



キーワード：物性 I、ナノ構造物理、グラフェン、ゆらぎ、量子効果、量子デバイス

注目物質“グラフェン”における電子の分配を世界で初観測！ ～電子の波動性を利用した電子干渉デバイスの実現へ～

❖ 研究成果のポイント

- 金属と半導体の性質を持つグラフェンに形成される pn 接合において、電流ゆらぎ(ショット雑音)を精密に調査
- 量子ホール状態にある pn 接合において、グラフェンに特有の電子分配過程を初観測
- グラフェンを用いた電子干渉デバイス等の実現につながることに期待

❖ 概要

小林研介(大阪大学大学院理学研究科教授)と松尾貞茂(東京大学大学院工学系研究科助教)は、小野輝男(京都大学化学研究所教授)および塚越一仁(物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点主任研究者)らの研究グループとの共同研究により、金属と半導体の両方の性質を持つグラフェン^{注1}中に形成された pn 接合^{注2}での量子ホール状態^{注3}における電流ゆらぎ^{注4}を精密に研究し、 pn 接合によって電子が接合の左右に分配される様子(電子分配過程^{注5}: 図1左上図を参照)を、電流ゆらぎとして初めて観測することに成功しました。また、 pn 接合がない際には、異なる量子ホール状態の接合があった場合でも電子が分配されないことも同時に明らかになりました。

グラフェンは、特異な電子構造に起因する豊富な電子物性とその応用の可能性のため、非常に注目を集めている物質です。今回、グラフェンに特有の電子分配過程を実験的に検証した結果、これまでの理論が裏付けられました。このことは、グラフェンに対する理解が更に深まったことを意味し、グラフェンの将来性を広げるものです。

今後、本成果が、グラフェンの持つ様々な電子の自由度(スピン自由度やバレー自由度)に依存したユニークな pn 接合での量子ホール状態の電子分配機構の解明、 pn 接合を用いたグラフェン量子ホール状態の電子干渉素子^{注6}の実現などに役立つことが期待されます。

本研究成果は、2015年9月4日(英国時間)に「Nature Communications」のオンライン版に発表される予定です。

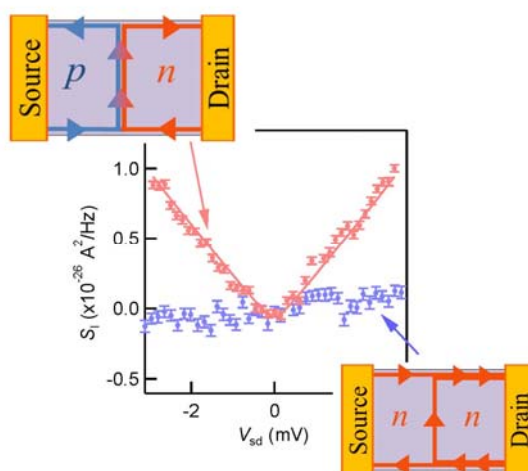


図 1: ショット雑音の測定結果。 pn 接合のある場合(赤いデータ)は電子分配過程があるためショット雑音が生じるが、 pn 接合のない場合(紫のデータ)ではショット雑音が生じない。



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



Press Release

❖ 研究の背景

pn 接合とは、半導体において極性の異なる2種類のキャリア(電子と正孔)からなる領域の間で形成される接合のことであり、ダイオードをはじめとする様々な電子デバイスで利用されています。2004年の報告以降、新規半導体材料として期待されているグラフェンにおいても pn 接合を形成することができますが、グラフェンの場合には、その特異な電子構造を反映した特色ある pn 接合となることが知られており、その電子輸送の研究がこれまで盛んに行われてきました。特にグラフェンでは、強い磁場中におくことによって、これまで実現が困難であった量子ホール状態にある pn 接合の研究が可能となります。

これまでの伝導度測定の結果、量子ホール状態にあるグラフェン pn 接合では、量子ホール状態が完全に混じりあう結果、接合の両側への電子の分配過程の存在が推察されていました。しかし、この電子分配過程を直接的に実証した報告はありませんでした。

❖ 研究成果

本研究チームは、グラフェン pn 接合における電子の分配の様子の直接観察とその機構の解明のため、電流ゆらぎ(ショット雑音)測定を行いました。ショット雑音とは、電流の実体が、素電荷($e = 1.602 \times 10^{-19}$ クーロン)を持つ電子という単位により構成されているために起こる電流のゆらぎ(雑音)のことです。量子ホール状態では、電流は一方向にのみしか流れることを許されず、ゆらぐことができないためにショット雑音は観測されません。このことは、すでにガリウムヒ素(GaAs)系等の半導体素子において、すでに知られていました。しかし、量子ホール状態にあるグラフェン pn 接合では、接合において量子ホール状態が完全に混合する結果、電子が接合を確率的に通過するという電子分配過程が生じるため、電流にゆらぎ(ショット雑音)が発生することが期待されます。ここに述べた、量子ホール状態混合によるショット雑音の発生は、2008年に理論的な予想がなされていました。

本研究では、ゲート電極を組み合わせることで pn 接合を形成可能なグラフェン試料を作製し、低温強磁場下において高精度な電流ゆらぎ測定を行いました。その結果、図1に示すように、量子ホール状態で pn 接合のある場合にはショット雑音が発生するのに対し、 pn 接合のない場合にはショット雑音が発生しないことを明らかにしました。また、観測されたショット雑音の大きさが、理論予想とほぼ一致することも実証しました。これらの結果は、量子ホール状態にある pn 接合が電子を分配するということが世界で初めて直接的に示した成果であり、グラフェン pn 接合で起こる電子分配の微視的特性を初めて定量的に確立した成果です。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

本研究は、量子ホール状態にあるグラフェンにおいて pn 接合が電子分配機構を持つことを初めて直接的に実証しました。この結果は、ギャップのないグラフェンでは実現困難な量子ポイントコンタクトに代わる電子分配機構として pn 接合が利用可能であることを示しており、グラフェンを用いた電子干渉デバイス等の実現につながることを期待されます。また、高移動度のグラフェンでは pn 接合でのキャリアの振る舞いがスピン自由度やバレー自由度に依存することが報告されており、これらの特性の解明と制御へと発展していくことが期待されます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2015年9月4日(英国時間)に「Nature Communications」に発表されます。

タイトル : “Edge Mixing Dynamics in Graphene p-n Junctions in the Quantum Hall Regime”

著者名 : Sadashige Matsuo, Shunpei Takeshita, Takahiro Tanaka, Shu Nakaharai, Kazuhito Tsukagoshi, Takahiro Moriyama, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi

なお、本研究成果と密接に関連する成果が、NTT とフランスの合同チームから、同時に「Nature Communications」に発表されます。本研究チームとは完全に独立に行われた研究ですが、我が国の2つの研究チームから、世界初の研究成果が同時に発表されることは特筆すべきことです。

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(S) (No.26220711)、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「ゆらぎと構造」(No.25103003)および「原子層科学」(No.25107004)の補助を受けて行われました。

❖ 用語の説明

注1) グラフェン

炭素の層状構造を持つグラファイトから原子層一層だけを取り出した二次元的な物質を指す。2004年に初めて実現された。グラフェンを初めて実現した Geim と Novoselov は 2010 年にノーベル賞を受賞している。

注2) pn 接合

半導体中で p 型の領域と n 型の領域が接する部分を指す。グラフェンはゲート電圧によって、キャリアを、電子にも、正孔にもできるので、 pn 接合を形成できる。本研究では、さらに強磁場を印加して、量子ホール状態にある pn 接合の振る舞いを研究した。

注3) 量子ホール状態

二次元電子(正孔)系に対し垂直に強い磁場を印加すると、電子の軌道運動が量子化され、系のホール伝導度が離散化された普遍的な値をとるようになる。これを量子ホール効果と呼び、そのような現象を示す電子(正孔)系を量子ホール状態と呼ぶ。

注4) 電流ゆらぎ

試料で発生する電流の時間的なゆらぎ(雑音)のことを指す。電流ゆらぎは、主に熱的なゆらぎに起因する熱雑音と電子の分配過程に起因するショット雑音からなる。本研究では、ショット雑音に注目した。通常の測定では、電流の時間的なゆらぎを高速フーリエ変換によって電流雑音スペクトル密度に変換して評価する。

注5) 電子分配過程

pn 接合において、電子が「接合を通過する」場合と「接合に反射される」場合の二つの過程が起こる結果、電子が接合の両側に分けられることを指す。ショット雑音は、電子分配過程によって引き起こされる。

注6) 電子干渉素子

波はお互いに強め合ったり弱め合ったりする効果(干渉効果)を示す。光の持つ波としての性質を利用した様々な実験・測定装置を干渉計と呼ぶ。量子力学の世界では、電子も波として振る舞う。電子の波としての性質を利用する素子のことを量子干渉素子と呼ぶ。