

論文の内容の要旨

論文題目 グラフェン量子輸送現象の電子光学的制御

氏名 森川 生

超高移動度を示す二次元電子系においては、キャリアがバリステック(直進しながら)かつコヒーレント(位相を保って)に伝搬し、電子の流れをあたかも光波の流れのように捉えることができる。このことは、電子波の屈折や干渉などをあたかも光波を操るように制御できることを意味し、この概念を利用した、いわゆる電子光学("Electron optics")と呼ばれるフィールドでは、電子系におけるレンズや干渉計など「光学デバイス」の実現が報告されてきた。本博士研究では、この概念をグラフェンに応用することを大きな目的に掲げた。

グラフェンにおける電子光学は、通常の半導体二次元電子系におけるそれよりも、遥かに広範な可能性を有する領域として注目を集めている。なぜなら、グラフェンは Dirac 電子系特有のギャップレスかつ線形という特異なバンド構造を有し、pn 界面において、負の屈折現象や Klein tunneling などグラフェン特有の電子にとっての「光学的」な性質を示すことが知られているからだ。このような特異な性質を電子光学のコンセプトを利用して操ることにより、Veselago lensing や Cloaking など通常の光学の領域においても実現が難しい現象や機能の観測が可能になりうると、理論的に予測されている。

一方で、筆者が研究を始めた 2012 年当初においては、グラフェンにおける量子輸送現象の実験は SiO₂ 基板を用いた低移動度試料によるものが主流であり、電子光学を実験的に実現するには、以下に挙げるような基礎的な技術や知見が不足していた。

- 高移動度試料の作製とそれに伴うバリステックおよびコヒーレントな伝導の実現
- 電子波制御を行うためのナノ構造(pn 接合、局所ポテンシャル変調、エッジチャネル配

置等)の作製

○ 屈折・反射・干渉・回折など基本的な「光学」機能のデモンストレーション

本博士研究において、筆者は主にこの三点の整備に重点的に取り組み、グラフェン量子輸送の領域においても電子光学が実現しうることを、次に示すいくつかの実験によって実証することに成功した。理論面での提案が先行していた本領域において、実験的なアプローチでこのフィールドの実現可能性を示したことを意味し、今後、“Dirac fermion optics”と呼ぶべきこの新概念を用いた物性開拓やデバイス応用に向けて、重要な一歩となる研究成果である。

I. バリステックおよびコヒーレントな伝導の観測

電子光学を実現するには、キャリア伝導形態がバリステックもしくはコヒーレントである必要があるが、従来使われていた SiO₂ 基板上のグラフェンでは、SiO₂ 由来のキャリア散乱がグラフェンの移動度を抑制し、キャリアの進行方向や位相の情報がすぐに失われてしまう拡散的な伝導が実現していた。そこで、Columbia 大学のグループが提案した、h-BN を基板として用いる構造を利用し、バリステック伝導を実現することにまず取り組んだ。その後、h-BN を top gate の絶縁膜としても用いることで、局所的なキャリア変調を行い、高品質な npn 接合の実現に成功した。pn 界面をハーフミラーと見なせる電子波の Fabry-Perot 干渉も観測されており、h-BN をゲート絶縁膜として用いたことにより、接合部の cavity 長が約 500 nm と従来報告されていた値よりも一桁以上長い、巨視的なコヒーレント伝導が実現した npn 接合を世界で初めて実現した(S. Masubuchi, S. Morikawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 110105 (2013))。

II. Zigzag npn 接合における屈折や透過を用いた抵抗制御

キャリア密度の異なる界面においては、バリステックなキャリアは光波同様に「スネルの法則」にしたがった屈折現象を示す。この屈折現象を利用した量子伝導制御を実現するために、zigzag 型の npn 接合を作製し、p 型領域のキャリア密度増大に伴う、抵抗値の増大の観測に成功した(S. Morikawa *et al.*, submitted)。

p 型領域のキャリア密度が増大すると、この領域の電子波の周波数が増大するために、最初の界面での屈折角がゼロに近づく。このことは全ての入射角からの電子が垂直出射にコリメートされることを意味する。この電子波たちが二つ目の傾斜を持った界面に入射すると、今度は全反射臨界角がゼロに近いことから、全ての電子波が全反射を起こす。これにより、電子の接合透過率が著しく抑制されるために抵抗が増大すると説明できる。また、仏の理論グループと共同研究を行い、実験結果と計算結果の定性的な一致も確認している。グラフェンは、ギャップレスなバンド構造に起因して、電気伝導率を抑制する状態を、特に高移動度高キャリア密度を保ちながら実現することは難しいが、Dirac fermion optics という新概念を利用することにより、この実現可能性を示唆した重要な結果と言える。

また、Klein tunneling に起因して zigzag 接合と flat 接合間で磁気抵抗の符号が変化することも観測しており(S. Morikawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 100305 (2016))、前述のゼロ磁場下での結果と合わせて、接合の形を変化させることでバリスティックなキャリアの軌道制御が可能であることを明らかにした。

III. 局所ポテンシャル変調を用いた電子軌道反射

II においてキャリア密度の異なる領域で電子波が制御可能なことを示したが、これをよりナノスケールに制御するために、Scanning gate microscopy(SGM)という技術でグラフェン中に局所的にポテンシャル変調を加え、バリスティックキャリアの軌道を反射により局所的に制御可能な事を実証した(S. Morikawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 243102 (2015))。

この際、磁場によるローレンツ力で曲げられたバリスティックなキャリアが、電圧端子に飛び込むことで非自明な非局所電圧が生じる、電子フォーカシング効果と呼ばれる現象を利用した。SGM チップに電圧を加えながら試料表面を空間的に走査すると、チップがバリスティックなキャリアの直上に来た時のみ、明瞭に非局所抵抗が抑制される。この抑制領域をマッピングすることで、グラフェン中のサイクロトロン運動をするバリスティックなキャリアのイメージングに初めて成功した。チップのもたらすポテンシャル変調によってバリスティックキャリアが反射され、電子が電圧端子に飛び込めなくなったことを観測したことになる。また、この反射を利用することで、もともと電圧端子に飛び込むことができていなかった電子の進行方向を変化させ、逆に電圧端子に”refocus”することが可能であることも示した。ナノスケールのポテンシャル変調を用いることで、意図的にバリスティックキャリアの軌道が制御可能であることを意味する。

IV. pn 接合におけるエッジチャネル配置を用いた干渉計

I で作製した高品質なコヒーレント pn 接合に対して強磁場を加えることで、量子ホールエッジチャネル干渉計の形成が示唆される磁気抵抗の振動現象を観測した(S. Morikawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 183101 (2015))。

観測された磁気抵抗振動は、振動周期が磁場に対して単調減少であり、従来知られている SdH 振動等では説明することが不可能であったが、pn 界面を貫く co-propagating なエッジチャネルが Aharonov-Bohm 干渉計を形成していると考えたことで、振動構造が定量的に非常に良く説明できることが分かった。通常の半導体二次元電子系におけるエッジチャネル干渉計で報告されてきた、伝導度の磁場-DC バイアス依存性におけるチェッカーボード模様も明瞭に観測されており、空乏層のない pn 界面というグラフェン特有の系において、グラフェンにおいて初めてエッジチャネル干渉計の存在を示唆した実験結果と言える。今後はエッジ速度やコヒーレンス長などのグラフェンエッジ物性に迫る舞台として、基礎・応用両面から、グラフェン pn 界面という系が注目を集めると考えられる。