

EU フラッグシップ集合体の支援で グラフェンフォトディテクタが進歩

ソフィア・ロイド

グラフェンの広帯域光学応答と優れた電気伝導特性により、高感度、広いスペクトル範囲、高速ダイナミクスのフォトディテクタが実現する、これは10年以内にオンチップディテクタプラットフォームの商用化につながる重要な進歩である。

グラフェンは、炭素の安定した同素体であり、その中では炭素原子が単原子厚の六方格子で整列している。グラフェンの基礎物理学についての画期的な実験は、2010年アンドレ・ガイムとコンスタンチン・ノボセロフのノーベル賞となった。際立つ電氣的、光学的、熱的、機械的特性で、グラフェンは、フレキシブルエレクトロニクス、高周波エレクトロニクス、エネルギー生成と蓄積、複合材料、オプトエレクトロニクスデバイスを含むアプリケーションで有望視されている。

2013年、欧州連合(EU)はFuture and Emerging Technology Graphene Flagshipを立ち上げた。重構造の遷移金属二カルコゲン化合物と silicene (Siの2D同素体)などの新材料を含む、グラフェンおよび関連材料(GRM)に基づいた新技術の研究加速が目的である。ヨーロッパ23カ国から150を超える産業界と学術パートナーが、この10年、11億3000万ドルプロジェクトに参加し、実験室の研究をGRMに基づいた商用化可能な技術に変えることを目標にしている。

グラフェンは、オプトエレクトロニクスアプリケーションには特に魅力的である。これには、通信コンポーネント、テラヘルツアンテナとディテクタ、レーザー、プラズモンセンサ、フォトディテク

タなどが含まれる。グラフェンのギャップレス電子構造は、非常に広帯域の光吸収に行きつき、またその高いキャリア移動度により超高速応答時間が可能になる。グラフェンのコンパクトな性質、高い室温移動度、シリコンとの親和性は、こうした機能がオンチッププラットフォームに集積可能であることを意味する。つまり、大きなオプティクスや冷却システムが不要になる。

単原子厚にもかかわらず、グラフェンは、入射光の2.3%を吸収する。グラフェンベースのデバイスには、いくつかの異なる光検出メカニズムがある、光起電流生成、ボロメータのコンダクタンス変化、光熱電(PTE)効果、外部光吸収体を使うフォトゲーティング、プラズマ波アシストディテクシ

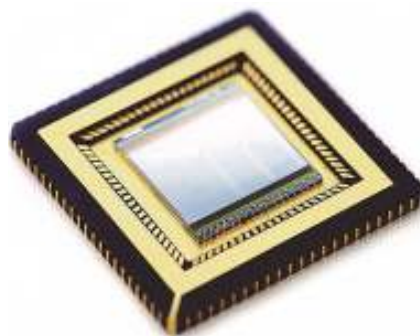


図1 モノリシック集積グラフェン-量子ドットフォトディテクタでは、アレイは、可視-SWIR範囲で高分解能カメラとして機能し、ハイパースペクトルイメージングを可能にする(ICFO/D. Bartolome)。

ンが含まれる⁽¹⁾。多様な商用アプリケーションを提案するために、Graphene Flagshipは、多様な周波数範囲にわたりグラフェンベースフォトディテクタでこれらのメカニズムを開発している。

赤外イメージングと分光測定

グラフェンを伝導チャネルや別の増感層として利用することは、高速、広帯域イメージングセンサへの有望な道である。増感層の光応答は調整可能であり、一方でグラフェンの優れた電気特性がディテクタの全般的な応答度を強める。

特定のターゲットは可視から短波長赤外(SWIR)域のハイパースペクトルイメージングである。これは、セキュリティ、暗視、マシンビジョンアプリケーションにとって重要である。超高応答ハイパースペクトルディテクタは、高いスペクトル分解能の分光計測でも可能性がある。

グラフェン製造会社であるスペインのグラフェニア社(Graphenea)と協働して、同じくスペインのICFOは、読み出しICを持つ(ROIC;図1)CMOSチップに完全垂直統合したグラフェン-量子ドットフォトディテクタを実証した⁽²⁾。388×288ピクセルカメラが、300~2000nmのUV-可視-SWIR範囲で動作する最初の製品である。

フォトゲーティング効果に基づいて、フォトディテクタアレイは 10^7 の高利得、 10^8 A/W応答速度であり、たとえば硫化鉛(PbS)コロイド量子ドットベースのイメージセンサの0.5A/Wより

も著しく高い。参照ピクセルは、 $>80\text{dB}$ のダイナミックレンジ、 $<1\text{ms}$ の応答時間を示しており、フレームレート1000を超えるフレーム/秒(frames/s)に適している。しかし、カメラの性能は、既成のROICに制限された。

フィンランドのエムベリオン社(Emberion)はNokiaからスピンアウトした研究&開発会社で、さまざまなCMOS集積フォトディテクタを開発している。これらは、グラフェントランسدューサと光アクティブ結晶ナノ材料をベースにして、可視-SWIRスペクトルで動作する。これらのアプリケーション特有のディテクタアレイは特注ROICを集積しており、これらグラフェンベースディテクタのフル機能を利用することができる。

可視-SWIR領域を超えて、グラフェンベースのディテクタは、中赤外領域でもイメージングと分光測定を改善する。英ケンブリッジ大とエムベリオン社は、高感度中赤外ディテクタを実証した。これは、 15cm 離れて人の手の存在を検出することができる⁽³⁾。そのディテクタは、光吸収で加熱される焦電性基板上のグラフェンチャネルで構成されている。フローティングゲート電極は、焦電場をグラフェンチャネルに集中させ、放射原理による検出を可能にしている。

ピクセルサイズと形状により感度とスペクトル応答を調整することで、 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ までの小型ディテクタは、高空間分解能赤外線イメージングに適しており、より大きなディテクタの高感度は、高いスペクトル分解能の中赤外および遠赤外で分光測定の可能性を開く。室温動作であるので、その高感度分光計は、危険物質やガス検出アプリケーションで役立つ。

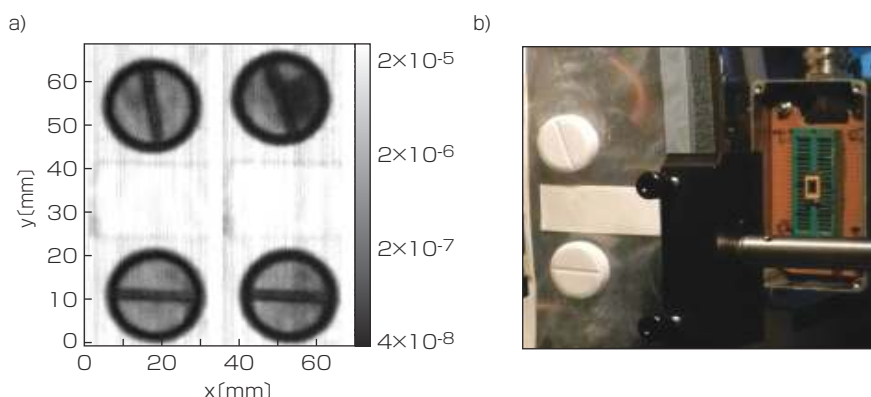


図2 可動ステージ上のシングル黒リンFETピクセルを用いて検出された透過テラヘルツ画像は、錠剤の水損を示している。(a)は、錠剤上方に水を注入する前の錠剤を示しており(左)、また錠剤の上に(右)眼に見える損傷がある。悪化は裸眼には見えない(b)。(CC-BY許可により文献7から採った画像)

テラヘルツイメージング

周波数範囲 0.1 から 10THz は、セキュリティスクリーニング、非破壊試験、欠陥分析、化学センシング、生体医用イメージングでますます重要になっている。これらのアプリケーションが、可搬、室温動作が可能な、高速で高感度のテラヘルツコンポーネントの必要性を推進している。

DyakonovとShurは、2D電子ガス電界効果トランジスタ(FET)を伝搬するプラズマ波をベースにしたテラヘルツ照射の検出メカニズムを提案した。グラフェンFETは、それ以来、伊CNRとケンブリッジ大が、共鳴フォトディテクタと広帯域テラヘルツフォトディテクタの両方に適していることを実証した⁽⁴⁾。

一般的なプラズマ波アシストグラフェンフォトディテクタでは、グラフェンFETのソースとゲート電極がアンテナのローブに接続されており、テラヘルツ信号をFETのサブ波長エリアに導き、グラフェンにプラズマ波を生成する。共鳴ディテクションは、プラズマ波がFETチャネルを通過する際に起こる。運動緩和時間よりも短い時間で通過するとき、ソースドレイン光起電力を

生成し、一方で過減衰しプラズマ波が広帯域ディテクションを可能にする。

CNR、伊IIT、およびケンブリッジ大は二重層グラフェンFETテラヘルツディテクタを実証した。これは、高応答性 1.2V/W または 1.3mA/W 、低雑音であり、商用テラヘルツディテクタに対して競争力がある⁽⁵⁾。さらに、CNRと伊Fondazione Bruno Kesslerがシリコンカーバイド上にエピタキシャル成長させたグラフェンベースのテラヘルツディテクタは、イメージング向け集積ディテクタと大面積ディテクタアレイの大規模製造が有望視されている。しかし商業的に競争力を持たせるには、応答性とノイズ性能を高めるためにさらなる研究が必要とされている⁽⁶⁾。

他のGRM(グラフェンと関連材料)も、テラヘルツディテクションのアプリケーション向けに研究されている。黒リンは、グラファイトやグラフェンと同じように、フォスフォレーン(2D層リンの半導体同素形)のスタックで構成される層状材料。グラフェンと違い、フォスフォレーンは原子的にフラットではないが、その代わりにリッジ構造となっており、これが電子輸送特性における固有の異方性、層の数に依

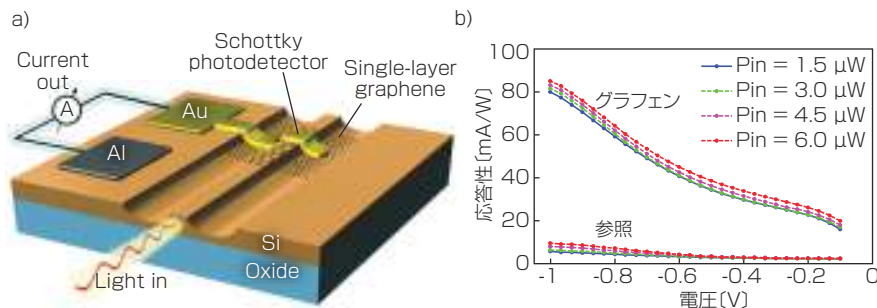


図3 グラフェン集積ショットキーフォトディテクタ (a)の概略図で、グラフェン集積ディテクタの向上した応答性をグラフェンを用いない類似のディテクタと比較し、広い入力パワー (pin)とバイアス電圧(b)を示している。(CC-BY許可により文献11から採った画像)

存するバンドギャップにつながる。

黒リンベースのテラヘルツディテクタは、プラズマベースのディテクタでは低雑音と超高応答5.0V/W、ボロメータディテクタでは7.8 V/Wが示されている⁽⁷⁾。これらの高応答テラヘルツディテクタは、品質制御アプリケーションでも実証されている(図2)。

通信

接続性とモノのインターネット (IoT)で活気づけられていることから、光通信システム需要が急増している。現在の技術は、速度、帯域、消費電力の限界に達している。次世代通信システムは大容量トラフィックに対処できなければならないが、同時に効率向上によりエネルギー消費の削減にも対処できなければならない。

グラフェンは、高移動度と低い固有雑音のために、高速でエネルギー効率のよい通信アプリケーションに有望である。計測によるとグラフェンは、262GHzの固有データ帯域を持ち、最近の研究成果がこの潜在能力を確認している⁽⁸⁾。独AMOとオーストリアのウィーン工科大は、65GHzの高カットオフデータ周波数の導波路集積フォトディテクタを報告した。これは、潜在的なデータレート、90Gbit/s程度を示

唆している。これらのディテクタでは、光はシリコンストリップ導波路により、スロット導波路に誘導される。シリコンストリップ導波路は、局所ゲート電極としても働き、スロット導波路上のグラフェンでp-nジャンクションを誘導している。

これまで、グラフェンベースのフォトディテクタで報告された最高の帯域は76GHzであり、これはデータレート100Gbit/sに対応している。しかし、AMOのボロメトリックフォトディテクタの帯域は、計測セットアップの制約を受けており、ディテクタの帯域は、潜在的にはもっと高い。

グラフェンベースのショットキーダイオードは、単層グラフェンが金属とシリコンの界面に挿入されたものだが、これは標準の金属-シリコンショットキーフォトダイオードよりもはるかに高効率の動作が可能である。イスラエルのヘブライ大、米ジョンホプキンス大と共同ケンブリッジ大は、導波路集積ショットキーフォトディテクタを報告した。これは、応答性が改善されており、内部量子効果はシリコンベースのダイオードの<1%と比べて7%と高い(図3)⁽¹¹⁾。そうした改善は、最先端のシリコンフォトニクスの、あるいはそれを超える感度で高効率動作を実現す

るグラフェンの潜在性を証明している。

グラフェンベースの検出プラットフォームと変調プラットフォームも同じチップに集積可能であり、グラフェンの高伝導性を利用して高速ディテクションと変調が可能になる。併せて高データレートも可能である。Graphene Flagshipは、オプトエレクトロニクス研究プログラムの主要成果としてアクティブコンポーネントをベースにしたプロトタイプトランシーババンクを開発している。

ディテクタ技術の拡張

グラフェンをベースにした光検出プラットフォームは、動作速度、感度、および周波数領域の観点から極めて有望である。既存技術と対抗するために、新しいフォトディテクタは、ローコストで大量生産されなければならない。また、エネルギー効率も改善されなければならない(たとえば通信分野において)。あるいは、他の方法ではありえないまったく新しい機会を開くこともできる(CMOS集積ハイパースペクトルイメージングやテラヘルツイメージング)。

これらの最近の研究開発成果の多くは、化学気相法(CVD)あるいは機械的剥離とウエハへの転送により得られたグラフェンに頼っている。現在の課題は、このアプローチをCMOS製造プロセスに実装することである、また大面積、高品質のグラフェンを得る、欠陥や不整合を減らせる移行プロセス、これら両方においてこのアプローチを実装することである。

Graphene Flagship内のグループは、グラフェンと集積エレクトロニクスやフォトニック回路とを統合するいくつかの可能性のあるルートを探究している。グラフェンベースのオプトエレクト

ロニクスの最初のアプリケーションは、後処理とライン生産方式のバックエンドを通して生まれる、そこではグラフェンは、製造前の回路に転送される。

Emberionは、この戦略を使って特注設計のROICとグラフェンベースフォトディテクタを集積する。高移動度グラフェンをウエハに集積する有望なルートは、クロムナノ粒子をシードにして銅箔上にCVD成長させることである。これにより単結晶グラフェンが制御されたアレイで製造でき、これはウエハに転送することもエッチングすることも可能である⁽¹²⁾。絶縁シリコンカーバイドウエハにグラフェンを直接成長するような代替アプローチは、フロントエンドラインプロセスに適し

ている、ただしシリコンカーバイドウエハは相対的に高価である。

概念実証を通して、商用実行可能な技術に関心を持ち、製造の業界パート

ナーと関与することで、Graphene Flagshipのアプローチは、グラフェンフォトディテクタの開発が急速に進行する強力な基盤を創る。

参考文献

- (1) F. H. L. Koppens et al., Nat. Nanotechnol., 9, 780-793 (2014).
- (2) S. Goossens et al., Nat. Photon., doi:10.1038/nphoton.2017.75 (2017).
- (3) U. Sassi et al., Nat. Commun., 8, 14311 (2017).
- (4) L. Vicarelli et al., Nat. Mater., 11, 865-871 (2012).
- (5) D. Spirito et al., Appl. Phys. Lett., 104, 061111 (2014).
- (6) F. Bianco et al., Appl. Phys. Lett., 107, 131104 (2015).
- (7) L. Viti et al., Sci. Rep., 6, 20474 (2016).
- (8) A. Urich et al., Nano Lett., 11, 2804 (2011).
- (9) S. Schuler et al., Nano Lett., 16, 7107 (2016).
- (10) D. Schall et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 50, 124004 (2017).
- (11) I. Goykhman et al., Nano Lett., 16, 3005 (2016).
- (12) V. Miseikis et al., 2D Mater., 4, 021004 (2017).

著者紹介

ソフィア・ロイドは、Graphene Flagship (英ケンブリッジ大ケンブリッジグラフェンセンター)のライター。e-mail: writer@graphene.cam.ac.uk URL: www.graphene.cam.ac.uk

LFWJ

光産業技術マンスリーセミナー



Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム (10~11月)

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第413回 10月17日(火) 15:30-17:30	「診断・治療における内視鏡技術の現状と将来」 講師：五十嵐 誠氏 (オリンパス株式会社)
第414回 11月21日(火) 15:30-17:30	「量子カスケードレーザの進展とその応用」 講師：枝村 忠孝氏 (浜松ホトニクス株式会社)

- 場所 一般財団法人光産業技術振興協会
- 定員 各60名
- 参加費 光協会賛助会員：1,500円(税込み) / 一般参加：3,000円(税込み)
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。

- 申込方法 オンライン申込フォーム >>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
- 申込締切 定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合には Web 上にその旨を掲載します。

問い合わせ先

一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当 間瀬、潮田
〒112-0014 東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F TEL:03-5225-6431 FAX:03-5225-6435
E-mail: mly@oitda.or.jp URL: http://www.oitda.or.jp/