

富永 淳二

産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門  
首席研究員

カルコゲン化合物・超格子のトポロジカル相転移を利用した  
二次元マルチフェロイック機能デバイスの創製

## § 1. 研究実施体制

### (1)「産業技術総合研究所」グループ

- ① 研究代表者: 富永 淳二 (産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門  
首席研究員)
- ② 研究項目: カルコゲン超格子によるトポロジカル機能発現とマルチフェロイック機能  
デバイスの創製
  1. ナノ構造創製と機能発現
  2. トポロジカル相転移材料及びデバイスの理論・シミュレーション
  3. 革新的マルチフェロイック機能電子デバイスの創製
  4. ヘリカルスピン制御型光デバイスの創製

### (2)「豊田工業大学」グループ

- ① 主たる共同研究者: 栗野 博之 (豊田工業大学・大学院工学研究科・教授)
- ② 研究項目: カルコゲン超格子における磁気応答の研究
  1. GeTe/ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子における磁気光学効果の研究
  2. GeTe/ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子における磁気抵抗効果、異常ホール効果、スピン波伝搬の研究

### (3)「筑波大学」グループ-1

- ① 主たる共同研究者: 長谷 宗明 (筑波大学数理物質系・物理工学域・教授)
- ② 研究項目: カルコゲン化合物・超格子における磁気コヒーレンスの生成と検出
  1. カルコゲン化合物・超格子における磁気コヒーレンスの生成と検出

(4)「筑波大学」グループ-2

- ① 主たる共同研究者:久保 敦 (筑波大学数理物質系・物理学域・講師)
- ② 研究項目: カルコゲン超格子を用いたアクティブプラズモニクス
  - 1. カルコゲン超格子の相転移機構を用いたプラズモニックデバイスの開発
  - 2. カルコゲン超格子におけるスピン偏極プラズモンの励起と観察

(5)「東京工業大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:村上 修一 (東京工業大学理学院・教授)
- ② 研究項目
  - 1. トポロジカル半金属の超格子で現れるさまざまなトポロジカル相の検討
  - 2. トポロジカル絶縁体積層で現れるトポロジカル相の探索およびカイラリティの秩序化転移の可能性の検討
  - 3. トポロジカル絶縁体薄膜でのコットンムートン効果の実験データの解析

(6)「名古屋大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:田仲由喜夫 (名古屋大学・大学院工学研究科・教授)
- ② 研究項目: 超格子構造がもつ低次元電子系物理の解明
  - 1. 3次元トポロジカル絶縁体表面におけるらせん光渦による電気磁気効果の研究
  - 2. ワイル・ディラック半金属における逆ファラデー効果の理論研究
  - 3. 単層カルコゲナイド物質における電気磁気効果の研究

## § 2. 研究実施の概要

(1) **産業技術総合研究所(富永)グループ:** GeTe と  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  薄膜によって構成される超格子構造の組み合わせ積層数、各層の単位膜厚を詳細に振った研究から、巨大磁気抵抗変化を発生させるメカニズムを解明した(論文投稿中)。理論計算から GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  界面のラッシュバ効果により、フェロ配置でも熱緩和による再構成を考慮すると低抵抗状態が実現することを明らかにした(論文投稿中)。三端子超格子デバイスのゲート機能を担う GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子の抵抗スイッチングについて、世界で初めてバイポーラス動作することを確認するとともに、低抵抗・高抵抗状態のコンダクタンス測定にも成功し、スイッチング特性と膜中電荷捕獲の関係を議論した。多機能走査プローブ顕微鏡システム(MSPM)を用いて、GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子膜における局所的な電気伝導度のスイッチングの測定を行った結果、電圧パルス印加により起こる状態変化は、探針からの電子的な励起により誘起されていることが分かった。トポロジカル絶縁体の光学応答理論を構築し、トポロジカル絶縁体、ワイル半金属、原子層材料に適応することで、トポロジー性に起因する異常光学応答の出現が予測できた。三端子超格子デバイスのゲート機能を担う GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子の抵抗スイッチングについて、世界で初めてバイポーラス動作することを確認するとともに、低抵抗・高抵抗状態のコンダクタンス測定にも成功し、スイッチング特性と膜中電荷捕獲の関係を議論した。**プラズモニクスデバイスでは**、超格子を用いた不揮発メモリと同様に電圧印加ができるサンプルデバイスの設計を進め作製に着手した。

(2) **豊田工業大学(栗野)グループ:** (1)これまで GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子の磁気応答としてミラーシメトリーで大きな磁気光学 Kerr 効果が現れることを報告してきた。ミラーシメトリーについては未だに原因が不明であるが、もしも垂直に印加した磁界で GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子内の元素の磁気モーメントが膜面一方向に揃うようなことがあればこの現象がコットンムートン効果を測定していたことになり、ミラーシメトリーな磁気光学効果発現が説明できる。そこで、この測定装置の準備を開始した。(2) また、これまで直流における磁気抵抗効果について報告してきたが、この周波数依存性や磁気キャパシタンス効果についても調べるために、これらの周波数特性を測定できる測定器を立ち上げた。これにより一つの GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子について調べた結果、磁気抵抗効果と磁気キャパシタンス効果の磁界に対する極性が互いに逆であることや、コンダクタンス、キャパシタンスの周波数特性が温度によって大きく変化することがわかった。

(3) **筑波大学(長谷)グループ:** H28 年度は、長波長領域(1200~1550 nm)での時間分解磁気光学測定を行うため、まず、フェムト秒パルスレーザーの光パラメトリック増幅光(中心波長 1200~1550 nm、パルス幅 < 60 fs)を光源としたポンププローブ型透過測定システムを構築し、カルコゲン化合物および超格子型相変化メモリ(iPCM)材料の薄膜試料の超高速光応答を測定した。その結果、結晶性を反映した明確なコヒーレントフォノン信号を取得することができた。この結果は超格子型相変化メモリの光通信帯域での相変化ダイナミクスに関する知見を与える。今後は 1200~1550 nm の波長域で時間分解ファラデー回転検出も行い、スピン偏極(磁化)信号取得を目指す。

(4) 筑波大学(久保)グループ: GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子 (GST) へのパルス電圧印加により繰り返し RESET-SET 相転移が可能なプラズモニック光変調デバイスの製作を行った。Au/SiO<sub>2</sub>/GST 多層膜にスリット状の光入力部と電極パッドを、集束イオンビームエッチング/デポジション法により作製した。入力した光信号はスリット部でプラズモンに変換され、Au/SiO<sub>2</sub>/GST 層を導波する。パルス電圧印加/レーザー照射その場観察装置により、電圧パルス ( $V_{\text{set}}$ ) 印加に伴うリード抵抗の変化を計測し、iPCM の動作に類似した RESET-SET-RESET 動作を捉えることに成功した。これにより、マイクロサイズの GST 面積を有するプラズモニックデバイスの繰り返し駆動が可能であることの証左を得た。

(5) 東京工業大学(村上)グループ: 相変化メモリ超格子に対応して、トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の超格子として現れると言われている2つの積層パターン (cohelicity, counterhelicity) について、現れる相を調べ、それらのトポロジカル相の出現の起源を探った。その結果ディラック半金属相の他に、ノーダルライン半金属、ノーダルサーフェス半金属などさまざまなトポロジカル相がでることを見いだした。

また、ワイル半金属と通常の絶縁体の超格子で現れる相を、それぞれの層の厚さを変えて調べた。ワイル半金属のワイル点同士を結ぶ方向に対して、垂直および平行に積層した場合を調べたところ、前者ではワイル半金属ないし通常の絶縁体相が現れるのに対し、後者では層の厚さの関数として複雑な相図が得られた。特にチャーン数がさまざまな量子異常ホール相が出てくることが分かり、それを表面フェルミアーク状態の混成という観点から解釈することができた。こうした研究成果は、トポロジカル相を積層してバンド構造をデザインするための基礎的な知見となる。

(6) 名古屋大学(田仲)グループ: GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子の Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> はトポロジカル絶縁体として知られている物質であり、その物質の表面における電気磁気効果を理論的に研究している。H28 年度ではトポロジカル絶縁体表面に軌道角運動量を持った光(らせん光渦)を照射することによって、光のスピンの軌道角運動量に応じたスピン偏極がトポロジカル絶縁体表面に誘起されることを明らかにした。また GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 超格子はディラック半金属の候補物質として知られていることから、本グループはディラック半金属(もしくはワイル半金属)特有の光学応答も調べている。H28 年度では、ディラック半金属における逆ファラデー効果の研究を行い、円偏光を照射した方向にスピン偏極すること、光誘起の電流が駆動されることが分かった[1]。

### 代表的な原著論文

- [1] Kotaro Makino, Shota Kuromiya, Keisuke Takano, Kosaku Kato, Makoto Nakajima, Yuta Saito, Junji Tominaga, Hitoshi Iida, Moto Kinoshita, and Takashi Nakano, "THz Pulse Detection by Multilayered GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>", ACS Applied Materials & Interface, 8 (47), pp.32408–32413 (2016).
- [2] K. Yokomizo, S. Murakami, Topological phases in a Weyl semimetal multilayer, Phys. Rev. B 95, 155101 (2017).
- [3] K. Taguchi, D.-H. Xu, A. Yamakage, and K. T. Law "Photovoltaic anomalous Hall effect in line node semimetals" Phys. Rev. B. 94, pp.155206-1 -155206-7 (2016).