第71回 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2024年 3月 18日

裏面照射型グラフェン可視光イメージセンサ (I)
Back-illuminated graphene visible light image sensor (I)

グラフェンの「光ゲート効果」で実現する高感度可視光イメージセンサ

三菱電機株式会社
○嶋谷 政彰, 福島 昌一郎, 岩川 学, 小川 新平
E-mail: Shimatani.Masaaki@bk.MitsubishiElectric.co.jp

【発表概要】

- **グラフェンを用いた高感度赤外線イメージセンサを実現する「光ゲート効果」を可視光イメージセンサに応用**
- **裏面照射型で、画素数640×512 のアレイセンサを持つグラフェン可視光イメージセンサを作製**
- **多様な波長の光（紫外光～赤外線）でグラフェンをイメージセンサへ応用できる技術として期待**

三菱電機株式会社の嶋谷政彰氏らは、これまでに高感度の赤外線イメージセンサを開発してきた。この赤外線イメージセンサは、グラフェン近傍に配置した材料における光照射時の電気特性変化をグラフェンによって増幅する「光ゲート効果」と暗電流抑制を目的としたグラフェン/半導体が直接接触するグラフェン光ゲートダイオード（GPD: Graphene Photogated Diode）構造によって実現している。嶋谷氏らは、このGPD構造を可視光に適用し、裏面照射型の可視光イメージセンサに応用した。グラフェンによる光スイッチング効果を利用できるGPD構造は、従来のシリコン（Si）フォトダイオードよりもはるかに高い感度を持つことから、非常に高感度な可視光イメージセンサの実現が期待される。

【詳細】

高感度を実現するグラフェンの光ゲート効果

炭素原子一層のシート状の2次元物質であるグラフェンは、その優れた電子・光物性により、多様な応用が期待されている。例えば、高感度センサ、さまざまな半導体デバイス、透明な導電膜などが視野に入る。

「グラフェンはその独自の物質構造により、可視光を含む幅広い波長の光を吸収する能力を持ちますが、その吸収率は約2.3%と比較的低いものです。そこで私たちは『光ゲート効果』（図1）とその発展である『グラフェン光ゲートダイオード（GPD構造: Graphene Photogated Diode）構造』を開発しました。グラフェンの光ゲート効果を利用することで、光照射により光増感層で発生した電気信号を大幅に増幅することができます。さらにGPD構造により暗電流を抑制することができます。これらの結果として高い感度を持つ光センサを実現しています。」と嶋谷氏は話す。

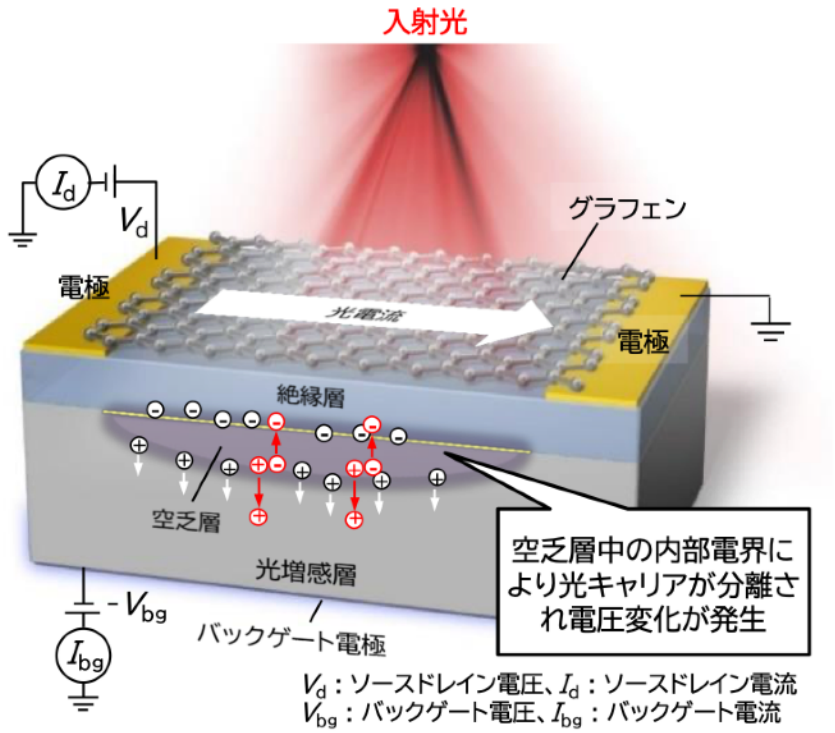

図1:光ゲート効果の原理

嶋谷氏らは、グラフェンによる光ゲート効果を、様々な波長帯域に適用し、高感度なグラフェン光検出器の開発・実証に成功している。バックゲート電圧が与えられると、半導体基板（光増感層）と絶縁層の界面に空乏層が形成される。そこに光が当たると、半導体基板中で電子と正孔が

生成され（光電変換）、これがグラフェンのフェルミレベルを変化させ、その結果として電流が大きく増加する（光ゲート効果の無い場合と比較し、10～1000倍）。微小な電圧変化でも顕著な電流の増加を引き起こすことから、センサの感度が大幅に向上する。
GPD構造は光ゲート効果を実現し、さらにバンドギャップがないグラフェンの欠点である大きな暗電流（※）を抑制することができる。GPD構造では、グラフェンと光増感層（例えば半導体）が直接接触することで、それぞれの物質が持つエネルギーレベルの違いがショットキーバリア（金属と半導体の接触面に形成される電位障壁）を作り出す。このショットキーバリアにより、光が照射されない時には電流が抑制される。一方で光が当たると、電子がエネルギーを受け取り、ショットキーバリアを越えて流れることができる（光電流）。近年の研究によれば、ショットキーバリア領域に形成される薄い酸化膜による光ゲート効果により、グラフェンのフェルミレベル（絶対零度において、電子などのフェルミ粒子が占有しているエネルギー状態の最高値）が大きく変化する。この変化によって、光照射時のみグラフェンと半導体間のショットキーバリアが低下し、大きな出力電流が得られる（光スイッチング効果）。

※光電効果を利用した半導体デバイスなどにおいて、外部からの光が当たっていない状態〈暗闇の状態〉で流れる微小な電流

裏面照射型グラフェン可視光イメージセンサを開発

さらに嶋谷氏らは、GPD構造を適用し、裏面照射型の可視光イメージセンサを開発した。光ゲート効果とGPD構造は、光増感層を変更することで、赤外線波長域以外、つまり紫外、可視、近赤外線、テラヘルツ周波数領域にも適用が可能なのだという（図2）。また、従来の表面照射型センサは、光電変換素子上に配線や回路を配置するため、光の吸収率が低下し感度が低下するという問題があった。この問題を解決するために、シリコン（Si）基板の裏面から光を照射する裏面照射型センサを開発したという。

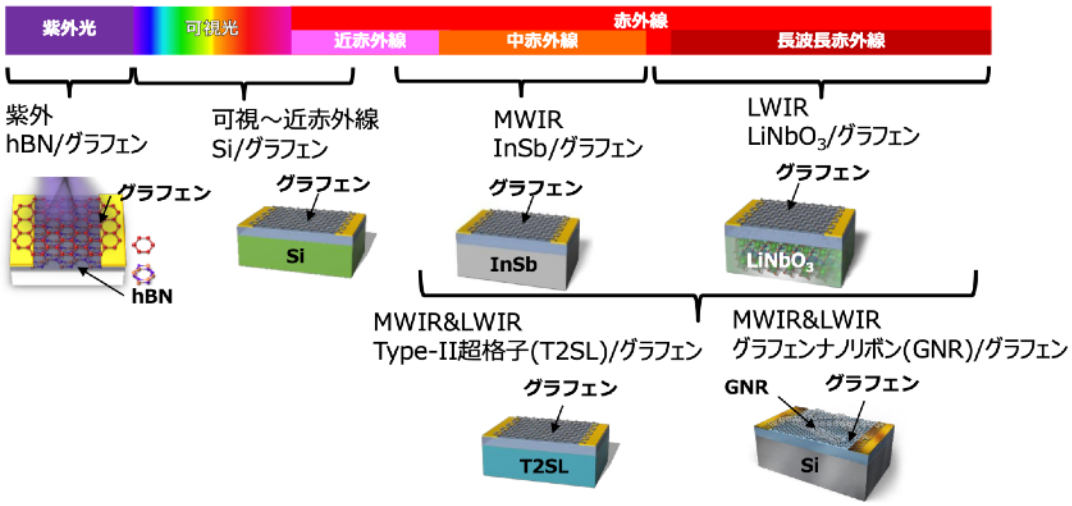

図2 紫外光から赤外で光ゲート効果を生む光増感層

「裏面照射型の、開口率が非常に高いこと、入射光の損失が少ないといった利点が加わることで、高感度と多画素化を実現できます。可視光イメージセンサは各社でさまざまな試みがありますが、今回私たちが提案する可視光イメージセンサは、そこにグラフェンの光ゲート効果が加わることで、より競争力の高いものが実現できると考えています。」（嶋谷氏）

嶋谷氏らは、グラフェンとシリコン（Si）の組み合わせからなるGPD構造をひとつの画素とし、640×512画素のセンサアレイを製作（図3）。グラフェンの表面にALD技術を用いて保護膜を成膜し、プロセスによる損傷を最小限に抑えた。さらに、GPD構造の電極はこの保護膜上に形成されるインジウム（In）バンプを介して読み出し回路に接続される。この構造により、裏面照射型のイメージセンサを実現した。GPD構造を用いていることから、従来のシリコン（Si）フォトダイオードよりもはるかに高い感度を持つ可視光イメージセンサの実現が期待できるという。

グラフェンイメージセンサの用途は、可視波長域における従来の可視イメージセンサの置き換えや、赤外線波長域であれば高性能なナイトビジョンやセキュリティカメラなどがある。「今後は私たちのより身近な場所で高性能かつ低コストなグラフェンイメージセンサの普及を実現していきたいと考えています。」と嶋谷氏は話す。

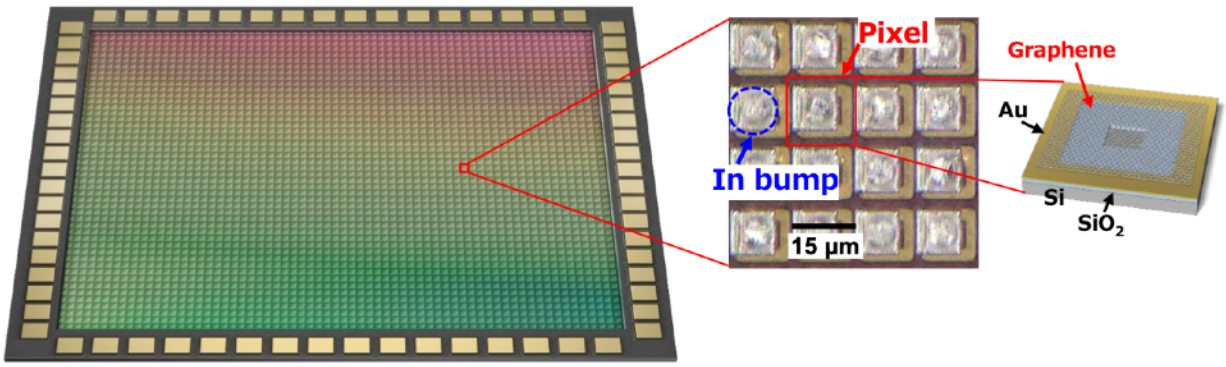

図3: a: グラフェン可視光イメージセンサの模式図 b: グラフェン可視光イメージセンサの画素の光学顕微鏡像 c: インジウムバンプなしの画素の模式図