****

**حسگرهای مبتنی بر گرافن، دیگر مواد دو بعدی و سیستم های ترکیبی**

گرافن و بقیه مواد دو بعدی، مانند فلز گذار dichalcogenide، به سرعت به عنوان بلوک‌های ساختاری جذاب برای کاربردهای اپتوالکترونیک، همراه با تمرکز قوی روی پلتفرم‌های مختلف تشخیص نور، خود را به اثبات رسانده‌اند. تطبیق‌پذیری این سیستم‌های مواد، کاربرد آن‌ها را در نواحی شامل تشخیص بسیار سریع و با حساسیت بالای نور در رنج فرکانسی ماوراء بنفش، نور مرئی، مادون قرمز و تراهرتز، امکان‌پذیر می‌کند. این حسگرها همانند تکنولوژی‌های الکترونیک و فوتونیک سیلیکون، می‌توانند با دیگر اجزای فوتونیک مبتنی بر همان مواد، در کنار یکدیگر قرار گیرند. در اینجا، حسگرهای نوری مبتنی بر گرافن مدرن، سایر مواد دوبعدی و سیستم‌های هیبرید مبتنی بر ترکیب بلورهای دو بعدی مختلف یا بلورهای دو بعدی و دیگر مواد (نانو)، مانند نانوذرات پلاسماسون، نیمه هادی ها، نقاط کوانتومی یا ادغام آنها با موجکهای سیلیکون را مرور و ارزیابی می‌کنیم.

تبدیل نور به سیگنال‌های الکتریکی در صدر تکنولوژی قرار دارد ‌دهد. کاربردهای شامل تصویربرداری ویدئویی، ارتباطات نوری، تصویربرداری بیومدیکال، امنیت، دید در شب، حسگر گاز و تشخیص حرکت، به دلیل توسعه مواد با کارایی بالا و تکنولوژی تولید و یکپارچه‌سازی در مقیاس بزرگ به سطح بالایی از پیشرفت رسیده است. با وجود رشد مقیاس و تنوع نواحی کاربردی، نیاز به یک پلتفرم تشخیص نور با کارایی بالاتر در زمینه سرعت، کارایی یا رنج طول موج، به اندازه انعطاف‌پذیری، شفافیت و اجتماع‌پذیری CMOS، روز به روز برجسته‌تر می‌شود.

گرافن ماده جذابی برای فوتونیک و اپتوالکترونیک است زیرا در مقایسه با مواد دیگر مزایای متعددی ارائه می دهد. انواع دستگاه های اپتوالکترونیک نمونه اولیه ، مانند الکترودهای شفاف در نمایشگرها و ماژول های فتوولتائیک، مدولاتورهای نوری ، دستگاه های پلاسمونی و لیزرهای فوق سریع، تاکنون نشان داده شده است. در بین این‌ها، بیشترین تلاش برای پیشرفت سنسورهای نوری، براساس تعدادی از ویژگی های متمایز گرافن و مواد مرتبط (GRM)، صورت گرفته است. اول، گرافن بدون شکاف است. این ویژگی منحصربفرد، تولید حامل‌های بار از طریق جذب نور را در طیف بسیار وسیعی از انرژی، امکان‌پذیر می‌کند. این رنج وسیع اشعه ماوراء بنفش، نورمرئی، مادون قرمز موج کوتاه (SWIR)، نزدیک مادون قرمز (NIR)، میان مادون قرمز (MIR)، مادون قرمز دور (FIR) و رگرسیون طیفی تراهرتز (THz) را در برمی‌گیرد. همچنین، گرافن دارای دینامیک حامل بار بسیار سریع، جذب مستقل طول موج، خواص نوری قابل تنظیم از طریق دوپینگ الکترواستاتیک، نرخ تخلیه کم و تحرک بالا و توانایی محدود کردن انرژی الکترومغناطیسی به حجم بی‌سابقه کم است. تحرک‌پذیری بسیار بالای حامل‌ها باعث تبدیل سریع فوتون و یا پلاسمون به جریان الکتریکی یا ولتاژ می شود.

بسیاری از این ویژگی‌ها و قابلیت‌های منحصربفرد سیستم‌های تشخیص نور مبتنی بر گرافن، در طول چند سال اخیر مطالعه شده و به کاربردهای مختلفی اشاره شده است. بعضی از این ویژگی‌ها در حال حاضر با رقابت با تکنولوژی های موجود به رقابت های تجاری دست پیدا کرده اند. از همه مهم‌تر، گرافن با پلتفرم مبتنی بر سیلیکون بسیار پیشرفته برای الکترونیک و فوتونیک سازگار بوده، و آن را به عنوان یک رقیب قوی برای ادغام هزینه کم و مقیاس بزرگ در شبکه های اپتوالکترونیک و مدارهای خواندن چند پیکسلی CMOS سازگار قرار می‌دهد.

گرافن تنها یکی از تعداد زیادی از بلورهای دو بعدی (2D) است که در حال حاضر تنها شروع به بررسی می‌شوند. صدها مواد لایه ای وجود دارد که ثبات آنها را تا به تک لایه ها حفظ می کند و خواص آنها مکمل گرافن است. اکسید فلزی گذرا (TMOs) و فلز گذرای dichalcogenides (TMDs) دارای ساختار لایه ای هستند. اتم‌های هر لایه توسط پیوند کووالانسی کنار یکدیگر نگه داشته می‌شوند، در حالی که لایه‌های مختلف توسط نیروی واندروالانسی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. در مقایسه با نیمه‌هادی‌های با شکاف باند مستقیم کلاسیک، TDMها به دلیل شفافیت، انعطاف‌پذیری مکانیکی و پردازش آسان، مزایای اضافی را در زمینه اپتوالکترونیک ارائه می‌دهد. همچنین، تونایی تنظیم شکاف باند توسط تغییر تعداد لایه‌ها (N)، تشخیص نور را در طول موج‌های مختلف امکان‌پذیر می‌کند. این ویژگی ها از بسیاری جهات گرافن را تکمیل می کند: گرافن برای فناوری های باند پهن و فناوری‌های سریع مفید است، در حالیکه TMD های نیمه هادی برای کاربردهایی که به جذب نور قوی و الکترولیومینسانس نیاز دارند، مفید هستند. یک رویکرد امیدوارکننده ترکیب این خواص و ایجاد دستگاه‌های هیبریدی و موادی چند منظوره و با کارایی بالا، شامل گرافن و سایر پشته های ناهمگن کریستال 2بعدی است. لایه های گرافن می توانند به عنوان الکترود قابل تنظیم به کار برده شوند، در حالیکه TMD ها به عنوان مواد عکس برداری فعال استفاده می شوند، که نشان‌دهنده تعامل قوی نور و جذب فوتون هستند.

در این بررسی، ما در مورد وضعیت فعلی مدرن تشخیص نور بر اساس GRM ها و سیستم های ترکیبی‌ای بحث می‌کنیم که بوسیله ترکیبی از کریستال های دوبعدی مختلف یا کریستال های 2بعدی و دیگر مواد (نانو) مانند نانوذرات پلاسمونی، نقاط کوانتومی، یا توسط ترکیب GRMها با موجک‌های سیلیکونی، ایجاد شده‌اند. در ابتدا، اصطلاحات و مکانیسم های فیزیکی پایه‌ای تشخیص تشخیص نور ، و سپس تجربیات آزمایشی انواع مختلفی از دستگاه‌های حسگر نور، از جمله تکنیک های افزایش حساسیت و جذب نور مورد بحث قرار گرفته است. با بحث در مورد سطوح پیشرفت و عملکرد سیستم های پیشرفته تشخیص نور GRM، در مقایسه با تکنولوژی های موجود نتیجه‌گیری می‌کنیم.

**مکانیزم‌های فیزیکی قادر به تشخیص نور**

اصل کلیدی که تشخیص فوتوژن و دیگر کاربردهای اپتوالکترونیک به آن متکی هستند، تبدیل فوتون‌های جذب شده به سیگنال الکتریکی است. چندین مکانیزم متفاوت در گرافن که توسط آن این تبدیل صورت می‌گیرد، گزارش شده‌است. این روش‌ها شامل تاثیر فتوولتائیک، تاثیر ترموالکتریک نوری، اثر بالومتریک، اثر فوتوگیتینگ و مکانیزمی که از موج پلاسما کمک می‌گیرد می‌باشد. در ادامه، ما این مکانیزم ها، که در چه زمانی هر یک از آنها برجسته شده و اهمیت آن‌ها در تشخیص نور مبتنی بر GRM را توصیف می‌کنیم.

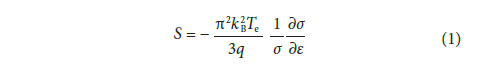
توجه شود که اصطلاحات مربوطه، واحدها و عناصر کلیدی شایستگی‌ها برای حسگر نور (مانند مفاهیم جریان نور، سرعت، راندمان کوانتومی داخلی و خارجی، حساسیت، تشخیص، قدرت برابر با نویز و افزایش هدایت فوتونی) در جعبه 1 خلاصه شده است.

اثر فتوولتائیک. تولید جریان نور فوتوولتائیک (PV) براساس جداسازی جفت الکترون-حفره (e-h) تولیدشده با نور بوده که توسط میدان های الکتریکی موجود در اتصالات بین نواحی آلاییده شده مثبت (p-type) و منفی (n-type) گرافن یا بین بخش‌های با آلایش متفاوت، ایجاد می‌شود. همان اثر را می توان با استفاده از ولتاژ بایاس سورس-درین(Vbias)، ایجاد کرد که یک میدان الکتریکی خارجی تولید می‌کند. اما این به طور کلی در مورد گرافن اجتناب می شود، چون یک نیمه رسانا است و بنابراین یک جریان تاریک بزرگ تولید می کند. میدان ساخته شده را می توان نتیجه دوپینگ شیمیایی در محل دانست که به صورت الکترواستاتیکی با استفاده از گیت‌ها یا با استفاده از تفاوت عملکرد بین گرافن و یک فلز متصل ایجاد می‌شود. در مورد گیت‌های تقسیم شده، دوپینگ می تواند بسته به ولتاژهای اعمال شده به گیت، به صورت p یا n تنظیم شود، در حالیکه در مورد اتصالات گرافن و فلز، دوپینگ در ناحیه تماس ثابت می شود. به طور معمول برای فلزات با عملکرد کاری بالاتر از گرافن ذاتی (4.45 eV) p-type است، در حالی که کانال گرافن می تواند p یا n باشد. جهت جریان نور فقط به جهت میدان الکتریکی بستگی دارد، و نه به سطح دوپینگ. بنابراين، هنگاميکه از p-n به n-p يا از +p-p به p-p+، می‌رود، تغییر علامت می‌دهد، که p + به معناي دوپينگ p-type قوی تر نسبت به p است.

یادآور می‌شویم که پراکندگی الکترون-الکترون (e-e) می تواند به تبدیل یک جفت الکترون-حفره با انرژی بالا به جفت های چندگانه e-h با انرژی پایین تر منجر شود. این فرایند، همچنین به عنوان ضرب حامل شناخته می شود، که به طور بالقوه می تواند کارایی کلی تشخیص نور را افزایش دهد.

اثر ترموالکتریک نوری. انتقالات با کمک حامل‌های حرارت‌دیده می تواند نقش مهمی در گرافن (شکل 1a-d) بازی کند. به علت تعاملات قوی e، یک جفت الکترون-حفره برانگیخته موجب افزایش سریع گرمای (~ 10-50 fs) حامل‌ها در گرافن می شود. از آنجا که انرژی فونون نوری در گرافن بزرگ (~ 200 مگاوات) است، حامل های گرم ایجاد شده توسط میدان تابش می تواند در دمای Te باقی مانده (و در نتیجه انرژی kBTe، با kB ثابت Boltzmann) که برای چند پیکوثانیه، بالاتر از دمای شبکه است. تعادل نهایی الکترون‌های حرارت‌دیده و شبکه از طریق پراکندگی کندتر بین حامل های بار و فونون های صوتی صورت می‌گیرد. این فرایندها در طول چند نانوثانیه انجام می‌شوند، اگر چه آنها به سرعت قابل ملاحظه‌ای در برخوردهای ناشی از اختلال دست می‌یابند.

الکترونهای داغ تولید شده توسط نور میتوانند یک ولتاژ نوری، VPTE را با اثر فوتو ترموالکتریک (اثر PTE) (اثر Seebeck) تولید کنند: VPTE = (S1 - S2) ΔTe،که S1،2 (در VK-1) قدرت ترموالکتریک (Seebeck ضریب) در دو ناحیه گرافن با دوپینگ‌های مختلف، و ΔTe تفاوت دمای الکترون بین نواحی است. به طور کلی‌تر، VPTE می توان با ادغام میدان الکتریکی محلی تولید شده توسط گرادیان درجه حرارت ناشی از اپتیک، Te∇، همراه با یک ضریب متغیر با مکان Seebeck، محاسبه کرد: VPTE = ∫S ∙ ∇Te dx. اثر PTE در اتصالات P-N گرافن یا در گرافن معلق نقش مهمی ایفا می کند. از آنجایی که الکترونهای داغ، به جای گرمایش شبکه، پاسخ الکترونیکی را در این شرایط تولید می کنند، آشکارسازهای گرافن PTE می توانند پهنای باند بالا را مانند آشکارسازهای PV بدست آورند. توان ترموالکتریکی S با هدايت الكتريكي σ توسط فرمول مات مربوط است:



q شار الکترون است و مشتق هدایت الکتریکی σ با توجه به انرژی ε باید در انرژی فرمی، یعنی در ε = εF = ħvFkF، ارزیابی شود، ħ ثابت پلانک کاهش یافته، vF سرعت Fermi (که در گرافن 54 ~ 106 ms-1 است) و kF بردار موج فرمی است. توجه داشته باشید که چون معادله (1) از توسعه رابطه سامرفلد مشتق شده است، فقط برای kBT << εF معتبر است. برای این شرایط، S می تواند از ویژگی های انتقال دستگاه، یعنی از وابستگی هدایت به ولتاژ گیت محاسبه شود. یک منحنی معمول با وابستگی S به تراکم حامل (n) در شکل 1 نشان داده شده است.

اثر بالومتریک. اثر بالومتری با تغییر در هدایت انتقال ایجاد شده توسط حرارت مرتبط با فوتون‌ها در ارتباط است (شکل 1d). بولومتر قدرت تابش الکترومغناطیسی را با جذب تابش وابسته (dP) و خواندن نتایج افزایش درجه حرارت dT اندازه‌گیری می‌شود. بالومترها عمدتا از مواد نیمه هادی یا مواد جاذب ابررسانا ساخته شده است و به طور گسترده ای در محدوده طول موج های زیر میلی متر (THz) استفاده می شود، که آنها از جمله حساس ترین آشکارسازها هستند. پارامترهای کلیدی یک بالومتر، مقاومت حرارتی Rh = dT / dP است که در نهایت حساسیت آن را تعریف کرده و ظرفیت گرمای Ch که زمان پاسخ آن τ = RhCh (Ref 56) را تعیین می کند. گرافن حجم کوچکی برای یک ناحیه مشخص و حالت‌های با تراکم کم دارد، که به Ch کم، و درنتیجه یک پاسخ سریع دستگاه منجر می‌شود. خنک‌کردن الکترون‌ها با استفاده از فوتون‌های صوتی به دلیل سطح فرمی کوچک ناکارامد است و خنک‌کردن با فوتون‌های نوری نیازمند Te (kBTe> 0.2 eV) بالا است.لذا Rh نسبتا بالا بوده و منجر به حساسیت بالومتری بالا می‌شود.

همانطور که این مکانیزم تشخیص نور، به جای تولید مستقیم جریان نوری، مبتنی بر تغییر نور در هدایت است، به یک بایاس بیرونی نیاز دارد و می تواند بدون نیاز به پیوند p-n بر روی گرافن همگن عمل کند. تغییر هدایت ناشی از برخورد نور می تواند به سبب دو مکانیسم باشد: (1) تغییر در تحرک‌پذیری حامل با توجه به تغییر درجه حرارت مرتبط؛ یا (2) تغییر در تعداد حاملهایی که در جریان هستند. توجه شود که با اثر PV با میدان الکتریکی تولید شده توسط بایاس خارجی همخوانی دارد.

اثر فتوگیتینگ. اثر Photogating بر مبنای تغییر نور ناشی از تراکم حامل GRM، Δn است و بنابراین هدایت آن Δσ = Δnqμ است، که μ تحرک‌پذیری است. ما می توانیم دو مورد را تشخیص دهیم. در ابتدا، تولید جفت حفره-الکترون در GRM اتفاق می افتد و سپس یکی از دو نوع حامل (الکترون یا حفره) به دام میفتد (به عنوان مثال، در تله بار یا در مولکول های مجاور نانوذرات). در مرحله دوم، تولید الکترون-حفره در نانوذرات، مولکول ها یا تله های بار در مجاورت GRM رخ می دهد. پس از آن یک نوع حامل به GRM منتقل می شود (در برخی موارد به وسیله یک میدان داخلی رانده می شود) و دیگر حامل‌ها در ذرات، مولکول ها یا تله‌ها قرار دارند، که ورقه GRM را به عنوان گیت در نظر می‌گیرند در حالی که بارها درGRM بین سورس و درین تکرار می‌شوند. تفاوت بنیادی بین اثر بولومتری که بر مبنای تغییر در μ به علت گرما است، و اثر فتوگیتینگ که بر مبنای تغییر ناشی از نور در n است، وجود دارد.

افزایش بهره هدایت نوری، Gph (با توجه به شکل 1 برای تعریف) می تواند با استفاده از یک هادی با تحریک‌پذیری بالا (مانند گرافن) و با طول τtr (با جعبه 1 برای تعریف) به شدت افزایش پیدا کند. اما، یک τtr طولانی سرعت عمل را کاهش می دهد. بنابراین این آشکارسازها می توانند برای پهنای باند موقتی کم، مانند برنامه های تصویربرداری ویدئویی استفاده شوند. آشکارسازهای هدایت نوری ممکن است یک جریان تاریک بالا را ایجاد کنند، لذا یک ارزیابی مناسب از عملکرد آشکارساز نه تنها توسط پاسخ‌پذیری بلکه به وسیله اندازه گیری نویز معادل توان (NEP) یا تشخیص خاص D \* (تعاریف در جعبه 1 را ببینید) ارائه می‌شود.

مکانیزم موج پلاسمای کمک کننده. Dyakonov و Shur یک طرح تشخیص نور پیشنهاد دادند که به وسیله یک ولتاژ d.c. در یک ترانزیستور اثر میدان (FET) در پاسخ به میدان تابشی متغیر تولید می شود (شکل 1d). این بر اساس این واقعیت است که یک FET دارای گاز 2بعدی الکترون بوده و می تواند به عنوان یک گودال برای امواج پلاسما عمل کند. (نوسانات تراکم جمعی) هنگامی که این موجهای پلاسما ضعیف میشوند (یعنی زمانی که یک موج پلاسما در سورس آغاز می شود تا زمان رسیدن به درین در زمان کوتاهتر از زمان بی حرکتی)، تشخیص تابش از تداخل سازنده موج های پلاسما در گودال بهره می برد، که در نتیجه پاسخ رزونانتی افزایش یافته است. این به اصطلاح ناحیه رزونانس تشخیص نور پلاسما موج است و می تواند یک سیگنال 5-20 برابر قوی تر از سیگنال غیر رزونانس باند پهن ایجاد کند. تشخیص پهنای باند زمانی اتفاق می افتد که موج های پلاسما بیش از حد میرا شوند: یعنی زمانی که امواج پلاسما تولید شده در سورس پیش از رسیدن به درین، میرا شوند.

Dyakonov و Shur نشان دادند که پاسخ فوتوولتاژ یک سیستم الکترون 2D در یک FET، یعنی تفاوت پتانسیل الکتریکی بین درین و سورس، حاوی جزء d.c است حتی اگر فیلد ورودی a.c. باشد و بنابراین یکسوسازی سیگنال را فراهم می کند. این به خصوص برای تشخیص تابش THz مفید است. یکسوسازی به دلیل پاسخ غیر خطی گاز 2D الکترون در کانال FET اتفاق می افتد و به مکانیزم های یکسوسازی بیرونی که به دلیل مثلا، موانع شاتکی در اتصالات یا دیگر عناصر مداری که به صورت غیراهمی پاسخ می دهند، مرتبط نیست. برای ناحیه رزونانت، پاسخ نوری d.c. توسط قله ها در تعداد فردی از پایین ترین فرکانس موج پلاسما مشخص می شود. تشخیص رزونانس پرتوهای THz در FET های گرافنی به طور تئوری در Ref. 61، که تأثیر غیرخطی های هیدرودینامیکی ناشی از جریان گاز 2D الکترون در یک ورق گرافن، به صورت کمی اندازه گیری شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از پراکندگی امواج پلاسما در گرافن، نویسندگان مرجع. 61 به این نتیجه رسیدند که اندازه دستگاه معمولی با سایز L که برای کار در طیف THz است، بین 1 تا 10 میکرومتر متفاوت است.

آشکارسازهای THz دمای اتاق بر اساس FETهای گرافنی آنتن های جفت شده هستند و بهره برداری از مکانیزم Dyakonov و Shur نشان داده شده است. در مرجع. 62 موجهای پلاسما برانگیخته شده توسط تابش THz، به شدت میرا می شوند و بنابراین آشکارسازها در ناحیه رزونانس کار نمی کردند. وابستگی فتوولتائیک به تراکم حامل در کانال FET نیز نشان دهنده امتیازات PTE می باشد.

**دسته بندی حسگر های نور**

در حال حاضر ما در مورد کلاس های اصلی فوتودتکتور بر اساس GRM های موجود در پیشینه بحث می کنیم و شایستگی ها و عملکرد های نسبی آنها را در نظر می گیریم.

فوتودیکاتور فلزی گرافن فلزی. این نخستین کلاس از تشخیصدهنده نور مبتنی بر گرافن بود که مورد بررسی بود. در گزارش های اولیه، جریان نور توسط روشنایی محلی یکی از رابط های فلزی / گرافن یک FET گرافن با گیت پشتی ایجاد شده است. جریان نتیجه به اثرPV نسبت داده شد. نشان داده شد که این میدان از انتقال بار از فلز متصل به گرافن ایجاد می شود و بنابراین می تواند با انتخاب مناسب فلز تنظیم شود. این امر می تواند توسط دوپینگ از طریق gating الکترواستاتیک افزایش یابد. الکترودهای فلزی توسط چند لایه گرافن با FeCl3 افزایش یافته جایگزین شدند تاحسگر های نور تمام مبتنی بر گرافن را ایجاد کنند.

علاوه بر اثر PV اثر PTE نیز به جریان نور نسبت داده شد. در مراجع 36، 37 و 72 نشان داده شده است که پاسخ نور نزدیک پیوندهای PN یا ارتباط گرافن تک لایه و دو لایه ( به ترتیبSLG و BLG) توسط اثر PTE قدرت می گیرد. در مقابل جریان PV، جریان PTE معکوس شدن در اتصالات p-n دو قطبی و همچنین اتصالات تک قطبی p + p یا nn- را نشان می دهد. علامت، به علت تغییر در نرخ تغییر جریان به تغییر ولتاژ ورودی، ∂σ / ∂ε، در رفتن از p- به n-type تغییر می کند (شکل 1b). تغییر علامت در هنگام تغییر جهت میدان الکتریکی همراه، منجر به تغییر علامت شش برابر در جریان نور می شود (شکل 1c). بنابراین علامت جریان نور ناشی از اثر PV در مقابل جریان PTE است و می تواند برای تمایز بین مکانیسم های PV و PTE استفاده شود (شکل 1b). اندازه گیری طول موج و قطبش از پاسخ نور در نزدیکی اتصال گرافن به فلز برای اندازه گیری و کنترل سهم نسبی اثرات PTE و PV مورد استفاده قرار می گیرد، که هر دو با اضافه شدن به پاسخ نوری کلی انجام می شوند. استفاده از اثرات PV در طول موج های طولانی تر انجام می گیرد.

همانطور که تولید جریان نور تنها در ناحیه زیر میکرومتری رابط فلزی / گرافن اتفاق می افتد، یک ساختار انگشتی به هم جفت شده (شکل 2b) برای افزایش سطح موثر تشخیص نور تصویب شد. اعمال یک بایاس برای شکستن تقارن آینه دستگاه، کاربردی نیست، زیرا طبیعت نیمه رسانای گرافن موجب جریان قوی تاریک می شود. بدین ترتیب یک طرح فلزی نامتقارن در نظر گرفته شد (مشخصات باند در شکل 2a)، که عملیات را با جریان تاریک و بایاس صفر فعال می کند و قابلیت پاسخگویی بین 1.5 تا 6.1 میلی آمپر بر وات در NIR. IQE های (برای تعریف جعبه 1) فلز-گرافن-فلز روی سطوح Si / SiO2 در رنج 6-16 درصد نشان داده شده است که نشان می دهد که امکان بهبودی وجود دارد، زیرا IQE های بالاتر (~ 35٪) در گرافن معلق مشاهده شده است.

تحرک پذیری بالا و طول عمر کوتاه حامل در گرافن باعث می شود کهحسگر های نور فلز-گرافن-فلز با نرخ داده بالا کار کنند. دستگاه در شکل. 2b در یک لینک نوری مستقر شد و بازیابی بدون خطا از جریان داده 10 گیگابیت بر ثانیه به دست آمده است. این در شکل 2c توسط نمودار چشم نشان داده شده است که یک پوشش از بخش های مختلف جریان داده بوده و کیفیت سیگنال در انتقال دیجیتالی با سرعت بالا را نشان می دهد. در اتصالات فلز-گرافن، هیچ تضعیف پاسخ نوری تا یک فرکانس مدولاسیون 40 گیگاهرتز مشاهده نشد [18] و اندازه گیری تمام نوری یک پهنای باند داخلی 262 گیگاهرتز را حاصل شد. توجه شود که نه تنها اثر PV، بلکه PTE با پهنای باند بالای مشاهده شده به صورت آزمایشی، به دلیل جدا شدن دمای الکترونی و شبکه، سازگار است.

افزایش حساسیت توسط حفره ها، موجبرها و پلاسمونیک ها. SLG 2.3٪ نور پاسخ را جذب می کند، که به طور قابل توجهی برای مواد نازک اتمی بسیار زیاد است، اما در شرایط مطلق بسیار کوچک است. این یک ویژگی جذاب برای دستگاه های اپتوالکترونیک انعطاف پذیر و شفاف است. با این حال برای افزایش جذب SLG بسیار مورد علاقه است.

یک رویکرد برای افزایش جذب براساس یکی کردن در میکروکاوی نوری یا حفره های کریستال فوتونی سطحی است. حفره گزارش شده در مرجع75 (شکل 2d)، بازتابنده های توزیع براگ را مورد استفاده قرار داده که شامل لایه های با یک چهارم طول موج از مواد متفاوت هستند، در حالی که در مرجع 76آینه فلزی استفاده شد. نور پاسخ درون حفره سطحی قرار دارد و چندین بار از طریق SLG عبور می کند و موجب افزایش جذب می شود. بیش از 60 درصد جذب نور و واکنش پذیری 21 میلی آمپر بر وات به دست آمد. اگرچه حساسیت بهبود یافته به هزینه پهنای باند طیفی به دست می آید، طول موج طراحی را می توان طوری انتخاب کرد، که یک حفره نوری با تلفات کم در محدوده طول موج مورد نظر قرار گیرد.

یک رویکرد دیگر شامل ترکیب همپوشانی گرافن با یک موجبر نوری است. این در شکل 2f نشان داده شده است(مرجع 21). مدل نوری در یک موجبر سیلیکون بر روی عایق از طریق یک دم ناپایدار با یک SLG که در بالا قرار دارد جفت می شود. یک پاسخ نوری تقریبا مسطح در مقابل پنجره های مخابرات تمام نوری (از O- به U-band) نشان داده شده است، که فراتر از دامنه طول موجحسگر های Ge است (قابلیت پاسخ دهی از جنبه بلندی طول موج توسط شکاف باند Ge محدود شده است). پهنای باند بیش از 20 گیگاهرتز و یک چشم باز با 12 گیگابایت بر ثانیه بدست آمد که نشان دهنده پتانسیل انتقال داده با سرعت بالا بود. پاسخ دهی های گزارش شده در محدوده 0.05-0.13 آمپر بر وات در مقابلحسگر های نوری پیشرفته ی ساخته شده از GeSn (Ref. 79) است که هنوز یکی از مناسب ترین انتخاب ها برایحسگر های نوری سازگار با Si برای باندهای با طول موج های بلند (L و U) می باشد.

یک روش سوم برای افزایش پاسخ نوری شامل استفاده از افزایش میدان ناشی از تحریک پلاسمون های سطحی می شود. پلاسمون های محلی در نانوساختارهای فلزی برای اولین بار در ترکیب با گرافن برای دستیابی به پراکندگی رامان با سطح بالا 80 و برای تحقق پیشرفت های میدان های قوی در شکاف های زیر نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند. سپس این کار با قرار دادن نانوساختارهای پلاسمونی در نزدیکی اتصالات، (شکل 3a، b) که به بهبود قابل توجهی در عملکرد منجر شد، انجام می شود (شکل 3d). به عنوان یک مزیت اضافی، نانوساختارهای با رزونانس هندسی در طول موج های مورد نظر می تواند برای تقویت انتخابی مورد استفاده قرار گیرد، به طور بالقوه اجازه می دهد فیلتر کردن و تشخیص نور، و همچنین تعیین قطبش در یک دستگاه واحد انجام شود. عملکرد فرکانس را می توان در مقایسه با دستگاه های سنتی بهبود داد، به عنوان ساختارهای پلاسمونی تنها سهم ناچیز را به ظرفیت (بخشی از فمتوفاراد) اضافه می کند، اما می تواند به طور قابل توجهی مقاومت تماسی را کاهش دهد. یکی دیگر از راه حل این است که برداشتن نور را در ناحیه دیگری از دستگاه انجام دهیم و آن را به اتصال گرافن منتقل کنیم.

یک روش چهارم برای ارتقاء حسگر نوری بهره وری از افزایش میدان توسط پلاسمون ها است، اما در این مورد افزایش از نوسانات بار جمعی ذاتی مایع الکترون 2D در داخل گرافن حاصل می شود (شکل 3c، e). توانایی تنظیم طول موج پلاسما و طول عمر توسط گیتینگ یا دوپینگ می تواند برای بسیاری از کاربردها بسیار مهم باشد. تحرک پذیری بسیار خوب حامل در گرافن و ویژگی 2D آن باعث افزایش شدید بهبود تماس بین نور و گرافن می شود که منجر به افزایش جذب نور می شود. حالت ایده آل این خواهد بود که خود گرافن به عنوان ابزار تقویت کننده حسگر نور و پلاسمونیک استفاده شود. در واقع، آرایه های نانوریبن گرافن روی SiO2 با عرض های مختلف به عنوان دمای اتاق و حسگر نوری IR قابل تنظیم نشان داده شده است. همانطور که در شکل 3e نشان داده شده است، برای یک آشکارساز متشکل از یک آرایه از نانوریبون گرافنی 140 نانومتری، بهبود، 1500٪ است.

حسگرهای نوری ناهمگن گرافن-نیمه هادی. اتصالات سطحی پلان های گرافن و عناصر گروه IV و همچنین نیمه هادی های ترکیبی می توانند به عنوان دیودهای شاتکی عمل کنند. ویژگی های الکتریکی این دستگاه ها رفتار یکسوسازی، با یک مانع انرژی وابسته به مواد نیمه هادی، نشان می دهند. برای نور کم تاریک، حسگر نور نیمه هادی-گرافن تحت بایاس معکوس عمل می کنند، و مشخصات باند مربوطه در شکل 2e نشان داده شده است. جذب نوری در نیمه رسانا اتفاق می افتد، در حالی که SLG به عنوان یک جمع کننده حامل بار شفاف عمل می کند.

همانطور که در شکل 2g نشان داده شده است. حسگر نوری نیمه هادی-گرافن با یک پاسخ دیود نوری خطی معمولی (خط قرمز خطی) متفاوت است: جریان نوری برای ولتاژ بایاس کوچک VB متوقف شده، از آنجا که Vb، Ef را در گرافن کنترل می کند، از این رو کنترل تعداد حالت های موجود برای حفره های برانگیخته شده با نور تزریق شده از نیمه هادی تحت نور را نیز انجام می دهد. این ویژگی پاسخ دهی با قابلیت تنظیم ولتاژ (تا 0.435 آمپر بر وات) را برای کنترل روشنایی و عملکرد فعال در یک محدوده دینامیکی وسیع با اندازه مرتبه 6 فراهم کرده است.

محدوده طیفی به وسیله برانگیختن الکترون در گرافن به سمت طول موج های کمتر از شکاف باند رفته تا به انرژی بالاتر از مانع شاتکی (عملیات نوری داخلی) افزایش یابد. در اتصالات Si-گرافن، IQE = 10٪ (برای مقایسه، IQE ≈ 1٪ در دیودهای شاتکی معمولی) در طول موج های مخابراتی به دست آمد و یک دستگاه موجبر یکپارچه امکان تشخیص MIR با 0.13 آمپر بر وات را فراهم کرد، که راه را برای حسگرهای نوری MIR با عملکرد بالا و هزینه کم هموار کرد.

بولومتر مبتنی بر گرافن. با بایاس کردن SLG، پاسخهای بولومتری در دمای اتاق اندازه گیری شد (31،94). در مرجع. 31 گزارش شده است که دو مکانیزم باعث ایجاد جریان نوری بولومتری با علامت مخالف می شوند: حامل هایی که بیش از اندازه توسط نور القاء شده اند، موجب افزایش هدایت می شوند، در حالی که وابستگی دمای قابلیت تحرک پذیری باعث کاهش هدایت می شود. با تغییر EF، می توانید کنترل کنید که کدام مکانیزم غالب باشد 31. در نزدیکی نقطه دیراک، که در آن چگالی حامل کمترین مقدار را دارد، اثرات PV حاکم است، در حالی که اثرات PTE تا حد زیادی غالب است 31.

با این حال، وابستگی دمای ضعیف مقاومت الکتریکی در گرافن، یک چالش عمده برای خواندن dT از طریق اندازه گیری های انتقال الکتریکی است. به همین دلیل پاسخ دهی 0.2 میلی آمپر بر وات برای آشکارسازهای بالومتریک گرافنی در دمای اتاق اندازه گیری شد. برای حل این مشکل، یک دستگاه BLG دوگیتی با یک گیت بالایی اپتیکی شفاف استفاده شد (شکل 4a) تا یک شکاف باند در نقطه دایرک باز کند و وابستگی مقاومت Te را به دست آورد. این دستگاه در زیر نور MIR (10.6میکرومتر) با استفاده از یک پیکربندی چهار ترمیناله اندازه گیری شد و پاسخ نوری به بولومتری داده شد. مقاومت حرارتی، نشان داده شده در شکل 4c، دارای وابستگی T-3.45 بود، که تقریبا با تئوری مورد انتظار T-3 برای خنک کردن فونون (بدون اختلال) مطابقت داشت. آشکارساز عملکرد عالی نشان می دهد: NEP ≈ 33 fW Hz-0.5 در T = 5 K (چندین بار پایینتر از Si تجاری یا بالومترهای ابررسانایی) و پهنای باند ذاتی بیش از 1 گیگاهرتز (3-5 مرتبه بالاتر). روشی دیگر برای پیاده سازی مقاومت گرافنی وابسته به دما این است که سیستم الکترونیکی را به وسیله اضافه کردن اختلال به ناحیه موقعیت یابی قوی درایو کنیم. با استفاده از فیلم های گرافن معیوب در دمای پایین می توان این کار را انجام داد.

شکل 4b یک بالومتر با پیوند تونلی گرافن-ابررسانا را نشان می دهد. اگر چه دستگاه در ref. 101-با امواج رادیویی اندازه گیری شد، این مفهوم را می توان برای تشخیص نوری هم استفاده کرد. برای بررسی اخیربه مرجع 1.2 مراجعه کنید.

ترانزیستورهای ترکیبی نوری. تشخیص فوتون در شدت بسیار کم، حتی نزدیک شدن به سطح تک فوتون، نیاز به یک مکانیسم بهره دارد که بتواند حامل های الکتریکی چندگانه در هر فوتون مستقل را فراهم کند. این را می توان با استفاده از بیشتر کردن حساسیت روی مراکزی که نور را به طور موثر جذب می کنند، پس انتقال الکترون ها یا حفره ها به هادی (اثر فتوگیتینگ) به دست آورد. نتیجه، یک شیفت در منحنی ولتاژ معمولی نسبت به ولتاژ گیت، همانطور که در شکل 5b نشان داده شده است، می باشد. گرافن به دلیل تحرک بالا (زمان انتقال حامل کوتاه)، انتخابی عالی برای تشخیص نور با بهره بالا در دمای اتاق است. همچنين به علت داشتن مواد 2D، هدايت آن به اختلالات الکترواستاتیکی توسط حامل های نزديک به سطح تولید شده به وسیله نور، بسيار حساس است.

نمونه هایی از ذرات جذب کننده نور که برای بالا بردن حساسیت گرافن استفاده شده اند، QD کلوئیدی ساخته شده از PbS (Refs 105،106؛ شکل 5a)، CdS (Ref. 107) یا ZnO (Ref. 108) هستند. QDs می تواند جذب نور قوی و قابلیت تنظیم باند گذر را داشته باشند، قابل کنترل با تغییر سایز باشند و می توانند دامنه جذب را از فرابنفش تا SWIR پوشش دهند. آنها می توانند در محلول پردازش شوند و با چرخش پوشش، چاپ تماس، یا تکنیک های جوهر افشان قرار گیرند. علاوه بر این، لیگاندهای سطح QD را می توان برای بهینه سازی انتقال بار بین خود QD ها و بین QD ها و گرافن طراحی کرد. حسگرهای نوری رسانای نور گرافنی حساس شده هیبریدی، با استفاده از PbS کلوئیدی یا ZnO QDs به عنوان رسانه جذب کننده نور شناخته شده است. میزان جذب نور موثر و انتقال شارژ با کل QE ~ 25٪ گزارش شده است. بهره بالا، برای گرافن با PbS QDs، که برای Rph ~ 107 آمپر بر وات (در دمای اتاق) برای شدت کم نور 10 تا 14 W بود، تا 108 مشاهده شد. با توجه به QE بالا (> 25٪) ، سرعت تصویربرداری ویدئویی ~ 30-60 هرتز و NEP تخمین زده شده ~ 10-17 وات، این سیستم ترکیبی یک پلتفرم امیدوار کننده برای برنامه های قابل مشاهده و کاربردهای SWIR است.

گرافن پوشش داده شده با بیومولکول ها، همچنین، اثرات photogating برای نور مرئی را ، همانند نمونه های ترکیب شده با آنتن های نانو فلزی، نشان می دهد. به طور خاص، دومی طیف گسترده ای از حساسیت طول موج را ارائه می دهد که توسط تنظیم رزونانس پلاسمون از طریق شکل آنتن به دست آمده است، که بالقوه محدوده طول موج IR را نیز پوشش می دهد.

حسگرهای نوری تراهرتز. با توجه به انرژی کم فوتون های مرتبط، پرتو THz (0.1-10 THz، 30 تا 300 میکرومتر) می تواند به دی الکتریک هایی که به طور معمول مورد استفاده قرار می گیرند و به نور مرئی و نور MIR متبلور هستند، نفوذ کند. این عمل، تشخیص ویژگی های خاص اسپکتروسکوپی ماده را با یک دقت زیر میلیمتری محدود، امکان پذیر می کند. با توجه به تحرک پذیری زیاد آن، گرافن یک ماده بسیار امیدوار کننده در مقابل FIR برای توسعه حسگرهایی است که در دمای اتاق عمل می کند، و کارایی بالایی در دمای اتاق و پهنای باند طیفی بالا که محدوده THz کامل (0.1-10 THz) را پوشش می دهد دارد. گرافن از امواج پلاسما THz که به طور بالقوه میرا هستند، (برای مقیاس های طولی قابل مقایسه با فاصله سورس تا درین) در دستگاه های با تحرک پذیری بالا را پشتیبانی می کند، و امکان تشخیص رزونانس در FETرا ایجاد می کند. یک طرح تشخیص THz بر اساس یک BLG-FET با گیت پشتی، همراه با یک لایه متقاطع با ثابت دی الکتریک بالا، که در آن تولید جفت e-h در بخش تخلیه FET صورت می گیرد، در Ref. 117 پیشنهاد شده است. تغییرات مرتبط در جريان الكترون سورس-درین متناسب با توان تراهرتز بازگشتی برآورد شده است. اخیرا، در ref. 118 پیشنهاد شده است که گرافن می تواند برای دستگاه های جدید پلاسما موج THZ استفاده شود.

تشخیص در درجه حرارت اتاق در سراسر FIR در FETهای پلاسما موج SLG و BLG، با استفاده از پیکربندی اتصال آنتن به بالای گیت (شکل 6a) برای تحریک پلاسما موج میرا در کانال FET، انجام می شود. آنتن های دندانه دار دایره ای که در انتهای الکترود سورس و گیت استفاده می شوند، برای جفت شدن پرتو 0.3-THz از یک منبع الکترونیکی مورد استفاده قرار می گیرند. وابستگی اندازه گیری شده ولتاژ نوری Vph به (1 / σ) (dσ / dVG) با ولتاژ گیت VG، در توافق کیفی با پیش بینی یک مدل نظری توزیع شده، نشان داده شده است، در نتیجه اثبات می شود که حسگرها در به اصطلاح پهنای باند ناحیه میرای شدید برای عمل کردن نیاز دارند. یک حداکثر Rv = 1.3 VW-1 (یا Rph = 1.3 mA W-1 در حالت جریان نوری) و حداقل NEP ~ 1 nW Hz-0.5 گزارش شده است (شکل 6c)، که سبب قابل صدور ساختن تکنولوژی پیشنهادی در یک تنظیمات واقع گرایانه می شود و محیط بزرگ و تصویربرداری سریع از نمونه های ماکروسکوپی را امکان پذیر می کند(شکل 6d). آزمایش های بیشتر در فرکانس های بالاتر (3.11 THz) برای FETهای گرافنی با آنتن متصل و گیت پشتی، سیگنال های فوتو ولتاژ چند میکروولت را نشان می دهد.

آشکارسازهای THz باند پهن مبتنی بر گرافن که در دمای اتاق کار می کنند، با Rv ~ 5 nA W-1 و زمان پاسخ سریع (~ 50 ps) در 2.5 THz نشان داده شده است که باعث می شود آنها برای برنامه های زمانبندی مناسب باشند. دستگاه در مرجع 120 یک آنتن THz با ثبت داده دوره ای با یک شانه مرکزی متصل شامل می شود که تماس الکتریکی به SLG را فراهم می کند. آشکارسازهای THE گرافنی PTE، که در 2.5 THz کار می کنند و براساس SLG خالص شده با الگوی تماس های فلز نامتقارن هستند نیز گزارش شده است.

حسگرهای نوری مبتنی بر مواد دیگر 2D. خواص بدنه TMD برای چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته است و تلاش برای تولید لایه های 2D با کار پیشگام Frindt و Yoffe در سال 1963 آغاز شده است. خواص ساختاری و نوری MoS2 تک لایه (1L-MoS2) از زمان 1980 بررسی شده است. اما فقط به دنبال گرافن است که تحقیقات در مورد مواد دیگر 2D احیا شده است. به طور خاص، اکنون روشن است که آنها دارای پتانسیل بالایی برای برنامه های کاربردی در اپتوالکترونیک هستند. خواص TMD ها به ضخامت آنها بستگی دارد. به عنوان مثال، MoS2 یک باند گذر غیرمستقیم بدنه 1.3الکترون ولتی دارد که یک باند گذر مستقیم 1.8 EV در 1L-MoS2 می شود (refs 125،126). این تغییرات خواص نوری مانند طیف جذب و فوتولومینسانس را تغییر می دهد. افزایش 1000 برابر تولید کوانتوم لومینسانس برای 1L-MoS2 در مقایسه با بدنه MoS2 در مرجع 125 حاصل شده است. قطبش دره که توسط پمپ اپتیکی کنترل می شود نیز در 1L-MoS2 نشان داده شده است و قطبش آن در طول بیش از 1 نانومتر نگهداری می شود.

در مقایسه با نیمه هادی های کلاسیک با باند گذر مستقیم ، TMD ها می توانند در زمینه الکترونیک نوری مزایای بیشتری را به دلیل انعطاف پذیری مکانیکی و پردازش آسان آنها ارائه دهند. بیشتر حسگرهای نوری مبتنی بر TMD تحت بایاس، به عنوان یک فوتودیود (شکل 7a-c) و یا هدایت کننده نوری (شکل 7d-f) عمل می کنند. به عنوان مثال، حسگرهای 1L-MoS2 رسانای نوری با پاسخ دهی نوری خارجی بسیار بالای 880 AW-1 (Ref 130؛ شکل 7e، f) شناخته شده اند، اما با زمان پاسخ بسیار طولانی (~ 9 ثانیه)، و حسگرها GaTe با Rph = 104 AW-1 و زمان پاسخ 6 میلی ثانیه گزارش شده اند. علاوه بر این، توانایی تنظیم باند گذرا با تغییر تعداد لایه ها، امکان تشخیص نور در طول موج های مختلف را فراهم کرد. محدودیت های این دستگاه ها – جریان تاریک بزرگ و پاسخ های فرکانسی کمتر از 1 هرتز - با استفاده از الکترود های گیت های جدا در زیر یک 1L-WSe2 برای تحقق یک دیود نوری p-n مورد رسیدگی قرار گرفت. حسگرهای نوری بر اساس بسیاری از مواد لایه ای دیگر، از جمله MoS2 (Rph = 0.57 AW-1) 131، GaSe (Rph = 2.8 AW-1) 135، GaS (Rph = 19 AW-1) 136، In2Se3 (Rph = 3.95 AW -1) 137، فسفر سیاه فاکتور 138 و WS2 (Rph = 22 uA W-1) 139 گزارش شده است. اثر PTE قوی اندازه گیری شده در اتصالات فلزی TMD همچنین می تواند برای کاربردهای تولید توان حرارتی مفید باشد.

TMDها یک تصویر خوب از طیف گسترده ای از خواص اپتیک ارائه شده توسط کریستال 2D هستند. یک رویکرد امیدوار کننده برای ترکیب این خواص و ایجاد مواد چند منظوره و با کارایی بالا، شامل استفاده از گرافن با سایر کریستال های 2D در پشته های ناهمگن و دستگاه های ترکیبی است. با ترکیب گرافن با MoS2، یک نوع جدید از دستگاه هیبریدی 141، 142 نشان داده شد که در آن جذب نور مرئی و به دام انداختن بار توسط لایه MoS2 با Rph ~ 5 × 108 AW-1 در دمای اتاق، با QE ≈ 32٪ انجام می شود. سرعت آن به ~ 1 هرتز، به دلیل طول به دام انداختن ~ 1 ثانیه، محدود می شود. یک دستگاه مربوطه که شامل یک جفت SLG انباشته جدا شده توسط یک مانع تونلی نازک است، فتوگیتینگ قوی هدایت کانال و پاسخ باند فوق العاده پهن (MIR-مرئی) را با Rph> 1 A W-1 در MIR143 نشان داد. مفاهیم ترانزیستور جدید بر مبنای انتقال عمودی بین دو الکترود گرافن جدا شده از طریق نیترویید بور هگزاگونال، MoS2 یا WS2، (شکل 7a-c) گزارش شده است. دستگاه های هیبرید مشابه برای کاربردهای فتوتراپی با Rph ~ 0.1 A W-1 و EQE ≈ 30٪ پتانسیل بالایی نشان داده اند. در این دستگاهها، لایه های گرافین به عنوان الکترود قابل تنظیم تابع کار استفاده می شوند، در حالیکه TMD ها به عنوان مواد فعال نوری به کار رفته اند، که اثر متقابل نور و ماده جذب فوتون را نشان می دهد. جفت الکترون حفره در TMD ایجاد شده و بین دو لایه گرافن همسایه تقسیم شده است، بنابراین استفاده از کل اتصال گرافن-TMD برای تولید جریان نور را منجر می شود.

**زمینه های کاربردی، چالش ها و دیدگاه ها**

ما در حال حاضر در مورد عملکرد پلتفرم های تشخیص نور GRM مدرن کنونی بحث می کنیم. از آنجایی که گرافن به طور متمایز به عنوان یک سیستم مادی متفاوت است، دارای مزایا و معایبی نیز می باشد، و ما با چالش هایی مواجه هستیم که برای دستیابی به رقابت در زمینه های کاربردی مختلف مورد توجه قرار می گیرند. پارامترهای عملکرد GRM در جدول 1 نشان داده شده اند.

برنامه های کاربردی با سرعت بالا. تشخیص نور با سرعت بالاتر از فناوری های موجود برای ارتباطات نوری مورد علاقه ما است. پهنای باند ذاتی حسگرهای نوری مبتنی بر گرافن به 262 گیگاهرتز می رسد. با توجه به جذب باند پهن گرافن، ضریب جذب نور برای دیدن، NIR و SWIR ، با بهره گیری از ادغام با موجک یا پیشرفت های پلاسمونیک، نسبتا ثابت (تا ~ 3 μm؛ Ref 149) با Rph تا ~ 0.13 AW-1 نشان داده شده است. از لحاظ پهنای باند، گرافن می تواند از تکنولوژی های دیگر که برای ارتباطات نوری مورد بررسی قرار می گیرند، از جمله یکپارچه سازی همگن Ge (Refs 151،152) ، فراتر عمل کند. حسگرهای نوری با سرعت بالا نیز با نیمه هادی III-V (> 300 GHz) تحقق یافته است، اما با فناوری های نوری و الکترونیکی Si به سختی سازگار است. یک چالش مهم برای حسگرهای نوری مبتنی بر گرافن همچنان افزایش پاسخ دهی و ناحیه تشخیص موثر است. پشته های ساختار همگن از مواد 2D برای استخراج جریان نوری عمودی دارای ناحیه تشخیص بزرگ هستند و بنابراین ممکن است موضوع دوم را حل کنند. مزیت دیگری بر فن آوری های موجود این است که گرافن یک پلت فرم برای مدولاسیون و تشخیص نور با سرعت بالا در یک تراشه است. اگر چه عناصرتکی شناخته شده است، مجتمع کردن یک لینک تمام نوری و پیاده سازی مدارهای باقی مانده در مقیاس بزرگ، یک چالش مهم باقی مانده است. نتایج در مرجع 73 نشان می دهد به رغم آرامش در زمان بندی بسیار سریع، توزیع ناهمسانگردی نور تولید شده از جنبش حامل ها می تواند در اندازه گیری های الکتریکی دیده شود. این ممکن است راه را برای حسگرهای نوری مبتنی بر گرافن که می تواند نور بازگشتی و قطبش آن را در زمانبندی فوق العاده سریع تشخیص دهد باز می کند، که با ثابت زمانی که سرعت را محدود می کند مقابله می کند.

تشخیص بسیار حساس. تشخیص نور با حساسیت بسیار بالا برای بسیاری از کاربردها مانند حسگر از راه دور، تصویربرداری بیومدیکال، ارتباطات نوری و حسگر گاز عملکرد گسترده ای دارد. برای کاربردهایی که شفافیت و انعطاف پذیری مهم هستند، دیود​​های نوری مبتنی بر GRM یک جایگزین امیدوار کننده هستند. برای کاربردهایی که در آن به تشخیص SWIR تا MIR مورد نیاز است، Si جاذب مناسبی نیست و نیمه هادی III-V جایگزین ارائه می دهد، اما هزینه و پیچیدگی آن ها با ادغام با الکترونیک خواندن Si بالا می رود. دیودهای نوری مبتنی بر GRM، رساناهای نوری و ترانزیستورهای نوری هیبرید به ویژه امیدوار کننده هستند؛ زیرا آنها به علت تحرک پذیری بالای GRM، بهره رسانایی نوری بالایی دارند و به ولتاژ بالا نیاز ندارند و می توانند به صورت انحصاری با آرایه های کانال های هوایی چندپیکسلی موجود مبتنی بر Si ترکیب شوند. با حساسیت دادن به GRM، محدوده حساسیت می تواند نور مرئی تا فرابنفش و همچنین SWIR و MIR را پوشش دهد. چالش برجسته این نوع سنسورهای رسانای نور، جریان تاریک است که می تواند توسط مدار خواندن ایجاد شود (مشابه با سیستم های بولومتری). NEP پیش بینی شده (~ 10-17 W) و D \* (7 × 1013 Jones) 105 در مقایسه با فناوری های موجود مانند InGaAs است. چالش ها شامل بهبود سرعت (در حال حاضر تا 100 هرتز؛ Ref. 105)، تولید با مقیاس بزرگ و ادغام آرایه های چند پیکسل است. از طرف دیگر، TMD های مبتنی بر فوتودیود p-n دارای حساسیت بالا (به عنوان مثال، Refs 7،8 را ببینید) و جریان تاریک کم هستند. بهبود نواحی حساس و تولید در مقیاس بزرگ، مسائلی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

تشخیص مادون قرمز. تشخیص نور MIR برای تشخیص بیو، امنیت و تصویربرداری حرارتی مهم است. برای این محدوده فرکانس، گرافن می تواند مزایای جذاب در مقایسه با مواد دیگر را ارائه دهد: پلاسمون های آن می توانند برای افزایش رزونانس جذب برای یک طول موج، که با یک گیت قابل تنظیم است، استفاده شوند که انتخاب طیفی قابل تنظیم را در محل ارائه می دهند. چالش اصلی برجسته این محدوده طول موج، استخراج حامل، به عنوان مثال، با استفاده از اتصالات p-n در سازه های جانبی یا عمودی یا با استفاده از تشخیص بولومتری است. بولومتر گرافنی عملکرد عالی در دمای پایین را، با NEP ~ 33 fW Hz-0.5، نشان می دهد که قابل مقایسه با فن آوری های موجود است. چالش اصلی همچنان مطابقت امپدانس بالای گرافن (ده ها kΩ) با فضای آزاد (377 Ω) برای اتصال موثر فوتون است.

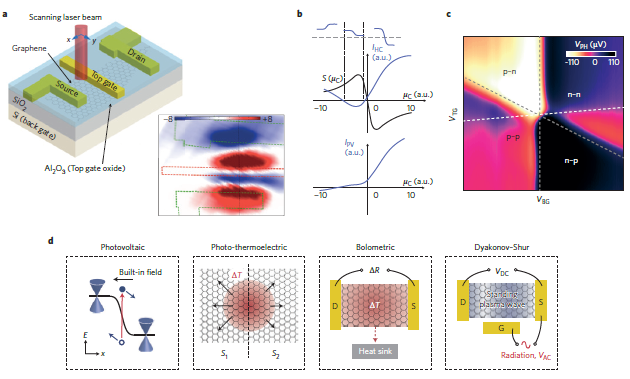
تشخیص Terahertz. تشخیص نور از اشعه فرابنفش برای انواع کاربردهای استراتژیک، از تشخیص پزشکی تا کنترل فرآیند، امنیت میهن، مترولوژی و میراث فرهنگی است. آشکارسازهای THz تجاری قابل استفاده براساس عناصر تشخیص حرارتی هستند که هم بسیار آهسته هستند (مدولاسیون 10-400 هرتز و NEP ~ 10-10 W Hz-0.5) و هم نیاز به خنک سازی عمیق دارند(4K برای بولومترهای الکترون داغ ابررسانا) با وجود بهره برداری از الکترونیک سریع غیر خطی (دیودهای شاتکی) و یا ترانزیستورهای با قابلیت تحرک پذیری بالا معمولا به فرکانس های زیر THZ محدود می شود. حسگرهای گرافنی برای محدوده 0.29-0.38 THz با NEP ~ 10-9 W Hz-0.5 (Ref 62) و در 2 THz با یک NEP ~ 10-8 W Hz-0.5 (Ref. 121 ) نشان داده شده اند. ترکیبی از مقیاس پذیری در فرکانس های بالاتر، جنبه های ادغام با پلت فرم های Si و پتانسیل برای پیاده سازی دستگاه های انعطاف پذیر، گرافن را به رقیبی برای نسل آینده سیستم های تشخیص THz تبدیل می کند.

به طور خلاصه، پلتفرم های تشخیص نور مبتنی بر GRM ها با سرعت قابل توجهی توسعه می یابند و امید فراوانی برای انواع مختلفی از زمینه های کاربردی ارائه می دهند. برای بسیاری از انواع حسگرها، پارامترهای عملکرد در سطوح برتر یا در مقایسه با فناوری های موجود نشان داده شده است. چالش ها برای نشان دادن پتانسیل کامل آنها و بهره برداری از مزایای متمایز کریستال های 2D باقی می مانند. چشم انداز تجاری سازی نه تنها بر عملکرد حسگر، بلکه بر برخی از مزایا و قابلیت های متمایز آن، علاوه بر توانایی تحقق تولید GRM های با کیفیت بالا و مقیاس بزرگ با قیمت پایین، و مجتمع سازی با مقیاس بزرگ با سیستم های موجود فتونی و الکترونیکی مانند تکنولوژی های CMOS بستگی دارد.

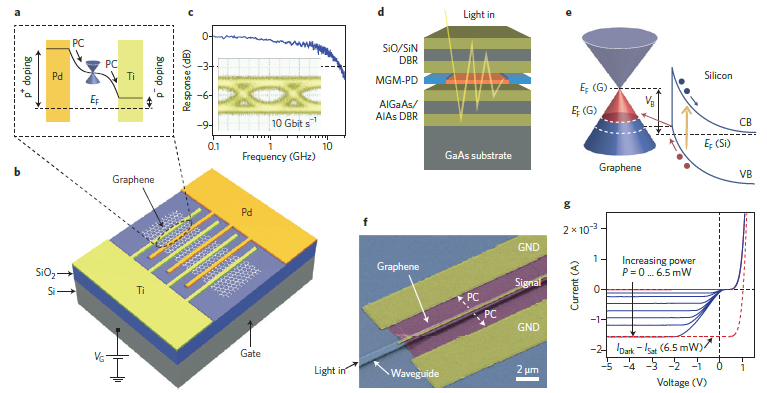
جعبه 1

نور وارد شده به یک دستگاه با انرژی فوتونی Eph و قدرت Pin، مطابق با شار فوتون ورودی φin = Pin / Eph و شار فوتون جذب شده φabs = φinAabs، با Aabs کسر جذب است. بهره وری کوانتومی خارجی، EQE برابر با تعداد جفت الکترون-حفره (e-h) جمع شده در هر ثانیه برای تولید Iph است که تقسیم بر تعداد فوتون های برگشتی در ثانیه می شود: EQE = (Iph / q) / φinکه q شار الکترون است. بازده کوانتومی داخلی (IQE) به روش مشابهی محاسبه می شود، مگر آنکه در این حالت شار فوتون جذب شده در نظر گرفته شود: IQE = (Iph / q) / φabs. پاسخ دهی یک حسگرنور، جریان فوتونی Iph تقسیم بر توان است: Rph = Iph / Pin یا، اگر ولتاژ القاء شده با نور، Vph اندازه گیری شود، Rv = Vph / Pin. به عنوان مثال، در یک آشکارساز با 100٪ EQE، Rph = 1 A W-1 برای Eph = 1 eV. نیروی معادل نویز (NEP) توان سیگنال است که در آن نسبت سیگنال به نویز یک است که معمولا با واحد W Hz-0.5 بیان می شود. یکی دیگر از معیارها که برای تشخیص عملکرد یک حسگر استفاده می شود، آشکارساز خاص D \* است که با D \* = (A ∙ BW) 0.5 / NEP داده می شود. D \* در cm Hz1 / 2 W-1 اندازه گیری می شود، این واحد، برای به رسمیت شناختن کارش بر حساسیت سنسورهای تابش پس از R.C.Jones نام گذاری شد، که به موجب آن یک Hz1 / 2 W-1 cm=1جونز است. در اینجا، A ناحیه ای حساس به نور است و BW پهنای باند فرکانسی حسگر است.

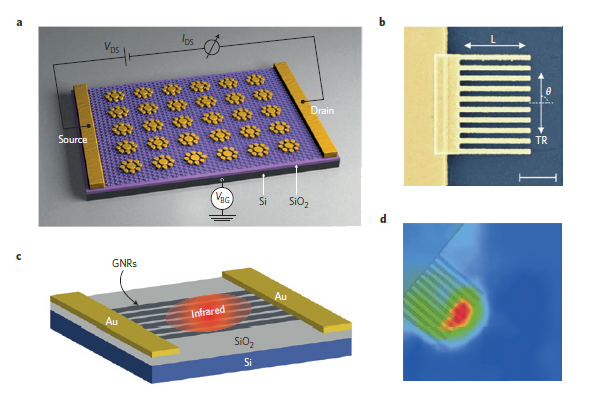
برای بالا بردن حساسیت رسانای نور، بازده کوانتومی خارجی به صورت QE = ηtrans ηabs تعریف می شود، که ηtrans بازده انتقال بار و ηabs بازده جذب نور است. دومین پارامتر مهم، τtr، طول عمر بار ساکن در ذرات است، که تغییرات ناشی از نور در تراکم حامل Δn به صورت خطی با آن مقیاس می شود: Δn = τtr × QE × φin. حسگرهای رسانای نور اغلب با بهره رسانایی نورسنجیده می شوند، Gph = (Iph / q) / (φinQE)، که تعداد بارهای بار تشخیص داده شده در هر فوتون مستقل است. این را می توان با نسبت طول عمر حامل های به دام افتاده در طول زمان انتقال رانش، τtransit، از حامل های بار SLG از سورس به درین تعیین کرد: Gph = τtr / τtransit. τtransit توسط میدان اعمال شده مدیریت می شود، بنابراین برای بایاس و تحریک پذیری بیشتر، کوتاه تر است: τtransit = L2 / (μVbias)، L فاصله جدایی سورس-درین است.

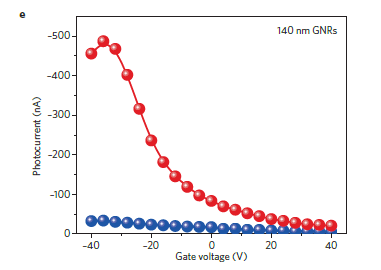


شکل 1 | مکانیزم تشخیص نور a، شکل بالا، از دستگاه با گیت دوگانه استفاده شده تا اثر PTE در ref. 30 را ارزیابی کند. با استفاده از بایاس مناسب به گیت های بالا (VTG) و پشت (VBG)، دو ناحیه گرافن با دوپینگ متفاوت ایجاد می شوند. پایین: اسکن جریان فوتون دستگاه. خطوط متمم نشان دهنده اتصالات (سبز) و گیت (قرمز) است. b، محاسبه جریان نور از حامل های گرم (HC) و اثرات فتوولتائیک (PV). PV در صورت تغییر شرایط برق، علامت را تغییر می دهد، در حالی که مشارکت HC علامت را دو بار تغییر می دهد. پتانسیل شیمیایی μC نسبت به نقطه دیراک (خط چین خاکستری) نیز در نمودار بالا ترسیم شده است. c، ولتاژ نوری تابع VBG و VTG است. تغییر شش برابر قطبیت دیده می شود. خط چین خاکستری مقاومت بالا به دست آمده از اندازه گیری انتقال را نشان می دهد. d، نمایش شماتیک چهار مکانیزم تولید جریان نور توضیح داده شده در متن اصلی. اولین پانل: جداسازی الکترون-حفره (حلقه باز و جامد) با یک میدان الکتریکی داخلی. پانل دوم و سوم: منطقه سایه دار قرمز نشان دهنده افزایش دمای الکترون با ΔT گرادیان درجه حرارت و ΔR مقاومت در سراسر کانال است. S1 و S2، ضریب Seebeck در مناطق گرافن با دوپینگ متفاوت. پانل های سوم و چهارم: S و D نشان دهنده سورس و درین و G گیت است؛ VDC ولتاژ d.c تولید شده توسط نور.؛ VAC، ولتاژ a.c. اعمال شده به گیت. اشکال با مجوز از: a، ref. 30، © 2011 انجمن شیمی آمریکا؛ b، ref. 38، © 2011 انجمن شیمی آمریکا؛ c، ref 37، © 2011 انجمن آمریکایی برای پیشرفت علم است.

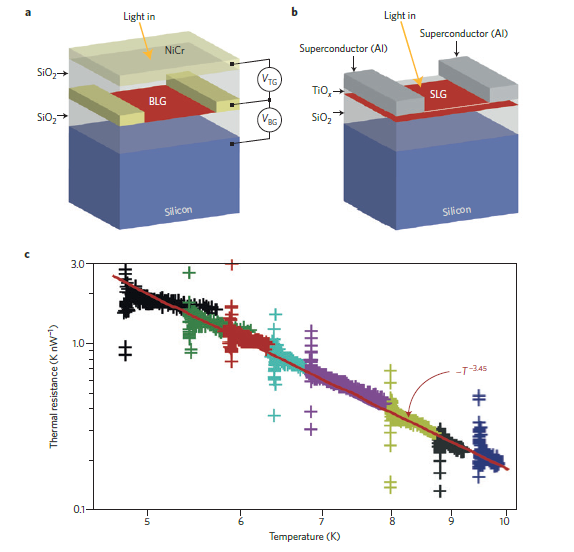


شکل 2 | حسگرهای نوری ناهمگن فلزی گرافن-فلزی و گرافن-نیمه هادی. a، مشخصات باند. این فلش ها جریان الکتریکی را نشان می دهد و مخروط دیراک، نقطه ی خنثی شارژ را نشان می دهد. PC، جریان نور؛ EF، سطح فرمی. b، طرح سه بعدی. c، پاسخ فرکانس بالا یک حسگر نور فلز-گرافن-فلز (MGM-PD) با تماس نامتقارن. درج: نمودار چشم. d، طرح شماتیکی یک حسگر نور یکپارچه میکروکواویت. DBR، آینه براگ توزیع شده. e، مشخصات باند (VB و CB، سلول های ولنس و رسانای سیلیکون). f، اسکن تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکن از یک دستگاه یکپارچه موجبر. GND، زمین. g، مشخصات I-V یک حسگر نور ناهمگن گرافن-سیلیکون بدون (خط قرمز) و با (خطوط جامد) نور (با افزایش ~ 1 مگاوات). رفتار دیود نوری معمولی (P = 6.5 mW) به عنوان یک خط چین قرمز نشان داده شده است. بخش قرمز مخروطی دیراک نشان داده شده در e نشان دهنده حفره های تزریقی از سیلیکون است. اشکال با مجوز از: a-c، ref. 19، 2010 گروه انتشارات Nature؛ f، ref 21، 2013 انتشارات Nature؛ e، g، ref. 90، © 2013 انجمن شیمی آمریکا.

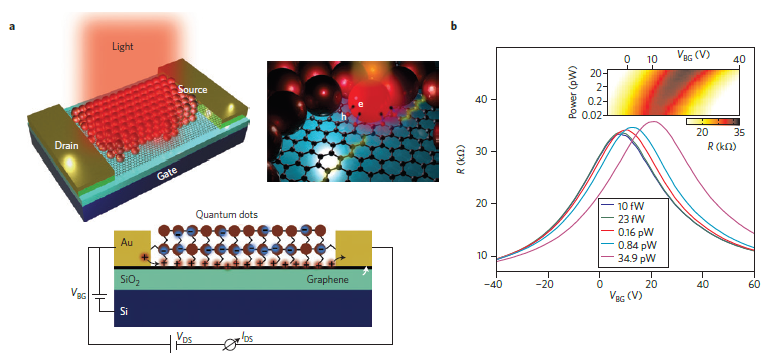




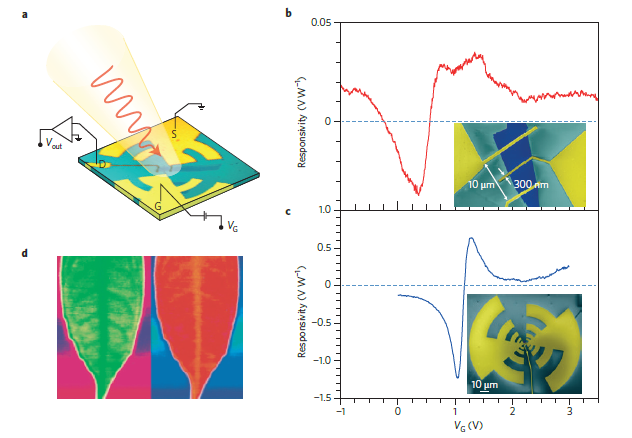
شکل 3 | بهبود تشخیص نور توسط نانوساختارهای پلاسمونی فلزی و پلاسمون های ذاتی. a، شماتیک آنتن های پلاسمونی در SLG. . b یک اتصال ساختار انگشتی. پلاریزه شدن نورهای طولی (L) و عرضی (TR) نشان داده شده است. نوار مقیاس، 1 میکرومتر. c، شماتیک از یک حسگر نور مادون قرمز نانوریبون آرایه ای. d، نقشه ی ولتاژ نوری یكی از اتصالات نانوساختار مانند یكی از موارد نشان داده شده در b. مقیاس رنگ از -4 میکروولت (آبی) تا 12 میکرومتر (قرمز) اجرا می شود. GNRs، نانوروبنهای گرافن. e، وابستگی جریان نوری به ولتاژ گیت برای چنین حسگرهایی که (عرض نوار W = 140 نانومتر) توسط یک پرتو نور 10.6 میکرومتر با قطبی شدن عمود بر ریبون (کره های قرمز) تولید شده است و که باعث برانگیخته شدن پلاسمون به موازات ریبون ها (کره آبی) که به پلاسمون متصل نیست، می شود. ارقام با مجوز از: a، ref. 113، © 2012 انجمن شیمی آمریکا؛ b، d، ref. 82، 2011 گروه انتشارات Nature؛ c، e، ref. 86، 2013 گروه انتشارات Nature.



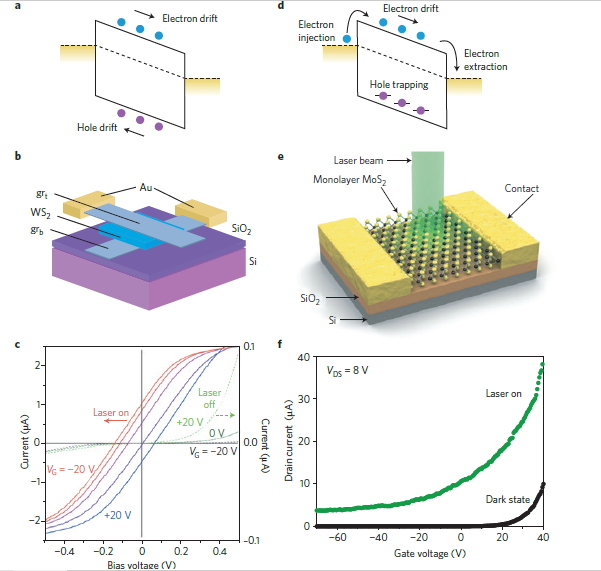
شکل 4 | بولومتر بر اساس گرافن. a، ساختار دستگاه یک بالومتر گرافنی دو لایه دو گیتی. VTG، بایاس گیت بالایی؛ VBG، بایاس گیت پشتی. b، ساختار دستگاه یک بالومتر اتصال تونلی گرافن-آلومینیوم. c وابستگی دمایی مقاومت حرارتی. خط قرمز نشان دهنده مقیاس درجه حرارت T-3.45 است.



شکل 5 | حسگر نور رسانای نور گرافنی حساس شده. a، حسگرهای نوری مبتنی بر نقاط کوانتومی (بالا و پایین). تصویر سمت راست بالا جدایی eH را در نقطه کوانتوم نشان می دهد. b مقاومت تابعی از ولتاژ گیت پشتی برای ساختار نقطه کوانتوم-گرافن برای افزایش شدت روشنایی است. افزایش روشنایی منجر به یک اثر فوتوگیتینگ می شود که نقطه ی دیراک را به ولتاژ گیت پشتی، VBG بالاتر شبفت می دهد. این دوپینگ نوری حفره گرافنی را نشان می دهد Inset: نقشه مقاومت گرافن به عنوان تابعی از توان نوری است. شکل با مجوز از ref. 105، 2012 گروه انتشارات Nature.



شکل 6 | حسگر تراشه FET گرافن همراه با آنتن تراهرتز. a، حسگر متشکل از یک آنتن دایره ای دندانه ای است که بین سورس و گیت یک SLG-FET طراحی شده است. درین یک خط فلزی پیوسته به سمت پد اتصال است. b، c، پاسخ دمای اتاق تابعی از ولتاژ گیت، VG، برای حسگرهای مبتنی بر SLG-FET (b) و BLG-FET (c)، همانطور که برای دستگاه در ref. 62. اندازه گیری شد، رنگ های مختلف پس زمینه مناطق زیر و در بالای نقطه دایرک را مشخص می کند. مجلات: میکروسکوپ الکترونی اسکن شده. d، تصویر (در 0.3 THz) از یک برگ، که همچنین رگه های برگ را نشان می دهد. شکل با مجوز از ref. 62، 2012 انتشارات Nature.



شکل 7 | تشخیص نور در 1L-MoS2 و در ساختار همگن SLG / WS2 / SLG. . a، نمودار باند از یک حسگر نوری مبتنی بر یک کریستال 2D، با توجه به ولتاژ بایاس و موانع کوچک شاتکی در اتصالات. b، طرح کلی یک دستگاه با ساختار همگن SLG / WS2 / SLG، grt و grb ورق های بالا و پایین گرافنی هستند. c، منحنی های I-V برای ساختار SLG / WS2 / SLG اندازه گیری شده در ref. 147 تحت نور (محور سمت چپ) و در تاریکی (محور راست). d، نمودار باند یک حسگر رسانای نور، با توجه به گیر انداختن حفره. e، نمایش شماتیک از یک حسگر نور 1L-MoS2. . f، پاسخ گیتینگ حسگرهای نوریMoS2 در ref. 30 در حالت های تاریک و درخشان. ارقام دارای مجوز از: b، c، ref. 147، © 2013 انجمن آمریکایی برای پیشرفت علم؛ e، f، ref. 130، 2013 گروه انتشارات Nature.

جدول 1 پارامترهای عملکرد

