

ファンデルワールス・ヘテロ接合の物理と機能

Physics and Functions of van der Waals heterostructures

課題番号：19H05602

岩佐 義宏（IWASA Yoshihiro）

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要（4行以内）

2次元物質と呼ばれる原子層数層以下の厚みしかない物質が、バルクの結晶と大きく異なる革新的な新物性を示すことを明らかにし、急激に発展している。本研究の目的は、2次元物質を自在に積層したファンデルワールスヘテロ接合からなる新物質を作製し、様々なデバイスと組み合わせることで、単一物質では決して得られない新しい物性・機能を見出すことである。

研究分野：固体物理学

キーワード：2次元物質、ファンデルワールスヘテロ接合、非線形現象、電界効果

1. 研究開始当初の背景

近年の物質科学の発展は、原子層1枚の厚みでも物質が安定に存在するとともに、それらがバルク物質とは全く異なる様々な興味深い物理的、化学的性質を示すことを明らかにしてきた。これらの極薄膜物質は2次元物質と呼ばれ、2004年のグラフェンの発見に端を発する。その後、他の様々なファンデルワールス（VdW）結合を有する層状物質からも2次元物質が作製され、最近では、異なる2次元物質を積層するヘテロ構造や、ねじって積層するツイスト積層などが大きな注目を集めている。このVdWヘテロ接合の大きな特徴は、従来の半導体ヘテロ接合に要求される格子整合という強い拘束条件がほとんどないことで、格子定数だけでなく、結晶系が異なる物質の間でも、任意のツイスト角度で積層が可能である。そのため、VdWヘテロ接合は、従来のヘテロ接合の枠組みをはるかに超えた新しい物質作製の指導原理として期待されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2次元物質、VdWヘテロ接合からなる様々な新物質を作製し、単一物質では得られない新しい物性を見出すことである。

特に注目する物性として、第1に、対称性の破れに起因した非相反輸送現象や異常光起電力効果などの新現象の発見を、第2に隣接する物質との強い近接効果に起因する新しい電子相の形成を目指す。さらにこれらの微視的機構を明らかにして、それに

基づく新しい機能性の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究では、2次元物質およびそのVdWヘテロ接合を、機械的積層法とMBE法の2つの手法を用いて作製する。前者は、2種類の2次元物質を積層する際に、ツイスト角の自由度が許される一方、試料面積は小さい。一方、MBE法ではツイスト角の自由度がない半面、大面積試料が得られるため多様な物性計測が可能である。

以上の試料のデバイス構造を作製し、輸送現象、光電物性、磁性を中心とした物性を測定する。さらに電子状態制御法として、電界効果、電気二重層トランジスタなどの電気化学的手法を用いる。

4. これまでの成果

①VdWヘテロ接合におけるバルク光起電力の発見

三回回転対称性を有する2次元物質・単層WSe₂と二回回転対称性を有する2次元物質・黒リン(BP)の積層により、vdWヘテロ接合を作製した(図1)。このように構造が異なる物質の接合が可能なのが、VdWヘテロ接合の最も大きな特徴である。さらに、この界面で、面に平行にバイアスなしで光電流が流れることを発見した(図2)。この界面の構成要素物質であるWSe₂とBPはともに非極性であるにも関わらず、これらの物質のVdWヘテロ界面には面内分極が生成され(図1)、その結果、バルク光起電力が分極方向のみに発生することを理論との

共同研究によって明らかにした[1]。この結果は、VdW ヘテロ接合が対称性の制御、さらには機能性の発現に非常に強力な役割をすることを示しており、今後の発展が期待される。

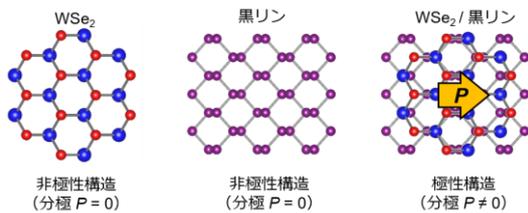


図1 VdW ヘテロ構造における対称性の制御。WSe₂ (左)、黒リン (中)、ヘテロ構造 (右)。

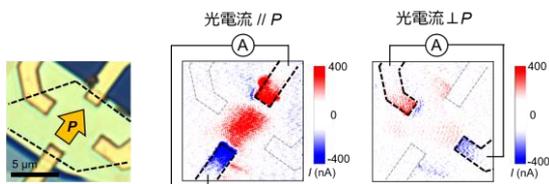


図2 WSe₂/BP ヘテロ構造の光学顕微鏡写真 (左)、分極に平行方向 (中) と垂直方向 (右) の光電流マッピング。

②新しい2次元強磁性の発見と、磁性 VdW ヘテロ接合における強磁性の増強

MBE 法を用いて遷移金属カルコゲナイドによる超伝導体、磁性体、およびその VdW ヘテロ接合の作製に成功した。まず、V₅Se₈ はバルクでは反強磁性体として知られるが、数 10 層以下の厚みの薄膜状態では異方性の弱い強磁性を示すことを発見した[2]。さらに超伝導体 NbSe₂ と強磁性体 V₅Se₈ からなる V₅Se₈/NbSe₂ の VdW ヘテロ接合 (図 3 左) を作製した。その結果、NbSe₂ の超伝導は失われる代わりに、強磁性転移温度が V₅Se₈ 単体の 10 K 以下から 20 K 以上に上昇する (図 3 右) それとともに、強い面直磁気異方性を示すように変化することを見出した。さらに、理論との共同研究により、V₅Se₈ の強磁性の増強が NbSe₂ 特有の Zeeman 型スピン-軌道相互作用によってもたらされていることがあきらかにした[3]。

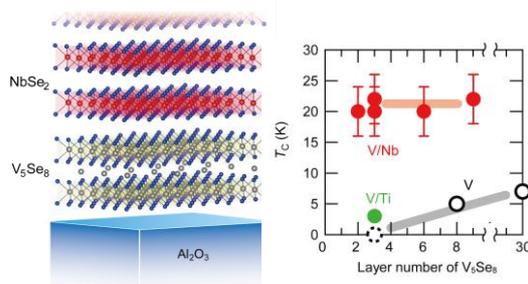


図3 V₅Se₈/NbSe₂ の VdW ヘテロ接合：(左) 構造の模式図、(右) V₅Se₈ (白抜き) と V₅Se₈/NbSe₂ ヘテロ接合ヘテロ接合 (赤) のキュリー温度 T_C と膜厚の関係。

③VdW ヘテロ界面におけるマグノン-励起子結合の観測

反強磁性体である MnPSe₃ と単層 MoSe₂ のヘテロ接合において、発光スペクトルの温度変化から、ヘテロ界面を通じた励起子-マグノン相互作用の存在を実証した[4]。

続いて、強磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット(YIG)薄膜と MoSe₂ の VdW ヘテロ接合におけるマグノン-励起子結合の観測に成功した。YIG 薄膜の強磁性共鳴によりマグノンが励起され、マグノンが作り出す振動磁場によって MoSe₂ の励起子準位がゼーマン相互作用により変調される様子を、光の反射率の変調信号として観測した。量子情報分野のマイクロ波領域の情報担体として有力視されているが、長距離伝導を目指し、赤外可視領域への情報変換の原理を示すものである。

④層間エンジニアリングによる超低キャリア数超伝導体の物性解明

VdW 層状超伝導体 Li_xZrNCl における Li 組成 x を、電圧によって 2 桁近く変化させることに成功し、極めて低いキャリア数領域での超伝導が、BCS (バーディーン・クーパー・シュリーファー超伝導) - BEC (ボース・アインシュタイン凝縮) の間のクロスオーバー現象を示すことを発見した[5]。

5. 今後の計画

2次元物質と VdW ヘテロ接合の、対称性の制御と近接相互作用に基づく新物性開拓を継続する。そのため、新たに4つの技術を導入する。①第2高調波発生法による分極を直接検出、②電界効果、歪効果の技術を導入による、対称性の制御技術の向上、③インターカレーションによる層間エンジニアリングの概念による、磁性、超伝導状態の制御、④デバイス構造の再検討とマイクロ波共振器を導入による、マグノン-励起子相互作用の増強。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] T. Akamatsu et al., Science 372, 68-72 (2021).
- [2] M. Nakano et al., Nano Lett. 19, 8806 (2019).
- [3] H. Matusoka et al., Nano Lett. 21, 1807 (2021)
- [4] M. Onga et al., Nano Lett. 20, 4625 (2020).
- [5] Y. Nakagawa et al., Science 372, 190-195 (2021).

岩佐義宏 仁科記念賞(2019)

7. ホームページ等

<http://iwasa.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>
iwasa@ap.t-tokyo.ac.jp