آشکارسازهای مادون قرمز بر پایه گرافن

سمینار درس کوانتوم الکترونیک

استاد:

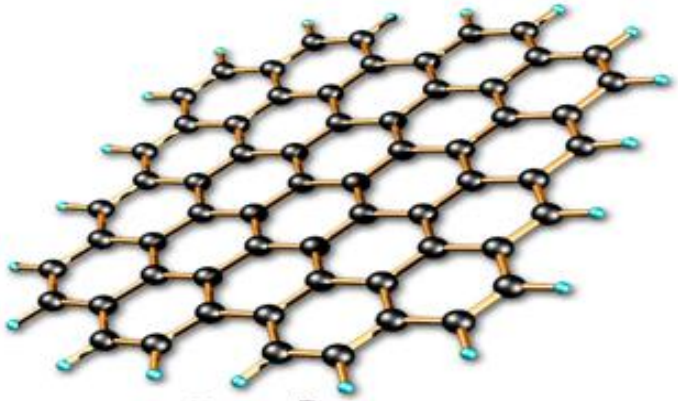
دکتر شهرام محمد نژاد

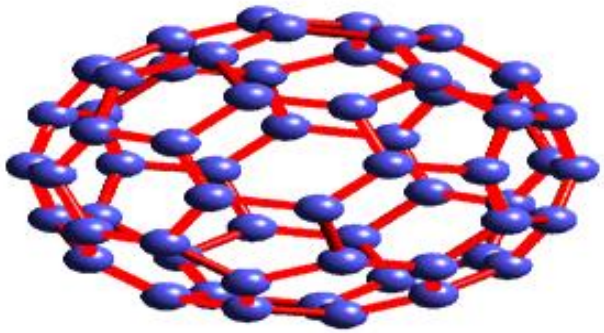
بسم الله الرحمن الرحیم

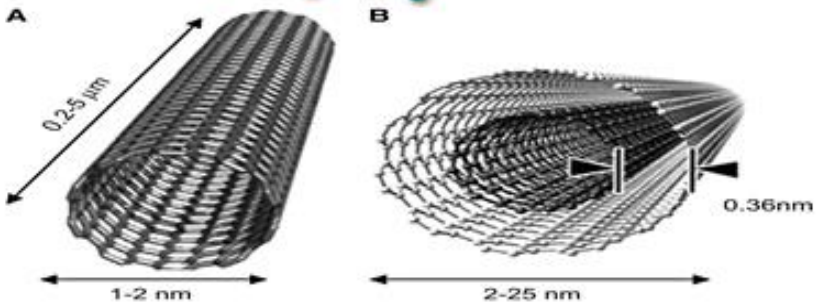
گرافن

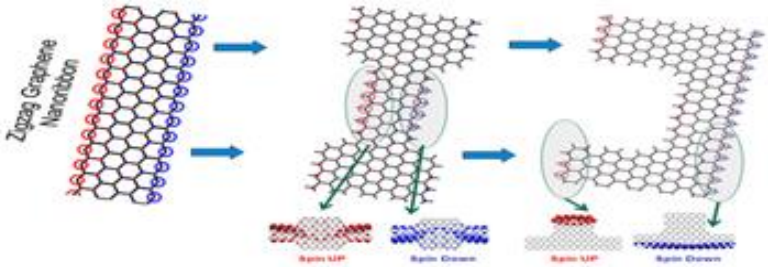
- گرافن از سال ۲۰۰۴ که پیشرفت های عمده ای در این زمینه صورت گرفت برای کمک به تولید نسل جدید الکترونیک مورد بحث و تحقیق گسترده ای قرار گرفت.
- گرافن تک لایه از یک لایه از اتم های کربن که به صورت ساختار کریستالی لانه زنبوری شش ضلعی قرار گرفته اند، تشکیل می شود.
- طول بین اتم های کربن در گرافن تقریباً 0.142nm و ضخامت یک گرافن تک لایه حدود ۰/۳۳۵nm است.
- انواع بلوک ساختاری پایه ای بر پایه گرافن:

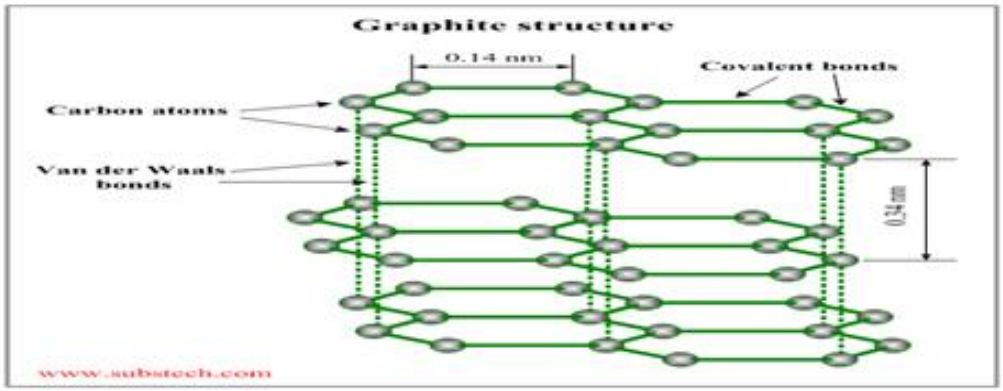
۱) carbon buckyballs
۲) Carbon nanotubes(CNT)
۳) Graphene nanoribbons






A
B
0.2-5 µm
1-2 nm
0.36nm
2-25 nm


Zigzag Graphene Nanoribbon


Graphite structure
0.14 nm
Covalent bonds
Carbon atoms
Van der Waals bonds
0.34 nm
www.substech.com

- خواص منحصر به فرد گرافن:

۱) سبک وزنی

۲) انعطاف پذیری بسیار زیاد

۳) ساختار باند خیلی خاص

۴) تحرک پذیری بار بسیار بالایی

۵) نشان دادن اثر فتوالکتریکی بسیار قوی

✓ چرا گرافن برای حس کردن مادون قرمز بسیار مفید است؟

مواد حسگر مادن قرمز باید انرژی یک فوتونی را جذب کنند که از انرژی باند گپ آنها بیشتر باشد. از آنجایی که انرژی یک فوتون در ناحیه های مادون قرمز موج متوسط کمتر از 0.5 ev است، لازم است که یک ماده مناسب برای جذب انرژی کم فوتون ها پیدا شود. گرافن تک لایه خالص به عنوان یک ماده با باند گپ صفر شناخته می شود.

دیگر اشکارسازهای مادون قرمز و مشکلات آنها

۱) آشکارسازهای نوری بر پایه ژرمانیوم:

آشکارساز نوری بر پایه ژرمانیوم در رنج طول موج مادون قرمز که یکی از بهترین انتخاب ها می باشد، به خاطر ناهماهنگی گرمایی و پروسه های تمیزی زیرلایه سختی که دارند، قابل قیاس با تراشه های سیلیکونی نیستند.

۲) آشکارسازهای نوری تماما سیلیکونی:

آشکارسازهای تماما سیلیکونی در بهترین حالت یک اوج پاسخ دهی ناچیز دارند.

۳) آشکارسازهای شاتکی:

آشکارسازهای مادون قرمز شاتکی در اغلب موارد دچار محدودیت بازدهی می باشند (کمتر از 1 %).

- در این سمینار طراحی، ساخت و توسعه آشکارسازهای مادون قرمز کووانتومی که از گرافن استفاده کرده اند مورد بحث قرار می گیرد. دو روش در این سمینار مورد بررسی قرار گرفته است.

۱) توسعه آشکارسازهای نوری با استفاده از تکه های کوچک گرافن برای حس کردن مادون قرمز

۲) دیود شاتکی گرافن- سیلیکون به عنوان آشکارساز مادون قرمز

آشکارسازهای نوری با استفاده از تکه های کوچک گرافن

- مراحل تولید:
  ۱) طراحی
  ۲) ساخت:

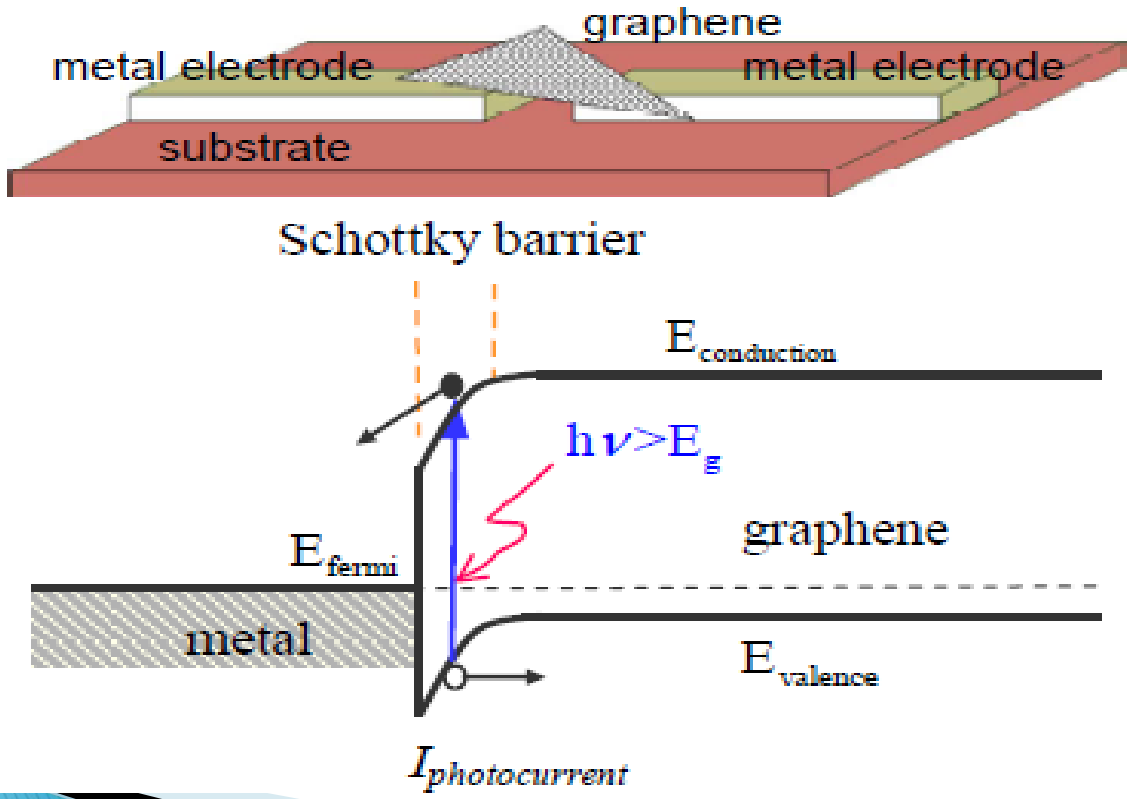
1)Photolithography(electrode fabrication)

2)Mechanical exfoliation

3)DEP manipulation

4)AFM assembly

- طراحی:


graphene
metal electrode
metal electrode
substrate
Schottky barrier
$E_{conduction}$
$h\nu > E_g$
graphene
E_{fermi}
metal
$E_{valence}$
$I_{photocurrent}$

۱) زمانی که یک تکه کوچک گرافن بین دو الکترود فلزی متصل می شود، دو مانع و سد شاتکی در رابط های گرافن- فلز شکل می گیرند.

۲) جریان نوری زمانی که افزاره در معرض نور مادون قرمز قرار می گیرد به واسطه اثر فتوولتاییک در سدها تولید می شود.

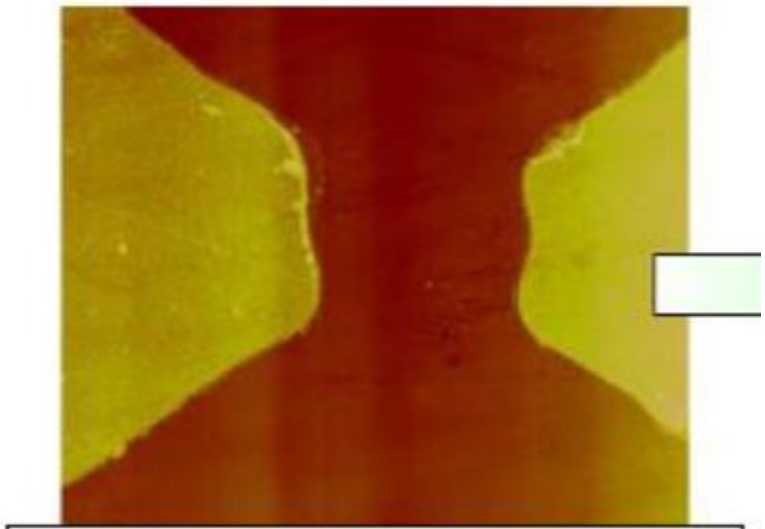
۳) زمانی که فوتون های مادون قرمز به گرافن برخورد می کنند، فوتون هایی که انرژی آنها از باند گپ بیشتر است، الکترون ها و حفره های داخل گرافن را بر می انگیزند تا به شکل جفت های الکترون- حفره در آیند.

۴) جفت های الکترون- حفره توسط پتانسیل built – in جدا شده و در جریان نوری شرکت می کنند. از آنجایی که خارج از نواحی تهی هیچ پتانسیل built – in وجود ندارد، جفت های الکترون- حفره به سرعت بازترکیب شده و در جریان نوری شرکت نمی کنند، بنابراین جریان های نوری فقط در رابط های گرافن – فلز تولید می شوند.

- ساخت:

۱) Photolithography (electrode fabrication):

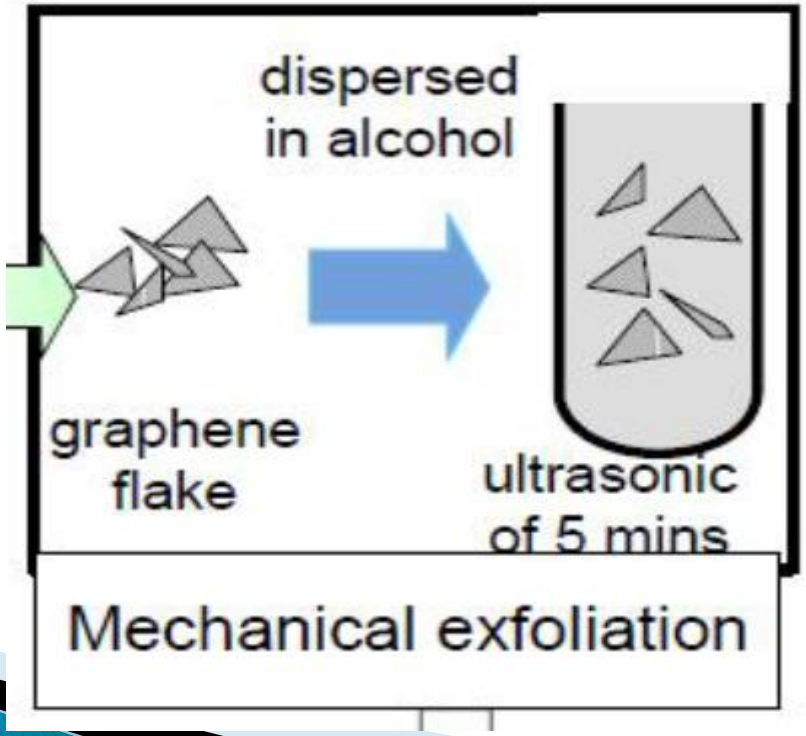
در این مرحله میکروالکترود های فلزی بر روی یک زیر لایه کوارتز (دی اکسید سیلیکون) توسط یک پروسه لیتوگرافی نوری استاندارد ساخته می شود. فاصله شکاف بین دو الکترود $2\mu m$ است، پس یک تیکه کوچک گرافن می تواند به صورت موثری بین دو الکترود شکل بگیرد.



Photolithography
(electrode fabrication)

۲) Mechanical exfoliation

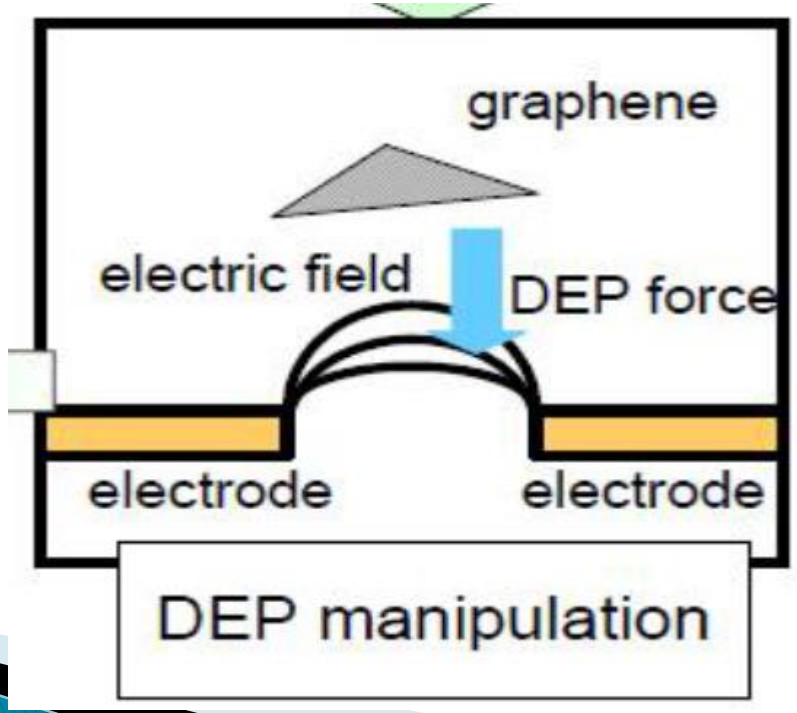
در مرحله دوم، گرافن توسط حذف کردن پشت سر هم لایه های رویی Highly Oriented Pyrolytic Graphite (HOPG) (SPI-1 Structure Probe, Inc) تولید می شود. به این پروسه لایه روبی مکانیکی می گویند. نمونه گرافن سپس در الکل متوسط بعد از عمل التراسونیک برای پنج دقیقه پراکنده و معلق می شود.



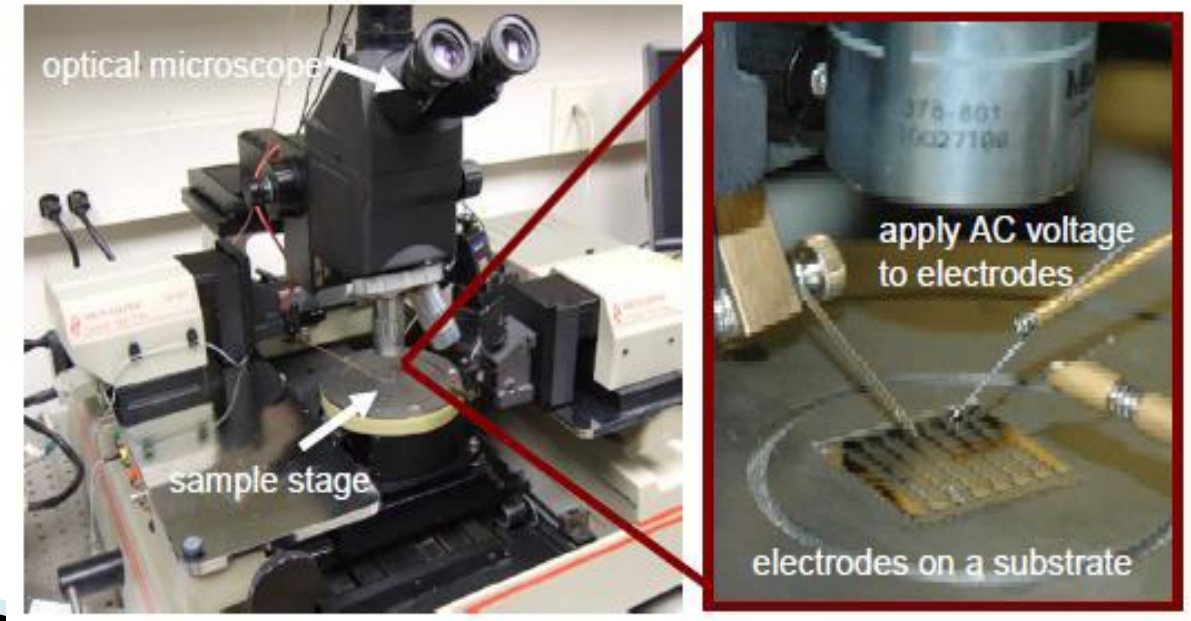
۳) DEP manipulation

در مرحله سوم، گرافن معلق شده به سیستم دست کاری DEP منتقل شده که این سیستم می تواند نیروی DEP بر یک جفت میکروالکترود فلزی از قبل ساخته شده القا کند.

Dielectrophoresis(DEP) پدیده ای است که در آن یک نیرو به یک ذره دی الکتریک القا می شود وقتی که در یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت قرار می گیرد.

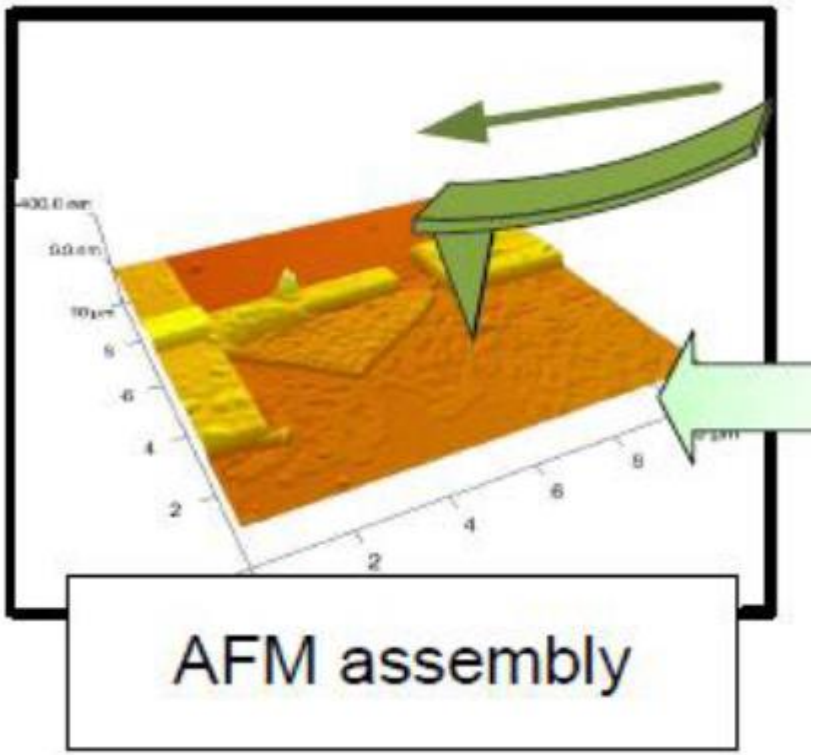


- سیستم یک ولتاژ AC 1.2 V(P-P) با فرکانس 1MHz را برای القا نیروی DEP مثبت بر تکه های کوچک گرافن، به کار می برد. زمانی که یک ولتاژ AC در طول میکروالکترودها به کار گرفته می شود، یک میدان الکتریکی تولید می شود و سپس یک نیروی DEP بر تکه کوچک گرافن القا می شود. بنابراین تکه کوچک گرافن جذب میکروالکترودها می شود.



۴) AFM assembly

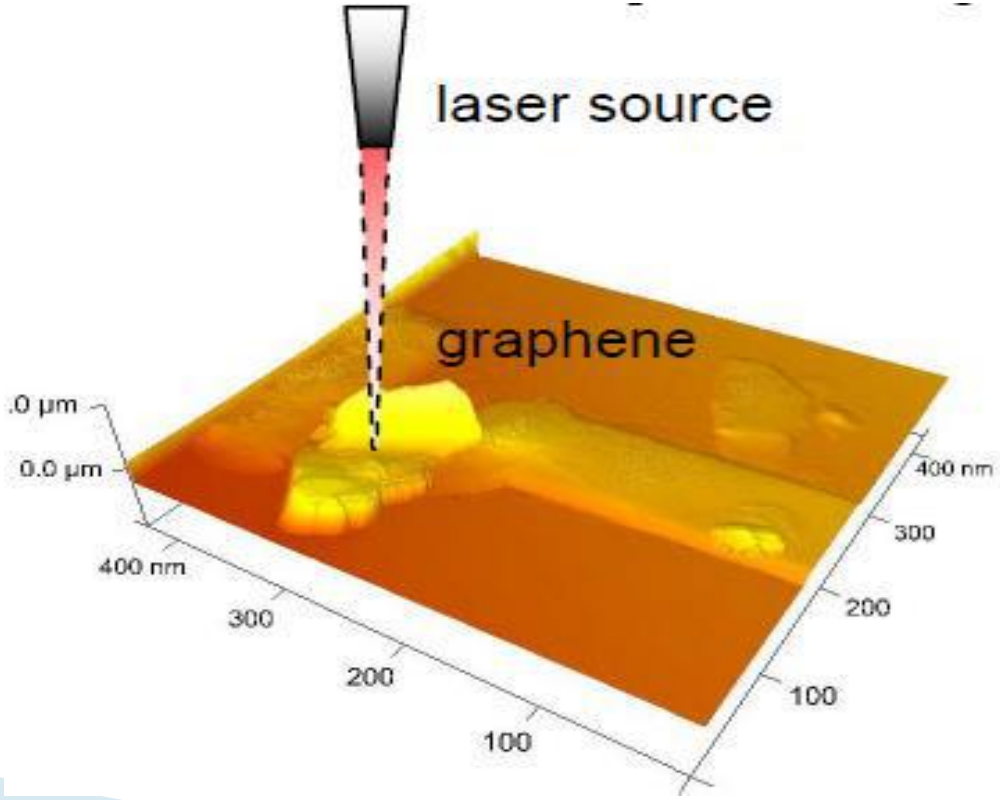
برخی از ناخالصی ها یا بیشتر از یک تکه کوچک گرافن در برخی از موارد بین الکترودها به دام می افتند. بنابراین دست کاری نانو توسط سیستم رباتیکی نانو AFM به کار گرفته می شود که یک پروب AFMرا برای هم تراز کردن تکه کوچک گرافن میکروالکترودها کنترل می کند.



- در سیستم AFM مرسوم، یک پروب AFM مقیاس نانو به کار رفته است. این پروب بر یک اسکنر فیزوالکتریک سوار شده است که نمونه ها را در مقیاس نانو اسکن می کند. این پروب AFM به عنوان یک بازو نانورباتیک قلمداد می شود که می تواند اشیا نانو را به صورت موثری دست کاری کند.

حس کردن مادون قرمز افزاره های بر پایه گرافن

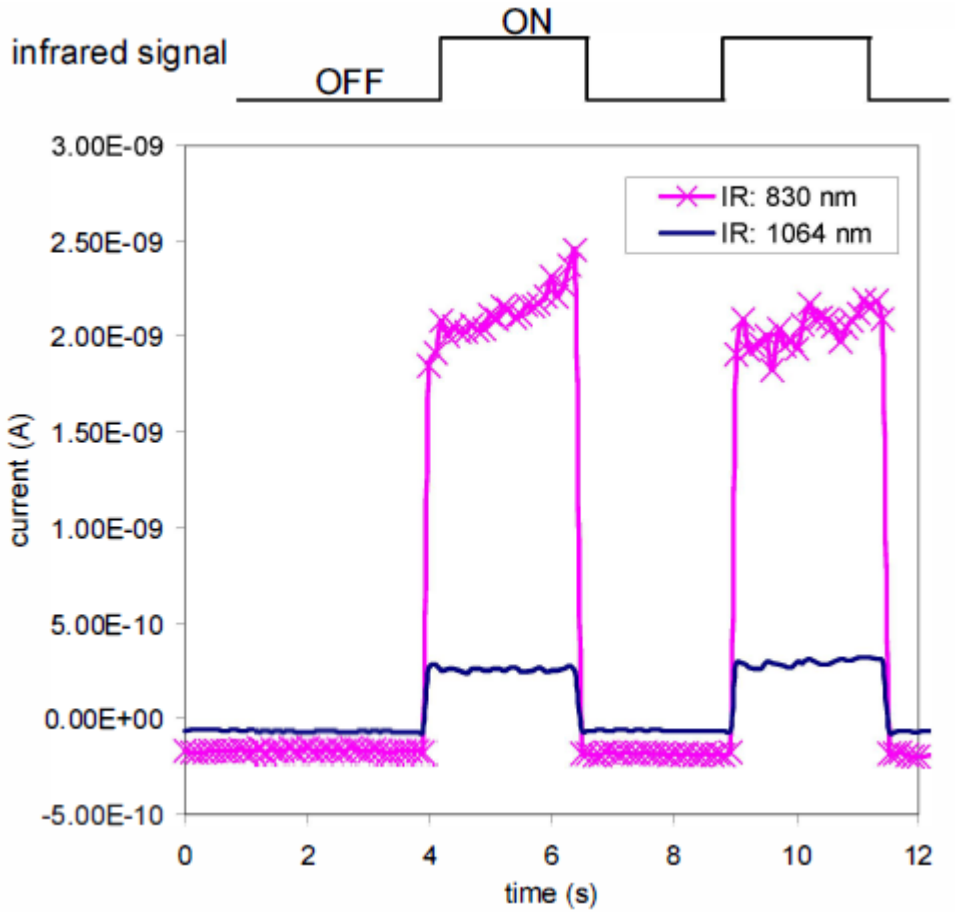
- در آزمایش های حس کردن مادون قرمز از دو منبع مادون قرمز با طول موج 830nm و 1064nm استفاده می شود.



نتایج آزمایش:

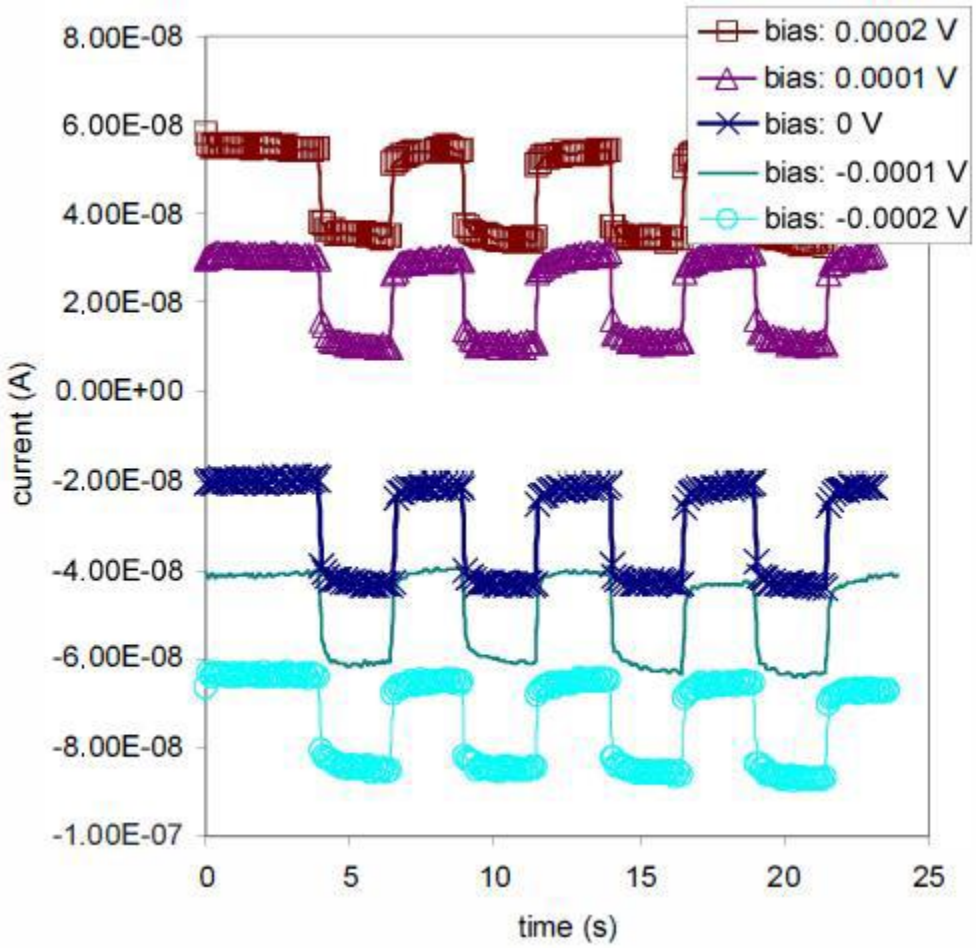
۱) بدون اعمال بایاس

جریان های نوری تولید شده در یک افزاره یکسان زیر تابش دو سیگنال مادون قرمز متفاوت به ترتیب 2nA و 0.35nA است.

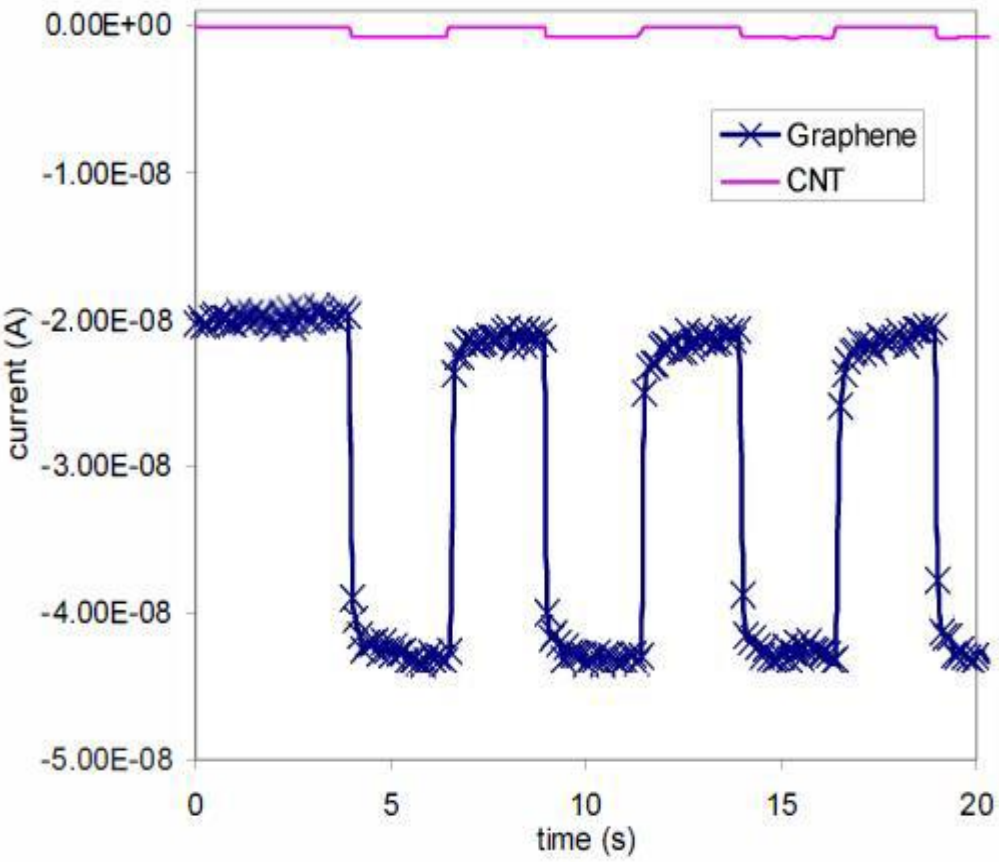


۲) تحت بایاس

افزاره در ولتاژ بایاس مثبت و منفی مورد تست قرار گرفته و نتایج نشان می دهد که جریان های نوری در اثر بایاس ولتاژ، تاثیر نمی پذیرد.



مقایسه پاسخ های نوری گرافن و نانوتیوب کربنی



نتایج نشان می دهند که آشکارساز مادون قرمز ساخته شده با گرافن چند لایه جریان -های نوری بیشتری را تولید می کند. به همین خاطر گرافن برای حس کردن مادون قرمز در دمای اتاق بسیار مناسب است.

دیود شاتکی گرافن- سیلیکون

- مزایای این افزاره:

۱) بهره بردن از مزایای نواحی خاص اتصالات دیود شاتکی گرافن-سیلیکون

۲) پاسخ دهی در رنج 2.8 الی $9.9\ \frac{mA}{w}$

۳) بازدهی کووانتومی داخلی $10 - 30\ \%$ (با توجه به $2.3\ \%$ جذب نوری در گرافن)

۴) رنج نبردن از طول عمر کوتاه حامل های گرافن (به دلیل رفتار جمع آوری سریع آن ها)

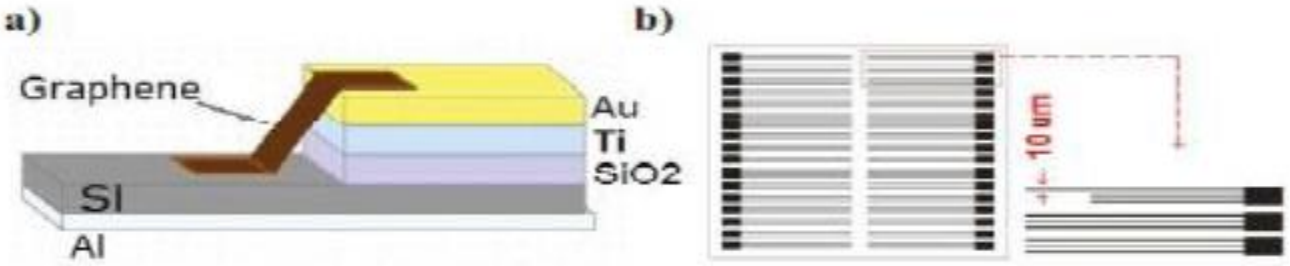
۵) ناحیه آشکارسازی نوری موثر بزرگتری

۶) هزینه کم ساخت

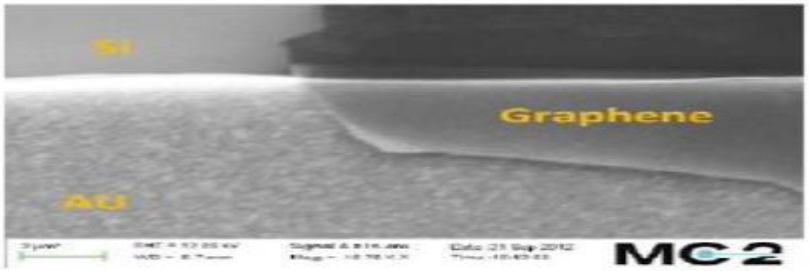
ساخت دستگاه و تنظیمات اندازه گیری:

a) گرافیت طبیعی که به صورت مکانیکی تراشیده شده بر روی یک زیرلایه سیلیکون/ سیلیکون-اکسید/ تیتانیوم/ طلا از قبل الگودهی شده رسوب گیری می شود.

b) ویفر برای ساخت پنجره هایی داخل لایه های سیلیکون-اکسید/ تیتانیوم/ طلا الگودهی می-شود.

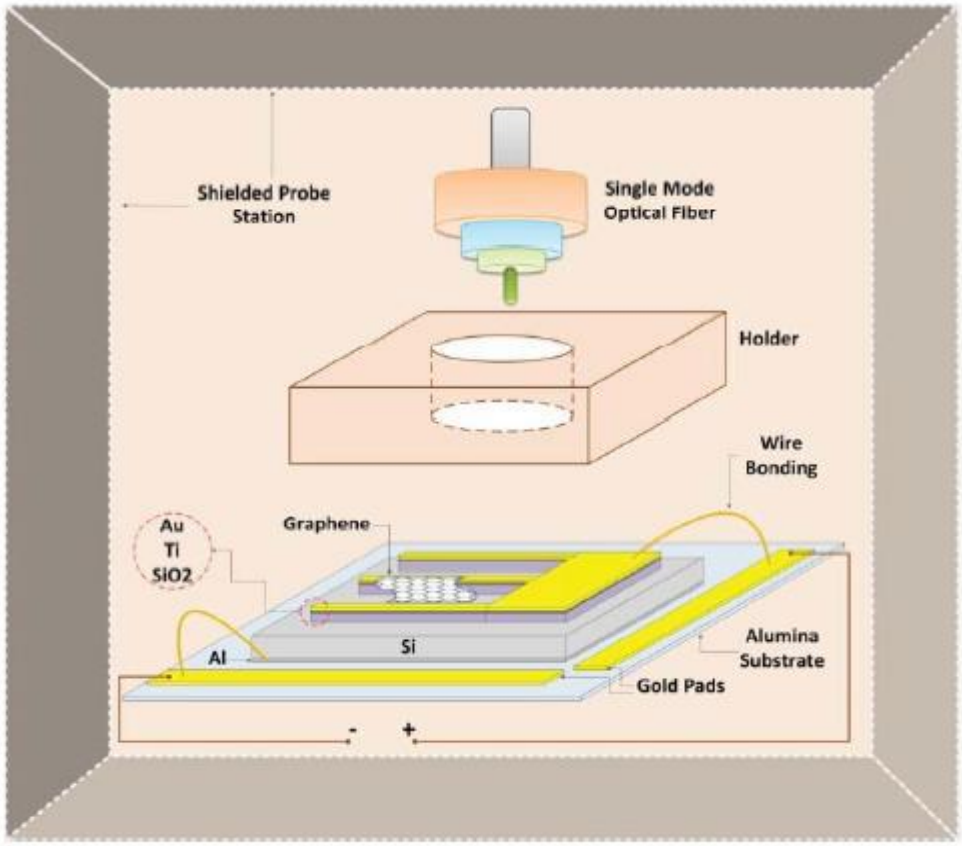


تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکن-کننده (SEM) از لایه گرافن رسوب گیری شده بر روی اتصال طلا و زیرلایه سیلیکونی



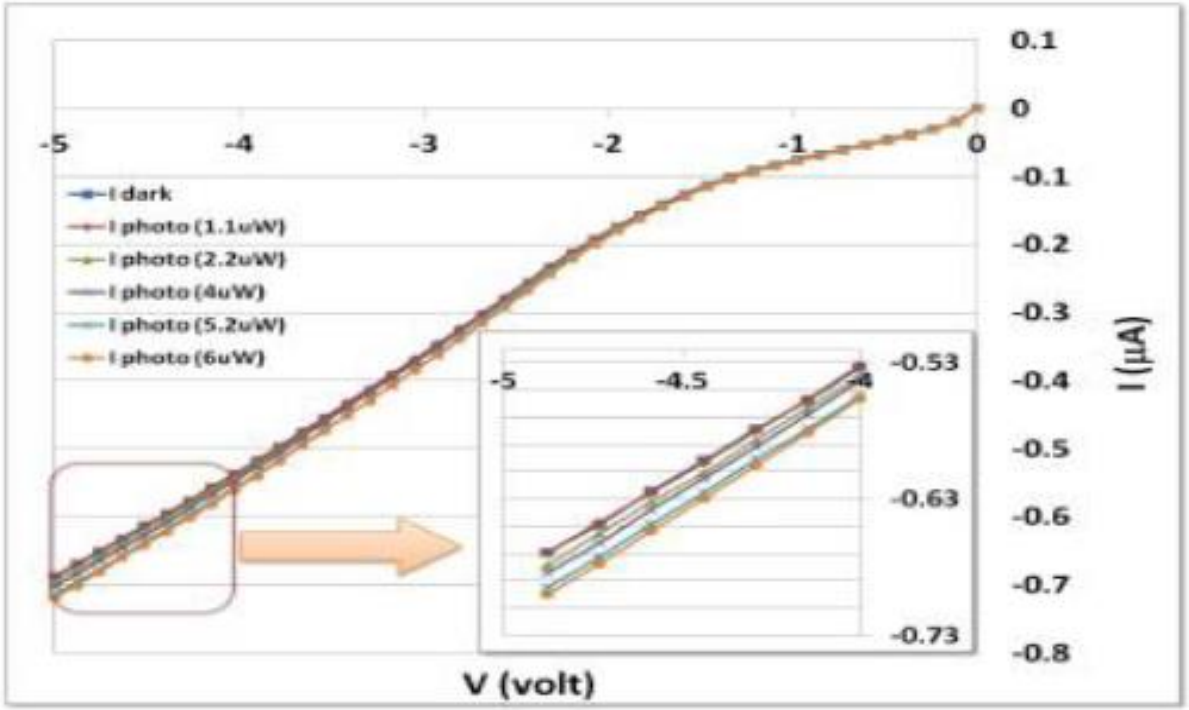
ساختمان آرایش اندازه گیری های آشکارسازی نوری

- ✓ لیزر $1.55\ \mu m$ از یک فیبر نوری تک-حالته (Single-Mode Optical Fiber) به نمونه منتشر می شود.
- ✓ یک نگهدارنده (holder) برای تثبیت موقعیت فیبر نوری روی نمونه استفاده می شود.
- ✓ آرایش اندازه گیری برای کاهش اثر نویز در یک جایگاه پروب محافظت شده (Shielded Probe Station) جاسازی می شود.

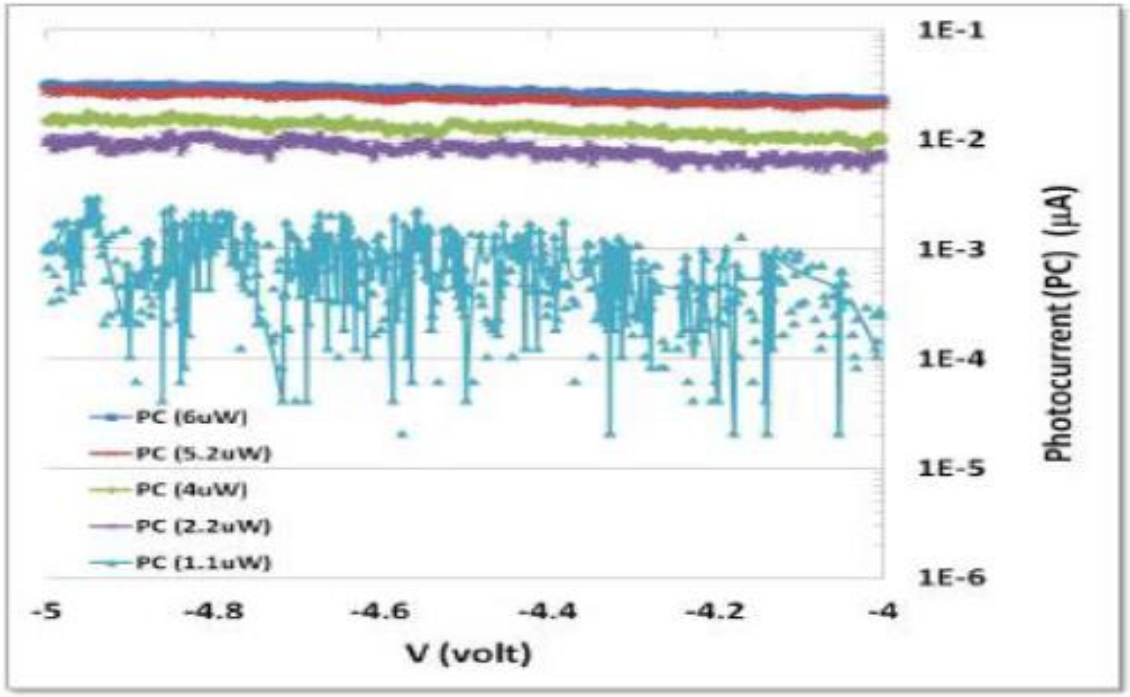


- مشخصات آشکارساز:

منحنی های (I–V) در بایاس معکوس 5− تا 0 ولت برای دیود شاتکی گرافن-سیلیکون تحت برانگیخته شدن لیزر $1.5\ \mu m$ در ۵ توان لیزر (P) مختلف



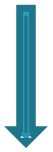
جریان نوری نیمه لگاریتمی را به عنوان یک تابع ولتاژ در رنج $(-5^v, -4^v)$



تفاوت ترانزیستورهای اثر میدان گرافن با دیود شاتکی گرافن- سیلیکون

در مورد ترانزیستورهای اثر میدان گرافن، حامل های تولید شده توسط نور توسط میدان الکتریکی اتصالات گرافن- فلز اسیر می شوند، بنابراین فقط یک شکست کوچک حامل ها که اطراف اتصالات تولید شده اند می توانند توسط مدار خارجی جمع آوری شود. بقیه حامل ها بدون هیچ شرکتی در جریان نوری خارجی، بازتزکیب خواهند شد. در نتیجه، ناحیه آشکارسازی نوری موثر در ترانزیستورهای اثر میدان گرافن به نواحی باریکی نزدیک به اتصال گرافن- فلز محدود می شود.

در دیود شاتکی گرافن- سیلیکون، حامل های تولید شده توسط نور به صورت عمودی منتقل می شوند. در اتصال شاتکی گرافن- سیلیکون، تمام حامل های نوری در گرافن، مستقل از محل برانگیختن آن ها، به یک اندازه شانس برای جذب توسط سیلیکون دارند. بنابراین، ناحیه آشکارسازی نوری موثر در دیودهای شاتکی گرافن- سیلیکون فقط توسط ناحیه اتصال بین گرافن و سیلیکون محدود می شود. بنابراین طول عمر کوتاه حامل های تولید شده توسط نور بر عملکرد دیود شاتکی گرافن- سیلیکون هیچ ضرری وارد نمی کند و دلیل آن این است که لایه گرافن کوچکتر از طول بازترکیب حامل ها می باشد.



بازدهی کوانتومی بیشتر

Thanks!