

氏 名	賀 形
授与した学位	博 士
専攻分野の名称	理 学
学位授与番号	博甲第6045号
学位授与の日付	2019年 9月25日
学位授与の要件	自然科学研究科 地球生命物質科学専攻 (学位規則第4条第1項該当)
学位論文の題目	Pressure-driven superconductivity in topological insulators (トポロジカル絶縁体の圧力誘起超伝導)
論文審査委員	教授 久保園芳博 准教授 後藤秀徳 教授 横谷尚睦 准教授 小林夏野
学位論文内容の概要	
<p>Topological insulators are quantum electronic matters with a bulk insulating gap accompanied by the topologically protected gapless surface states or edge states. In analogy with topological insulators, topological superconductors possess a bulk superconducting gap together with the gapless Majorana bound states (Andreev bound states). Beyond the fundamental interests from view of condensed matter physics and materials science, the primary motivation for studying topological materials would originate from the expectation as an ideal platform for detecting and manipulating Majorana fermions. In the Doctor thesis, the author aims at precisely clarifying the structural behavior of tetradymite-type (A_2B_3) topological insulators under pressure, and at investigating their physical properties under pressure, in particular searching for novel quantum phases such as superconductivity.</p> <p>In chapter 3, the author reports crystal structure of Ag-doped Bi_2Se_3 in a pressure range of 0 – 30 GPa, showing that two structural phase transitions occur at 8.8 and 24 GPa. In chapter 4, pressure dependence of electric transport properties of Ag-doped Bi_2Se_3 is reported at 0 – 26 GPa, and the emergence of superconductivity is confirmed at 11 GPa. From magnetic field (H) dependence of superconducting transition temperature (T_c) at 11 and 20.5 GPa, the reduced magnetic field (h^*) - t ($t = T/T_c$) plots are obtained, suggesting a possible p-wave pairing in superconductivity. In chapter 5, the author reports pressure dependence of crystal structure of $Bi_{2-x}Sb_xTe_2Se$ ($x = 0, 0.25, 0.5, \text{ and } 1.0$) clarified on the basis of synchrotron X-ray diffraction (XRD) measurement at 0 – 30 GPa. Three and four phases are found in Bi_2Te_2Se and $Bi_{2-x}Sb_xTe_2Se$ ($x = 0.25, 0.5, \text{ and } 1.0$), respectively. Phase II' (monoclinic structure ($C2/c$, No. 15)) is observed in $Bi_{2-x}Sb_xTe_2Se$ at $x \neq 0$. In chapter 6, the author fully reports the electric transport properties of $Bi_{2-x}Sb_xTe_2Se$ ($x = 0, 0.25, 0.5, \text{ and } 1.0$) up to 15 GPa. At ambient pressure, all samples show no superconductivity down to 2.0 K. However, the superconductivity emerges in phase I by applying pressure, and the value of superconducting transition temperature, T_c, gradually increases with pressure. The h^* - t plots are followed by p-wave polar model, indicating a possible p-wave superconducting pairing, as in Ag-doped Bi_2Se_3. In chapter 7, the author reports crystal structure and electric transport properties of $BiSbTeSe_2$ under pressure. Two structural phase transitions are found at 0 – 29 GPa. Superconductivity is observed in phase II, by applying pressure; Te amount in $Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$ seems to be a key for the phase (phase I or phase II) in which superconductivity emerges. Through this Doctor thesis, the author has clarified the superconducting behavior of topological insulators under pressure, and discussed the topological nature in superconductors. This is the first systematic study for the pressure-driven superconductivity in topological insulators.</p>	

論文審査結果の要旨

He Tong氏は、トポロジカル絶縁体と呼ばれる一連の物質群に圧力を印加することによって、超伝導が出現することを見だし、超伝導を引き起こす結晶相がどのようなものであるか、その超伝導がどのような超伝導カップリングによって引き起こされるかを詳細に研究した。

トポロジカル絶縁体は、バルクが絶縁体で、表面にギャップのない線形の分散関係が現れる極めて興味深い物質である。この物質を基礎にして超伝導相を作り出す試みが、現在、世界各地で進められている。He Tong氏は、今回、金属原子をドーピングしたトポロジカル絶縁体として、銀 (Ag) をドーピングした Bi_2Se_3 の圧力下での電気抵抗の温度依存性と結晶構造を詳細に調べた。その結果、0 から 30 GPa までの圧力領域で 2 つの構造相転移が存在し、低圧から菱面晶系、単斜晶系、正方晶系へと変化することを示した。さらに、第 2 番目の結晶相において低温超伝導相 (超伝導転移温度 $T_c = 4 - 6 \text{ K}$) が出現し第 3 番目の結晶相で消滅すること、単斜晶系の中の高圧領域で高温超伝導相 ($T_c = 7 \text{ K}$) が出現し、第 3 番目の結晶相でも維持されることを見いだした。また、これらの超伝導が通常の s 波カップリングによる超伝導ではなく、p 波カップリング超伝導 (トポロジカル超伝導) の可能性があることを明らかにした。次に、 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ というトポロジカル絶縁体について、x ならびに y を変化させてフェルミレベルならびにディラック点の位置を系統的に変化させた物質を対象として、圧力印加によって結晶構造と電気抵抗の温度依存性がどのように変わるかを詳細に調べた。その結果 y = 1 の場合では、x を変化させることによって、構造相転移を引き起こす圧力が高圧力側に移動すること、最初の結晶相 (菱面晶系) から超伝導が出現することを明らかにした。また、その超伝導が p 波カップリングによる超伝導である可能性を示した。y = 2 については、研究が部分的に進んでおり、2 番目の結晶相から圧力誘起超伝導が現れることを示した。このように、超伝導がどの結晶相から現れるかは、Se と Te の量に依存しているようである。系統的なトポロジカル絶縁体の圧力誘起超伝導研究は、本研究が初めてであり、その意味で博士の学位論文として合であると判断する。