

共同利用研究ハイライト

トポロジカル絶縁体超薄膜の電子構造

平原 徹 東京大学大学院理学系研究科 助教

1. はじめに

トポロジカル絶縁体は量子スピンホール相とも呼ばれる新奇な物質状態 (a new state of matter) であり、物性物理学全体のホットトピックとして研究が盛んに行われています。これは量子ホール効果のスピ教版で、バルク (物質内部) は絶縁体だがエッジにフェルミ準位を横切り常に金属的であるような状態が存在します。量子ホール効果は低温・強磁場下で実現しますが、量子スピンホール効果は物質の内部磁場ともいえるスピン軌道相互作用が重要な役割を果たして2次元のみならず3次元物質でも実現されます。さらにエッジでの反転対称性の破れにより、エッジ・表面状態は非磁性物質であるにも関わらずRashba効果によってスピン偏極してスピン流を運びます。「トポロジカル」という語源の由来はこのエッジ・表面状態がトポロジーで定義される量により非磁性不純物の乱れの散乱から保護されていることによって、通常の絶縁体と区別されます。

ここまで読まれた時点で興味を持たれた方はより詳しい文献をご覧になることをお勧めします^[1]。そしてこれまでの多くの研究の結果トポロジカル絶縁体のバルク部分を本当に絶縁体にするのが難しいことが明らかになりました。つまりエッジ・表面状態の「トポロジカル」な性質を理解するにはバルクの体積を減らし表面を際立たせた方が有利であるということが分かり、執筆者はトポロジカル絶縁体を超薄膜に

成長させて研究しています。特に執筆者の所属する東京大学大学院理学系研究科長谷川修司研究室では従来から *in situ* でマイクロ・ナノスケールにおいて表面状態の電気伝導を測定する研究を行っており、トポロジカル絶縁体の表面状態の電気伝導測定もその延長線上で実現できると考えています。しかし電気伝導のデータ解釈においてバンド分散を知ることは不可欠であり、UVSORの高分解能角度分解光電子分光ビームラインBL5Uを2009、2010年度に使わせていただきました。本稿ではその成果の一部を紹介させていただきます。

2. ビスマスアンチモン合金超薄膜のフェルミ面と表面状態電気伝導

ビスマスアンチモン ($\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$) 合金は $0.07 < x < 0.22$ でトポロジカル絶縁体になると理論的に予言され実験的にも2008年にバルク結晶の光電子分光測定で実証されました^[2]。執筆者は以前からシリコン表面上にBi超薄膜を成長させて研究していましたが、BiとSbを同時に蒸着させることにより合金の超薄膜を成長させることにも成功しました。そのフェルミ面を測定したところ一番薄く成長できる29 Åの膜でも図1(a)のようにバルク結晶の場合と同じくトポロジカルな表面状態が存在していることが明らかになりました。そしてその電気伝導をマイクロ4端子法で測定したところ、図1(b)に示す通り膜厚が厚いとき (239 Å) は温度が下がるほど抵抗率が上がる絶縁体的な

振る舞いを示していたものが、膜厚を薄くしていくと98 Åの膜では低温で金属伝導に転移し、29 Åの膜では室温からずっと金属的になるという結果を得ました。これは確かに一番薄い薄膜では表面状態によって電気伝導が支配されていることを意味してトポロジカル表面状態の電気伝導検出に成功したと言えます^[3]。

3. ビスマスセレン合金超薄膜の量子トポロジカル相転移

ビスマスセレン (Bi_2Se_3) は上記の $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金の次にトポロジカル絶縁体であると同定された物質でバンドギャップが0.3 eVと大きく、また表面状態の分散が理論から予言される最も単純な単一ディラックコーンであるということで現在多くの関心を集めています^[4]。図2(a)に80 Åの厚さの Bi_2Se_3 超薄膜のバンド分散を示します。フェルミ準位直下の強度が強い部分はバルクバンドを示していて、これはSeサイトでの欠損によりバルクがn型にドーピングされていることを示しています。このようなnドーピングの傾向はバルク半無限結晶でも見られており、上述のように表面状態の性質を調べる上で障害となっています。その脇に見られるやや強度が小さい直線的なバンドが表面状態で、スピン分解測定によりスピン分裂していることも直接示されておりヘリカルディラックフェルミオンと呼ばれます^[5]。膜厚を薄くしていくと図2(b), (c)にあるように直線的な分散は見られなくなり表面状態にギャップ

プが開きます。これはもはや30 Å厚さ以下の超薄膜はバルク結晶と同じとみなせないことを意味しています。理論によれば^[6]Bi₂Se₃を薄膜にした場合、50 Å以下で膜の表裏の表面状態が混成し3次元物質ではなく2次元系と考えるべきだと示されました。そしてそのような混成効果によって3次元では表面状態であったバンドの分散にギャップが生じますが、次元が変わってもトポロジカルな物質であることは変わりません(図2(b)、30 Å)。興味深いのはさらに膜厚が薄くなった場合(図2(c)、20 Å)には通常の絶縁体へと相転移が起きることが予言されていることです。詳細は省きますが、理論計算との比較によって図2(b)、(c)においてそのようなトポロジカル量子相転移が確かに起きていることが実験的に明らかになりました^[7]。

4. おわりに

2、3で示したように高分解能角度分解光電子分光法によってトポロジカル絶縁体を超薄膜にしたときの興味深い現象を測定することができました。今後さらに研究を進めてトポロジカル表面状態の新たな性質を明らかにしたいと思っています。

本研究を遂行する上で(課題番号21-524、22-521) ビームライン担当の木村真一准教授、宮崎秀俊博士をはじめUVSOR、分子研のスタッフの皆様にはお世話になっています。特に2010年度よりトップアップ運転が定常化されたことに伴い、入射時の待ち時間が減りビーム強度が減衰しなくなったことで測定時間が大幅に短縮されてユーザーとしては大変ありがたく思っています。この場を借りて皆様に厚く御礼を申し上げます。

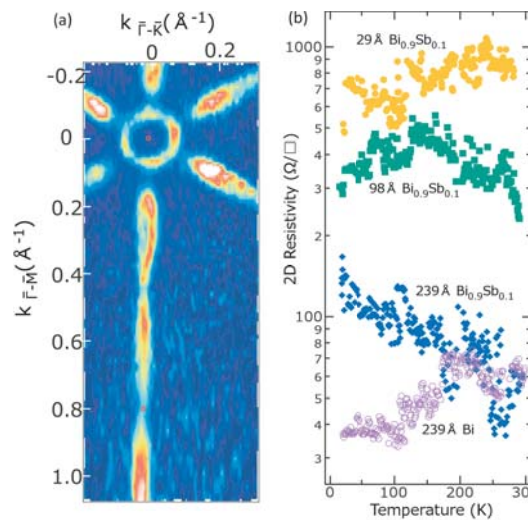


図1 (a) ビスマスアンチモン (Bi_{1-x}Sb_x) 合金超薄膜 (30 Å 厚さ) のフェルミ面。(b) ビスマス (239 Å) およびビスマスアンチモン合金超薄膜 (239、98、29 Å) 電気抵抗率の温度依存性。

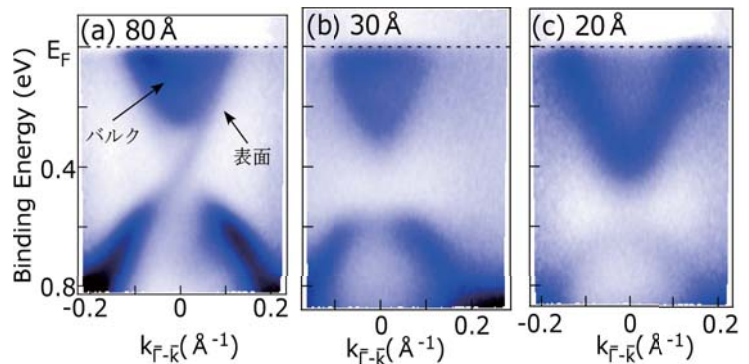


図2 ビスマスセレン (Bi₂Se₃) 超薄膜のバンド構造。厚さはそれぞれ80 Å (a)、30 Å (b)、20 Å (c) であり、30 Å まではトポロジカル絶縁体、20 Å は通常の絶縁体である。

参考文献

- [1] 村上修一、平原徹、松田巖、日本物理学会誌 Vol. **65**, No. **11**, 840 (2010).
- [2] D. Hsieh *et al.*, Nature **452**, 970 (2008).
- [3] T. Hirahara *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 165422 (2010).
- [4] H. Zhang *et al.*, Nature Phys. **5**, 438 (2009).
- [5] T. Hirahara *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 155309 (2010).
- [6] H. Z. Lu *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 115407 (2010).
- [7] Y. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 165432 (2010).



ひらはら・とる

1980年米国ワシントン州生まれ、埼玉県育ち。2006年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程中退、2007年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・助教、2008年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士(理学)学位取得。専門は表面物理学。特に表面状態におけるスピン軌道相互作用が関係した電子・スピン構造と電気・スピン伝導特性に興味を持っている。