

トポロジカル半金属 Cd_3As_2 薄膜における量子化表面伝導の観測

東京大学大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 打田 正輝
物性研究所 国際超強磁場科学研究施設 徳永 将史

はじめに

波数空間においてバンド構造にねじれをもつトポロジカル物質は、新たな電子構造の理論的提案と具体的な物質の発見が相俟いながら研究領域が拡大し続けている。近年盛んに研究されているトポロジカル半金属は、トポロジカル絶縁体と同様に、バンド反転に由来するヘリカルな表面状態をもつ。一方で、対称性に守られた一部の波数ではバンド交差が解けずに残るため、三次元的なディラックまたはワイルコーンをバルク状態にもつ[1]。トポロジカル半金属において提案されている新しい輸送現象は、これらの三次元分散が磁場下において特異なランダウ準位(カイラルゼロモード)をもつことに強く由来している。また、特に単純なバンド構造をもつトポロジカルディラック半金属は、対称性や次元性を制御することにより様々なトポロジカル相を実現できるという特徴も備えており、この観点からの研究も盛んになりつつある。一方で、トポロジカル絶縁体等と比較すると、上記で挙げたような量子輸送特性の検証はいまだに立ち遅れていると言える。

本研究では、前稿[2]に引き続き、トポロジカルディラック半金属の典型物質[3,4]である Cd_3As_2 を対象としている。本物質は、高い電子移動度と長い平均自由行程をもち、その異方性は小さい。さらに、ディラック点を守る回転対称軸と安定な結晶成長方位が異なるため、トポロジカル半金属の表面軌道運動を調べる上で非常に理想的な系であるといえる。我々は、パルスレーザー堆積法と固相エピタキシー法を組み合わせた成膜手法を開発することで、薄膜の蒸発を防ぎながら非常に高温でのアニールを可能とし、既報のバルク試料を超える非常に高い結晶性をもつ Cd_3As_2 単結晶薄膜の作製に成功した[5,6]。また、この成膜手法は、トポロジカル半金属の輸送特性の研究において重要な膜厚制御性や平坦性にも優れていることがわかってきた。 Cd_3As_2 の薄膜化による利点には、膜厚変化による次元性の制御[5]、電界効果によるフェルミ準位の制御[7]、Zn 等の元素置換によるパラメータの制御[7]、ヘテロ構造や近接効果の利用による相制御、等が挙げられる。現在、これらの利点を存分に活かすことで、トポロジカルディ

ラック半金属の輸送特性の研究を精力的に進めている。

その中で、本稿では、系統的な測定によって明らかになってきたトポロジカル半金属表面における伝導状態とその量子化について紹介する[8]。半金属と強磁場は、量子極限物性の研究において非常に良い相性をもつが、トポロジカルな表面伝導の検出においても強磁場下における輸送測定がその威力を発揮した。図1に示すように、トポロジカル半金属の表面状態は途中で途切れているため一方の面だけでは量子化を起こさず、バルク内部のカイラルゼロモードを介して表(おもて)面と裏面を行き来する特異な伝導状態が実現していると考えられる。

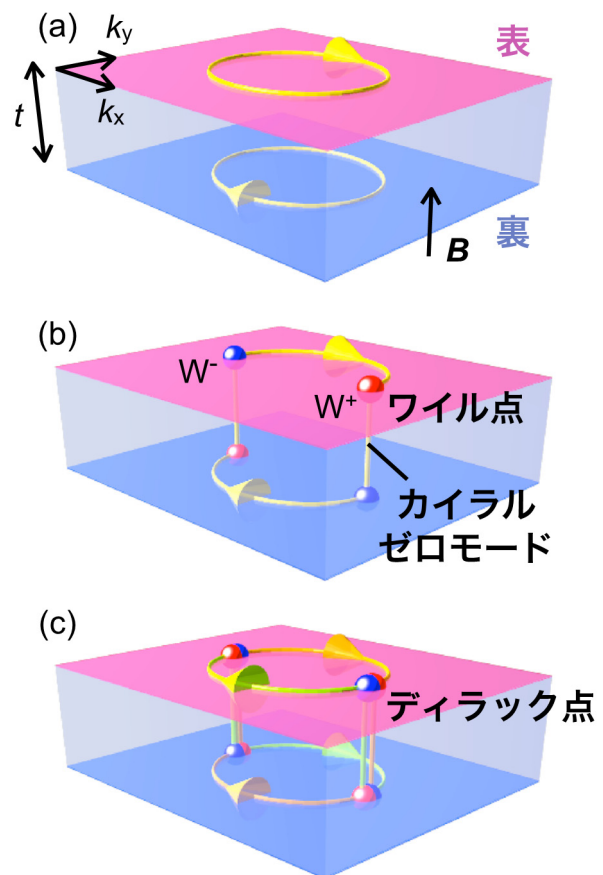


図1. (a)トポロジカル絶縁体・(b)ワイル半金属・(c)ディラック半金属の各表面における軌道運動。

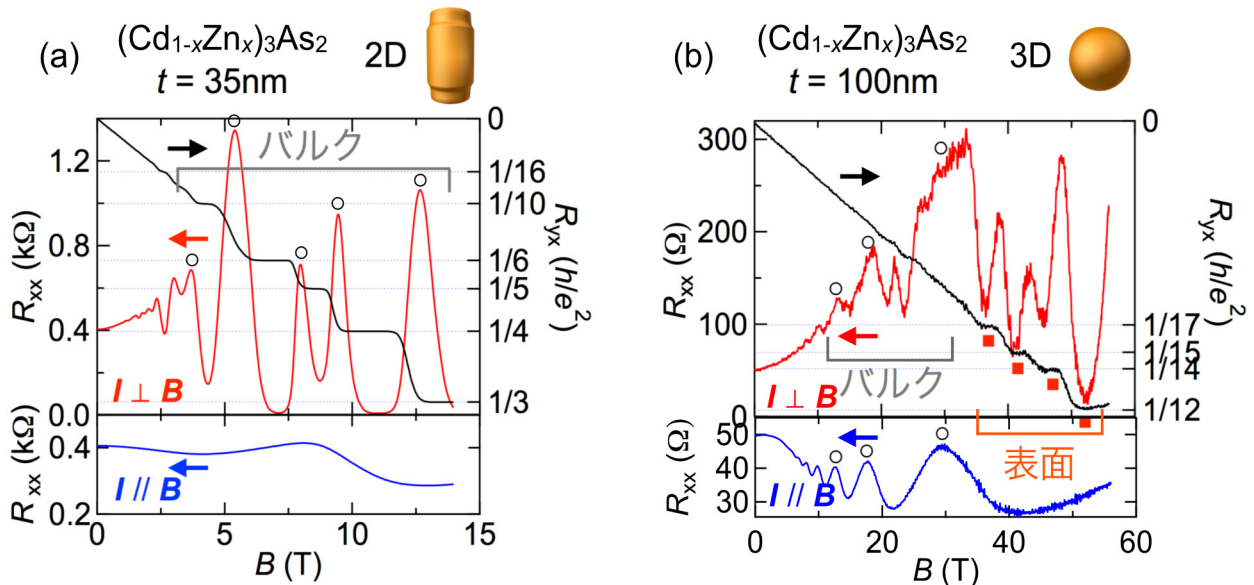


図 2. (a)膜厚 35 nm 及び(b)100 nm の(Cd_{1-x}Zn_x)₃As₂ 薄膜において観測された縦抵抗・ホール抵抗の量子化。Zn 置換量はそれぞれ $x=0.13, 0$ である。

実験結果

図 2 に、膜厚の異なる二種類の薄膜について測定された縦抵抗・ホール抵抗の磁場依存性を示す。図 2(a)は既に Zn がドーピングされている場合の結果であるが、縦抵抗 R_{xx} が明瞭なゼロ抵抗を示し、ホール抵抗 R_{yx} が広い磁場範囲にわたって量子化値をとっていることがわかる。我々は、 Cd_3As_2 薄膜において量子ホール効果の観測を初めて報告したが、図 2(a)の結果はこれに相当している[5]。すなわち、このような 35nm 程度までの薄い試料においては、量子振動の磁場方位依存性からわかるように量子閉じ込めによって二次元的なフェルミ面構造が実現しており、その量子ホール状態の振る舞いや縮退度の変化は、閉じ込めによる g 因子の変化[5]やサブバンドの形成[7]によって説明できる。

一方、100nm 程度の厚い試料では三次元的なフェルミ面構造が実現する[5]。図 2(b)に示すように、この場合には、バルク由来の振動に加えて、より高磁場において別周期の量子振動及びホールプラトーが現れていることがわかる。この振動は、二次元的であることに加えて、温度依存性から得られる有効質量がバルクの値よりもずっと大きいこと、Zn ドーピングによりスピン軌道相互作用を減少させ自明な絶縁体へ転移する過程で消失することから、トポロジカルディラック半金属の表面状態が量子化したものであると結論した。さらに、電界効果によってキャリア濃度の制御を行いながら電気伝導を測定した結果、トポロジカルディラック半金属薄膜における表面伝導は、バルク内部

の状態と独立ではなく、バルク内部のカイラルゼロモードを介した形で実現していることを明らかにした。このことは、バルク内部を介して表(おもて)面と裏面における円弧状の表面状態を行き来する三次元的な軌道伝導を反映していると解釈される。

今後の展開

Cd_3As_2 薄膜表面において量子化された伝導が観測された背景には、磁場方向に分散をもつカイラルゼロモードを介した軌道状態の実現があると考えられる。今回の実験結果は、これまで二次元の電子系でのみ実現されてきた量子化伝導が、トポロジカル半金属では三次元の系に拡張できる可能性を示している。現在、ヘテロ構造化において高い自由度をもつ、分子線エピタキシー成長によって作製された Cd_3As_2 薄膜においても同様の表面量子振動を観測することに成功している[9]。例えば、強磁性絶縁体とのヘテロ接合においては、ディラック点の分裂に由来した異常ホール効果の観測や、表面状態に対する磁気近接効果の研究が今後重要であると考えている。

謝辞

本研究は、東京大学の西早辰一、中澤佑介、川崎雅司、東京大学物性研究所の栗原綾佑、秋葉和人、三宅厚志、理化学研究所創発物性科学研究センターの M. Kriener、田口康二郎、各氏をはじめとした多くの方々との共同研究によるものである。なお、本研究は、科学技術振興機構さき



がけ(No. JPMJPR18L2)・CREST(No. JPMJCR16F1)及び日本学術振興会科学研究費(No. JP18H01866、JP15K05140)の支援の下に行われた。

REFERENCES

- [1] S. Murakami, *New Journal of Physics* **9**, 356 (2007).
- [2] 打田 正輝、徳永 将史、物性研だより **58-2**, 11 (2018年7月)
- [3] Z. Wang, H. Weng, Q. Wu, X. Dai, and Z. Fang, *Physical Review B* **88**, 125427 (2013).
- [4] Z. K. Liu, J. Jiang, B. Zhou, Z. J. Wang, Y. Zhang, H. M. Weng, D. Prabhakaran, S-K. Mo, H. Peng, P. Dudin, T. Kim, M. Hoesch, Z. Fang, X. Dai, Z. X. Shen, D. L. Feng, Z. Hussain, and Y. L. Chen, *Nature Materials* **13**, 677-681 (2014).
- [5] M. Uchida, Y. Nakazawa, S. Nishihaya, K. Akiba, M. Kriener, Y. Kozuka, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, N. Nagaosa, Y. Tokura, and M. Kawasaki, *Nature Communications* **8**, 2274 (2017).
- [6] Y. Nakazawa, M. Uchida, S. Nishihaya, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, and M. Kawasaki, *Scientific Reports* **8**, 2244 (2018).
- [7] S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, and M. Kawasaki, *Science Advances* **4**, eaar5668 (2018).
- [8] S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, R. Kurihara, K. Akiba, M. Kriener, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, and M. Kawasaki, *Nature Communications* **10**, 2564 (2019).
- [9] Y. Nakazawa, M. Uchida, S. Nishihaya, S. Sato, A. Nakao, J. Matsuno, and M. Kawasaki, *APL Materials* **7**, 071109 (2019).

