

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月18日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
国立大学法人千葉大学・大学院工学研究院
[職・氏名]
教授・青木伸之
[課題番号]
JPJSBP 120218805

1. 事業名 相手国: 韓国 (振興会対応機関: NRF) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 2次元物質のヘテロ接合形成による電気-磁気量子輸送現象の新展開

(英文) Electrical quantum magnetotransport with two-dimensional materials

3. 共同研究実施期間 2021年4月1日 ～ 2023年3月31日 (2年0ヶ月)【延長前】 年 月 日 ～ 年 月 日 (年 ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Sungkyunkwan University・Professor・Gil-Ho Kim

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		2,280,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,140,000 円
	2年度目執行経費	1,140,000 円
	3年度目執行経費	- 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	14名
相手国側参加者等	6名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0(0)
2年度目	0	0	1(0)
3年度目			()

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

本研究の目的は、スピン軌道相互作用が極めて小さいグラフェン(Gr)に対して、ファンデルワールス接合により高品質な遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)を積層化させることでTMDC/Grヘテロ接合を形成し、近接相互作用によってグラフェンにスピン軌道相互作用を導入する。その結果、バンドギャップ(Δ)の導入や、スピン-バレーホール効果、更にはトポロジカルエッジチャネルの発現の可能性を探り、グラフェンを用いたバレートロニクスの実現へと発展させる。その実現には、欠陥や不純物が非常に少ない超高品質なTMDC結晶でTMDC/Grヘテロ接合を六方晶窒化ホウ素(h-BN)で挟み込むことによる超高移動度化が不可欠な要素となる。Kim教授の研究室ではフラックス法によるTMDCの結晶成長を手掛けており、Kim教授から提供される世界最高品質のTMDC(WSe_2 等)結晶と、研究代表者らがこれまで培ってきたファンデルワールス接合化技術および走査ゲート顕微法によるナノスケール電気計測技術とを融合させ、高品質TMDCとグラフェンのヘテロ接合を形成することで、グラフェンにスピン軌道相互作用の導入を目指した共同研究を進めた。また、高品質のTMDC材料とh-BNとのヘテロ接合形成による新奇伝導現象や様々な派生技術についても開発を進めた。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

①TMDCの1種である単層 WSe_2 と単層Grとのヘテロ接合をh-BNで挟み込んだ構造を作製し、エッジコンタクト法にて電極を取り付けた素子を作製した。その際、電極間距離を200 nmまで接近させることでバレー間散乱の影響を極力抑え、特徴的な輸送現象の観測を目指した。 WSe_2 をGrの上側に積層した素子においては、強磁性的性質を持つ WSe_2 の端部を介したGrへのキャリア注入が生じることで、極低温において磁場の掃引に対するヒステリシス現象を示すスピンバルブ効果の観測に至った。一方で、 WSe_2 をGrの下側に積層した素子においては、グラフェンへの直接的なキャリア注入ができることで、 WSe_2 が接合していない通常の単層グラフェンにおける伝導現象との比較を行うことができるようになった。その結果、 WSe_2 を近接させることでGrにスピン軌道相互作用が導入されていることを示すゼロ磁場近傍での『負の磁気伝導度』の観測に至った。また、特定のゲート電圧範囲において明瞭なゼロバイアス異常ピークの観測にも成功した。しかし、量子スピンホール効果の検証となる $4e^2/h$ の伝導度プラトー構造の存在は確認されず、単層グラフェンに対してスピン軌道相互作用を導入してもカイラルエッジ状態は形成されないといった結論に至った。

②h-BN/3層 WSe_2 /h-BNヘテロ接合に対してスプリットゲート型の量子ポイントコンタクトを導入した構造を作製した。さらに、 p^{++} - MoS_2 結晶薄片を3層 WSe_2 の両側に取り付けることで、p型特性に対するオーミックコンタクトの実現を図った。その結果、極低温において e^2/h を単位とした伝導度プラトーを観測し、p型動作の量子ポイントコンタクトの実現に世界で初めて成功し、Nano Letters誌に共著論文が掲載された。この結果は、3層 WSe_2 における伝導経路をナノスケールまで狭めることで、3層であるにもかかわらず単層であるかのような伝導を示していること、スピン分裂を示す結果となっていることなど、新たな知見を得ることになった。

③その他にも、TMDC材料に対するエッジコンタクト技術の確立、レーザー照射による MoTe_2 -両極性動作TFETデバイスの実現、単層 MoS_2 におけるバレーホール効果の観測とゲート制御、といった研究を進めており、成果が出てきている。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

Kim教授の研究室で合成している非常に高品質なTMDC材料が使用できるようになり、研究の質と幅が広がったことが成果と言える。また実際に交流を行うことで、素子作製におけるノウハウや問題点について情報を得る

だけでなく、こちらからも結果の解釈や改善方法についてアドバイスを送るといった協力を通じて、互いに研究スキルを向上させ、成果につなげることができたと考えている。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

本研究の中では、極低消費電力デバイスとして期待されるバレートロンクスの実現に向けた MoS_2 おけるバレーホール効果のゲート制御の研究や、10年度のデバイス技術として期待される相補型電界効果トランジスタ(CFET)構造や室温での高速応答が期待されるトンネル型電界効果トランジスタ(TFET)構造の作製も進めてきた。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

今回の実施期間はちょうど COVID19 の期間と重なり、両国間の行き来が制限された状態にあったことから、研究参加者の安全的な配慮からも渡航を控えることにしたが、その代わりオンラインでのミーティングを行うことで、それを補った。大学院生を中心に、オンラインにて英語で相互に発表を行うことで、英語による研究報告のみならずコミュニケーション能力も身につけてきたと実感している。また、渡航による交流では実際に渡航に参加した者しか成果が得られないが、オンラインでの交流の場合は参加した大学院生や若手教員といった発表者以外にとっても英語に接して短期間に理解する訓練として成果があったと感じている。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

今年に出すかは未確定ではあるものの、今後は科研費・国際共同研究事業への応募も視野に入れて検討している。また、今回の共同研究内容を含んだ共著論文1報を現在投稿中であり、今後も引き続き成果をまとめて論文投稿を行っていく予定でいる。2次元物質の研究は未解決な問題や新たな発見が続いており、相互に訪問しながら情報交換を継続していくことが不可欠である。その先には新しい量子効果デバイスの実現に向けた共同研究へと発展する可能性を秘めていると期待している。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

研究参加者の横井和史(M2)が LT29 にて発表したポスター(上記①の成果)が、Best Poster Award を受賞した。