

課題番号 : 2021A-E19
利用課題名 (日本語) : 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ・サンドイッチ構造の XMCD 測定
Program Title (English) : XMCD measurements on magnetic topological heterostructures and sandwich structures
利用者名 (日本語) : 福嶋隆司朗¹⁾, 角田一樹²⁾, 竹田幸治²⁾, 平原 徹¹⁾
Username (English) : R. Fukushima¹⁾, K. Sumida²⁾, Y. Takeda²⁾, T. Hirahara¹⁾
所属名 (日本語) : 1) 東京工業大学理学院, 2) 日本原子力研究開発機構
Affiliation (English) : 1) School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2) JAEA

キーワード :

1. 概要 (Summary)

これまで我々は世界に先駆けて開発した磁性トポロジカルヘテロ構造 $\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (MBS/BS) と $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ の磁化特性と表面ディラックコーンのギャップの有無に関して研究を行ってきた。その結果、前者では強磁性と表面のディラックコーンのギャップが明確に観測されたのに対し[1]、後者は 6K まで常磁性でディラックコーンにはギャップは存在しなかった[2]。両者が示す真逆の性質に関して、これまでのところミクロスコピックな起源は明らかになっていない。このようにトポロジカル絶縁体ベースの二次元ファンデルワールス(2D v-dW)磁性体については未解明な点が多い。さらに最近、共同研究者が上記の通常のヘテロ構造と、ヘテロ構造を2つ有するサンドイッチ構造のホール効果測定の結果には大きな違いが存在することが明らかになった[3]。これは磁性原子層間の相互作用が磁化特性を考える上で重要なことを示しているが、その詳細は明らかになっていない。2020A 期に我々は SPring-8 BL23SU において、MBS/BS、MBS/MBS/BS、MBS/BS1 QL/MBS/BS 試料(1番目は通常のヘテロ構造、2,3番目はサンドイッチ構造)に対して SPring-8 BL23SU において X 線磁気円二色性 (XMCD) 測定を行った。その結果、磁性原子層間の磁氣的相互作用が 2D v-dW 磁性体の磁化状態を安定化させていることが明らかになった。本研究ではより系統的な研究を行うため引き続き MBS/BS n QL/MBS/BS の $n=2, 3, 6$ の試料の XMCD 測定を行った。その結果 $n=1$ 以上の試料は n によらずキュリー温度(T_c)が 25-30K で通常のヘテロ構造は 15-20K、磁性層が隣接する MBS/MBS/BS ($n=0$)のみ T_c が 30-35K と高いことが分かった。

2. 実験(目的,方法) (Experimental)

トポロジカル絶縁体はバルクが絶縁体であるが、表面に金属的なスピン偏極したディラックコーンを有し、時間反転対称性が破れない限りディラック点がトポロジカルに保護されており、ギャップを開けることができない。磁性を導入して時間反転対称性を破ると、ディラック点にギャップが開くと同時に輸送特性では無磁場下での量子ホール効果である、量子異常ホール効果(QAHE)が実現する。2014年にQAHEが初めて実験的に実証されてから多くの研究が行われてきたが、その実現温度は最大でも2Kである[4]。そこで、QAHE由来の無散逸に伝導するエッジ状態をデバイスに応用するには、より高温でQAHEを実現することが求められている。

これまでトポロジカル絶縁体に強磁性を付加する方法として薄膜作製時に磁性不純物を導入する、という方法が行われていた。これに対し我々は最近、MnとSeをトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に蒸着すると、 Bi_2Se_3 の表面最上位層に Mn と Se が潜り込むことで $\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ (MBS/BS) という、秩序だった磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ接合を形成できることを明らかにした。このヘテロ構造では室温まで約 100 meV という大きなディラックコーンギャップが観測された。さらに SQUID による磁化測定では面直の磁化曲線にヒステリシスが観測され、確かにディラックコーンギャップが磁性由来のものであることが明らかになった [1]。本研究ではこれをベースに、MBS/BS n QL/MBS/BS サンドイッチ構造の試料(図 1 (b))を作製した($n=2, 3, 6$)。実験室で試料 BL23SU の超高真空装置に導入後、200-250 度で加熱を作製後に表面保護のためにキャップしたもの

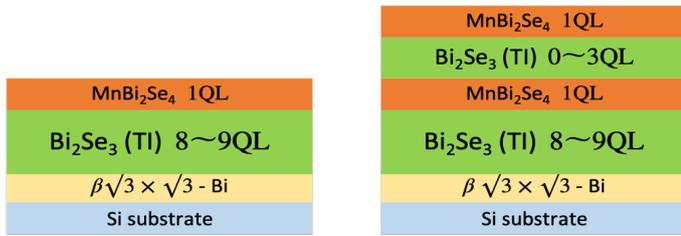


図 1(a)磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 MBS/BS および(b)磁性トポロジカル絶縁体サンドイッチ構造 MBS/BS (n QL)/MBS/BS の模式図。本研究では $n = 0, 1, 2, 3, 6$ である。

をしてキャップを飛ばすことで清浄表面を回復してから測定を行った。液体ヘリウムにより最低 6 K まで試料を冷却した。

3. 結果と考察(Results and Discussion)

これまで同様、各試料に 5 T の面直磁場を印加して XMCD スペクトルを測定した。明確な XMCD シグナルが L₃、L₂ 吸収端ともに観測されていることが分かった。

次に光エネルギーを L₃ 吸収端ピークに固定して、印加磁場を掃引して XMCD 強度を測定することで各温度での MH カーブを導出した。代表として $n=6$ のものを図 2 に示す。30 K のときは直線的な振る舞いを示すが、温度が低下するに従って直線からずれる。明確なヒステリシスは無いが、これは系が常磁性から強磁性に変化した結果と解釈できる(10T まで磁場を印加してもスピントリップ転移のようなものは見ら

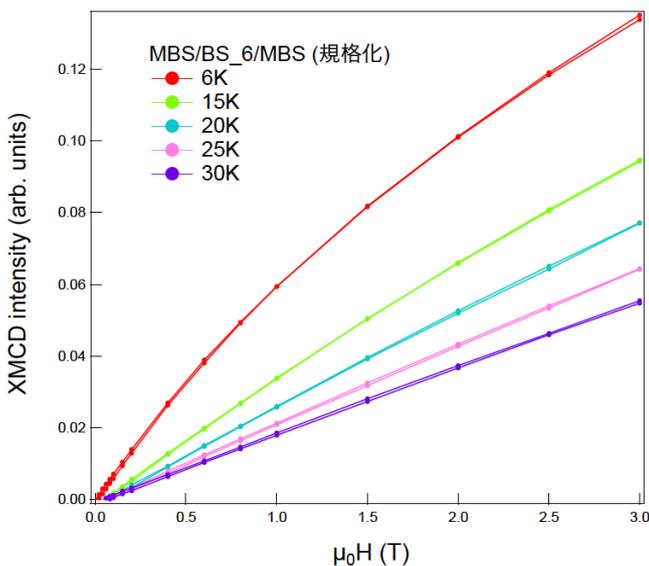


図 2 各温度における、MBS/ BS 6 QL/MBS/BS の L₃ 吸収端における XMCD 強度の磁場依存性(MH カーブに相当)。

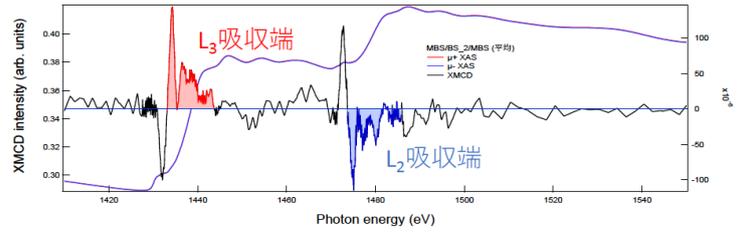


図 3 6K、10T における MBS/ BS 2 QL/MBS/BS の Se の L 吸収端における XMCD スペクトル。

れず、反強磁性ではないと思われる)。直線からのズレを丁寧に解析すると、キュリー温度 T_c は 25-30 K であることが分かった。他の試料についても同様な測定を行った結果、 $n=1$ 以上の試料は n によらず T_c が 25-30K で通常のヘテロ構造は 15-20K、磁性層が隣接する MBS/MBS/BS ($n=0$)のみ T_c が 30-35K と高いことが分かった。隣接する磁性層間の相互作用が二次元磁性を増強させている紛れもない証拠である。これは非磁性の Bi₂Se₃ 中の電子を介し磁氣的相互作用が働いていることを示している。実際に Se の L₃、L₂ 吸収端で 6K、10T で XMCD スペクトルを測定した結果が図 3 である。弱いながらもバックグラウンドに対して優位なシグナルが観測され、さらに Mn のものとは符号が異なっていた。これは Se 原子が Mn と反対方向の磁化を持っていることを意味しており、Mn からの磁気近接効果で Se に磁化が誘起されているわけではないことを明確に示している。 $n=1$ 以上の試料であまり磁化特性が変わらない点については Bi₂Se₃ が電子ドーピングされているために表面状態ではなくバルク状態が効いているものと思われる。今後図 3 の Se の XMCD スペクトルを理論計算などと比較して Se に関してより詳しい磁化の知見を得る予定である。

4. その他・特記事項 (Others)

参考文献

- [1] T. Hirahara *et al.*, Nano Letters **17**, 3493 (2017).
- [2] T. Fukasawa *et al.*, submitted to Phys. Rev. B (2021).
- [3] T. Takashiro *et al.*, to be submitted (2021).
- [4] M. Mogi *et al.*, Applied Physics Letters **107**, 182401 (2015).

謝辞:本研究は科研費 基盤研究(A)「強磁性二次元ファンデルワールス原子層物質の新奇な磁化特性の解明と制御」の助成を受けて行われました。