

2次元電子・正孔系における プラズモン伝導の時間分解測定

電子と正孔を別の層に閉じ込める半導体複合量子井戸は、層構造の最適化により2次元トポロジカル絶縁体となるため、新しい原理を用いた量子コンピュータへの応用等から注目されています。本稿では、ゲート電圧によって電子と正孔を切り替えることで単一の試料において両極性のプラズモン伝導を時間領域で観測した実験について紹介します。本測定手法により、2次元トポロジカル絶縁体における電荷・スピンのダイナミクスの研究が進展すると期待されます。

かまた ひろし いりえ ひろし
鎌田 大 入江 宏
くまだ のりお むらき こうじ
熊田 倫雄 村木 康二

NTT 物性科学基礎研究所

トポロジカル量子計算技術

近年、組合せ最適化等、従来のコンピュータが苦手とする問題を、大規模かつ高速に処理することへの社会的ニーズとともに、それによるイノベーションへの期待から、新しい動作原理に基づく次世代型コンピュータの実現が切望されています。特に、量子力学の原理に基づき、複数の情報を同時に符号化することで超並列計算を実行する量子コンピュータが大きな注目を集めています。その実用化に向けて、超伝導体や単一の原子、光子、電子スピンなどを用いて量子ビットを構成し、量子もつれ等、基本的な量子操作を含

むさまざまな原理実証が行われています。このような研究の流れの中で、誤り耐性のある量子計算と量子回路の大規模化は、量子コンピュータを社会実装するうえでの主要課題と認識されています。

一方、別のアプローチとして、自然界の基本粒子*¹とは異なる特異な性質を持つ準粒子*²を用いて量子ビットを構成するトポロジカル量子計算が注目を集めています。トポロジカル量子計算は、従来の量子計算とは異なる

り、準粒子の交換によって系の量子状態が変化することを論理ゲートとして用いるもので、空間に配置された準粒子を順番に入れ替えることで計算が実行されます(図1)。計算結果は準粒子を交換する順序のみで決まり、準粒子がたどる軌跡の詳細には依存しないため、外部擾乱に対して耐性が高い量子ビットとして期待できます。2次元トポロジカル絶縁体は特異な性質を持つ準粒子を実現する舞台として期待されています。

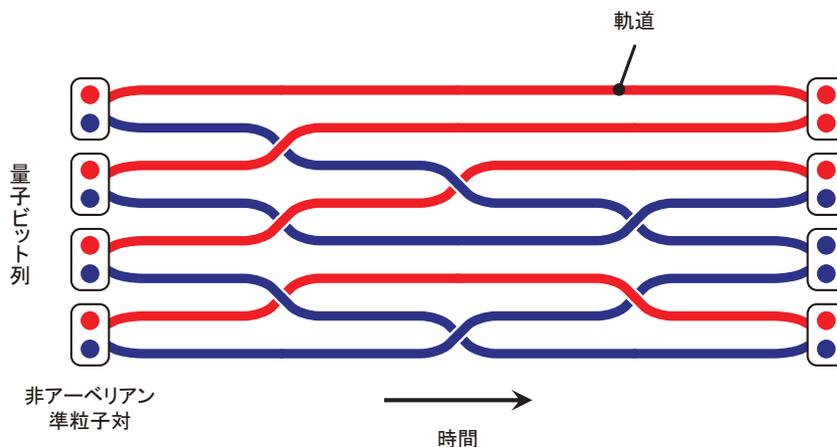


図1 トポロジカル量子計算の概念図

*1 基本粒子：自然界の物質を構成する最小単位の粒子であり、電子などのフェルミ粒子と光子などのボーズ粒子の2種類に分類されます。

*2 準粒子：半導体中の電子など、多粒子の集団的な振る舞いがあたかも1つの粒子のように振る舞うことがあり、これを準粒子といいます。2次元系では、フェルミ粒子ともボーズ粒子とも異なる量子統計に従い、入れ替えたときに元の状態とは異なる別の状態に変わる特異な性質を持つ準粒子の存在が許されます。

2次元トポロジカル絶縁体

2次元トポロジカル絶縁体では、試料内部が絶縁体であるのに対して、試料端には運動量とスピンのそれぞれ逆向きに1次元ヘリカル伝導チャンネル(ヘリカルエッジチャンネル)が形成されます(図2(a))。各試料端において逆方向に進行するエッジチャンネルは互いに逆向きのスピンを持つため、その間の非弾性散乱は時間反転対称性*3によって禁止され、零磁場で磁性不純物が存在しない場合、原理的に後方散乱は抑制されます。このヘリカルエッジ状態に超伝導体を近接させた系では、トポロジカル量子計算に必要な準粒子(マヨラナ準粒子)が発現すると予想されています。一方、理論が予測するように後方散乱がない場合、ヘリカルエッジ状態の伝導率は量子化*4するはずですが、実験では数 μm 程度の試料でしか量子化は観測されておらず、その散逸機構の詳細は明らかになっていません。

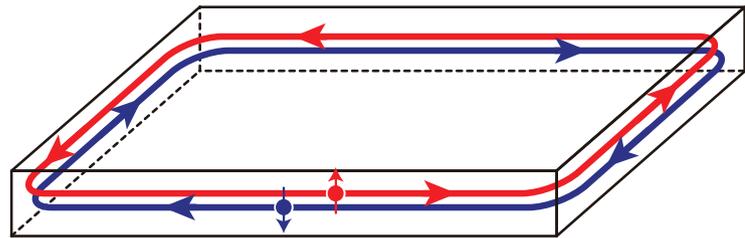
一方、2次元電子・正孔系に強磁場を印加すると、電子と正孔のサイクロトロン運動が量子化され、ランダウ準位と呼ばれる離散的なエネルギー準位が形成されます。このとき、フェルミ準位がちょうどランダウ準位の間にくるようにすると、試料内部は絶縁体となる一方、試料端には磁場の向きとキャリアタイプで決まる方向に周回する1次元の伝導チャンネル(カイラルエッジチャンネル)が形成されます。これは量子ホール効果状態と呼ばれ、時間反転対称性が破れた2次元トポロジカル絶縁体に分類されます。時間反転対称

性を持つ2次元トポロジカル絶縁体のヘリカルエッジ状態は、正確なスピンの向きを無視すれば、逆方向に進行する電子と正孔のカイラルエッジ状態を重ね合わせたものと近似的にみなすことができます(図2(b))。そこで、NTT物性科学基礎研究所では、半導体2次元トポロジカル絶縁体の母材となるInAs/InGaSb複合量子井戸において、電子と正孔のカイラルエッジチャンネルにおけるプラズモン(エッジマグネトプラズモン)伝導に着目しました。エッジマグネトプラズモンとは、2次元系の試料端における電荷の集団

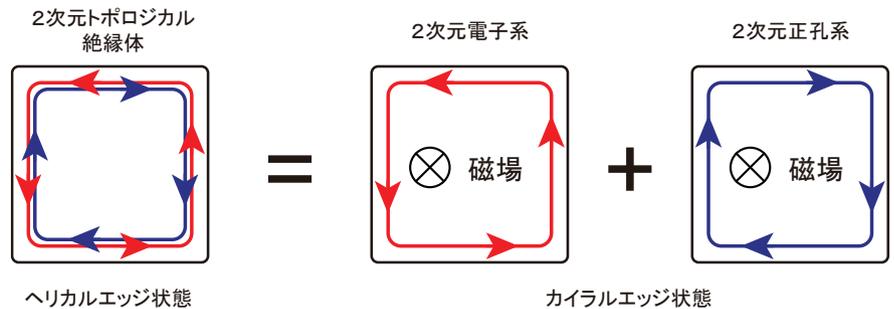
振動であり、その散逸や伝播特性を調べることで、エッジ状態に関する知見を得ることができます。

InAs/InGaSb複合量子井戸

ヒ化インジウム(InAs)とアンチモン化インジウムガリウム(InGaSb)をアンチモン化アルミニウムガリウム(AlGaSb)障壁層で挟んだ複合量子井戸は、図3に示すようなエネルギーバンド構造を持ち、電子はInAs量子井戸、正孔はInGaSb量子井戸に閉じ込められます。ここで、InAs伝導帯のサブバンド端がInGaSb価電子帯の



(a) ヘリカルエッジチャンネル



(b) ヘリカルエッジ状態とカイラルエッジ状態

図2 2次元トポロジカル絶縁体

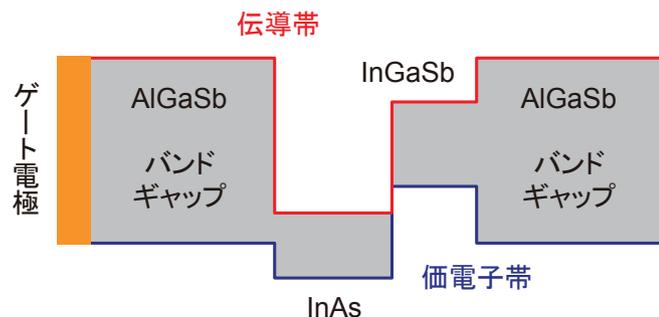


図3 エネルギーバンド構造

*3 時間反転対称性：時間の流れを逆向きにしたとしても状態が変化しないことであり、磁場によって時間反転対称性は破れます。

*4 量子化伝導：伝導率が e^2/h に量子化される無散逸な伝導。ここで、 e は素電荷 1.602×10^{-19} C、 h はプランク定数 6.626×10^{-34} J·s。

サブバンド端よりエネルギー的に下に位置（バンド反転）すると、電子と正孔の波動関数の混成によりエネルギーギャップが開き、2次元トポロジカル絶縁体となります⁽¹⁾。一方、InAs伝導帯のサブバンド端がInGaSb価電子帯のサブバンド端よりエネルギー的に上に位置（バンド非反転）するとき、通常のバンドギャップを有する半導体となりますが、表面ゲート電極でフェルミ準位を制御することにより、キャリアタイプを2次元電子系と2次元正孔系の間で切り替えることができます。本研究では、バンド非反転試料を用いて、2次元電子・正孔系それぞれにおけるエッジマグネトプラズモンに対するオンチップ時間分解電気伝導測定を行いました。

時間分解電気伝導測定法

従来、GHz帯域のプラズモンに対する電気伝導測定では、サンプリングオシロスコープやスペクトラムアナライザを用いて時間領域・周波数領域で測定する方法が主流でした。しかし、測定感度や測定系による高周波信号の歪みにより、試料内部における本来のプラズモン波形を観測・評価することが困難でした。本研究では、光学測定

におけるポンプ・プローブ分光法に類似の手法を用いることにより、試料内部におけるエッジマグネトプラズモンの波形を時間領域で観測することに成功しました。

図4(a)は実験に用いた試料の構造および測定系を模式的に示しています。試料には、3種類のゲート電極（エッジマグネトプラズモン励起のための入射ゲート、時間分解測定のための検出ゲート、電子・正孔のキャリア密度を変化させるためのグローバルゲート）があり、各ゲート電極間およびゲート電極と半導体基板はAl₂O₃絶縁膜によって絶縁されており、それぞれ独立に電圧を印加することができます。また、電流測定のためのオーミック電極に加え、高周波電圧に対して試料の電位を安定させるためのオーミック電極が複数あります。測定は強磁場を印加した量子ホール領域において、温度1.5 Kで行いました。

入射ゲートに電圧パルスを印加すると、パルスの立ち上がり・立ち下りのタイミングでそれぞれ電荷密度が粗・密のエッジマグネトプラズモンが励起されます。このエッジマグネトプラズモンは磁場の向きとキャリアタイプで決まるカイラリティで試料端に沿って

伝播します。これを時間分解測定するため、入射ゲートから30 μm離れたところにある検出ゲートに時間幅の短い電圧パルス（約80 ps）を印加し、狭窄部の局所的なキャリア密度を高速に変調します。図で反時計回りに伝播するエッジマグネトプラズモンが検出ゲートに到達するタイミングで検出ゲートに電圧パルスを印加するとエッジマグネトプラズモンは狭窄部で反射されるのに対し、それ以外のタイミングではエッジマグネトプラズモンは狭窄部を透過し、右下のオーミック電極で電流として測定されます。図4(b)で模式的に示すように、ここで印加する2つの電圧パルスの時間差 t_d を変えながら電流を測定すると、試料内部における局所的なエッジマグネトプラズモンの波形を計測することができます⁽²⁾。

エッジマグネトプラズモンの時間分解測定

図5(a)は、電子・正孔領域におけるエッジマグネトプラズモン波形の測定例です。時間軸の原点はエッジマグネトプラズモンを励起したタイミングを表し、正負のパルス状波形は入射ゲートに印加した電圧パルスの立ち上

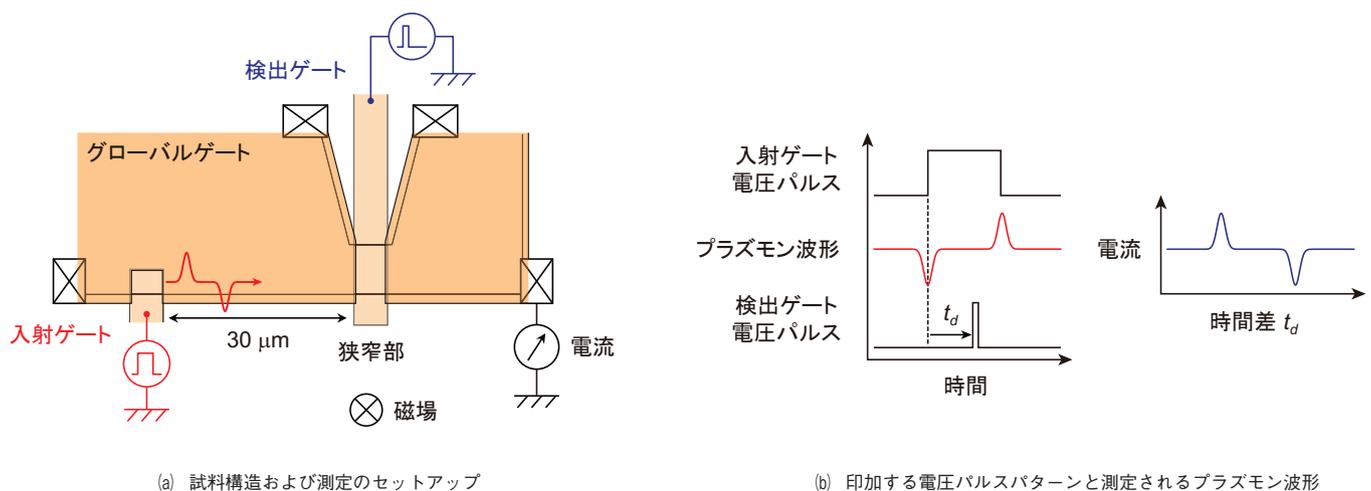
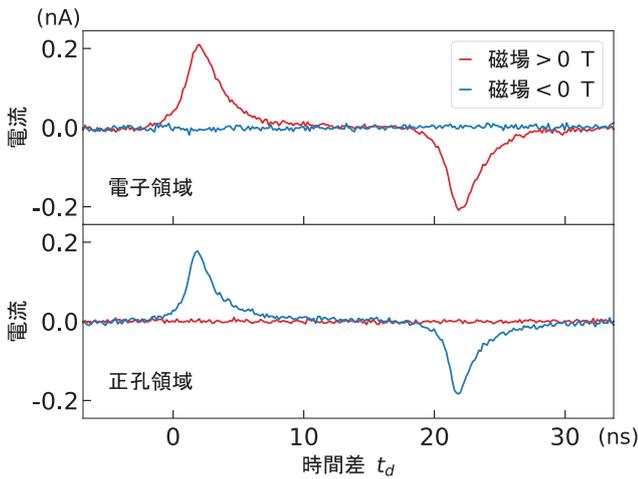
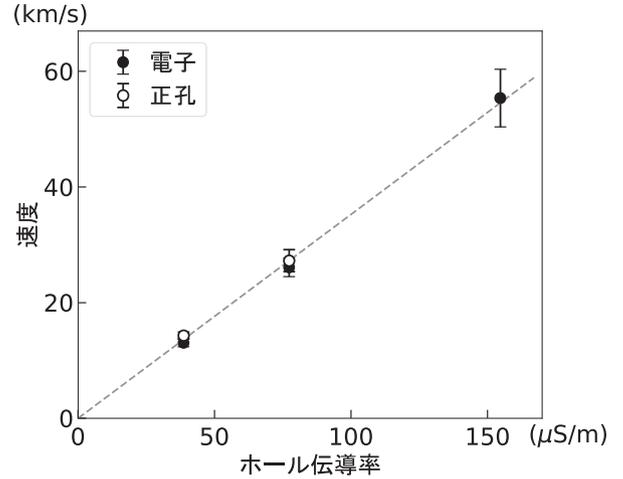


図4 時間分解電気伝導測定法



(a) エッジマグネトプラズモンの波形の測定例



(b) 伝播速度のホール伝導率依存性

図 5 エッジマグネトプラズモンの時間分解測定

がり立ち下りに、時間幅はパルス幅に対応しています。正負のパルス状波形は、電子・正孔領域それぞれに対し、一方向の磁場でのみ、かつ逆向きの磁場で観測されています。これは電子と正孔が同じ向きの磁場で逆向きのカイラリティを持つためです。ピークが2 ns程度遅れて現れているのはエッジマグネトプラズモンの伝播時間に対応しており、伝播距離(30 μm)から伝播速度が求まります。

試料表面がゲート電極で覆われている場合、エッジマグネトプラズモンの伝播速度はホール伝導率に比例することが理論的に示されています。図5(b)は電子・正孔領域それぞれに対して測定されたエッジマグネトプラズモンの伝播速度をホール伝導率に対してプロットしています。電子領域と正孔領域で測定された伝播速度はほぼ一致しており、ホール伝導率に比例しています。この結果は、電子・正孔領域ともにエッジマグネトプラズモンの伝播を時間領域で測定できていることを示すとともに、エッジチャンネルの特性をエッジマグネトプラズモンの伝播速度として測定できることを示しています。

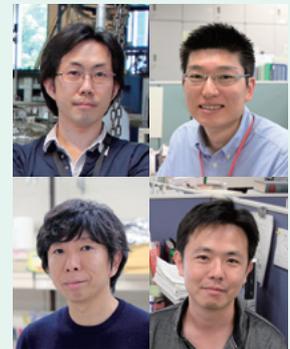
今後の展望

NTT物性科学基礎研究所では、2次元トポロジカル絶縁体の母材となるInAs/InGaSb複合量子井戸の電子・正孔領域において、エッジマグネトプラズモンの波形を時間領域で観測することに成功しました。測定されたエッジマグネトプラズモンの伝播速度はエッジチャンネルの特性を反映するため、2次元トポロジカル絶縁体をはじめとするさまざまなトポロジカル物質に対して本時間分解測定法を用いることにより、その緩和機構やダイナミクスが解明され、トポロジカル量子計算の実現につながる知見が得られるものと期待されます。また、本研究で示したように、エッジマグネトプラズモンの伝播速度やカイラリティをゲート電圧や磁場で制御できることは、プラズモンを情報担体として用いる「プラズモニクス」において有力なプラズモン伝播制御技術になると期待されます。

参考文献

- (1) 秋保：“量子計算実現に向けた新たな2次元トポロジカル絶縁体の創出,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.5, pp.28-31, 2017.
- (2) H. Kamata, H. Irie, N. Kumada, and K. Muraki: “Time-resolved measurement of ambipolar edge magnetoplasmon transport in

InAs/InGaSb composite quantum wells,” Phys. Rev. Research, Vol.4, 033214, 2022.



(上段左から) 鎌田 大/ 入江 宏
(下段左から) 熊田 倫雄/ 村木 康二

物質のトポロジカルな性質を量子情報処理技術に応用することをめざした研究が世界的に加速しています。NTT物性科学基礎研究所でも研究を進展させ、トポロジカル量子計算技術への発展の可能性を探索していきます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子科学イノベーション研究部
TEL 046-240-3544
FAX 046-240-4727
E-mail hiroshi.kamata@ntt.com