

報道機関 各位

東北大学大学院理学研究科
東北大学先端スピントロニクス研究開発センター

数百ナノメートルの半導体量子構造で偶数分母の 分数量子状態を発見

—通常の高移動度系を用いて世界ではじめて偶数分母状態を実現—

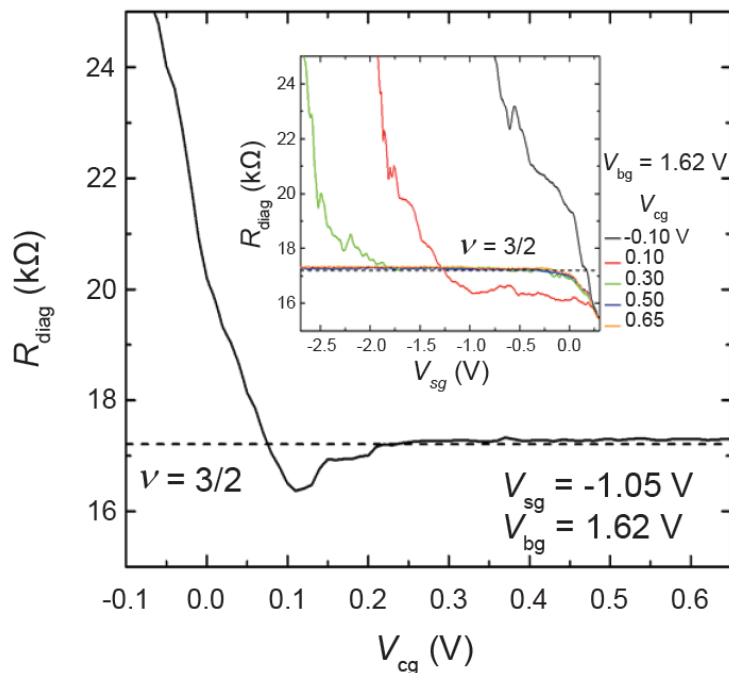
【発表のポイント】

- 半導体量子構造の代表例である量子ポイントコンタクト（以下、QPC）^(注1)において、センターゲート付き QPC を用いた場合、中央部分の400nm×600nmの領域に、エラーに強い量子操作^(注2)への期待が持てる偶数分母状態^(注3)（3/2状態）が出現することを発見した。
- これまでの偶数分母状態の研究は移動度^(注4)が $10^7\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える超高移動度 GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を用いたものに限られていた。今回、移動度が $10^6\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度の通常の高移動度 GaAs/AlGaAs ヘテロ構造上に作製した量子構造で3/2状態が観測できることを世界で最初に確認し、これまでの常識を覆した。（図）
- 通常の高移動度半導体の数百ナノメートル領域で偶数分母状態が実現されたことで、偶数分母状態を用いたエラーに強い量子操作の研究が加速されることが期待される。

【概要】

強相関電子系を理解する鍵となる分数量子ホール効果では、移動度が $10^7\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える超高移動度 GaAs/AlGaAs ヘテロ構造での偶数分母状態のみが知られていました。東北大学先端スピントロニクス研究開発センターの平山祥郎総長特命教授、東北大学大学院理学研究科の橋本克之助教、柴田尚和教授らのグループは、典型的な半導体量子構造である QPC においてセンターゲートを有する構造を用いることで、通常の高移動度（ $10^6\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度）GaAs/AlGaAs ヘテロ構造上での特別な偶数分母状態（3/2状態）が QPC の中央付近に実現できることを世界に先駆けて確認しました。この研究成果により、特別に高度な MBE 装置^(注5)を必要とする超高移動度のヘテロ構造を用いなくても、通常のある程度整備された MBE 装置で成長できる高移動度半導体量子構造でもエラーに強い量子操作の研究が加速されることが期待されます。

なお、研究成果は *Applied Physics Express* のオンライン版に2022年1月31日（英国時間）に掲載されました。



図：磁場 6 T、温度 100mK で測定した量子ポイントコンタクト (QPC) の伝導特性。挿入図はバックゲートバイアス (V_{bg}) を 1.62V にすることで、QPC 周囲の領域を $5/3$ 分数状態に設定し、センターゲートバイアス (V_{cg}) をパラメータにしたときの QPC の対角抵抗値 (R_{diag}) のスプリットゲートバイアス (V_{sg}) 依存性を示しており、中央の図は $V_{sg} = -1.05V$ のときの、 V_{cg} による R_{diag} の変化を示している。 V_{cg} のバイアスを増加させ QPC の中央部に電子を供給すると、通常予想されるように R_{diag} の減少が見られるが、 V_{cg} を 0.1V 以上にすると予想に反して R_{diag} は増大し、 $3/2$ 状態に対応する $17.2 \text{ k}\Omega$ に収束することがわかる。

【背景】

分数量子ホール効果^(注6)は、電子間の相互作用を反映した物理現象としてノーベル物理学賞の対象にもなりましたが、超高移動度の GaAs/AlGaAs 系においては、通常の分数量子ホール状態と異なる偶数分母の分数量子ホール状態 (例えば $5/2$ 状態) が発見されています。この偶数分母状態は、その特別な特性からエラーに強い量子操作に応用できる可能性が示唆され、欧米で研究が活発化しています。量子操作にはミクロスコピックな量子構造を用いる必要がありますが、最近、 $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える超高移動度の電子系で $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ の構造を実現し、周囲を $5/3$ の分数状態にすると、このミクロスコピックな領域に $3/2$ 状態 (対角抵抗 R_{diag} が $17.2 \text{ k}\Omega$ になる状態) が現れることが確認され、新たな着目を集めています。

一方、半導体量子構造の中核を担う、数百ナノメートル以下の量子構造でこの振る舞いが出現するかどうかは不明でした。さらに、このような量子構造を有さ

ない通常の系では偶数分母状態の発現には超高移動度が必要と考えられていましたが、こうした量子構造で偶数分母状態を実現させるためにどこまで超高移動度が必要かについても分かっていませんでした。

【研究手法と成果】

本研究では、バックゲートで電子密度を正確に制御できる高移動度（超高移動度ではない）の GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の上に図 1 に示したセンターゲートを有する QPC を作製しました。このヘテロ構造の低温での電子移動度は電子密度が $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ のときに $1.47 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ です。作製した QPC の長さ L は 400nm、幅 W は 600nm で、中央に 200nm 幅のセンターゲートを配置しています。

ヘテロ構造の電子系に垂直に 7 T の磁場 B を加えて、バックゲートに 2.18 V ($V_{bg} = 2.18 \text{ V}$) を加えると、QPC の両側の広い部分が $5/3$ の分数量子ホール状態になります。この様子は、図 2 の挿入図で $5/3$ に相当する R_{xy} で量子化プラトーが現れることで確認できます。ここで、両側のスプリットゲートに同じ V_{sg} を印加し、その値を変化させます。 V_{sg} が十分負になるとスプリットゲート下の電子系は空乏化され、電子のチャネルは QPC の中央部の狭い領域に限定されます。これを反映して図 2 では QPC の対角抵抗 R_{diag} は $5/3$ に対応した値から増大し最終的に QPC 内のチャネルが完全に狭窄すると無限大になります。

この状態でセンターゲートに正の V_{cg} を加えると QPC の中央部の電子が供給されるため、 R_{diag} は減少し、 R_{diag} カーブは V_{sg} の負側にシフトします。図 2 で、 V_{cg} が 0.1 V までは通常予想されるこの振る舞いが確認できます。一方で、 V_{cg} が 0.2 V を超えると QPC の中央領域にさらに電子が供給されているにもかかわらず、逆に R_{diag} の増大が見られ、さらに V_{cg} を大きくすると R_{diag} は $3/2$ 状態に対応する 17.2k Ω に収束します。

同様の振る舞いは $B = 6 \text{ T}$ でも観測されます。図 3 ではこの特別な振る舞いをさらに明瞭にするために、 $V_{sg} = -1.05\text{V}$ で QPC チャネルを形成し、 V_{cg} による R_{diag} の変化を測定しています。 V_{cg} のバイアスを増加させ QPC 中央部に電子を供給するにつれ 7T のときと同様に R_{diag} は一度減少するのですが、驚くべきことに $V_{cg} > 0.1 \text{ V}$ では増大に転じ、最終的に 17.2 k Ω に収束することがわかります。これらの実験結果は QPC 中央部の 400nm \times 600nm の領域に $3/2$ 状態に対応する特別な偶数分母状態が形成されていることを明確に示しています。

今回の実験で、超高移動度のヘテロ構造を用いなくても偶数分母状態が観測された理由はまだ不明ですが、センターゲートに正の電圧を加えることで、不純物などによるポテンシャルの揺らぎが抑制される効果が影響している可能性があります。

【今後の展開】

エラーに強い量子操作につながる $5/2$ 状態などでは、ミクロスコピックな構造への閉じ込めにより状態が変化することも報告されています。今回確認した $3/2$ 状態が本当にエラーに強い量子操作につながる面白い状態なのかについての確認はこれからの研究を待たなければいけません。通常の高移動度半導体の数百ナノメートル領域で偶数分母状態である $3/2$ 状態が実現されたことで、この特別な $3/2$ 状態の物理の解明、さらには量子操作の実用化に向けた応用研究の大きな加速が期待されます。

【謝辞】

本研究に必要な高移動度 GaAs/AlGaAs ヘテロ構造は NTT 物性科学基礎研究所から支援して頂きました。また、本研究にあたっては、科研費基盤研究(B)および東北大学スピン連携ネットワーク (CSRN)、スピントロニクス国際共同大学院 (GP-Spin) の支援も受けています。

【論文情報】

雑誌名 : Applied Physics Express

論文タイトル : Even-Denominator Fractional Quantum Hall State in Conventional Triple-Gated Quantum Point Contact

著者 : Yasuaki Hayafuchi, Ryota Konno, Annisa Noorhidayati, Mohammad Hamzah Fauzi, Naokazu Shibata, Katsushi Hashimoto, Yoshiro Hirayama

DOI 番号 : 10.35848/1882-0786/ac4c35

URL : <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac4c35>

【用語説明】

(注1) 量子ポイントコンタクト

GaAs/AlGaAs などのヘテロ構造に存在する平面状の電子系を短い狭いチャンネルで接続した構造。ポイントに近い短いチャンネルで電子系が結合されており、さらに両側から細線化されたことに対応した量子化特性がゼロ磁場で観測されることから、量子ポイントコンタクト (QPC : Quantum Point Contact) と呼ばれている。今回作製した QPC もゼロ磁場で明瞭な量子化特性が観測されており、良好な QPC が作製できていることがわかる。

(注2) 量子操作

量子コンピュータなどを実現するにあたり、量子ビットを操作することを量子

操作と言う。量子コンピュータに向けた量子ビットは超伝導体や半導体のスピンを利用したもので実現されているが、量子状態は脆弱でエラーに強い量子操作は難しい。

(注3) 偶数分母状態

分数量子ホール効果^(注6)の中でも分母が偶数の分数量子ホール状態を言う。通常の分数量子ホール効果の理論では説明することができず、全く異なる統計に従う可能性が示唆されている。この場合、エラーに強い量子操作が可能になることが理論的に示され、欧米で積極的な研究が進められている。GaAs/AlGaAs ヘテロ構造で観測されるランダウレベル充填率 $\nu = 5/2$ が一番有名であるが、最近では $\nu = 3/2$ 状態の存在も注目されている。これまで偶数分母状態が報告された単一の二次元系の実験では、すべて超高移動度のヘテロ構造が使用されている。

(注4) 移動度

半導体中で電子が移動するし易さを示す指標であり、不純物が少なくポテンシャル揺らぎの小さい系ほど大きな移動度を示す。GaAs/AlGaAs ヘテロ構造中の電子系の場合、MBE 装置^(注5)を良好な状態に保ち、注意深く成長したものでは $10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える高移動度を得ることができる。特に特別な工夫を施した MBE 装置では $10^7 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度が実現されており、超高移動度という。超高移動度を実現できる研究機関は世界中で3機関程度に限定されている。

(注5) MBE 装置

分子線エピタキシ (Molecular Beam Epitaxy) 装置。高純度の GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を成長する結晶成長法として MBE 法は確立されており、MBE 装置を良好な状態に保ち、注意深く成長したものでは $10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える高移動度を得ることができる。一方で、 $10^7 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度を実現するには、特に特別な工夫を施した MBE 装置が必要で、保有する研究機関は限られる。

(注6) 分数量子ホール効果

1998年に Laughlin、Störmer、Tsui がノーベル物理学賞を受賞した成果で、1985年にノーベル物理学賞を受賞した von Klitzing の整数量子ホール効果に対して、電子相関に基づく分数量子状態の量子ホール効果が出現したものである。ただし、Laughlin らの理論により説明される通常の分数量子ホール効果は奇数分母に限られる。

【参考図】

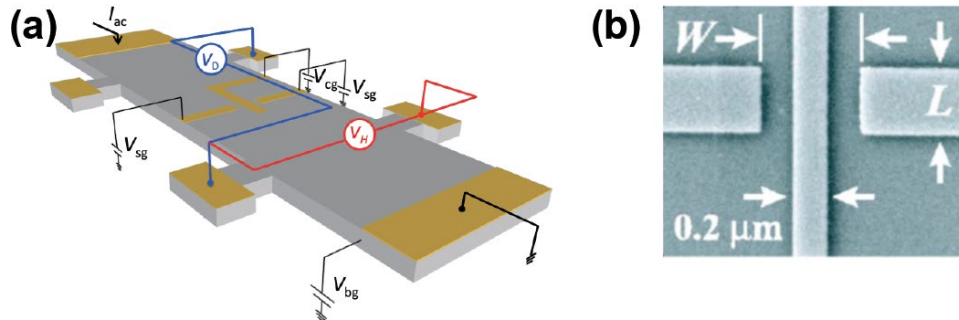


図 1 : (a) 今回の研究に用いたセンターゲート付き QPC の概略図。両側のスプリットゲートに同じ電圧 V_{sg} 、センターゲートに V_{cg} の電圧が印加されている。QPC の中央の状態を測定する対角抵抗値 (R_{diag}) は試料に交流電流 I_{ac} を流した時の V_D の出力から $R_{diag} = V_D / I_{ac}$ で求められる。(b) は QPC 中央部の SEM 写真である。 $L = 400 \text{ nm}$ 、 $W = 600 \text{ nm}$ でスプリットゲートの中央に幅 200 nm ($= 0.2 \mu\text{m}$) のセンターゲートが配置されている。

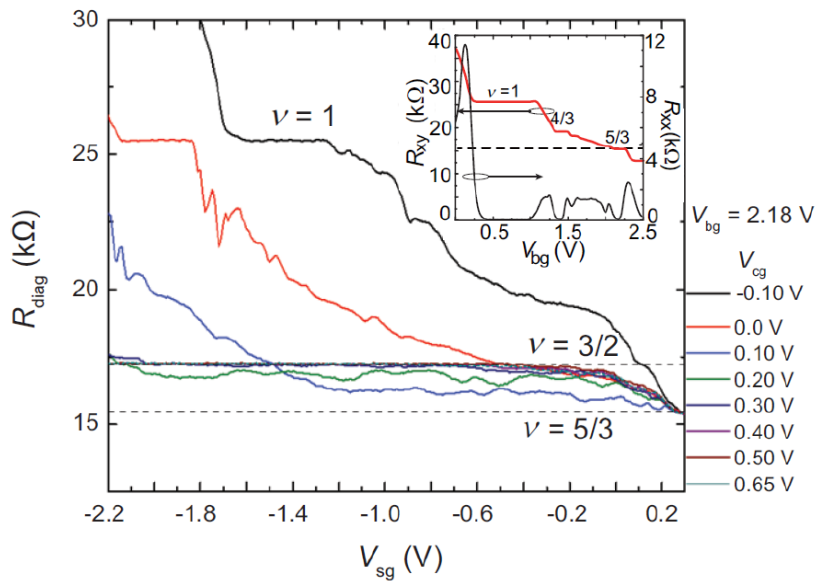


図 2 : $B = 7 \text{ T}$ 、 100 mK で測定された QPC の伝導特性。QPC の対角抵抗 R_{diag} の V_{sg} 依存性が、センターゲートバイアス V_{cg} をパラメータとして測定されている。QPC の両側の広い部分 (図 1 参照) は、 $V_{bg} = 2.18 \text{ V}$ を加えることで、 $5/3$ の分数量子ホール状態に設定されている。 V_{sg} が十分負になるとスプリットゲート下の電子系が空乏化され、電子のチャンネルが QPC の中央部の狭い領域に限定されることを反映して、 R_{diag} は $5/3$ に対応した値から増大する。 V_{cg} に正の電圧を加

えると、 V_{cg} が 0.1 V までは、 R_{diag} のカーブが V_{sg} の負側にシフトする通常の振る舞いが確認できる。一方で、 V_{cg} が 0.2V を超えると、QPC の中央領域に電子を供給しているにもかかわらず R_{diag} の増大が見られ、 $3/2$ 状態に対応する $17.2\text{k}\Omega$ に収束する。

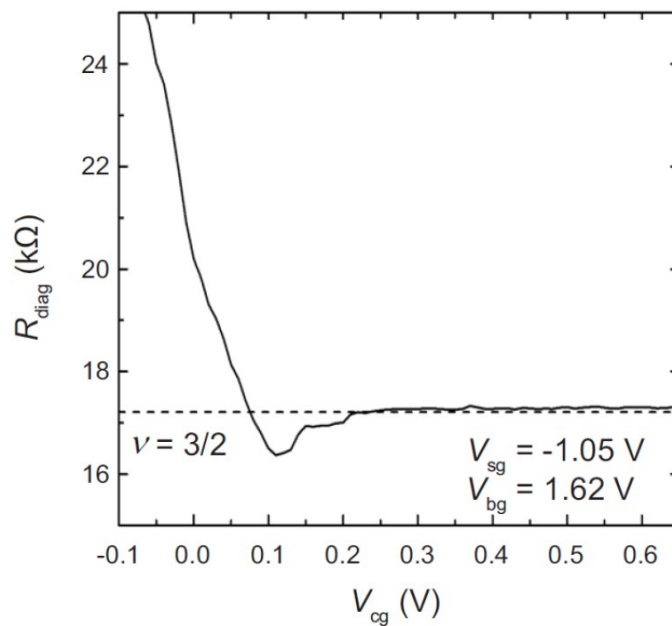


図 3 : $B = 6\text{ T}$ 、 100mK で測定された QPC の伝導特性。QPC の対角抵抗 R_{diag} の V_{cg} 依存性が測定されている。QPC の両側の広い領域は $V_{bg} = 1.62\text{ V}$ を加えることで、 $5/3$ の分数量子ホール状態に設定されている。また、 V_{sg} はスプリットゲート下の電子系が空乏化される $V_{sg} = -1.05\text{V}$ に設定されている。 V_{cg} のバイアスを増加させ QPC 中央部に電子を供給するにつれ、 R_{diag} は一度減少するが、 $V_{cg} = 0.1\text{ V}$ 付近から逆に増大し、 $17.2\text{ k}\Omega$ に収束することがわかる。

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学先端スピントロニクス研究開発センター
センター長・総長特命教授 平山祥郎（ひらやまよしろう）
電話：022-795-3880
E-mail：yoshiro.hirayama.d6@tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学大学院理学研究科
広報・アウトリーチ支援室
電話：022-795-6708
E-mail：sci-prmail.sci.tohoku.ac.jp