

高移動度グラフェンにおける希ガス吸着による スピンホール効果実現

所属： 兵庫医科大学 物理学教室

助成対象者： 寺澤 大樹

共同研究者： 大阪大学産業科学研究所 松本 和彦，大岩 顕，金井 康

概要

本研究は、グラフェンを用いたトポロジカル量子コンピューティングの鍵となるスピンホール効果を実現するため、移動度の低下を招くことなくスピン軌道相互作用を導入する方法を検討する。その方法として、高移動度架橋構造グラフェンデバイスを作製し、質量の大きな希ガスをグラフェン表面に吸着させてポテンシャル変調を加え、スピン軌道相互作用を起こすことを計画し、実験を行った。試料作製後、低温で弱い磁場を掛けたとき、希ガスの吸着によって伝導度がどのように変化するか調べる実験を行う予定であったが、実験設備の変更の都合により、予定が大幅に遅れてしまった。グラフェンのスピンホール効果の実現できれば、トポロジカル量子コンピュータ実現の可能性が高まり、基礎・応用両面にとって大きな成果につながる。

abstract

This study aims at implementing a graphene device that can realize spin Hall effect: a key phenomenon for topological quantum computing in graphene. To this end, it is necessary to induce spin-orbit interaction without deteriorating the mobility of graphene. We plan a method that uses noble gas adsorption on the surface of high-mobility suspended graphene devices. After fabricating devices, we planned the conductance measurement, however, an unscheduled change delayed the plan.

研究内容

背景と目的

現在、量子コンピュータの実現に向けて、精力的な研究が行われている。特に最近では、固体中に現れるトポロジカルに安定で、非可換な統計性に従う準粒子(non-Abelian 準粒子)を用いたトポロジカル量子コンピューティングの研究が盛んに進められている[1]。代表的な non-Abelian 準粒子としては、超伝導の p 波ペアリングクーパー対[2]、ランダウ準位占有率 $\nu = 5/2$ の量子ホール状態における Pfaffian 状態 (p 波ペアリング) と半渦励起準粒子[3]、スピン軌道相互作用の強い 1 次元系と超伝導近接効果を組み合わせて誘起するマヨラナフェルミオン[4]などが挙げられる。それらの中でグラフェンを用いた提案では、グラフェンスピンホール効果において現れるヘリカルなエッジ流と超伝導近接効果の組み合わせによりマヨラナフェルミオンを導入する方法が検討されている[5]。しかしながら、グラフェンにおけるスピン軌道相互作用は非常に弱く、この提案を実現する大きな障害となっている。

これまで、グラフェンに強いスピン軌道相互作用を導入する方法はいろいろと提案され、実験的にも実現されてきた。例えば、グラフェンに水素を化学結合させて sp^2 軌道を sp^3 軌道に変える方法[6]や、 WS_2 などの遷移金属ダイカルコゲナイド上にグラフェンを載せる方法[7]などである。これらの方法によって、確かにスピン軌道相互作用は大きくなるが、同時に移動度の低下を招き、位相コヒーレンスの低下を引き起こすという問題が生じてしまう。したがって、高移動度を保ったまま、強いスピン軌道相互作用を導入する方法が望ましい。

そこで、私は高い移動度を保ったままスピン軌道相互作用を導入する方法を検討したい。私はこれまで、グラフェンにおける量子干渉効果の実験[8], [9]や、グラフェン表面への希ガス(ヘリウム)吸着による伝導度への影響を調べる実験[10]を行ってきた。ヘリウムやアルゴン、クリプトンなどの希ガスがグラファイト上に吸着されると、整合格子を組んで安定に存在することはこれまで知られていた[11]が、グラフェン上に吸着された場合に伝導度特性にどのような影響を及ぼすかは分かっていない。我々の実験では、移動度の低下を招くような効果は見られないことが確認された。しかしながら、ヘリウム原子が軽すぎるためか、重元素によるポテンシャル変化によって引き起こされることが多いスピン軌道相互作用は確認できなかった。さらに、使用したグラフェン自体の移動度もそもそも小さかったため、吸着効果が打ち消されてしまっていた可能性が否定で

きない。そこで、移動度の高い架橋構造グラフェンを作製し、そこにヘリウムより重いアルゴンやクリプトン、キセノンなどの希ガスを吸着させ、移動度の低下を引き起こすことなくスピン軌道相互作用を起こすことを計画している。

結果

本研究に使用するグラフェン試料は、大阪大学産業科学研究所（阪大産研）において作製した。まず、グラファイトをテープによって剥離し、Si 基板上に成長した酸化膜 (SiO_2) 上に転写し[12]、適当な大きさを持った 1 層または 2 層グラフェンを探す。それに電子線リソグラフィによって電極を蒸着し、オーミック接触させることでグラフェンの伝導度を測定することができる。さらに架橋構造にするためにはウェットエッチングし、グラフェンの下の部分を除去する（図 1 参照）。このようにしてデバイス化した試料は、ラマン分光法を用いて層数を確認した後、本格的に伝導度測定を行った。

伝導度の測定は、兵庫医科大学において、作製済みだった試料セルに試料を設置して行った。このセルは無冷媒 Gifford・McMahon (GM) 冷凍機によって 4 K 付近まで冷却でき、以前にも弱局在現象などの量子干渉効果の測定に使用した実績がある。最初に希ガスをセル中に入れて温度を冷やし、架橋構造試料とゲート電極間の間隙中の希ガスが気体→液体→固体と相転移することで変化する静電容量を測定することを目指した。希ガスはアルゴンだと融点 83.80 K、沸点、87.30 K なので、液体窒素温度よりも高い温度で相転移する。温度を下げていくと確かに静電容量が変化し、一応の指標になることは確認できた（図 2 参照）。ただし、目的である試料部分の静電容量の変化だけでなく、リード線間の寄生容量なども変化に大

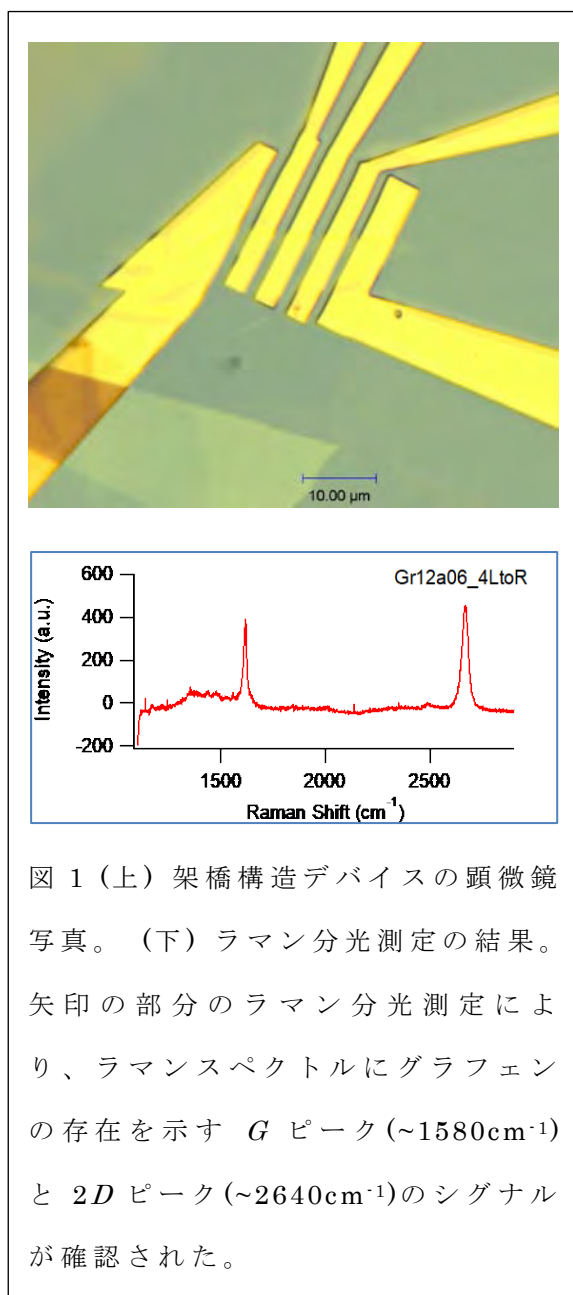


図 1 (上) 架橋構造デバイスの顕微鏡写真。(下) ラマン分光測定の結果。矢印の部分のラマン分光測定により、ラマンスペクトルにグラフェンの存在を示す G ピーク ($\sim 1580\text{cm}^{-1}$) と $2D$ ピーク ($\sim 2640\text{cm}^{-1}$) のシグナルが確認された。

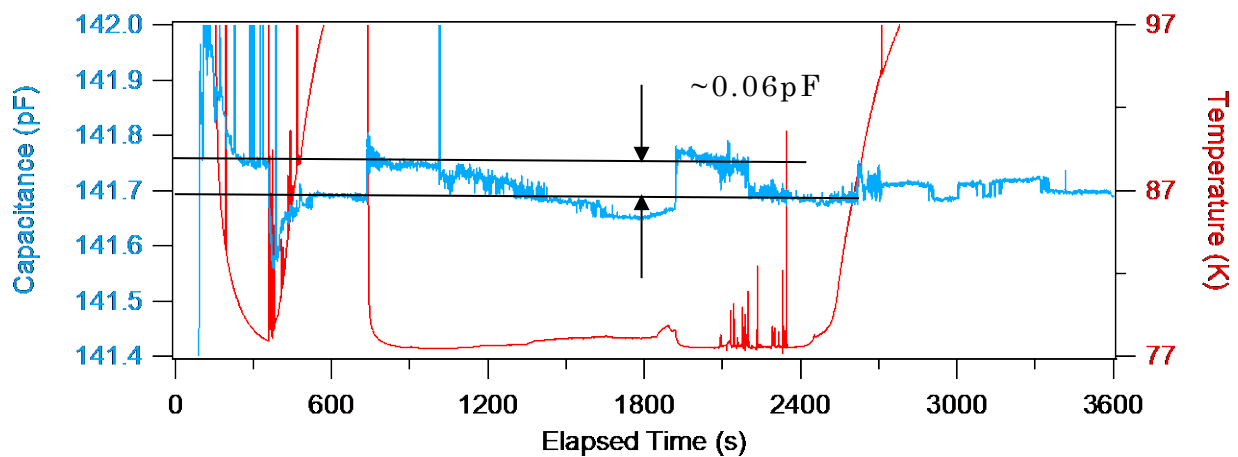


図 2 高精度キャパシタンスブリッジを用いて、アルゴンガス充填後のグラフェンとゲート電極間の静電容量を測定した結果。左軸に静電容量（Capacitance）を青で、右軸に同時に測定した温度（Temperature）を赤でプロットしており、下の軸は経過時間（Elapsed Time）である。アルゴンの沸点、融点付近で静電容量が 0.06pF ほど変化した。実際のデバイスのサイズから見積もられる静電容量の変化はこの値の 1/30 程度のはずである。また、温度との対応も再現性に疑問があるところがあり、さらなる検証が必要である。

大きく寄与しているため、この点について注意しなければならない。

グラフェンに希ガスを吸着させることで、スピン軌道相互作用が導入できたかどうかを確認する方法としては、弱局在と呼ばれる量子干渉効果を調べることにしている。この効果を測定するためには、4 K 付近まで冷却しなければならない。そこで、兵庫医科大学において 4 K 付近までさらに冷却し、この試料の伝導度特性を測定する予定であったが、兵庫医科大学での実験継続ができなくなり、伝導度測定も阪大産研で実施することになった。阪大産研における測定は、やはり GM 冷凍機によって冷却するが、もともとケルビンプローブによる伝導度測定を行うための 4 K プローバーを用いることになった（図 3 参照）。ここに希ガスを導入できるようにするため新たな試料セルを作製し、実験の継続を図った。しかしながら、セル内の温度測定を行ったところ、90 K 程度までしか冷却できなかった。弱局在現象を測定することでスピン軌道相互作用が導入できたか確認する予定であるが、この現象を測定するためには 20K ぐらいまで冷却する必要がある、確認に至らなかった。原因は、ガスを導入するための管を伝わって室温から熱が流入するためであると考えられる。4 K プローバーの真空チャンバー内でセルを設置するスペースも小さいことから、冷却が難しく、今後さらに冷却するには何らかの工夫をしなければならない。

今後の予定

今後は、4 K プローパーに設置したセルをさらに冷却できるように、クライオスタットを改良する。改良後は、試料を冷却し、重い希ガスの吸着によって、量子干渉効果が弱局在から弱反局在へと変化するかどうかを確かめる実験を進め、スピンホール効果が起こせるほど大きなスピン軌道相互作用かどうか確認する予定である。

謝辞

貴財団の本研究への支援に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- [1] Ay. Kitaev, “Fault-tolerant quantum computation by anyons,” *Ann. Phys. (N. Y.)*, vol. 303, no. 1, pp. 2–30, Jan. 2003.
- [2] D. A. Ivanov, “Non-Abelian statistics of half-quantum vortices in p-wave superconductors,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, no. 2, pp. 268–271, 2001.
- [3] G. Moore and N. Read, “Nonabelions in the fractional quantum hall effect,” *Nucl. Phys. B*, vol. 360, no. 2–3, pp. 362–396, 1991.
- [4] Y. Oreg, G. Refael, and F. von Oppen, “Helical Liquids and Majorana Bound States in Quantum Wires,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, no. 17, p. 177002, Oct. 2010.
- [5] P. San-Jose, J. L. Lado, R. Aguado, F. Guinea, and J. Fernández-Rossier, “Majorana Zero Modes in Graphene,” *Phys. Rev. X*, vol. 5, no. 4, p. 041042, Dec. 2015.
- [6] M. Gmitra, D. Kochan, and J. Fabian, “Spin-orbit coupling in hydrogenated graphene,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, no. 24, pp. 1–5, 2013.
- [7] Z. Wang *et al.*, “Origin and Magnitude of ‘Designer’ Spin-Orbit Interaction in Graphene

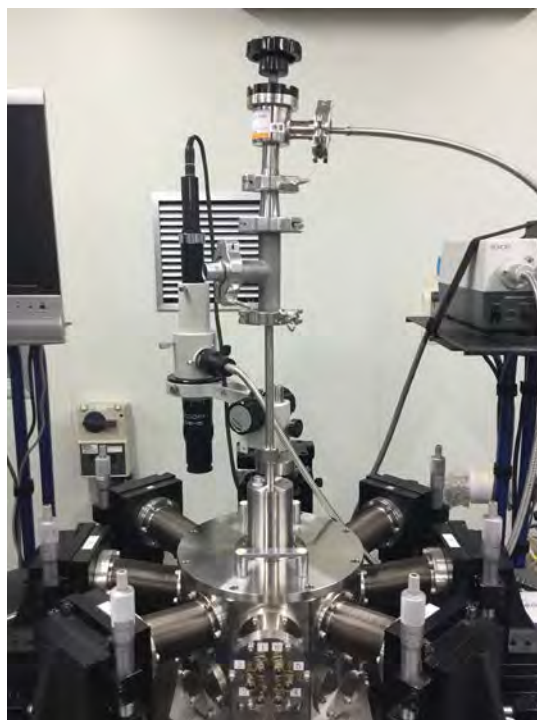


図3 4 K プローパーにガスを導入できるように試料セルを設置した様子を撮影した写真。断熱のためにセラミックスの絶縁体を挟むなど工夫したが、所期の温度まで冷却できなかった。

on Semiconducting Transition Metal Dichalcogenides,” *Phys. Rev. X*, vol. 6, no. 4, p. 041020, Oct. 2016.

- [8] D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Ohno, Y. Kanai, and K. Matsumoto, “Relationship between conductance fluctuation and weak localization in graphene,” *Phys. Rev. B*, vol. 95, no. 12, p. 125427, Mar. 2017.
- [9] D. Terasawa, A. Fukuda, A. Fujimoto, Y. Ohno, and K. Matsumoto, “Temperature dependence of universal conductance fluctuation due to development of weak localization in graphene,” *Solid State Commun.*, vol. 267, pp. 14–17, Nov. 2017.
- [10] A. Fukuda, D. Terasawa, A. Fujimoto, Y. Kanai, and K. Matsumoto, “Magnetotransport of Monolayer Graphene with Inert Gas Adsorption in the Quantum Hall Regime,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 969, p. 012130, Mar. 2018.
- [11] Z. Wang, J. Wei, P. Morse, J. G. Dash, O. E. Vilches, and D. H. Cobden, “Phase Transitions of Adsorbed Atoms on the Surface of a Carbon Nanotube,” *Science*, vol. 327, no. 5965, pp. 552–555, 2010.
- [12] K. S. Novoselov *et al.*, “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films,” *Science*, vol. 306, pp. 666–669, 2004.

本助成に関わる成果物

[論文発表]

該当なし

[口頭発表]

該当なし

[ポスター発表]

「架橋構造グラフェンを用いた希ガスセンシング」

寺澤大樹、福田昭、藤元章、金井康、松本和彦、大岩顕

日本物理学会第74回年次大会 2019年3月17日 九州大学伊都キャンパス 福岡市

[その他]

該当なし