

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	朱 思源
学位授与の要件	学位規則第 4 条第①・2 項該当		
論文題目			
<p>Electronic structure and carrier dynamics of ferromagnetic shape memory alloys and topological insulators</p> <p>(強磁性形状記憶合金とトポロジカル絶縁体の電子構造とキャリアダイナミックス)</p>			
論文審査担当者			
主 査	教授	木 村	昭 夫
審査委員	教授	黒 岩	芳 弘
審査委員	教授	圓 山	裕
審査委員	准教授	関 谷	徹 司
<p>固体の電氣的，熱的，磁氣的性質はその物質中の電子構造によって支配されている．さらに，固体中の電子スピンの関わる機能性材料を開発し，デバイスの超低消費電力化をすすめる研究が世界中で盛んに行われている．このようなスピン機能性物質の電子構造やダイナミクスを詳細に調べることは，一段と高い機能性を持つ新しい物質開発に役立つものと考えられ重要である．</p> <p>本学位請求論文では，巨大磁気熱量効果を示す強磁性形状記憶合金として知られる Ni-Mn-In 合金についての電子構造の研究およびトポロジカル絶縁体とその表面状態のキャリアダイナミクスの研究がまとめられている．</p> <p>1996 年にホイスラー型合金 Ni_2MnGa が顕著な磁場誘起歪を示すことが示され，磁場により原子変位を制御できることから，高速応答が可能な磁場駆動アクチュエーターへの応用展開がなされた．しかしながら磁場誘起歪みが主に双晶界面の移動によるものであることから，発生する力は実用にはまだ乏しいほど小さいものであった．2004 年以降に Ni_2MnZ ($Z=In, Sn, Sb$) という新しい強磁性形状記憶合金が発見され，2006 年には Ni-Mn-In の合金において，外部磁場により形状が完全に回復し，原理的には磁場によって 100 メガパスカルもの力を発生することができることが報告され，大きな注目を集めるようになった．このような強磁性形状記憶合金は，高温では立方晶（オーステナイト相）であるのに対し，低温ではより対称性の低い正方晶（マルテンサイト相）に構造相転移（マルテンサイト変態）をする．特に構造相転移の発現機構をミクロな立場から理解することは，より高い機能を示す実用的な強磁性形状記憶合金を開発する上で大変重要と考えられる．</p> <p>申請者は，この強磁性形状記憶合金のひとつである $Ni_2Mn_{1+x}In_{1-x}$ における構造相転移の発現機構をミクロな立場から解明するために，高輝度放射光を利用した硬 X 線光電子分光および第一原理計算による理論的手法を駆使して詳細にその電子構造を調べた．その結果，ニッケル (Ni) の電子状態が大きくスピンの向きによってエネルギー的に分裂しており，そのうちの少数スピン状態が構造相転移に大きく関わっていることが明らかとなった．また，マルテンサイト相では，フェルミエネルギー付近に擬ギャップが形成されていることが観測され，負の巨大磁気抵抗効果との関連を指摘した．</p>			

次に、申請者はトポロジカル絶縁体 Sb_2Te_3 の表面ディラック電子の非平衡ダイナミクスについての研究を行った。電子構造の観点から、電子が占有された価電子帯と非占有の伝導帯の間にエネルギーギャップ（禁制帯）が存在するのが絶縁体もしくは半導体、存在しないのが金属というように明確に区別される。一方、物質の分類においてトポロジー（位相幾何学）を用いた概念が、半導体二次元電子系において低温・強磁場下で現れる量子ホール効果において導入された。最近では量子ホール効果とは異なる種類のトポロジーを用いて物質を分類する概念が新たに見いだされ、それに対応するいくつかの物質も発見された。これらは「トポロジカル絶縁体」と分類され、その特徴として結晶内部が絶縁体で、その表面に線形のエネルギー分散関係を持つ金属状態（ディラックコーン）が存在し、あたかも光子の様に質量ゼロの粒子として振る舞う。さらに、スピン軌道相互作用により表面のディラック電子のスピンが運動量ベクトルに対して特定の方向を向く。このような特異な電子構造に起因して、電子の後方散乱が大きく抑制され、また特殊な電気磁気効果を示す事が理論的に予想されることから世界中で大きな注目を集めている。最近、磁性元素をドーピングした $(\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x)_2\text{Te}_3$ について量子異常ホール効果が観測され、大きな注目を集めている。量子異常ホール効果とは、外部磁場の無い状況で Hall 伝導度が量子化される現象のことを指す。一方、表面ディラックコーンに起因した電子輸送についてミクロな立場からの理解が乏しい状況であった。 Sb_2Te_3 は比較的早い段階でトポロジカル絶縁体と認識された物質の一つであるが、表面ディラックコーンが主に非占有状態側に存在しているため、通常の方法で観測されなかった。そこで、申請者自らの発案により、ポンプ・プローブ法に基づく角度分解光電子分光 (TrARPES) を用いて非占有電子状態の観測を行った。TrARPES では約 1.5 eV (赤外域) のポンプ光を用いて占有側の電子が非占有側に励起され、6 eV (紫外域) のプローブ光を用いて電子の緩和過程をストロボのように観測することが出来る有力な手法である。さらに、ディラック点が完全に非占有側に位置し、ポンプ光を入れる前には表面ディラックコーンがディラック点の上下で完全に空になっているという状況が得られる。この状態からポンプ光で電子を励起し、その緩和過程を観察していくと、ある一定の時間枠では、ディラックコーンの上部の電子数がよりエネルギーの低い下部よりも多い状況が生まれることを初めて観測した。このような時間を分解したディラック電子のダイナミクスは新しい量子現象のミクロな立場からの理解を助けるだけでなく、オプトエレクトロニクス分野へインパクトを与えることが期待され、申請者の研究は大きな価値を持つものである。

以上、審査の結果、本論文の申請者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

[1] Ultrafast electron dynamics at the Dirac node of the topological insulator Sb_2Te_3
S. Y. Zhu, Y. Ishida, K. Kuroda, K. Sumida, M. Ye, J. Wang, H. Pan, M. Taniguchi, S. Qiao, S. Shin, and A. Kimura
Scientific Reports **5**, 13213/1-6 (2015).

[2] Drastic change in density of states upon martensitic phase Transition for Metamagnetic Shape Memory Alloy $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1+x}\text{In}_{1-x}$
S. Y. Zhu, M. Ye, K. Shirai, M. Taniguchi, S. Ueda, Y. Miura, M. Shirai, R. Y. Umetsu, R. Kainuma, T. Kanomata, and A. Kimura
J. Phys.: Condens. Matter **27**, 362201/1-6 (2015).

参考論文

[1] Spectroscopic evidence of band Jahn-Teller distortion upon martensitic phase transition in Heusler-type Ni-Fe(Co)-Ga ferromagnetic shape-memory alloy films
K. Sumida, K. Shirai, S. Y. Zhu, M. Taniguchi, M. Ye, S. Ueda, Y. Takeda, Y. Saitoh, I. Rodriguez, J. M. Barandiarán, V. A. Chernenko, and A. Kimura
Phys. Rev. B **91**, 134417 (2015).

[2] Photoelectron Spin-Polarization Control in the Topological Insulator Bi_2Se_3
Z.-H. Zhu, C. N. Veenstra, S. Zhdanovich, M. P. Schneider, T. Okuda, K. Miyamoto, S. Y. Zhu, H. Namatame, M. Taniguchi, M. W. Haverkort, I. S. Elfimov, and A. Damascelli
Phys. Rev. Lett. **112**, 076802 (2014).

[3] X-ray magnetic circular dichroism for $\text{Co}_x\text{Fe}_{4-x}\text{N}$ ($x=0, 3, 4$) films grown by molecular beam epitaxy
K. Ito, T. Sanai, Y. Yasutomi, S. Y. Zhu, K. Toko, Y. Takeda, Y. Saitoh, A. Kimura, and T. Suemasu
J. Appl. Phys. **115**, 17C712 (2014).

[4] Electronic structures and magnetic moments of Co_3FeN thin films grown by molecular beam epitaxy
K. Ito, T. Sanai, S. Y. Zhu, Y. Yasutomi, K. Toko, S. Honda, S. Ueda, Y. Takeda, Y. Saitoh, Y. Imai, A. Kimura, and T. Suemasu
Appl. Phys. Lett. **103**, 232403 (2013).

[5] Perpendicular magnetic anisotropy with enhanced orbital moments of Fe adatoms on a topological surface of Bi_2Se_3 .
M. Ye, K. Kuroda, Y. Saitoh, K. Okamoto, S. Y. Zhu, K. Shirai, K. Miyamoto, M. Arita, M. Nakatake, T. Okuda, Y. Ueda, K. Shimada, T. Namatame, M. Taniguchi, A. Kimura
J. Phys.: Cond. Matter **25**, 232201 (2013).

[6] Quasiparticle interference on the surface of Bi_2Se_3 induced by cobalt adatom in the absence of ferromagnetic ordering
M. Ye, S. V. Eremin, K. Kuroda, E. E. Krasovskii, E. V. Chulkov, Y. Takeda, Y. Saitoh, K. Okamoto, S. Y. Zhu, K. Miyamoto, M. Arita, M. Nakatake, T. Okuda, Y. Ueda, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and A. Kimura
Phys. Rev. B **85**, 205317 (2012).