

High-resolution ARPES study of possible topological superconductors $TlxBi_2Te_3$ and $Pb/TlBiSe_2$

著者	Trang Chi Xuan
number	86
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3226号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00126093

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	Trang Xuan Chi	提出年	平成31年
学位論文の 題目	High-resolution ARPES study of possible topological superconductors $Tl_xBi_2Te_3$ and $Pb/TlBiSe_2$ (高分解能 ARPES によるトポロジカル超伝導体候補物質 $Tl_xBi_2Te_3$ および $Pb/TlBiSe_2$ の研究)		

論文目次

I. Introduction

Three-dimensional topological insulators (3D TIs) represent a new quantum state of matter with an insulating bulk and a conducting surface state (SS). The discovery of TIs stimulated the search for even more exotic state of matter, topological superconductors (TSCs) which host Majorana fermions¹. Experimental identification of Majorana fermions has been a big challenge since the number of TSC candidates are limited. So-far proposed TSCs are categorized into two types, an intrinsic and artificially engineered TSCs. The former is highlighted by the bulk materials characterized by an odd-parity superconducting pairing, while the latter is a hybrid system (heterostructure) consisting of a metal or semiconductor proximitized with a *s*-wave superconductor². In this thesis, electronic states of two TSC candidates, i.e. a bulk TI-doped Bi_2Te_3 and a heterostructure of $Pb/TlBiSe_2$, were investigated by angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES).

II. *p*-type topological superconductor candidate $Tl_xBi_2Te_3$

TI-doped Bi_2Te_3 is a new superconductor derived from prototypical TI Bi_2Te_3 . We have performed ARPES study of $Tl_{0.5}Bi_2Te_3$, and determined band structure of both bulk and SS using tunable photons in synchrotron radiation. The Fermi-surface (FS) mapping signifies multiple hole pockets surrounding the Z point of bulk Brillouin zone (BZ). These pockets originate from direct hole doping into the valence-band top, providing an experimental evidence that $Tl_{0.5}Bi_2Te_3$ is the first case of a superconductor derived from a hole doping of TI. We found that the bulk FS does not enclose any time-reversal invariant momenta, suggesting that $Tl_{0.5}Bi_2Te_3$ is unlikely a 3D TSC. ARPES intensity measured across the BZ center also reveals the existence of Dirac-cone SS whose electron filling can be controlled by surface aging. This makes $Tl_xBi_2Te_3$ an excellent platform to realize two-dimensional (2D) TSC.

III. 2D topological superconductor candidate Pb/TlBiSe₂

While the search for TSCs in superconducting hybrids has been intensively performed, no firm evidence for the Majorana fermions was reported to date. In this study, we propose a new platform of 2D TSC. By using molecular beam epitaxy, we have succeeded for the first time in fabricating high-quality single-crystalline ultrathin Pb films on top of TI, TlBiSe₂. The valence-band structure of pristine TlBiSe₂ shows a topological SS around the $\bar{\Gamma}$ point. In contrast, in Pb/TlBiSe₂, a clear signature of hybridization between the quantum well states of the Pb film and the topological SS was observed. This is unexpected from the photoelectron escape depth (0.5-1 nm) which is much shorter than the film thickness (~5 nm), and can be explained in terms of *topological proximity effect* where the Dirac-cone SS migrates onto the top surface of the Pb film after interfacing. Intriguingly, we clearly observed a signature of superconducting gap in the migrated topological SS below T_c of bulk Pb. These results strongly suggest that one can realize 2D TSC in Pb/TlBiSe₂ without relying on the conventional superconducting proximity effect.

IV. Conclusion

We have performed ARPES studies of two different types of TSC candidates, (i) Tl_{0.5}Bi₂Te₃, a superconductor derived from a hole-doped TI, and (ii) a heterostructure consisting of the Pb ultrathin film and TlBiSe₂. By revealing the FS topology, the band structure, and the superconducting-gap properties of these systems, the present study has added two new categories of 2D-TSC candidates. A next important challenge is to directly resolve signature of Majorana fermions in the vortex core under the magnetic field, using local spectroscopy techniques.

References

- 1) J. Alicea, Rep. Prog. Phys. **75**, 076501 (2012).
- 2) L. Fu, and C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. **100**, 096407 (2008).

論文審査の結果の要旨

トポロジカル絶縁体の発見を契機にして、トポロジカル超伝導体と呼ばれる新しい量子相の研究が精力的に行われている。トポロジカル超伝導体は量子計算に利用可能なマヨラナフェルミオンを内包することから、新しい種類のトポロジカル超伝導体の探索とマヨラナフェルミオンの実証が現在急務とされている。本論文では、トポロジカル絶縁体をベースとした新しいバルク超伝導体、およびトポロジカル絶縁体と低温超伝導体の接合系において、それらのトポロジカル超伝導性を角度分解光電子分光(ARPES)を用いて明らかにした。

本論文では、まず典型的なトポロジカル絶縁体である Bi_2Te_3 に Tl をドーブした $\text{Tl}_x\text{Bi}_2\text{Te}_3$ において、放射光を主に用いた ARPES 実験を行い、3次元ブリルアンゾーン全体に亘る電子状態を直接決定した。その結果、バルクのフェルミ面は Z 点付近の 6 個のホールポケットから構成されることを明らかにした。このことは、典型的なトポロジカル超伝導体候補物質である $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ において、電子キャリアが超伝導を担うのに対して、 $\text{Tl}_x\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ではホールキャリアが超伝導に密接に関与することを示したものであり、この物質における 3次元トポロジカル超伝導性の議論に重要な知見を与えるものである。本研究ではさらに、超伝導試料においても明確なトポロジカル表面状態が残存していることを見出すとともに、表面物理吸着によってディラック電子キャリア数を幅広い範囲で制御できることを明らかにした。これらの結果は、 $\text{Tl}_x\text{Bi}_2\text{Te}_3$ において 2次元トポロジカル超伝導が実現している可能性を示すものである。

続いて本論文では、トポロジカル絶縁体 TlBiSe_2 の劈開表面上に、高品質 Pb 単結晶薄膜を分子線エピタキシー法によって作製し、その電子状態を ARPES によって明らかにした。その結果、Pb 薄膜の量子閉じ込め効果により形成された量子井戸準位に由来したエネルギーバンドを明確に観測し、さらに、トポロジカル表面状態がこれらの量子井戸準位と強くバンド混成することが明らかになった。このことは、 TlBiSe_2 の表面にもともと局在していたトポロジカル状態が、Pb 薄膜と TlBiSe_2 の接合によって Pb 薄膜の表面付近まで移動したことを示唆しており、トポロジカル近接効果と呼ばれるエキゾチックな量子効果がこの系で発現していることを強く示唆している。加えて本研究では、極低温における超高分解能 ARPES 測定によって Pb 由来の量子井戸準位における超伝導ギャップの観測に成功し、Pb 薄膜の超伝導転移温度がバルクのものと同様であることを明らかにした。さらに、トポロジカル表面状態においても量子井戸準位と同様の大きさの等方的な超伝導ギャップを観測した。これらの結果は、Pb/ TlBiSe_2 系において 2次元トポロジカル超伝導が実現していることを示唆しているとともに、これまで広く用いられてきた超伝導近接効果を用いずともトポロジカル超伝導が実現できるという、新しい概念を提案するものである。

バルク物質とヘテロ接合系という二種類の異なる系において新しいトポロジカル超伝導体候補物質の電子構造を実験的に明らかにしたこれらの成果は、Trang Chi Xuan が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、Trang Chi Xuan 提出の博士論文を、博士(理学)の学位論文として合格と認める。