

工作部門を利用して

筑波大学 数理物質系 秋山 了太

1. はじめに

私の専門は磁性薄膜で、中でも特に磁性半導体を今までやって来ました。それに加えて、最近ではトポロジカル絶縁体に興味を持っています。トポロジカル絶縁体とは、バルク状態は絶縁体でありながら表面だけ金属的伝導を示すという面白い物質です。

その研究を立ち上げるにあたって、専用の分子線エピタキシー装置 (MBE) を作製する必要性がありました。現在所属する黒田・金澤研究室ではII-VI族系のMBEは稼働しているのですが、物質系の異なるトポロジカル絶縁体を成膜するには別なMBEが必要になったのです。さらに、IV-VI族磁性半導体 (トポロジカル絶縁体と物質系が似ている) も卒論生のテーマとして始める予定があったことも理由としてありました。母体となるMBEのメインチャンバーは譲渡品として研究室にありました。しかしその周辺コンポーネント、準備室や基板ホルダー、メインシャッターや真空排気系統などを色々と自作しなければなりませんでした。

私達の用いるMBEでは超高真空環境 (10^{-11} Torr 台) が必要であり、さらに基板周辺は高温になることもあり、脱ガスや汚染に気を配らなければなりません。当然用いる材質にも制約があり、どの材料をどのように加工してどういったものを作るのかを熟考することが大切でした。研究費も限られていますので、いかに低予算で、効率的に時間を節約して、なおかつ拡張性の高いMBEを立ち上げるかが問題でした。そこで私達が利用させていただいたのが学内の工作部門でした。

工作部門は工作をお願いする事ができるのに加え、公開工作室という場所が併設されており、講習を受けると誰でもボール盤や旋盤、フライス盤が無料で利用できます。必要なのは材料費のみです。両方共にMBEの立ち上げ時に急に部品がほしい時などに非常に助かりました。工作依頼の場合は堀先生 (工作部門) に懇切丁寧に相談に乗っていただき、不慣れなCAD作図についても、要点も教えていただいたりしまして、とても勉強になりました。学生さんもCAD技術を身につけることができ今後将来的にとっても役に立つことと思います。限られた研究予算の中で何より嬉しいのが、ものによって異なりますが、大体外注の1/3程度の価格で作製していただけることです。簡単な工作も柔軟に受けただけなのでとても助かっています。工作部門は今や研究には無くてはならない存在となっています。そして公開工作室は、穴を開ける、削る、切るなどちょっとした加工をしたい時にうってつけです。もちろん、本格的な工作もできます。私達はこれまでに、工作依頼と並行して公開工作室を利用してMBEの準備室の、基板ホルダーのスタック棚など様々な部品をステンレスなどで作製しました。ときにはインコネルなどの難削材も、教えていただきながら加工したこともありました。それらの工作品を使って一体どんな研究をしているのかを次にご紹介します。

2. 研究紹介

私の現在主に興味を持っている系はトポロジカル絶縁体です。トポロジカル絶縁体とは、バルク

が絶縁体であるにも関わらず表面などのエッジだけが金属状態になる物質群のことです。「トポロジ的に等価かどうか」は、連続的に変形できるか否かが1つの判断基準です。よく例えられるのが、コーヒーカップとドーナツはトポロジ的に等価であるということです。穴を新たに開けることなく両者は連続変形が可能だからです。一方で、メビウスの輪と普通の輪を比べると、両者は変形途中で一旦切断される必要があります。従って、これらはトポロジ的に等価ではない（トポロジカル数が異なる）のです。この不連続な遷移の過程で一旦切断された状態が、トポロジカル表面状態に相当します。異なるトポロジカル数をもつ状態間にはトポロジカル表面状態が出現します。

トポロジカル絶縁体では、強いスピン軌道相互作用などによってバンド反転が生じ、また時間反転対称性の要請から、異なる符号の運動量をもつキャリアは逆向きのスピンを持つことが予想されます。これは表面に電流を伴わない純スピン流が生じていることを示します。この状態は真空とトポロジカル絶縁体などのトポロジカル数の異なる絶縁体同士が接している時に、その境界で2つの状態を結ぶ状態として定義されるため、通常の化学的表面状態とは異なり、結晶中での電子散乱や電子格子相互作用、ランダムネスの影響を受けません。

この表面状態は図1に示すように、伝導帯と価電子帯の間にディラックコーンの形で生じます。グラフェンでも同様のディラックコーン型のバンド分散となりますが、大きく違うのは、そのバンドがスピン分極しているという点です。また、ディラック粒子が伝導を担うため、理論上はキャリアの質量がゼロとなり、移動度が極めて大きくなることが予想されています。従って、応用の面からは全く新しいスピンドバイスの創出が期待されていますし、物理学上も新しい現象の金脈として多

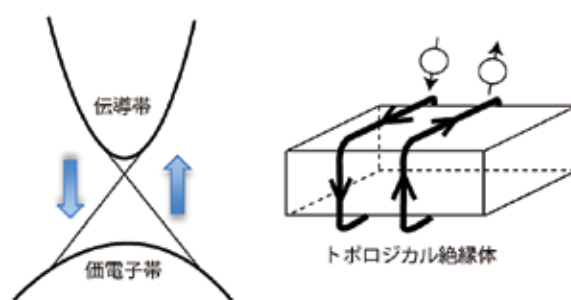


図1 左：伝導帯と価電子帯の間に生じる表面状態（ディラックコーン）。
右：トポロジカル絶縁体表面に生じる純スピン流。

くの研究者が研究を行っています。

私達は、そのなかでも最近実験的に発見されたトポロジカル結晶絶縁体SnTeに注目しています。トポロジカル絶縁体は、時間反転対称性のある物質において強いスピン軌道相互作用によって、トポロジカル表面状態が出現しますが、トポロジカル結晶絶縁体では時間反転対称性ではなく空間反転対称性がトポロジカル表面状態の起源となっています。SnTeが空間反転な面{001},{111},{110}を持つように、空間反転対称性を有する結晶において出現すると予測されています。このトポロジカル結晶絶縁体は新しいトポロジカル絶縁体であるため、まだ性質がほとんど明らかではなく今後の研究が期待されています。

トポロジカル絶縁体では金属状態が現れるのが表面であるため、新奇現象の探索など、電気伝導でトポロジカル絶縁体を調べるとき、バルク部の電気伝導をいかに抑えるかが鍵となってきます。そのため、結晶成長条件の最適化やドーピング等によってバルク部のキャリアを減らし、表面伝導を優勢にさせることが重要です。私達も現在、SnTeにおいて表面トポロジカル状態由来の電気伝導を測定できるように日々試行錯誤をしているところです。図2にSnTe薄膜のその場観察の高速電子線回折像の一例を示します。本当にトポロジカ

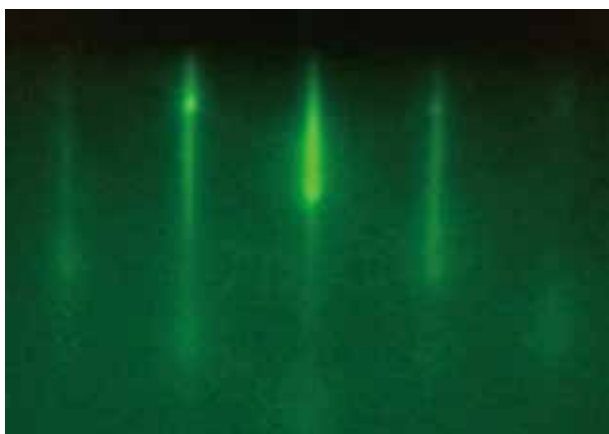


図2 SnTe薄膜のRHEED回折像。

ル表面状態が生じているかを確認するには、スピン分解光電子分光（スピン分解ARPES）が極めて有効な手段であり、バンド構造を直接的に確認できるので、ディラックコーンが存在するか否か、フェルミレベルはどこにあるのかなど貴重な情報が得られます。

今後私達は成長条件の最適化を行い、電気伝導測定によってトポロジカル絶縁体に特有の2次元伝導性を確認したいと考えています。さらに、スピン分解ARPESなどでバンド構造の観察を行い、どのような結晶状態をとればトポロジカル表面状態が保護されるのかを明らかにすることで、未だ不明なトポロジカル結晶絶縁体のトポロジカル表面状態発現条件について手がかりを得たいと考えています。将来的には、トポロジカル絶縁体が磁場を用いずともスピンの分極していることを利用して、新奇スピンドバイスを作成することを目指しています。大洋のように可能性が広がったこの物質系において、基礎・応用の両面から研究を進めていきたいと考えています。

3. 今までの工作センターとの関わり（工作をお願いしたものなど）

これまでに、主にお願ひしたものは上述のMBE、自作ALD（原子層堆積）装置、および自作真空蒸着

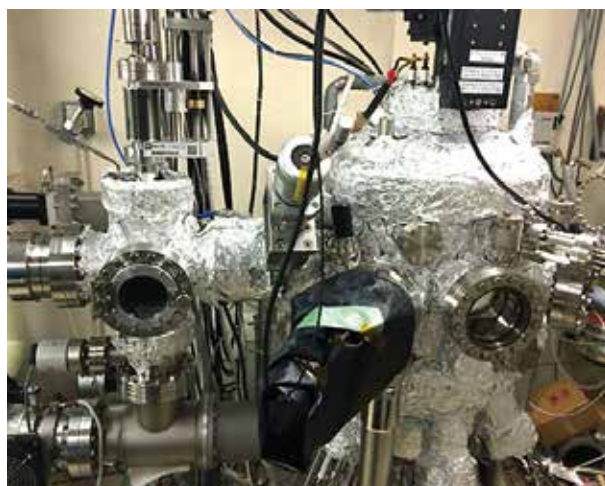


図3 稼働中のMBE装置。



図4 左：真空ゲージ用ポート 右：リークバルブ



図5 MBE準備室のサンプルホルダー棚。ステンレス板などを旋盤を用いて加工し、ネジで組み立てている。これ全体を引き上げる機構も自作。

装置の各部品になります。まずMBEですが、図3に完成して現在稼働している写真を示します。このMBEでは溶接によって真空ゲージポート・リークバルブを付けていただきました（図4）。また、公開工作室利用でM1の学生の藤澤君が準備室の棚をステンレスで作りました（図5）、サンプルホルダーはモリブデンで工作していただきました。自作ALD装置（図6）では、およそ4割程にあたる部品を作



図6 稼働中のALD装置。右上に写っているのが成膜チャンパー。この内部にサンプル加熱台などがある。



図7 公開工作室を利用し、蝶番やOリング収納溝などを作製。売り物と遜色ない出来栄に。

製していただきました。ALD装置は主に酸化膜の成膜に用いますが、購入すると特許の関係から非常に高額になります。そこで、私達の研究室では装置を自作することになりました。工作いただいたのは成膜チャンパーを固定する板に始まり、チャンパー内部のサンプル加熱台、上部ガス導入蓋などです。最後に真空蒸着装置についてですが、こちらも用途に特化するため、及び資金面から自作を行いました。チャンパー上下の蓋（排気や回転導入端子を取り付ける場所）やチャンパー内部の原料取付台などの加工をしていただき、公開工作室ではICF203大きさのOリング密閉タイプアクセスドアを作らせていただきました。作製したCAD図面を元に、こちらもM1の藤澤君が堀先生から有

益なご助言をいただきながら作製しました。売っているものに引けを取りません（図7）。このように非常に多くの物について、納期や機能についていつもワガママを聞いていただき、お願いしたり作らせて頂いております。

4. 工作部門に期待すること

このように私達は、日々の研究をする上で工作部門には非常にお世話になっており、特に装置を作りたい時、改造したいときにはとても助かっております。こうした貴重な部門はぜひ大切にしてください。学内の研究の活性化につながってくればと願っています。普段からご相談や工作依頼などでこちらも勉強させて頂く機会が多く、自分の手で図面を引いて工作するというのは、ものづくり教育の効果が期待できますし、研究テーマを自分のものとして隅々まで理解するのに、とても大切なことだと思います。そういう意味でも工作部門には本当に感謝しております。ここで、もし可能ならばということで希望を以下に述べさせていただきます。工作部門は人気がありますし、特に大型プロジェクトなどの工作依頼が入っている時は、仕方ないことですがなかなかすぐに作って下さいというわけにはいかないこともあります。そういう時は公開工作室も利用しますが溶接や切断など一部の工作はお願いするしかないものもあります。特に、急を要する加工について外注でなく学内でできることのメリットは非常に大きいと思います。もちろん費用や人手の問題がありますから簡単ではないと思いますが、今後、もしそういった急な工作依頼にもご対応いただけるようなシステムが出来たとすれば喜んで使わせていただきたく思っております。

今後、工作部門のますますのご発展を祈念し、学内の研究もそれに支えられて実っていくことを心より願っております。