

磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合の磁化特性 Magnetic properties of magnetic topological insulator heterostructures

日下翔太郎¹, 平原 徹^{1*}

¹東京工業大学 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1 H-84

Shotaro KUSAKA¹ and Toru HIRAHARA^{1*}

¹Tokyo Institute of Technology

H-84, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8551, Japan

1 はじめに

2008 年の Bi₂Sb₃におけるトポロジカル絶縁体の実験的発見以来、世界中でこの分野の研究が爆発的に行われてきた。申請者はこれまで分子科学研究所 UVSOR の BL-5U、7U を利用してトポロジカル絶縁体超薄膜の in situ 電子状態測定を行ってきた。特に膜厚がフェルミ波長以下の場合、トポロジカル秩序が膜厚によって変わることが示された (Bi₂Se₃) [1]。さらに異種原子を混ぜることでフェルミ準位を制御できることを示した (Bi₂Te₃) [2]。また 2 次元トポロジカル絶縁体である単層 Bi 膜の成長や [3]、Bi を歪ませてトポロジカルな物質に相転移することを明らかにした [4]。さらに励起光依存の光電子分光測定により、ラッシュバ効果が顕著な Bi 薄膜における 50 年間続いてきたバルクバンドの半金属半導体転移の議論に終止符を打った [5]。さらに最近、磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合 (MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃) の作製に世界で初めて成功し、ARPES 測定によってその表面状態ディラックコーン (DC) にギャップが生じることを確認した (図 1)。この系では SQUID 測定や UVSOR の BL-4B における XMCD 測定により、Mn 層で強磁性が実現し、ARPES で測定されたギャップは確かに時間反転対称性の破れに起因していることが明らかになった。これは、これまでの磁性不純物添加によるトポロジカル絶縁体への時間反転対称性の破れの研究とは違い、原子層レベルで制御されたヘテロ構造において表面のみに磁化を導入できたユニークな研究である [6]。この磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合の研究において、SQUID 測定では室温まで面直の磁化曲線にヒステリシスが観測され、強磁性が保たれていることが示された (図 2)。これはデバイス作製などの応用上非常に重要な結果である。しかし SQUID は基本的にバルク敏感な磁化測定手法であるために、ヒステリシスがあることは間違いないものの、Si 基板の反磁性シグナルがバックグラウンドで観測され、その除去の仕方によって定量的な議論が変わってしまう。XMCD では元素選択性のためにそのような心配はない。そこで本研究では PF の BL-16A において XMCD 測定を行い、強磁性状態が実現していることを確認し、さらに sum rule を用い

た定量的解析によって強磁性の起源を明らかにすることを目的にした。

(b) MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃ ヘテロ構造

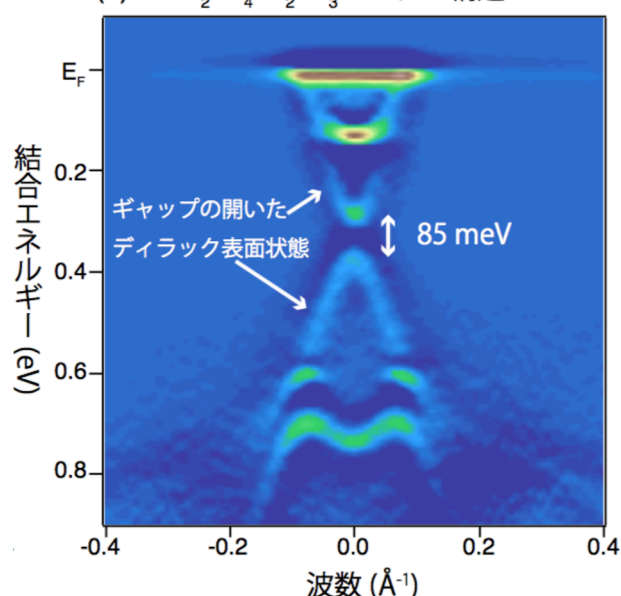


図 1 : MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃ 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造のバンド構造。強磁性 Mn 層による時間反転対称性の破れにより、表面のディラックコーンに 85meV というギャップが生じた。

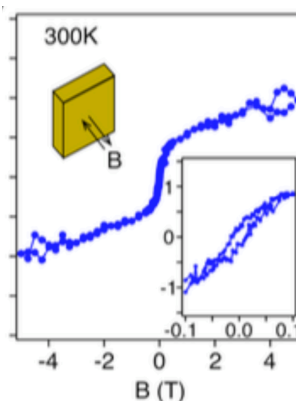


図 2 : MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃ 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の SQUID による磁化特性。測定は室温で、面直磁化を印加して行われた。

2 実験

実験は BL16A で行われた。実験室で作製したキャップした磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合 ($\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (厚さ 2QL)) を Se キャップ層によって保護し、ビームラインの超高真空装置に導入後、液体ヘリウムで冷却後 ($10 \cdot 50\text{K}$)、全電子収量法により $\pm 1.2\text{T}$ の磁場印加下で XMCD 測定を行った。

3 結果および考察

図 3 に 10K および 50K で測定されたデータを示す。Se キャップ層のせい、Mn の吸収端は大きく傾いたバックグラウンド上に検出された。図 3(a)、(b) で青がマイナス磁場での XAS スペクトル、赤がプラス磁場での XAS スペクトル、黒がその差分 (XMCD スペクトル) を表す。(c) は (a) の、(d) は (b) の XMCD スペクトルを拡大して表示したものである。バックグラウンドが安定していないため明確な結論を出すのは難しいが、一応 XMCD において L_3 エッジがマイナスに、 L_2 エッジがプラスのシグナルを見せており、XMCD シグナルが観測されたとと言える。しかし、バックグラウンドのため、sum rule を用いた定量的解析は行えなかった。さらに同様の測定を 100K でも行ったが、XAS スペクトルに時間依存性 (ビームを照射し続けていると XAS スペクトルが減衰していく) が見られ、そのせいで意味のある XMCD スペクトルが得られなかった。今後、この対策を行い (ビーム径を大きくし光密度を下げる)、残留磁化での測定と合わせて室温でも強磁性シグナルが得られるかを検証していく。

4 まとめ

XMCD 測定を磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合 ($\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (厚さ 2QL)) に対して行うことで、 $\pm 1.2\text{T}$ の磁場印加下で 10K および 50K において XMCD シグナルを得ることに成功した。今後はより高温で、さらに残留磁化での XMCD 測定を行うことにより、SQUID

で測定された室温強磁性を確認し、定量的解析を行う

ことで磁性の起源を探る。

謝辞

実験の際に、ビームライン担当の雨宮健太教授と酒巻真粧子助教に多大なご協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. B 81, 165432 (2010).
- [2] M. Aitani *et al.*, Jpn. J Appl. Phys. 52, 110112 (2013).
- [3] T. Hirahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. 107, 166801 (2011).
- [4] T. Hirahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 227401 (2012).
- [5] T. Hirahara *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 106803 (2015).
- [6] T. Hirahara *et al.*, Nano Lett. 17, 3493 (2017).

* hirahara@phys.titech.ac.jp

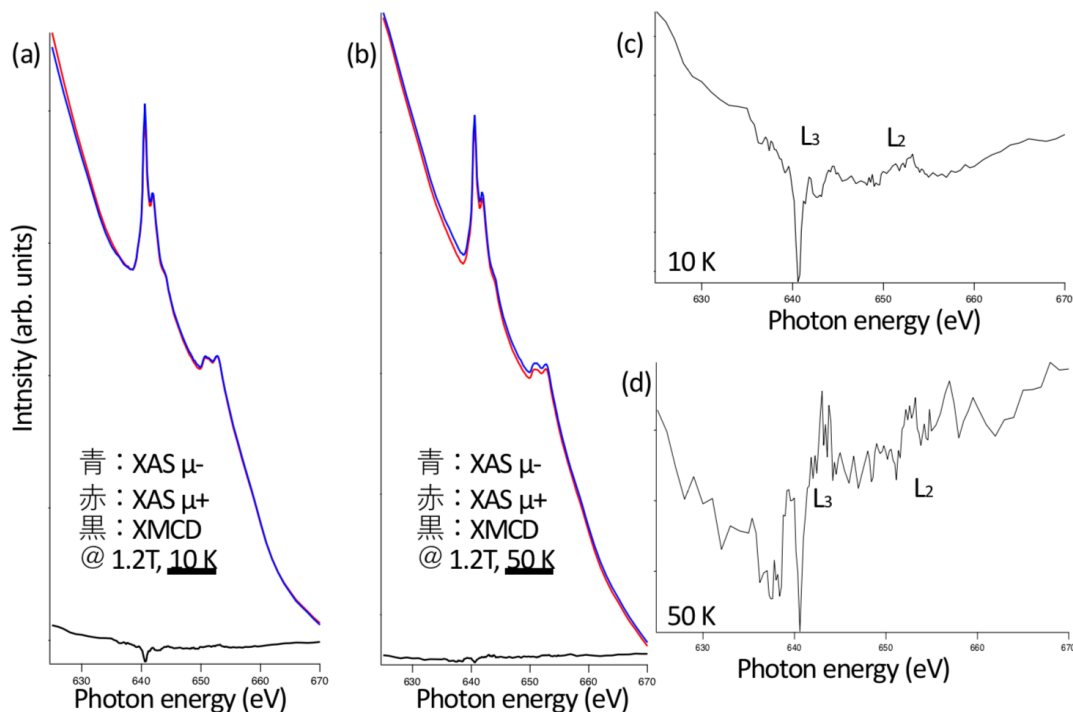


図 3 : $\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の XMCD 測定結果。(a) は 10K 、(b) は 50K で $\pm 1.2\text{T}$ の磁場を印加して行われた。青がマイナス磁場での XAS スペクトル、赤がプラス磁場での XAS スペクトル、黒がその差分 (XMCD スペクトル) を表す。(c) は (a) の、(d) は (b) の XMCD スペクトルを拡大して表示したものである。