

## 2次元層状ヘテロ構造を用いた光機能素子の実証

研究代表者

長汐 晃輔 東京大学マテリアル工学専攻 教授

共同研究者

岩本 敏 東京大学生産技術研究所 教授



### 1. 研究の背景と達成目標

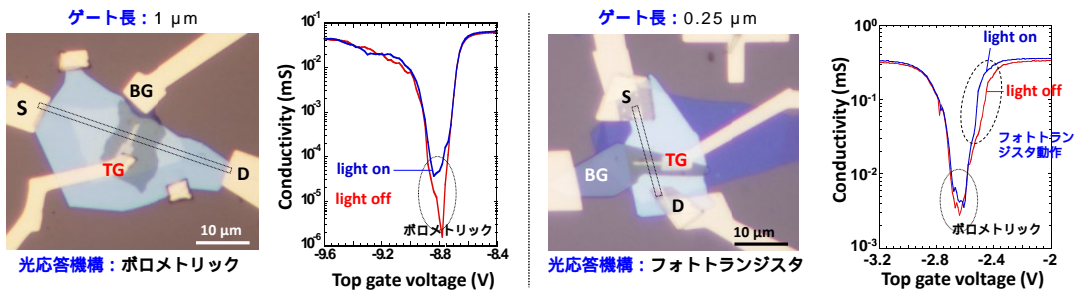
赤外センサーは、車積載ナイトビジョン、セキュリティ等に端を発し急激に用途を拡大しており、2020年には70億ドル規模の市場規模となっている。しかしながら、高速応答可能な光検出半導体素子に限ると、遠赤外領域にエネルギーギャップを有する材料はMCT(HgCdTe)のみであるため、RoHS指令の制限物質Hg、Cdを含むにも関わらず使用されている現状がある。また、赤外域の光検出には素子を冷却する必要があり室温動作が強く望まれている。我々は、これまでに通常ギャップの存在しない2層グラフェンをh-BNとの層状ヘテロFET構造に作りこみ、さらに外部電界を印可することで0.15eV程度のギャップを形成し、世界的に最も高い電流のon/off比の検出に成功している。外部電界によるギャップ変調(0~0.15 eV)によるマルチカラー化が可能であり、この素子ですべてに対応可能となる。2層グラフェンは直接遷移型であり、フォトトランジスタ構造により増幅作用により室温動作が可能であることが理論的に報告されているものの、未だ実験的に実証されていない。本研究では、2層グラフェン層状ヘテロFETを用いて赤外域に感度のあるフォトトランジスタ動作の実証を目指した。

### 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・2層グラフェン層状ヘテロFETにおいて、1  $\mu\text{m}$  より長いゲート長においてはポロメトリックな光応答を示すが、0.25  $\mu\text{m}$  のゲート長において初めてフォトトランジスタ動作を示す光応答を検出した。ゲート長により光応答機構が変化することを示した本成果は、赤外応答におけるデバイス構造設計への重要な知見である。
- ・2層グラフェンの大面積成長において電流変調特性が悪い準安定な積層構造が問題となってきたが、10時間を超える反応時間を保つことで安定な積層構造を取ること見出し、実際に5桁を超える高い電流変調特性を実証した。グラフェンの電子デバイス応用への重要な成果である。
- ・世界的に有無が議論されていたトポロジカル端の効果(エッジ伝導)が、短チャンネル2層グラフェンデバイスにおいて起こることを示した。理論予測に対する実験的検証は学術的な意義が高い。
- ・バンドギャップが0.05 eVとされ近年注目を集めるPdSe<sub>2</sub>の赤外応答を検討し、低温フーリエ変換赤外分光装置の光電流計測から遠赤外領域ではなく0.5 eVの近赤外領域であることを初めて示した。将来的な量子型近赤外線センサーに向けた重要な知見である。

### 3. 研究成果

2層グラフェンとh-BNの2次元ヘテロデバイスのフォトトランジスタ動作により赤外検出を目指した。フォトトランジスタ動作の条件はキャリアの拡散長(~1  $\mu\text{m}$ )よりもゲート幅が小さい場合であり、ゲート幅を変えたデバイスを図1のように作製した。1  $\mu\text{m}$  のゲート幅、ポロメトリック効果による光応答を示したが、ゲート幅が0.25  $\mu\text{m}$  の場合、フォトトランジスタ動作を示す光応答を初めて検出した。0.2  $\mu\text{m}$  以下のゲート幅のデバイスを作製したが、トポロジカル端の効果(エッジ伝導)により感度向上は困難であったが、世界的に有無が議論されていたトポロジカル端の効果の観察は、2層グラフェン研究において大きな進展であり学術的意義が高い。



2次元層状物質である貴金属ダイカルコゲナイドの一つであるPdSe<sub>2</sub>は、DFT計算によりバンドギャップエネルギーが強い膜厚依存性をもち、単層で1.5 eV、バルクで遠赤外領域に対応する0.05 eVであると報告され、環境負荷の高いMCT代替の遠赤外材料として注目を集めている。しかしながら、バルク結晶の機械的剥離で得られるPdSe<sub>2</sub>は20 μm程度であり従来適応されてきた赤外光吸収測定では困難でありバンドギャップの値には疑念が残る。本研究では、PdSe<sub>2</sub>デバイス自身を低温フーリエ変換赤外分光装置の検出器として用いることで高感度での光電流の連続スペクトルを取得した。図2に間接遷移の吸収端からバンドギャップが実際には0.5 eVであることが分かった。また、光照射における応答機構を解析した結果、試料形状等の非対称性に起因した光熱起電力効果によるものであることを見出した。

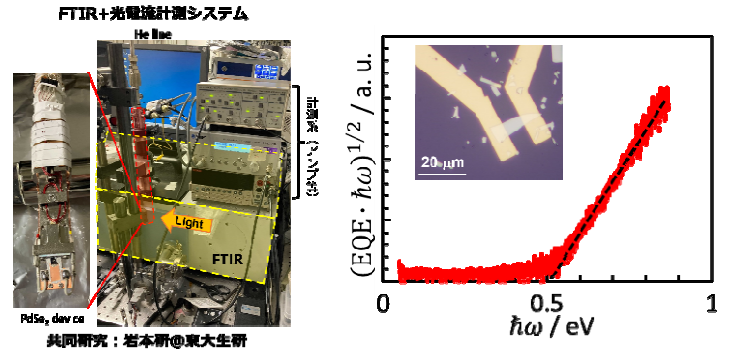


図2 低温フーリエ変換赤外分光装置と外部量子効率スペクトル。

図2に間接遷移の吸収端からバンドギャップが実際には0.5 eVであることが分かった。また、光照射における応答機構を解析した結果、試料形状等の非対称性に起因した光熱起電力効果によるものであることを見出した。

#### 4. 今後の展開

2次元層状物質は、離散的な原子層のため特異な物性を有することが多く、2層グラフェンの外部電界印加によりバンドギャップを赤外領域に変調させ赤外ディテクターとして用いる本研究も特徴を捉えたものである。一方で、物性値に関して疑念があることも多く、本研究におけるPdSe<sub>2</sub>におけるバンドギャップのように研究の過程で遡って物性値を再検討することもしばしばである。このような基礎的な検討を継続していくことにより特異な物性を制御し赤外ディテクターへの展開が加速していくことを期待する。

#### 5. 発表実績

[1] W. Nishiyama, T. Nishimura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, & K. Nagashio, "Quantitative Determination of Contradictory Band Gap Values of Bulk PdSe<sub>2</sub> from Electrical Transport Properties", Adv. Funct. Mater., 2021, 2108061.

[2] T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, & K. Nagashio, "Material and Device Structure Designs for 2D Memory Devices Based on the Floating Gate Voltage Trajectory", ACS nano, 2021, 15, 6658.

[3] T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, & K. Nagashio, "Understanding the Memory Window Overestimation of 2D Materials Based Floating Gate Type Memory Devices by Measuring Floating Gate Voltage", Small, 2020, 16, 2004907.

[4] P. Solís-Fernández, Y. Terao, K. Kawahara, W. Nishiyama, T. Uwanno, Y.-C. Li, K. Yamamoto, H. Nakashima, K. Nagashio, H. Hibino, K. Suenaga, & H. Ago, "Isothermal Growth and Stacking Evolution in Highly Uniform Bernal-Stacked Bilayer Graphene", ACS Nano, 2020, 14, 6834.

[5] N. Higashitarumizu, H. Kawamoto, C.-J. Lee, B. -H. Lin, F. -H. Chu, I. Yonemori, T. Nishimura, K. Wakabayashi, W. -H. Chang & K. Nagashio, "Purely in-plane ferroelectricity in monolayer SnS at room temperature", Nature commun., 2020, 11, 2428.