

# 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

2次元トポロジカル絶縁体を用いることでスピン自由度を活用したデバイスやトポロジカル量子計算に向けた新奇準粒子探索の可能性が拓けます。2次元トポロジカル絶縁体の母材となる材料系はこれまで2種類に限られていましたが、NTT物性科学基礎研究所では新たに歪み量子井戸を用いたトポロジカル絶縁体を提案しました。本稿では、従来の2次元トポロジカル絶縁体よりも優れた特性を持つ歪み量子井戸について紹介します。

あきほ たかふみ

秋保 貴史

NTT物性科学基礎研究所

## 2次元トポロジカル絶縁体

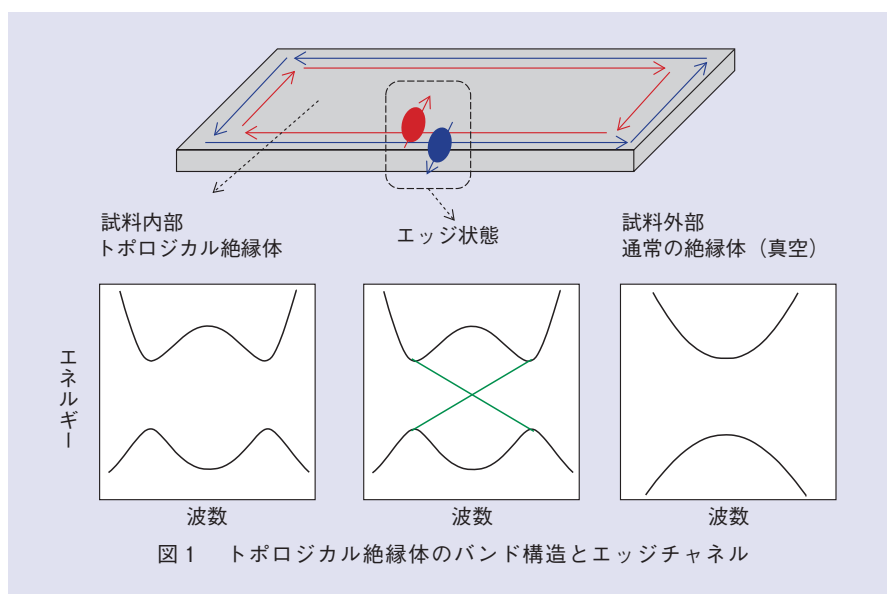
近年、「トポロジカル絶縁体」と呼ばれる、通常の絶縁体とは異なる性質を持った物質に関する研究がさかに行われています。トポロジカル絶縁体の名前の由来である「トポロジー」は、数学の一分野である位相幾何学のことで、連続的な変形によってお互い重ね合わせることができる物は同じトポロジーに分類されます<sup>(1)</sup>。トポロジカル絶縁体はバンド構造のトポロジーが、真空を含む通常の絶縁体のそれとは異なるため、通常の絶縁体とはバンドが連続的につながらず、その境界ではバンドギャップが閉じて金属的な性質を持つ伝導状態が現れます(図1)。2016年のノーベル物理学賞が「物質のトポロジカル相とトポロジカル相転移の理論的発見」に対して米国の研究者らに送られたことから、この研究分野はさらに注目を集めると考えられます。

トポロジカル絶縁体は2次元系で最初に提案され、そのエッジ状態は無散逸で量子化した伝導度を示し、さらにスピン偏極していることが理論的に示されました。そのため、スピン自由度を積極的に活用するスピントロニクス

分野におけるデバイス応用が期待されています。また、トポロジカル絶縁体のエッジ状態に超伝導体を近接させたトポロジカル超伝導体において、自然界にある通常の粒子とは異なる振る舞いを示すマヨラナ準粒子が現れることが予想されています。マヨラナ準粒子はデコーヒレンスに強く誤り耐性のあるトポロジカル量子計算への応用が期待されています。このように、トポロジカル絶縁体は基礎・応用研究の広い範囲から注目されており、良好なトポロジカル絶縁体試料を作製することが研究を進めていくうえで重要です。

## 新たな2次元トポロジカル絶縁体

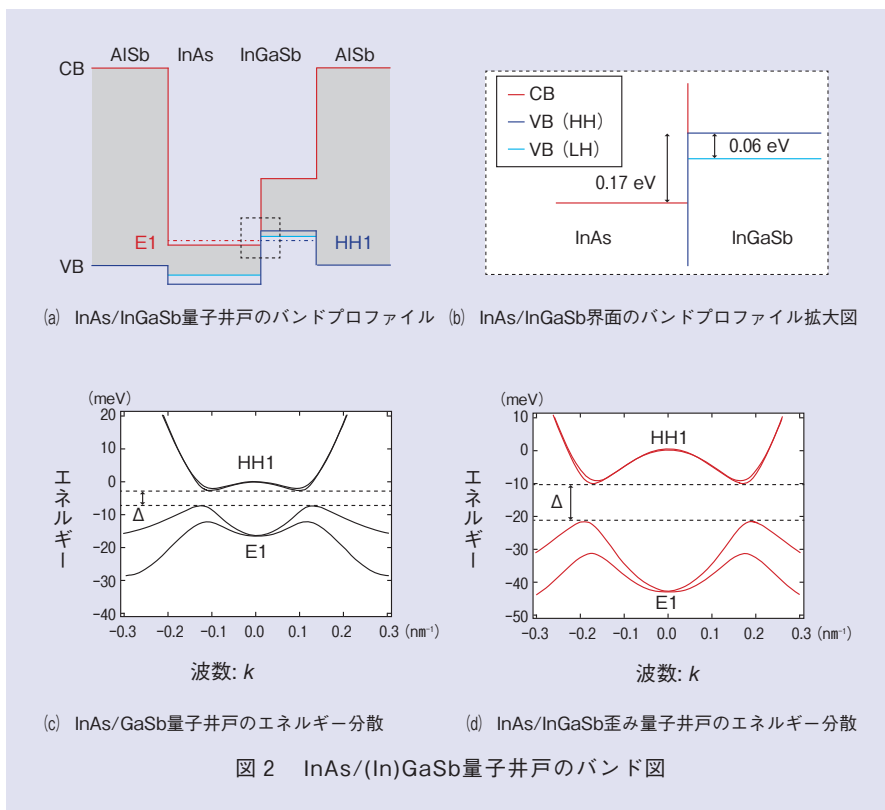
これまでに電気伝導特性が報告されている2次元トポロジカル絶縁体はテルル化水銀(HgTe)量子井戸とヒ化インジウム(InAs)とアンチモン化ガリウム(GaSb)からなる量子井戸の2種類に限られています。歴史的には本質的にトポロジカル絶縁体になりやすいHgTe量子井戸が最初に報告されました。その後、HgTeよりも比較的取り扱いやすい半導体材料のInAs/GaSb量子井戸が報告されました。InAs/GaSbの系ではゲート電圧に



よって、通常の絶縁体からトポロジカル絶縁体まで1つのデバイスで特性が可変であるという長所を持ちます。しかしながら、エネルギーギャップが小さいため、低温でもバルクの伝導性が残るといった問題があり、エッジ状態の明確な同定が困難でした。そこでNTT物性科学基礎研究所ではHgTe量子井戸、InAs/GaSb量子井戸に次ぐ新たなトポロジカル絶縁体として、InAs/InGaSb歪み量子井戸を提案し、InAs/GaSbよりも優れた特性を実現したので本稿で紹介いたします<sup>(2)</sup>。

### 歪み工学を用いた試料作製

InAs/In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>Sb歪み量子井戸は図2(a)に示すようなバンド端配置を持ち、電子はInAs量子井戸に、正孔はInGaSb量子井戸に閉じ込められます。閉じ込められた電子・正孔はそれぞれ量子準位 (E1, HH1) をつくり、正孔はさらに軽い正孔 (LH: Light Hole) と重い正孔 (HH: Heavy Hole) に分裂します。ここで、図2(b)に示すようにInAsの伝導帯 (CB: Conduction Band) 端はInGaSbの価電子帯 (VB: Valence Band) 端よりも0.17 eV下に位置しているため、通常の絶縁体とはバンドの上下位置が反転したエネルギー準位構造が可能です。トポロジカル絶縁体となるにはこのバンド反転が必要不可欠です。また、In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>Sbは障壁層であるAlSbにより格子定数が大きいため、面内に圧縮歪みがかかります。この歪みはLHとHHのバンド端を0.06 eV分裂させ、その結果、InAsの伝導帯とInGaSbの価電子帯のオーバーラップは0.17 eVまで増大し、LHバンドの影響を低減



します(図2(b))。これらの効果によって、バンド反転量の増大と、E1とHH1の混成によって生じるトポロジカル絶縁体のエネルギーギャップ $\Delta$ の増大が期待できます。 $\Delta$ の大きさは有限の波数 $k$ で定義されるため、 $k \cdot p$ 摂動法という手法でエネルギー分散関係を計算しました。InAs/In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>Sb歪み量子井戸と無歪みのInAs/GaSb量子井戸のバンド構造をそれぞれ図2(c), (d)に示します。InAs層と(In)GaSb層の層厚はそれぞれ10 nm, 6 nmで同じ条件です。計算結果は、InAs/In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>Sb歪み量子井戸では、無歪みのInAs/GaSb量子井戸に比べE1とHH1のオーバーラップ(バンド反転)が増大するとともに $\Delta$ が4.5 meVから10.8 meVまで増大することを示しており、良好なバルク絶縁性が期待でき

ます。本研究で用いた歪み量子井戸は分子線エピタキシー法によってGaAs基板上に成長しました(図3(a))。量子井戸層であるInAs層とInGaSb層が障壁層であるAlSb層に挟まれたヘテロ構造です。InAs層厚は8.5, 9.1, 10.0, 10.9 nmの4通りで変化させ、In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>Sb層厚は5.9 nm、In組成は25%で固定しました。成長した試料の特性は量子井戸の層数に強く影響されます。そのため、NTTがこれまで培ってきたノウハウを活かし、単一原子層単位(およそ0.3 nm)で量子井戸の層厚制御を行いました。作製したヘテロ構造はリソグラフィを用いてホールバードバイス(図3(b))に加工し、電気伝導特性を評価しました。試料に電流( $I$ )を流し、

電流に平行方向の電圧 ( $V_{xx}$ ) から縦抵抗 ( $R_{xx}$ ), 電流に垂直方向の電圧 ( $V_{xy}$ ) からホール抵抗 ( $R_{xy}$ ) を得ます.  $V_{xx}$  のプローブ間距離は  $180\ \mu\text{m}$ , ホールバーの幅は  $50\ \mu\text{m}$  です. ゲート電圧 ( $V_{FG}$ ) はチャンネル中のキャリア密度を制御するのに用います.

### バンド反転の定量評価

温度  $2\ \text{K}$  においてゲート電圧を変化させて測定した縦抵抗の磁場 ( $B$ ) 依存性を図 4 (a) に示します. 試料の InAs 層厚は  $10.9\ \text{nm}$  です. 強い磁場によって電子と正孔のサイクロトロン運動が量子化されるため, 抵抗は磁場とともに振動します [Shubnikov-de Haas (SdH) 振動]. この振動をフーリエ解析することで, キャリア密度を見積もることができ, その結果 2 つの周波数 ( $f$ ) 成分が明瞭に観測されました (図 4 (b)). これらのピークはそれぞれ電子密度 ( $n_e$ )・正孔密度 ( $n_h$ ) を反映しています. この電子と正孔が共存している結果は, バンド反転が起き, 2次元トポロジカル絶縁体のギャップ近傍でフェルミレベルが電子的なバンドと正孔的なバンドの両方を横切っていることを示しています. フーリエ解析から得られた周波数成分のピーク位置とキャリア密度は  $n = g_s f (h/e)$  の関係があり, ここで,  $h$  はプランク定数,  $e$  は素電荷,  $g_s$  はスピン縮重度です.  $g_s$  は 1 か 2 の値を取り, 1 であればスピン分裂, 2 であればスピン縮退していることを意味しています.  $g_s$  が 1 か 2 かを判定するために, ホール抵抗から得られたキャリア密度とフーリエ解析で得られた結果を比較したところ, 興味深いことにスピン分裂 ( $g_s = 1$ )

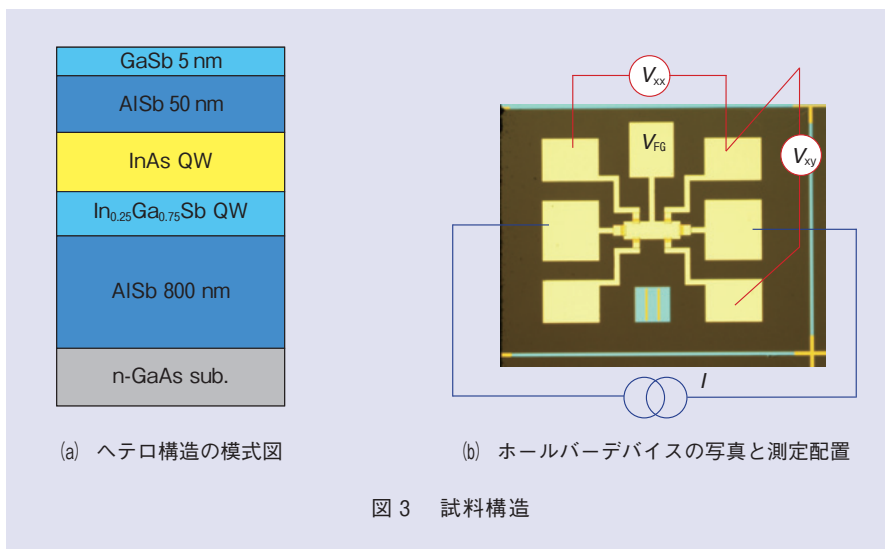


図 3 試料構造

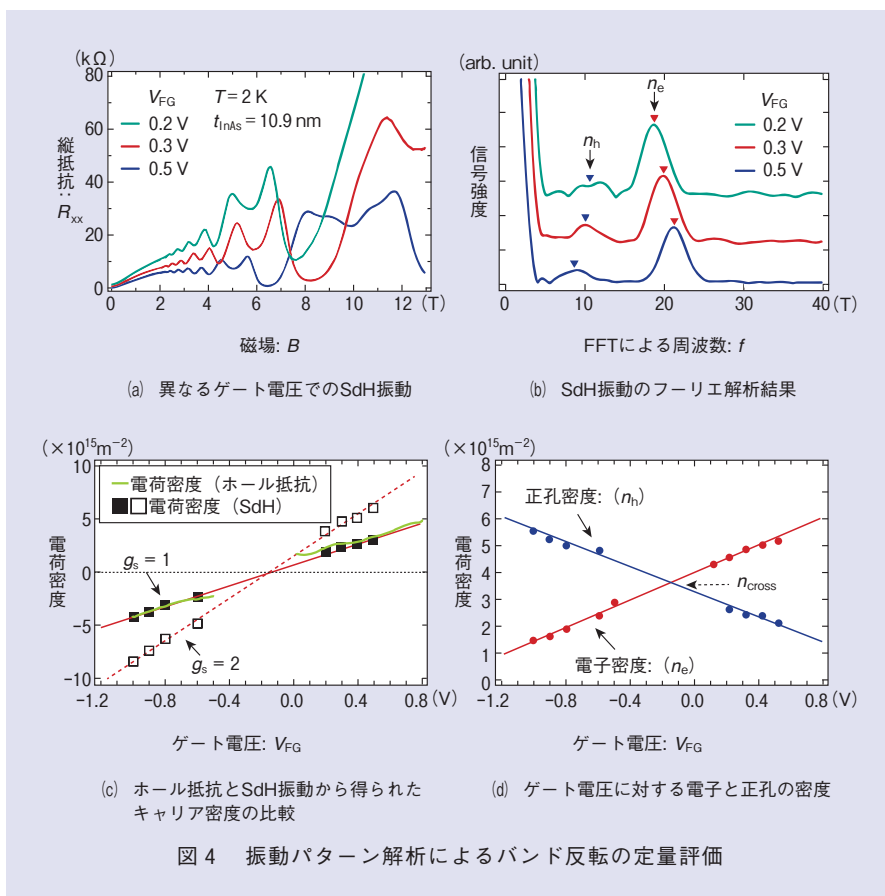


図 4 振動パターン解析によるバンド反転の定量評価

していることが分かりました (図 4 (c)). このような結果は, 従来の InAs/GaSb 量子井戸では観測されま

せんでした. スピン分裂が観測される理由として, スピン-軌道相互作用の影響が考えられますが, 詳細を明らか

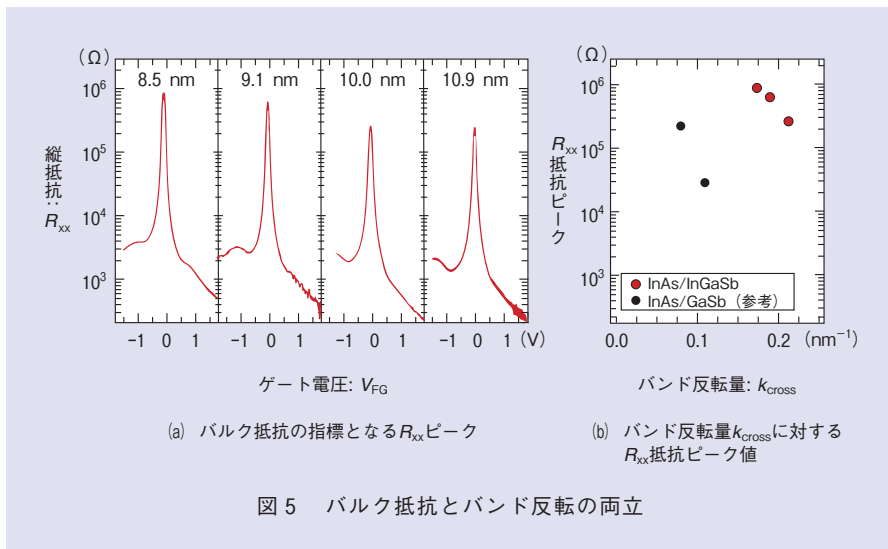


図5 バルク抵抗とバンド反転の両立

にするにはさらに研究が必要です。

バンド反転の定量的な指標は、E1とHH1バンドが反交差する波数 $k_{cross}$   $[= (4\pi n_{cross}/g_s)^{1/2}]$  で表すことができます(図2(d))。ここで $n_{cross}$ は図4(d)に示すように、ゲート電圧に対し電子と正孔の密度が等しくなる電荷中性点のキャリア密度であり、その値は $3.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ でした。得られた $n_{cross}$ と $g_s$ から、 $k_{cross} = 0.21 \text{ nm}^{-1}$ という値が得られました。

### バルク絶縁性の向上

温度0.25 Kにおいて測定した、ゼロ磁場における縦抵抗のゲート電圧依存性を図5(a)に示します。すべての試料において電荷中性点近傍で単一ピークを観測し、そのピーク値はInAs層厚を薄くすることで最大889 kΩまで増大しました。このピーク値が高いほどバルク絶縁性が優れていることを意味しています。得られた抵抗ピーク値をバンド反転の指標である $k_{cross}$ に対してプロットしたのが図5(b)です。比較のためInAs/GaSb量子井戸の値も同

時にプロットしています。この結果から、歪み量子井戸ではバンド反転量・抵抗ピーク値ともに増大していることが分かります。最初に述べたバルクの残留伝導の問題はバンド反転が大きいほど顕著になります。そのため、従来のInAs/GaSb量子井戸ではバンド反転とバルク絶縁性を両立するには両者をうまくバランスさせるシビアな試料設計が必要でした。今回の結果から、歪みを活用することでより自由度の高い試料設計が可能になりました。さらに $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 計算は、歪みを増大することで特性がさらに改善することを示しており、歪み量子井戸系はさらなる特性改善の可能性を残しています。これらの結果から、歪み量子井戸は2次元トポロジカル絶縁体のエッジ状態を調べるのに有望な系であることが分かりました。

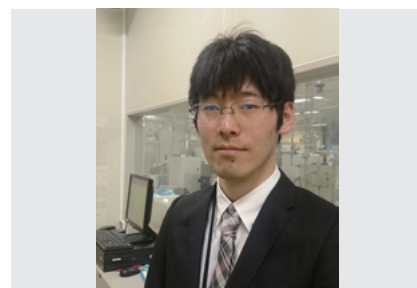
### 今後の展開

本研究では、InAs/InGaSb歪み量子井戸において従来よりも深いバンド反転領域で高いバルク絶縁性が得られ

ました。今後はスピン分裂した伝導特性など詳細な分析を進めるとともに、試料構造を最適化することで、InAs/InGaSb歪み量子井戸で明瞭なエッジ伝導を検出したいと考えています。併せて、エッジ状態と超伝導を結合させたトポロジカル超伝導の実現に向けて研究を進展させたいと考えています。

### 参考文献

- (1) 鈴木・小野満：“半導体ヘテロ接合によるトポロジカル絶縁体の実現,” NTT技術ジャーナル, Vol.27, No.6, pp.34-38, 2015.
- (2) T. Akiho, F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, and K. Muraki: “Engineering quantum spin Hall insulators by strained-layer heterostructures,” Appl. Phys. Lett., Vol.109, p.192105, 2016.



秋保 貴史

より良い試料をつくりたい一心で結晶成長を続け、今回はその中の1つのシリーズでこのような良い成果が得られました。今後もおもしろい研究ができるように、より良い結晶を成長していきたいと思ひます。

### ◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所  
量子電子物性研究部  
TEL 046-240-3449  
FAX 046-240-4727  
E-mail akiho.takafumi@lab.ntt.co.jp