

氏名	石川 諒
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 8471 号
学位授与年月日	平成 30年 3月 23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	トポロジカル結晶絶縁体 SnTe に遷移元素を添加した磁性混晶の作製と磁化特性
主査	筑波大学教授 理学博士 黒田 眞司
副査	筑波大学教授 博士(工学) 大野 裕三
副査	筑波大学教授 博士(工学) 末益 崇
副査	筑波大学教授 博士(工学) 柳原 英人

論文の要旨

本論文は、トポロジカル結晶絶縁体 **SnTe** に遷移元素 **Mn** を添加した磁性混晶および **Fe** との接合構造に関する著者の研究成果を纏めたものである。本研究の対象物質である **SnTe** はトポロジカル結晶絶縁体に分類され、従来のトポロジカル絶縁体における時間反転対称性に代わって結晶の鏡映対称性によりトポロジカル性が発現する。このトポロジカル結晶絶縁体において磁化発現による時間反転対称性の破れがトポロジカル表面状態にどのような与える影響かは未だ解明されておらず、**SnTe** に磁性を導入した系を対象とした本研究の動機となっている。具体的には、**SnTe** 中に固有磁気モーメントを有する遷移元素を添加した磁性混晶、および強磁性体との接合構造という 2 つの系を取り上げ、分子線エピタキシー(MBE)法によりこれらの試料を作製し、その磁気的特性を詳しく調べた。その結果、前者の磁性混晶においては構造と磁性の相関ならびに強磁性の起源を明らかにし、また後者の接合構造では強磁性層との界面において近接効果による磁化誘起を見出すという成果を挙げている。本論文の構成は以下の通りとなっている。

第 1 章では序論として本研究の理論的背景が簡単に紹介されており、スピントロニクス、希薄磁性半導体、トポロジカル絶縁体についての解説が与えられ後、トポロジカル絶縁体において磁性が及ぼす影響を解明するという本研究の動機が述べられている。

第 2 章では本研究の背景となる項目について先行研究の結果も含めて紹介されている。まず、トポロジカル絶縁体についての一般的な解説の後、トポロジカル結晶絶縁体の代表物質である **SnTe** の物性と先行研究が紹介され、さらに **SnTe** に **Mn** を添加した磁性混晶を対象とした先行研

究の成果が詳しく説明されている。最後に通常のトポロジカル絶縁体における磁性の影響を調べた先行研究のいくつかの例が紹介されている。

第3章は本研究で用いられた実験手法の解説に充てられている。MBE法による薄膜成長、X線回折、X線吸収微細構造解析(XAFS)などの構造解析手法、ならびに磁化測定、ホール測定、偏極中性子反射率測定などの物性評価手法について詳しく解説されている。

第4章で本研究の実験結果が詳しく述べられている。まず最初に、MBE法によるSnTeの薄膜成長において、トポロジカル表面状態の観測のための必須条件となる平坦な表面を得るという目的のため、GaAs基板上に作製したCdTeテンプレートをSnTe成長の基板として用いるという新しい手法が提案され、従来用いられてきたBaF₂基板への成長と比して平坦性が大幅に改善されることが報告されている。次いで、Mn添加の混晶(Sn,Mn)Teの薄膜成長、および原子レベルの結晶構造解析と磁化測定の結果が示されている。中でも、MBE成長時のTe分子線の付加により正孔密度を制御した薄膜において、Mn組成5%で正孔密度が10²¹cm⁻³へと増加すると磁化曲線に強磁性的な振舞いが現れる一方で、XAFSによる構造解析では正孔密度の増加に伴いMnがSnサイトを置換した希釈相以外の析出物の存在が示され、強磁性は異相の析出物由来であることを示唆する結果が報告されている。さらに、温度依存性も含めた詳細な磁化測定の結果、磁化曲線のヒステリシスが通常の強磁性の場合とは反転するなどの特異な振舞いが明らかにされている。またSnTeとFeとの接合構造では、偏極中性子反射率測定により各層の磁化の大きさが評価され、FeとSnTeの界面からSnTe層側の数nmの範囲内に磁気モーメントが誘起されることを明らかにしている。

第5章でこれらの実験結果に対する考察が与えられており、正孔密度の高い(Sn,Mn)Te薄膜で観察された特異な磁化特性に対する説明として強磁性析出物を起源とするモデルが提唱され、またFe/SnTeの接合構造においては界面での近接効果によりSnTeのトポロジカル表面状態に磁化が誘起されるというメカニズムが議論されている。最後に第6章では本論文の結論が示されている。

審 査 の 要 旨

[批評]

トポロジカル絶縁体は特異な表面状態を有する物質群として盛んに研究されている。表面に出現する金属的なディラック形状のバンドは、磁化発現に伴う時間反転対称性の破れによりギャップが開くことが報告され、量子異常ホール効果などの特異な電子状態を利用した低消費電力デバイスへの応用が期待されている。最近、時間反転対称性の代わりに結晶の鏡映対称性にトポロジカル性の起源を持つトポロジカル結晶絶縁体という新たな物質群が注目を集めているが、このトポロジカル結晶絶縁体において磁化発現による時間反転対称性の破れが表面状態にどのような影響を与えるかは、理論、実験の両面において未だ解明されていない。本研究はトポロジカル結晶絶縁体の代表物質であるSnTeにおける磁性のトポロジカル性への影響という未解明の問題に動機づけられたものである。

本研究では、SnTeに磁性を導入した系として、SnTeに遷移元素Mnを添加した磁性混晶および

SnTe と強磁性体の Fe との接合構造という 2 つの異なる種類の試料を MBE により作製し、構造解析ならびに磁性の評価を行っている。その結果、前者の磁性混晶(Sn,Mn)Te においては、正孔密度の増加により一見強磁性的な振舞いが現れるものの、磁化曲線のヒステリシスが反転するなどの特異な磁化特性を示し、さらにこの特異な振舞いと異相の析出との間に相関があることが原子レベルの構造解析で明らかにされている。これはこの物質における従来のキャリア誘起の強磁性発現という定説を覆す結果であり、注目すべき成果と言える。他方、Fe/SnTe の接合構造では近接効果によりトポロジカル表面状態に磁化が誘起されることを偏極中性子反射率測定より明らかにしており、トポロジカル結晶絶縁体では初めての報告である。

以上、本研究では 2 つ異なる方法で SnTe に磁性を導入した系を実現し、種々の解析手法により磁気的特性を詳細かつ多面的に明らかにしており、トポロジカル結晶絶縁体における磁性の影響の解明という次の進展に繋がる重要な成果として高く評価される。

[最終試験結果]

平成 30 年 2 月 10 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

[結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。