

凹凸のある SiO₂ 基板上グラフェンの磁気抵抗

Magnetoresistance of graphene on undulated SiO₂ substrates

2011 年度入学 物理学専攻 相馬 孝史

11N2100016B

1. はじめに

グラフェンは、炭素原子が六角格子構造をとっている 1 枚のシート状の 2 次元物質である。層内は 結合により強く結合しており、残る 電子が電気伝導に寄与する。伝導帯と価電子帯が 1 点（ディラックポイント）で接している特異なバンド構造をしているため、グラフェン中の電子はディラックフェルミオンとなり、通常の量子ホール効果と異なる半整数量子ホール効果が観測される。また 2 層グラフェンではバンド構造が異なり、電子は有効質量をもつため観測されるのは整数量子ホール効果である。グラフェン表面にはリップルと呼ばれる凹凸が存在するため平行に磁場を印加すると、リップルにより原子面に対して垂直磁場成分が生じる。その大きさは局所的な勾配の大きさによるため原子面に対しランダム磁場が形成され、これによりランダム磁場中のディラックフェルミオン系を形成する。実験的に、ランダム磁場中のグラフェンの輸送特性については通常の二次元電子系と似た振る舞いが現れることが報告されている [1][2]。しかし理論と実験において定量的には違いが生じている。この要因として、測定した磁気抵抗に、弱局在とランダムな垂直磁場成分に起因する負磁気抵抗が混在していることがあげられる。負磁気抵抗は 2 次元系特有の現象であり、電子波の干渉効果によるものである。

本研究では、平行磁場中のグラフェンの磁気抵抗の定量的な解決を目指し、スケールの違うランダム磁場中での磁気抵抗を調べることを目的として、新たな試料を作製して測定を行った。方法として、SiO₂ 基板に円形の凹みをランダムに配置してグラフェンを貼り付けた。平行磁場を印加すると、凹みで傾いた面に磁場の垂直成分が発生しランダムな磁場分布が形成される (図 2)。しかし測定した結果、2 層であると判断したため今回は負磁気抵抗に注目した。

2. 測定試料

粘着テープを用いて KISH グラファイトから 2 層グラフェンを剥離し、凹凸を作製しておいた基板に載せた。今回の試料には、円の直径 0.41 μm 、深さ 21nm、占有面積 47.3 % のランダムパターンを用いた (図 1)。電極は電子線リソグラフィー、真空蒸着によって作製した。作製した試料は図 4 に示すように、2 層グラフェンと n 型に濃くドーパされた Si 層で絶縁体である酸化膜を挟んだコンデンサ構造をしている。そのため Si 層にゲート電圧 V_g を印加することによって試料のキャリア濃度を変化させることができる。これにより、キャリアが電子とホールそれぞれの状態について輸送特性を測定することができる。

図 3 は今回測定した試料を光学顕微鏡で観察した様子である。幅 $W=8.3 \mu\text{m}$ 、長さ $L=9.5 \mu\text{m}$ の 2 層グラフェン試料をもちいて磁気抵抗測定をした。量子ホール効果の観測 (図 6) より、2 層グラフェンであることを確認している。

測定は 100nA での交流定電流測定、温度 $T=2\text{K}$ 、ゲート電圧 $V_g=-40 \sim 100\text{V}$ まで印加して測定した。

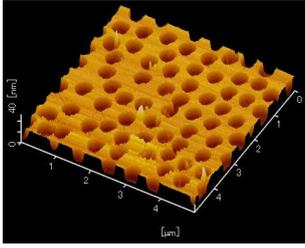


図 1: 作製した凹凸の原子間力顕微鏡による観察

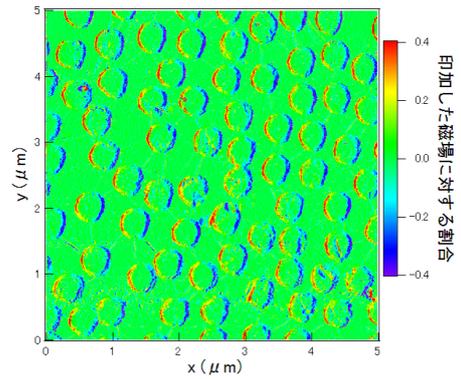


図 2: x 方向に平行磁場を印加したときの垂直磁場分布

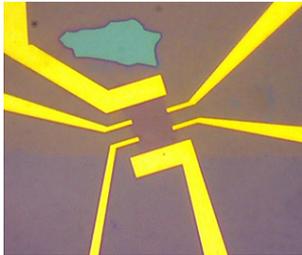


図 3: 測定試料

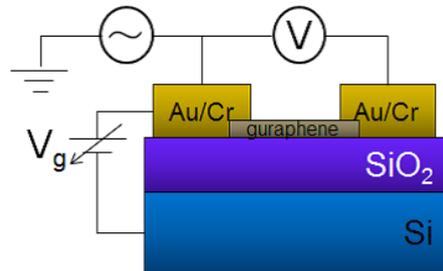


図 4: 試料断面図

3. 実験及び実験結果

図 5 はゼロ磁場でのゲート電圧依存性である． $V_g=4.6\text{V}$ と 33.2V 付近でのダブルピークが観測された．これはエッチングを行った部分とそれ以外の部分での不純物ポテンシャルに違いがあるためと考えられる．グラフェンの電荷中性点は理論的には $V_g=0\text{V}$ にあるが，クリーンな試料ではなく不純物ポテンシャルにより中性点がずれたためである．また，図中の黒丸は磁気抵抗の測定に用いたゲート電圧のポイントである．

試料に対して垂直に磁場を印加してゲート電圧依存性を測定した．完全ではないが電気伝導率 σ の値がプラトーになりかけているのが図 6 からわかる．この値は 2 層グラフェンの整数量子ホール効果， $\sigma = 4Ne^2/h$ (N は整数) の $N = 1$ に対応する．このことから，今回測定した試料は 2 層グラフェンであると判断した．

平行磁場中の測定において，ランダムな垂直磁場成分に起因すると思われる負磁気抵抗を観測した (図 7)．これと垂直磁場中での負磁気抵抗の測定結果 (図 8) をもちいて解析を行った．

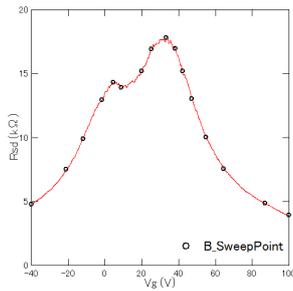


図 5: 0 磁場の抵抗のゲート電圧依存性

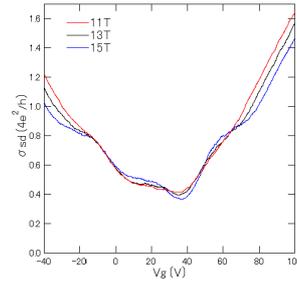


図 6: 高磁場中での電気伝導率のゲート電圧依存性

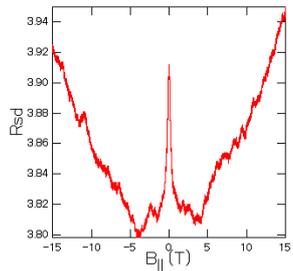


図 7: $V_g=100V$ での平行磁場依存性

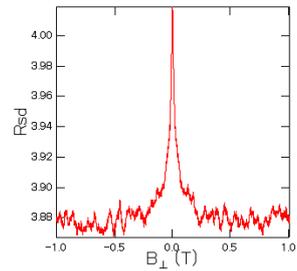


図 8: $V_g=100V$ での垂直磁場依存性

4. 解析及び考察

平行磁場中での測定結果を、垂直磁場中で観測されている負磁気抵抗と同じスケールでフィッティングを試みた。例としてゲート電圧 $V_g=33.2V$ (電荷中性点), $100V$ (高濃度電子領域) における平行磁場と垂直磁場のスケールフィットの図を示す。

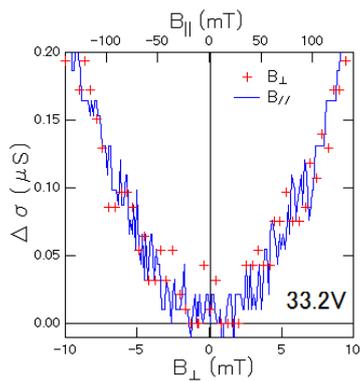


図 9: $V_g=33.2V$ でのフィッティング

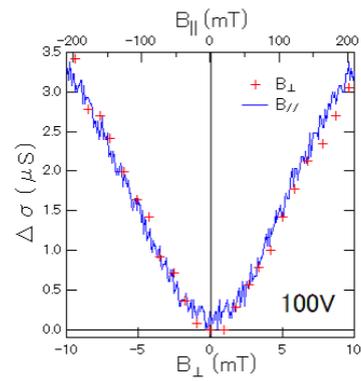


図 10: $V_g=100V$ でのフィッティング

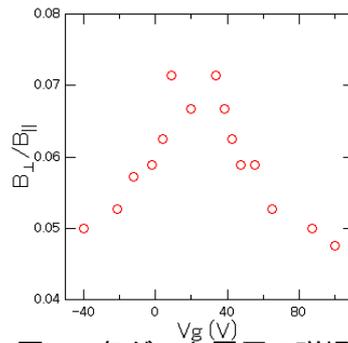


図 11: 各ゲート電圧の磁場比

各ゲート電圧における比を平均すると平行磁場を 1T 印加したときに同じ負磁気抵抗を引き起こすのに必要な垂直磁場の大きさは 0.06T である．しかし今回の試料から計算された垂直磁場成分の実効値は平行磁場 1T のとき約 0.11T であった．つまり負磁気抵抗の原因である電子の局在が，より大きな磁場を印加しなければとけないことを意味している．負磁気抵抗が生じるのは，磁場の影響により局在している電子波の干渉効果がとかれるからである．符号が一樣な磁場中で経路と逆回りの電子は常に逆向きのローレンツ力を受けるため干渉効果が減少しやすい．しかし符号のランダムな磁場中の電子はローレンツ力の強さ，符号がともに変化するため，経路を外れた電子波がまた戻ってくる確率が存在するので干渉効果が残りやすい．そのため計算した実効値よりも大きな磁場を印加しなければならない．

これまでの平行磁場中の単層グラフェンの磁気抵抗測定でも同様の結果が報告されている [2]．しかし測定条件のような低温下ではリップル形状が変化することが考えられるため，原因がランダム磁場によるものなのか，リップル形状の変化によるものなのかを判断できなかった．今回測定した系ではグラフェン本来のリップルによる凹凸に比べ基板の凹凸のほうがはるかに大きい．低温条件での凹凸形状の変化の影響は十分に小さいとみなすことができる．その結果，平行磁場中の負磁気抵抗の大きさと垂直磁場中の負磁気抵抗の大きさの関係に初めて整合性のある結果が得られたと考えられる．

まとめ

リップルによる相関長よりも大きな相関長をもつ 2 層グラフェンの系を作製し，測定を行った．

今回の実験では，平行磁場中と垂直磁場中の負磁気抵抗の大きさについて，整合性のある結果が単層グラフェン，2 層グラフェンを通してはじめて得られた．

しかし，比の大きさについてはランダム磁場中の負磁気抵抗の理論がないのでこれ以上の議論は難しい．さらに今回のランダム磁場の分布は特殊なため，実効値が普通の意味のランダム磁場の実効値とは対応しないと思われる．よって今後，別のランダム磁場分布で確かめなければならず，よりグラフェンのリップルに近い形状の相関長の異なる系を測定することで明らかになると考えられる．

参考文献

[1]M.B.Lundberg and J.A.Folk:Phys.Rev.Lett.105,(2010)146804.

[2]J.Wakabayashi and T.Sano:Proc. 19th Int. Conf. Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (Hukuoka Japan, Aug. 2010), J.Phys. : Conf. Ser. 334,(2011)012039.