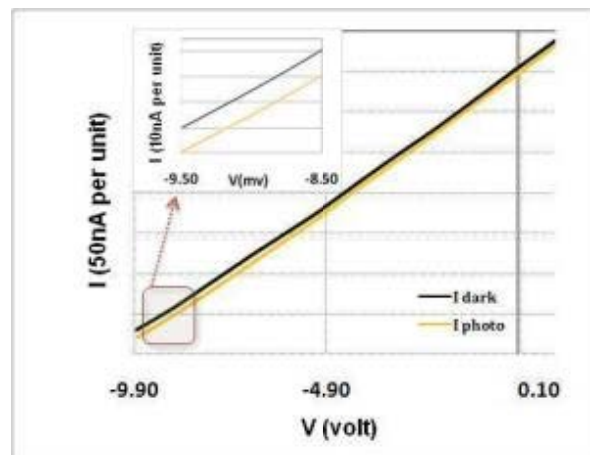
در این رابطه،  $\Delta I_p$  برابر با جریان نوری تولید شده و  $P$  توان رسیده به سطح آشکارساز را تشکیل می‌دهد.

بازده کوانتومی داخلی در مورد یک آشکارساز با نسبت حامل‌های نوری جمع شده در مدار خارجی به تعداد فوتون‌هایی که عملاً در سطح آشکارساز جذب شده‌اند تعریف می‌شود. از آنجایی که جذب امواج الکترومغناطیس در گرافین محدود است، بازده کوانتومی داخلی با بازده

سیگنال نوری تولید شده تحت تابش‌های ۲ و ۳.۵ میکرومتری حدود ۱۰ نانوامپر است که نسبت به تابش ۱.۱ میکرومتری حدود ۱۰۰ برابر کاهش یافته است و با آن‌چه از قبل در این مورد این کاهش پیش‌بینی شده بود، مطابقت دارد.

در کل می‌شود از این آزمایشات به این نتایج رسید که در تابش از جلو به نمونه تغییر جریان بایاس معکوس برای طول موج‌های بلندتر تقریباً حدود ۱۰ نانوامپر و تغییر برای طول موج ۷۰۰ نانومتر و ۱.۱ میکرومتر به ترتیب در حدود ۴۰۰ و ۲۰۰ نانو آمپر می‌باشد. با در نظر گرفتن تغییرات نسبی توان منبع نسبت به طول موج، پاسخدهی حدود ۸ برابر برای طول موج ۷۰۰ نانومتر از ۱.۱ میکرومتر بیشتر و پاسخدهی طول موج ۱.۱ میکرومتر هم ۱۰۰ برابر طول موج ۳.۵ میکرومتر می‌باشد. همچنین جالب است که به این نکته اشاره شود که پاسخ دهی طول موج‌های ۲ و ۳.۵ میکرومتر تقریباً مشابه می‌باشد در حالی که توان گسیل شده از منبع در طول موج ۳.۵ میکرومتری، ۰.۷ برابر توان در طول موج ۲ میکرومتر می‌باشد. بطور کلی به نظر می‌رسد که پاسخ دهی هم به فرکانس و هم به شدت تابش وابسته است که این یک مزیت در بین آشکارسازها حساب می‌شود.

(الف)



کوانتومی داخلی (%). (۱۶-۶) در مورد گرافین گزارش شده است.

در مجموع مشخصات محاسبه شده ی قطعه ساخته شده در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۲ خلاصه ای از مشخصات آشکارسازهای گرافینی ساخته شده مختلف است که با نتایج نمونه ساخته شده ما مقایسه می شود.

جدول ۱. مجموعه ای از اطلاعات محاسبه شده روی دو نمونه آشکارساز دیود شاتکی گرافین-سیلیکن ساخته شده

نمونه	تعداد لای های گرافین	$\lambda(\mu m)$	$V_b (mv)$	$\Delta I_p (nA)$	$R (mA W^{-1})$	$\eta_i (%)$	$D (W^{-1})$
نمونه ۱	multilayer	$\lambda = 0.7$	10	400	2.88	21.9	$0.28 \times 10^7$
		$\lambda = 1.1$	10	200	0.06	0.3	$0.52 \times 10^5$
		$\lambda = 2$	10	10	$0.28 \times 10^{-3}$	0.7	$0.16 \times 10^3$
		$\lambda = 3.5$	10	10	$0.26 \times 10^{-3}$	0.4	$0.23 \times 10^2$
۲	1	$\lambda = 1.5$	15V.	51.5.	2.8-9.9	10-30	$0.23 \times 10^{10}$

جدول ۲. مقایسه ی نمونه هایی از مشخصات آشکارسازهای گرافینی ساخته شده

آشکارساز	$\lambda(\mu m)$	$V_b(v)$	$R (mA W^{-1})$	$\eta (%)$
ترانزیستور گرافینی	1.5	80	0	6-16
ترانزیستور گرافینی با الکترودهای شانه ای	1.5	15	1.5-6.1	-
دیود شاتکی گرافین-سیلیکن ساخته شده	1.5	15	2.8-9.9	10-30

پاسخدهی دیود شاتکی گرافین-سیلیکن، بیش از ۱.۸ برابر پاسخدهی بهترین آشکارساز گرافینی در طول موج ۱.۵۵ میکرومتر است، که تا کنون معرفی شده است و بیش از ۱۰۰ برابر بزرگتر از آشکارسازهای تمام سیلیکنی می باشد. اگرچه پاسخدهی آشکارساز دیود شاتکی گرافین-سیلیکن، بیش از پاسخدهی سایر آشکارسازهای گرافینی است، اما

کوانتومی خارجی- که نسبت حامل های نوری جذب شده در مدار خارجی به تعداد فوتون های رسیده به سطح آشکارساز است- متفاوت است. در واقع بازده کوانتومی داخلی در افزاره های بر پایه گرافین، ماکزیمم بازده کوانتومی قابل دستیابی در این افزاره ها را نشان می دهد، بدین معنی که اگر بتوان این امکان را فراهم آورد که تمام فوتون های رسیده به سطح آشکارساز توسط آن جذب شوند، در این صورت بازده کوانتومی داخلی و خارجی برابر خواهند بود. همان طور که در بخش های قبلی نیز به آن اشاره شد، روش های مختلفی برای فراهم کردن جذب صد درصدی در گرافین ارائه شده است [۲۵] که این امر را ممکن می سازد که مقدار بازده کوانتومی داخلی با مقدار خارجی آن برابر شود و از تمامی پتانسیل آشکارساز استفاده شود.

آشکارکنندگی (D) هر آشکارساز طبق عبارت زیر تعریف می شود:

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (24)$$

$$NEP = \frac{\sqrt{2eI_0 f}}{\eta e} \hbar \omega$$

که  $f$  پهنای باند،  $I_0$  جریان تاریکی آشکارساز،  $\eta$  بازده کوانتومی است. این پارامتر همان طور که دیده می شود به پهنای باند بستگی دارد.

## نتایج و بحث

پاسخدهی برای دیود شاتکی گرافین-سیلیکن ساخته شده،  $2.8 \text{ mA/W}$  تا  $9.9 \text{ mA/W}$  محاسبه شده است. با در نظر گرفتن %۲.۳ جذب در گرافین، بازده کوانتومی داخلی دیود شاتکی گرافین-سیلیکن در محدوده (%۳۰-۱۰) خواهد بود. این در حالی است که ماکزیمم مقدار بازده



- Journal of Applied Physics 50 (2011) 070117.
- [8] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhange Y., Grigorieva S.V., Firsov A.A., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", Science, Vol. 306, (2004).
- [9] Novoselov.k.s .,et al .,proc. Natl. Acad.Sci. USA(2005) 102,10451
- [10] Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S. & Geim, A. K. The electronic properties of graphene. Rev. Mod. Phys. 81, 109–162 (2009).
- [11] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Katsnelson M. I., Grigorieva S.V., Firsov A. A., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, Nature Vol. 438, (2005), pp. 197-200.
- [12] Geim A.K., Novoselov K.S., "The rise of grapheme", Nature Mater, Vol .6, (2007), pp.183.
- [13] Barlas Y., Barnea T., Polini M., Asgari R., Macdonad A.H., Chirality and correlations in graphene, Physical Review Letters.Vol.98, No. 23, (2007), pp. 6601.
- [14] MC. Lemme, Frank H. L. Koppens, A. L. Falk, M. S. Rudner, H. Park, L. S. Levitov, and C. M. Marcus, Nano Lett. (2011), 11, pp. 4134–4137.
- [15] Nair,R.R.et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene.Science 320, pp.1308,2008.
- [16] Wang,F.et al. Gate-variable optical transition in graphene, Science 320, pp.206-209,2008.
- [17] Lee, E. J. H., Balasubramanina, K.,Weitz,R.T., Burghard, M.& Kern,K. "Contact and edge effects in grapheme devices", Nature Nanotech.3, pp.486-490. 2008.
- [18] Xia,F., Mueller,T., Lin,Y.M., Valdes-Garcia, A. and Avouris ,P., Nat.Nanotechnol.4, pp.839, 2009.
- [19] Dong,Y.Li,X., Cheng,C., Zhou,X., Zhang ,P ., Cao, j., and Zhang,H., j. physica B 404, 4282(2009).

نکته جالب و قابل توجه آن، بازده کوانتومی بالا در این قطعه است .

## نتیجه گیری

بطور کلی در این تحقیق، خواص نوری گرافین مورد بررسی قرار گرفت. دیود شاتیکی سیلیکن-گرافین به عنوان یک آشکارساز نوظهور در حوزه IR معرفی شد که کاربردهای بسیار خوب نظامی، از جمله در بخش مخابرات سریع، حفاظت، دید در شب، دنبال کننده موشک و هوافضا دارد. مشخصات این افزاره محاسبه و با آشکارسازهای گرافینی دیگر مقایسه شد.

## منابع

- [1] M. Casalino, G. Coppola, M. Iodice, I. Rendina, and L. Sirleto, "Near-Infrared All-Silicon Photodetectors", International Journal of Photoenergy, Volume 2012 (2012), Article ID 139278, 6 pages.
- [2] B. Sensale-Rodriguez<sup>1</sup>, R. Yan, M. M. Kelly, T. Fang, K. Tahy, W. Sik Hwang, D. Jen<sup>1</sup>, L. Liu & H. G. Xing, Nat. Commun.3, 780 (2012).
- [3] M. Sakowicz, M. B. Lifshits, O. A. Klimenko, F. Schuster, D. Coquillat et al. J. Appl. Phys. 110, 054512 (2011).
- [4] Dawlaty, J. *et al.* "Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible", Appl. Phys. Lett. **93**, 131905 (2008).
- [5] M. Amirmazlaghani, F. Raissi, O. Habibpour, J. Vukusic and J. Stake, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 49, NO. 7, (2013), 589-594.
- [6] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, AC. Ferrari, Graphene photonics and optoelectronics. Nat. Photonics. 2010, 4, 611–622.
- [7] Maxim Ryzhii<sup>1</sup>, Taiichi Otsuji, Vladimir Mitin, and Victor Ryzhii<sup>1</sup>; Japanese

- [20] Vasko, F.T., Ryzhii, V., Phys. Rev. B 77, 195433 (2008).
- [21] F.N. Xia, T. Mueller, Y.-M. Lin, A. Valdes-Garcia, and P. Avouris, Nat. Nanotechnol. 4, 839–843 (2009).
- [22] T. Mueller, F. Xia and P. Avouris, Nature Photonics, 2010.40.
- [23] Mueller, T., Xia, Avouris, P., Nat. photonics 4, pp. 297 (2010).
- [24] Matyba, P., Yamaguchi, H., Eda, G., Chhowalla, M., Ed-man, L., Robinson, N.D., ACS Nano 4, 637 (2010).
- [25] S. Thongrattanasiri, Frank H. L. Koppens, F. Javier Garcia de Abajo, Physical Review Letters 108, 047401 (2012).
- [26] L. C. Kimerling, L. dal Negro, S. Saini et al., “Monolithic silicon micro photonics,” in Silicon Photonics, L. Pavesi and D. J. Lockwood, Eds., vol. 94 of Topics in Applied Physics, pp. 89–119, Springer, Berlin, Germany, 2004.
- [27] D. E. Mercer, “Platinum Silicide/Silicon Interface Studies,” Stanford University, CA, United States, RL-TR-91-272, Final Technical Report, October 1991.
- [28] G. Masini, L. Colace, and G. Assanto, “2.5 Gbit/s polycrystalline germanium-on-silicon photodetector operating from 1.3 to 1.55  $\mu\text{m}$ ,” Applied Physics Letters, vol. 82, no. 15, pp. 2524–2526, 2003.
- [29] L. Colace, P. Ferrara, G. Assanto, D. Fulgoni, and L. Nash, “Low dark-current germanium-on-silicon near-infrared detectors,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 19, no. 22, pp. 1813–1815, 2007.
- [30] Farshid Raissi, “A Possible Explanation for High Quantum Efficiency of PtSi/Porous Si Schottky Detectors”, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, NO. 4, April 2003.