

平成 29 年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】強磁場計測とデータ解析技術の融合によるエネルギーデバイス材料評価手法の確立に向けた基礎調査研究

【整理番号】
TK17-023

【代表機関】 物質・材料研究機構

【調査研究代表者（氏名、連絡先 TEL & Mail）】
今中 康貴 029-863-5413, IMANAKA.Yasutaka@nims.go.jp

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】
産業総合技術研究所 柴田 肇
筑波大学 黒田 眞司
東京大学 秋山 了太

【TIA 外連携機関】

【報告書作成者】 今中 康貴 【報告書作成年月日】 平成 30 年 3 月 30 日

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

本調査研究においては今年度も計測を担当する物質・材料研究機構を中心に、エネルギーデバイスの材料の作成を担当する筑波大学、東京大学が試料を持ち寄り、強磁場計測する形で連携が推進された。

具体的には、筑波大学、東京大学からトポロジカル結晶絶縁体 PbSnTe および SnTe、更には物質・材料研究機構は CdTe、GaN、ZnO 二次元試料について、物質・材料研究機構の強磁場施設にて、強磁場輸送測定を行った。また計測した精密データ（磁気抵抗、ホール抵抗）を使ってのキャリアの種類、濃度、移動度のパラメータを解析するプログラムに関する調査を産総研、物質・材料研究機構が中心となり行い、極めて実効的な連携協力関係を構築することができた。

さらに強磁場計測に関する研究会を調査研究代表者が中心となり TIA かけはしの共催で開催し、本連携プログラムで得られた成果の発表を参画メンバー、参画学生が多数行った。その際、本解析手法に関して参加者と様々な有益な議論を行うことができた。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

半導体デバイスにおいて、特に複数種のキャリアが伝導を担う場合、それぞれのキャリアの移動度や濃度、極性に関する情報を分離することは重要である。実際に太陽光発電デバイスでは多数キャリアではなく少数キャリアの特性が、トポロジカル絶縁体ではバルクではなく表面キャリアの特性が重要で、その特性のみを切り出して評価するために、これまで試料品質や計測技術の向上の両面から努力が続けられている。

その問題に対して本調査研究では、1：光照射下での強磁場輸送計測法の確立、2：高品質試料の作成と共に、3：コンピュータープログラム使った解析による複数種のキャリア特性の自動抽出する手法について調査を行った。

今年度は特に、CdTe、GaN、PbSnTeといった各種半導体の強磁場輸送計測を物質・材料研究機構の強磁場磁石を用いて行い、広範な磁場範囲で磁気伝導度とホール伝導度のデータを得た。その伝導度データを使い、Beck、Andersonにより提案された移動度スペクトル法のプログラムを使って、キャリアの符号、濃度、移動度の分布の見積もりを行った。

その結果、移動度が高く、キャリアが単一の場合には、現行のプログラムでも十分にリズナブルな移動度スペクトルを得られることが明らかになったが、複数のキャリアが混在する状況下では、得られるスペクトルが非常に複雑になり、その妥当性、信頼性について、計算実験の両面より更に検討していく必要があることが今回明らかとなった。

また解析手法についても、GaAs 薄膜の低磁場下での輸送特性より得られた伝導度を使い、先の移動度スペクトル法による手法と、これとは別の単純正則化法による手法の比較検討を行った。両手法による移動度スペクトルの形状は若干異なるが、同様なピーク形状およびピーク位置を再現することが明らかとなった。

論文発表

1. K.Takehana, Y.Imanaka *et.al.*,"Logarithmic temperature dependence of resistivity in CVD graphene, *Curr.Appl.Phys.*17,474(2017).
2. "Improvement of minority carrier lifetime and conversion efficiency by Na incorporation in Cu₂ZnSnSe₄ solar cells", H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, and S. Niki, *Journal of Applied Physics* 122, 023106 (2017).
3. "Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping", Shinobu Ohya, Akiyori Yamamoto, Tomonari Yamaguchi, Ryo Ishikawa, Ryota Akiyama, Le Duc Anh, Shobhit Goel, Yuki K. Wakabayashi, Shinji Kuroda, and Masaaki Tanaka, *Physical Review B* 96, 094424 (2017).
4. "Berry phase shift from 2π to π in Bilayer graphene by Li-intercalation and sequential desorption", Ryota Akiyama, Yuma Takano, Yukihiko Endo, Satoru Ichinokura, Ryosuke Nakanishi, Kentaro Nomura, and Shuji Hasegawa, *Applied Physics Letters* 110, 233106 1-4 (2017).

学会発表

1. CdTe二次元電子系における強磁場荷電励起子発光II、今中康貴他、東京理科大学、2018年日本物理学会第73回年会（2018年3月23日）
2. InGaAs二次元電子ガス二層系における「指紋」としての分数プラトーの痕跡、山田省二、今中康貴、竹端寛治他、東京理科大学、2018年日本物理学会第73回年会（2018年3月22日）
3. 二層グラフェンにおける兵部バンドにおけるサイクロトロン共鳴測定、竹端寛治、今中康貴、東京理科大学、2018年日本物理学会第73回年会（2018年3月24日）
4. 強磁場サイクロトロン共鳴によるGaN二次元電子系の有効質量の評価II、D. Kindole, 竹端寛治、今中康貴、東京理科大学、2018年日本物理学会第73回年会（2018年3月23日）
5. Sbドーパドポロジカル結晶絶縁体PbSnTe(111)薄膜における2次元バンドの観測、秋山了太、大滝祐輔、伊藤寛史、中西亮介、宮内恵太、黒田眞司他、東京理科大学、2018年日本物理学会第73回年会（2018年3月22日）
6. 強磁場におけるCdTe二次元電子系における強磁場荷電励起子発光、今中康貴、つくば、物質・材料研究機構、強磁場フォーラム研究会（つくば、NIMS、2017年11月29日）
7. Cyclotron resonance in GaN quantum Hall systems、D. Kindole, 今中康貴、つくば、物質・材料研究機構、強磁場フォーラム研究会（NIMS、2017年11月29日）
8. 強磁場グリーンマグネット開発、木戸義勇、今中康貴、つくば、物質・材料研究機構、強磁場フォーラム研究会（NIMS、2017年11月29日）
9. イオンゲート制御された二層グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴測定、竹端寛治、今中康貴、つくば、物質・材料研究機構、強磁場フォーラム研究会（NIMS、2017年11月29日）
10. CdTe二次元電子系における強磁場荷電励起子発光、今中康貴、岩手大学、2017年秋季日本物理学会（2017年9月23日）
11. 強磁場サイクロトロン共鳴によるGaN二次元電子系の有効質量の評価、D. Kindole, 竹端寛治、今中康貴、岩手大学、2017年秋季日本物理学会（2017年9月21日）
12. 幅広InGaAs量子井戸二層二次元電子ガスにおける弱反局在解析、山田省二、今中康貴、竹端寛治、岩手大学、2017年秋季日本物理学会（2017年9月23日）

13. "Improvement of Open Circuit Voltage in Cu₂ZnSnSe₄ Solar Cells by Surface Treatment", H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, and S. Niki, 2017 MRS Spring Meeting, USA, Phoenix, Apr 19, 2017
14. "CHARACTERIZATION OF CU₂ZNSNSE₄ SOLAR CELL WITH CONVERSION EFFICIENCY OF 11.7%", H. Tampo, S. Kim, H. Shibata, and S. Niki, PVSEC-27, Japan, Shiga, November 15, 2017
15. MBE法により成長したIV-VI族希薄磁性半導体(Sn, Mn)Teの構造と磁性の評価、石川諒, 伊藤寛史, 秋山了太, 仁谷浩明, 黒田眞司, 21pPSA-29、岩手大学、2017年秋季日本物理学会 (2017年9月21日)
16. トポロジカル結晶絶縁体SnTe薄膜のPbTe表面へのMBE成長および電気伝導特性、伊藤寛史, 大滝祐輔, 石川諒, 秋山了太, 黒田眞司, 21pPSA-57、岩手大学、2017年秋季日本物理学会 (2017年9月21日)
17. TIドープトポロジカル結晶絶縁体SnTeの構造・電気伝導特性、秋山了太, 渡辺和己, 中西亮介, 宮内恵太, 長谷川修司, 21pPSA-58、岩手大学、2017年秋季日本物理学会 (2017年9月21日)
18. "Observation of the surface Dirac cone in Sb-doped PbxSn_{1-x}Te(111) thin films", Ryota Akiyama, Tomonari Yamaguchi, Yusuke Otaki, Ryo Ishikawa, Ryosuke Nakanishi, Di Fan, Hitoshi Sato, Kenichi Shimada, Eike F. Schwier, Koji Miyamoto, Akio Kimura, Shuji Hasegawa, and Shinji Kuroda, session 7, NTTI 2017, Switzerland (16-21 Jul. 2017)
19. "MBE growth of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Te thin films and observation of the surface state", Y. Otaki, T. Yamaguchi, H. Itoh, R. Ishikawa, S. Kuroda, R. Nakanishi, D. Fan, R. Akiyama, S. Hasegawa, K. Miyamoto, H. Sato, A. Kimura, International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017) (May 9-13, 2017, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan,)
20. "MBE growth and control of carrier density of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Te thin films", Y. Otaki, T. Yamaguchi, H. Itoh, R. Ishikawa, R. Akiyama, S. Kuroda, New Trends in Topological Insulators 2017 (NTTI2017) (July 16-21, 2017, Switzerland)
21. "Observation of surface state of topological crystalline insulator (Pb,Sn)Te thin films", Y. Otaki, T. Yamaguchi, H. Itoh, R. Ishikawa, S. Kuroda, R. Nakanishi, D. Fan, R. Akiyama, S. Hasegawa, K. Miyamoto, H. Sato, A. Kimura, International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017) (September 10-13, 2017, Miyagi-Zao, Japan)
22. "Thin film growth of topological crystalline insulator SnTe on CdTe by molecular beam epitaxy", H. Ito, Y. Otaki, R. Ishikawa, R. Akiyama, S. Kuroda, 18th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (September 24-29, 2017, San Juan, Puerto Rico)

【今後の活動予定】

今年度、計測手段、試料作成、解析プログラムの調査と一通りの調査が終わり、移動度スペクトル法プログラムの適用範囲とその問題点に関して明らかにすることができた。今後さらに連携を深めて、引き続き強磁場計測や計算プログラムの開発などを行いたいと考えている。また今後とも本連携をきっかけにした外部予算の獲得も目指す予定である。

以上。