



Title	トポロジカル絶縁体におけるフェルミ準位・バンドギャップ制御
Author(s)	
Citation	令和5（2023）年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書．2024
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/95166
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

令和5年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな 氏名	えん こうらく YUAN KANGLE	学部 学科	理学部 物理学科	学年	3 年
ふりがな 共 同 研究者氏名		学部 学科		学年	年
					年
					年
アドバイザー教員 氏名	木村 真一	所属	生命機能研究科		
研究課題名	トポロジカル絶縁体におけるフェルミ準位・バンドギャップ制御				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				

研究目的：

近年、物性物理学の分野ではディラック・ワイル半金属などの「量子物質」の研究がさかんに行われている。その中の1つに、トポロジカル絶縁体(Topological Insulator: TI)がある。金属と違い、トポロジカル絶縁体は表面だけに電流が流れ、内部は流れない(図1)。つまり、トポロジカル絶縁体の内部は絶縁体、表面が金属である。十数年の研究で、科学者たちは多くのトポロジカル絶縁体を発見した。代表的なものとして、 HgTe/CdTe , $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$, Bi_2Se_3 , がある。その中で最も有名な Bi_2Se_3 の特殊なバンド構造が、図2左の模式図である。この図で、下は価電子帯、上は伝導帯、真ん中の部分は禁制帯である。一般的な絶縁体にとって、禁制帯のところでは電子が存在しないが、トポロジカル絶縁体の表面電子状態から見ると、アップスピン状態とダウンスピン状態両方がある、スピン偏極になっている。この表面電子状態は、角度分解光電子分光(ARPES)実験により観測されており、図2右側のはその結果である。

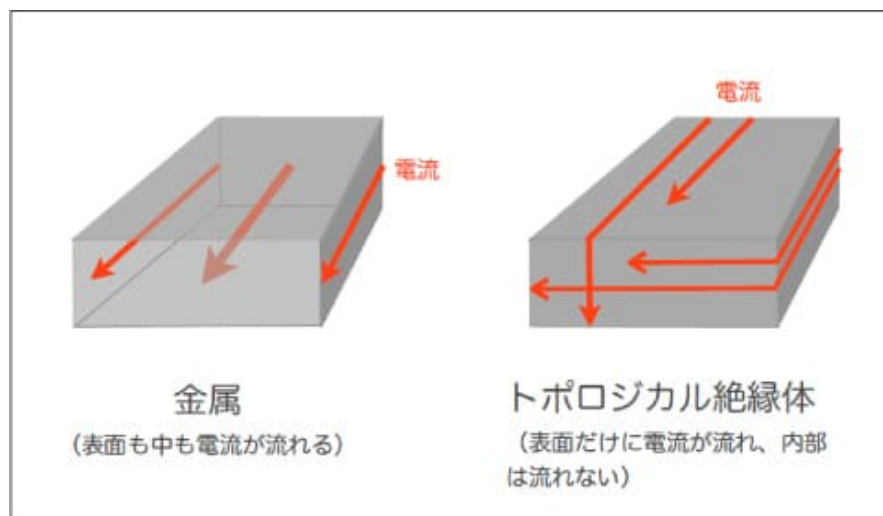


図1：金属（左）とトポロジカル絶縁体（右）の電流の流れ。

https://www.tel.co.jp/museum/magazine/material/150327_crosstalk01/02.html

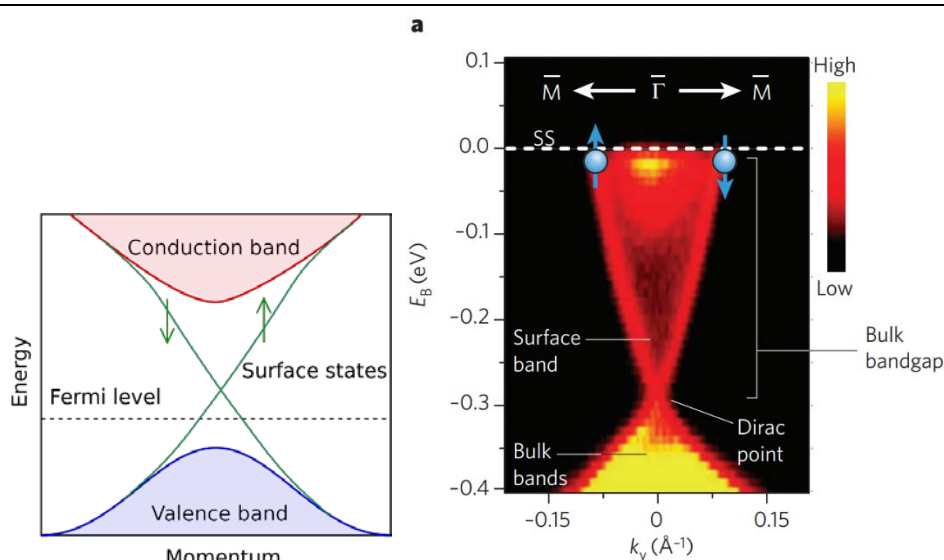


図 2 : トポロジカル絶縁体の模式図 (左) と ARPES による Bi_2Se_3 のバンド構造 (右)

Moore, J. E. The birth of topological insulators. *Nature*. **464**, 194-198 (2010).

私たちは高校物理で電子を学んだが、実は電荷を持つだけでなく、電子にはスピンの自由度がある (図 3)。地球が自転しているように、電子も似ている特性がある。スピンの特性を利用して製造される電子部品をスピントロニクスデバイスと呼ぶ。従来の電子デバイスは、電子の電荷流動を利用して伝送情報を記憶するだけである。スピントロニクス素子は情報処理過程において、スピンのみを転送担体として利用することがで、エネルギー消費を大幅に低減することができる。スピントロニクスデバイスが動作している場合、発生する熱は少ない。一般的な電子デバイスに比べて、より多くのエネルギーを消費してデバイスを放熱する必要はなく、比較的省エネルギーである。ハードウェア分野に応用できれば、ムーアの法則を破ることが期待できる。ただし、電流の検出には電流計があるが、スピンの流れであるスピン流を検出したいときにはスピン流計は存在しない。このことがスピンの検出問題であり、その応用が非常に困難になっている。現時点では、スピンを電流に変えて検出することが唯一の方法である。その場合、この変換にはトポロジカル界面が有効である。

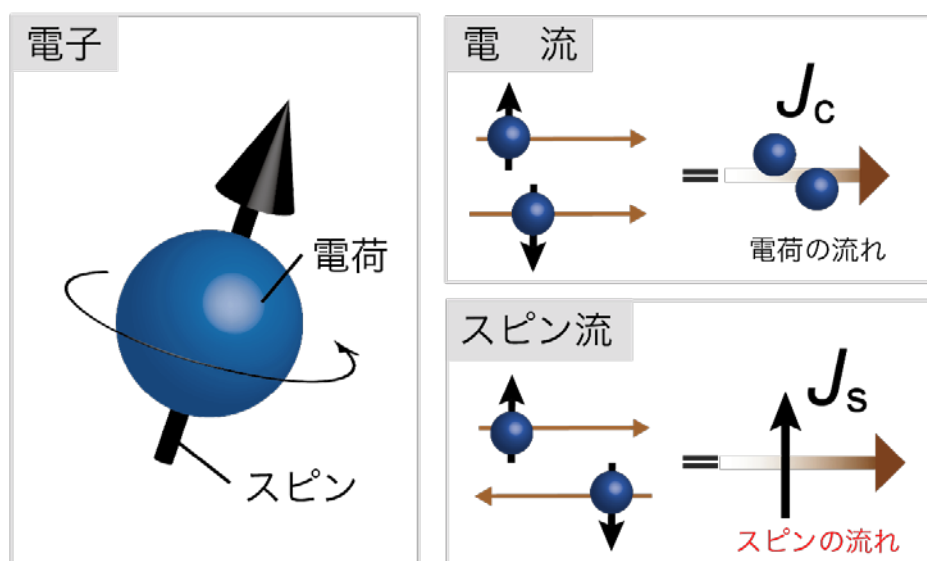


図 3 : 電子のスピンの概念図 (左) と、電流とスピン流の違い (右)。

<http://www.ndesrc.eng.iwate-u.ac.jp/koba-yanagi/spintronics/>

そこで今回の実験の目的は、トポロジカル界面を作ることである。候補物質は α -Snであり、この物質は Bi_2Se_3 と同じスピン偏極した真空との界面を持つことが予想されている、非常に良いトポロジカル絶縁体である。ただし、 α -Snを得るためには、図4に示したようにSnを薄膜化したものに格子変調を加える必要があるため、格子定数が僅かに異なっている基板上に成膜する必要がある。そこで、格子定数のミスマッチが0.15%であるInSbを基板として使った。本研究では、 α -Snを作るための実験環境を整備し、InSb基板上に α -Sn薄膜を製膜して単結晶薄膜が出来たかどうか調査することにした。期待される真空との界面が得られた際には、今後、その界面の電子状態を角度分解光電子分光で観測する計画である。

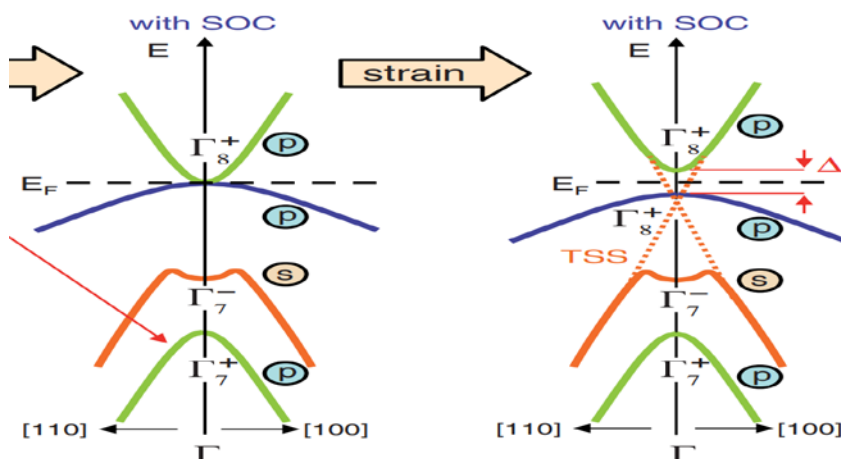


図4： α -Sn 固体の電子状態（左）と、結晶に格子変調を加えた場合（右）。格子変調を加えた際には、トポロジカル絶縁体になる。

A. Barfuss et al., Phys. Rev. Lett. 111, 157205 (2014).

研究手法：

光電子分光実験は基本的に表面に敏感な実験方法であるため、測定には清浄なサンプル表面が必要である。そのため、①基板として用いる InSb の清浄を、アルゴンイオンを電圧によって加速し、サンプル表面に衝突させることで、表面に存在する不純物を脱離させ（アルゴンイオンスパッタリング、図5左）、その後基板を加熱（アニーリング、図5中）して表面原子を再構成することで行った。その後、②原料の入った容器を超高真空チャンバー内で加熱し原料を分子線として基板に照射することで、高い純度の結晶薄膜の成長を行った。最後に、③反射高速電子線回折 RHEED で薄膜の結晶性を確認した。以下に詳細を説明する。

1. InSb(111)B 清浄面作製

界面を原子1層レベルまで清浄化→イオンスパッタリング+アニーリング処理

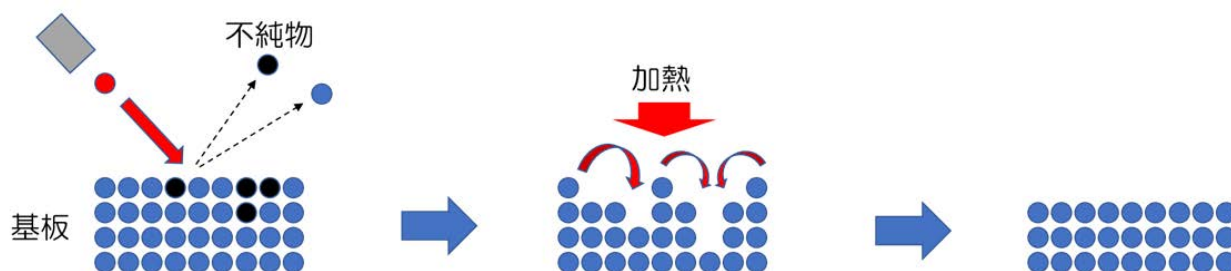


図5：イオンスパッタリングとアニーリング処理法

イオンスパッタリングは電圧によってイオン化した Ar などの希ガスを加速させ、試料表面に衝突させて表面に存在する自然酸化膜や不純物を離脱させる方法であり、単体金属やⅢ-V 族半導体などに有用である。スパッタリングにより表面を除去することにより生じた凹凸は、試料を加熱（アニーリング）することにより表面に存在する原子を移動させることができ、試料表面をより平坦にして清浄面を製造することができる。

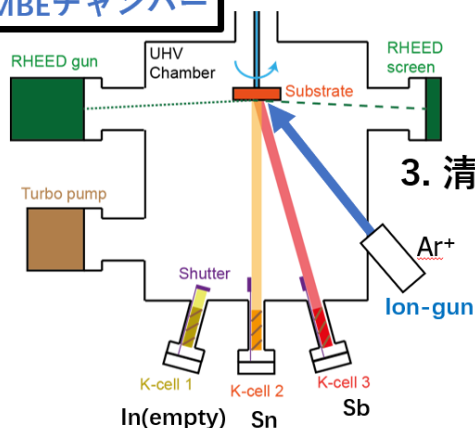
2. α -Sn/InSb(111)B 作製

α -Sn 薄膜→分子線エピタキシー（Molecular Beam Epitaxy : MBE）法で、Sn を真空蒸着

1. InSb(111)B 清浄面作製

- ・イオンガン→スパッタリング
- ・通電ステージ→アニーリング

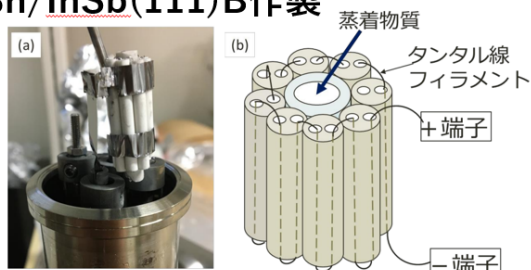
MBEチャンバー



<https://capricorn.bc.edu/wp/zeljkojoviclab/research/molecular-beam-epitaxy-mbe/>

2. α -Sn/InSb(111)B 作製

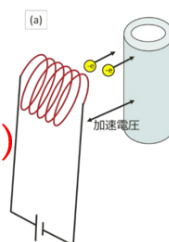
- ・Sb源



(a) 輻射加熱方式蒸着源

(b) 輻射加熱方式蒸着源模式図

- ・Sn源とIn源(予定)



(a) 電子衝撃型蒸着源模式図 (b) 電子衝撃加熱方式蒸着源 (c) フィラメントカバー

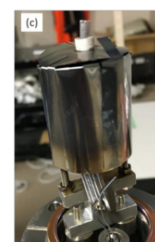
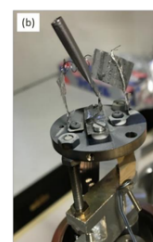


図6：本研究で用いた実験装置（MBE チャンバーに蒸着源と RHEED 装置が設置されている。）

超高真空中の薄膜成膜技術の1つは分子線エピタキシー法（Molecular Beam Epitaxy : MBE）である。MBE 法は超高真空中に分子線を介して原料を供給し、基板結晶上にエピタキシャル成長を行う方法である。エピタキシャル成長とは、成長層の結晶方位が基板の結晶方位と一致することを示す用語であり、特に化合物半導体装置の成長方法として用いられる。エピタキシャル成長において、基板と同じ材料の成長をホモエピタキシャル成長と呼び、異なる材料の成長をヘテロエピタキシャル成長と呼ぶ。図6の左側に示すように、MBE では、原料を入れた容器を超高真空室内で加熱し、原料を分子線として射出して供給する。超高真空中で成長するため、極めて純度の高い結晶を成長させることができる。また、分子線のフラックス制御により、結晶成長速度や組成を制御することができる。Sb は輻射加熱方式（図6右上）で、Sn が電子衝撃加熱方式（図6右下）で蒸着する。

3. 清浄確認

反射高速電子線回折（Reflection High-Energy Electron Diffraction: RHEED）パターン

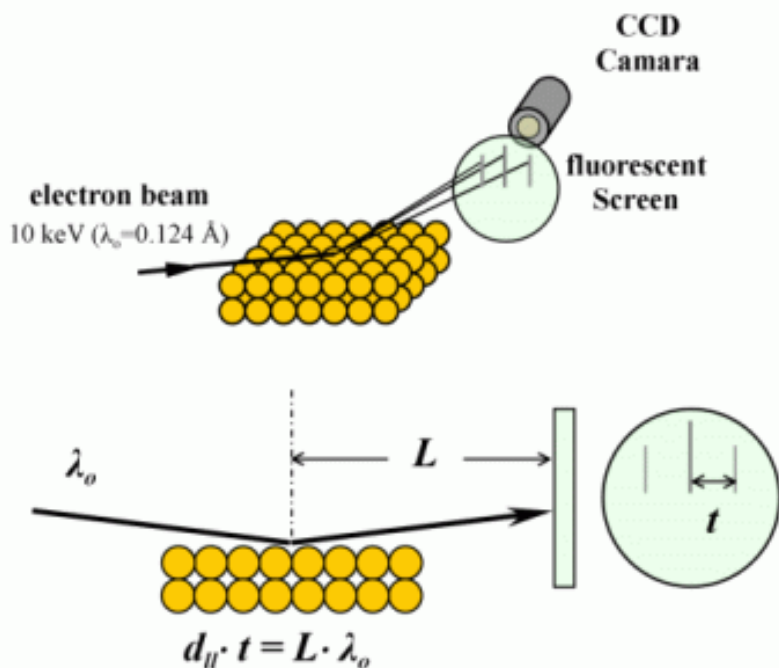


図 7：反射高速電子線回折（RHEED）の模式図

http://www.material.tohoku.ac.jp/~kaimenb/B_RHEEDJ.html

反射高速電子線回折（Reflection High-Energy Electron Diffraction：RHEED）は、その名の通り、5 keV 以上で加速した高速電子ビームを小さい角度で試料に入射し、反射した電子から形成される回折像を測定する方法であり、表面の周期構造の情報を得ることができる（図 7）。RHEED は表面結晶性を解析する方法として非常に有効である。また、低速電子線回折（Low Energy Electron Diffraction：LEED）に比べて、電子の加速電圧が大きいため、試料、電子銃、スクリーンから離れた場所に配置することができる。そのため、蒸着分子線を妨げることなく成膜過程をその場で観測できる利点がある。通常の真空蒸着装置（図 6）に RHEED を取り付けた場合の模式図を示す。サンプルに斜め入射した電子ビームは、サンプル表面を散乱し、電子銃上の正のスクリーンに投影される。これにより、回折パターンがハイライトとして映し出され、CCD カメラで観測することができる。

実験手順：

まず、超高真空を得るために、ターボ分子ポンプ（TMP）で排気しながらベーキングを行った。その結果、真空度は、TMP で排気しただけの値の 10^{-5} Pa 台から 10^{-7} Pa 台まで真空度が上がった。次に、基板を清浄化するために、基盤を乗せた試料ステージを 280℃ まで加熱して、前で紹介したイオンスパッタリングとアニーリングを使って処理を行った。清浄確認が RHEED を使って行い、(3x3) の RHEED パターンが得られた（図 8 左）。次に、Sb は輻射加熱方式（図 6 右上）で、Sn が電子衝撃加熱方式（図 6 右下）試料を加熱し蒸着した。RHEED により、それぞれ (2x2) と (1x1) の 2 つの RHEED パターンが得られた（図 8 中と右）。また、InSb (1x1) 上の α -Sn 試料は、RHEED 測定により、InSb (1x1) 基板と比較して (0 0) から (0 1) までの間隔はほぼ同じであることがわかった（図 9）。この結果は、InSb と α -Sn の格子定数がほぼ同じであることを示している。以上の結果、InSb 基板上に α -Sn 単結晶薄膜が製膜できたことがわかった。今後は、得られた単結晶薄膜がトポロジカル界面かどうかを、角度分解光電子分光（ARPES）で電子状態の観測を行い、検証する予定である。

研究経過：

以上の実験結果をまとめると、以下のようになる。

- 基板となる $\text{InSb}(3 \times 3)$ 、 $\text{InSb-Sb rich}(2 \times 2)$ および $\alpha\text{-Sn/InSb}(1 \times 1)$ の作成を行った。
- $\text{InSb}(1 \times 1)$ 上の $\alpha\text{-Sn}$ 試料は、RHEED 測定により、 $\text{InSb}(1 \times 1)$ 基板と比較して $(0\ 0)$ から $(0\ 1)$ までの間隔はほぼ同じであるため、 InSb と $\alpha\text{-Sn}$ の格子定数がほぼ同じであることがわかった。この結果は、超高真空中で InSb 基板上 $\alpha\text{-Sn}$ 単結晶薄膜の作製に成功したことを示している。

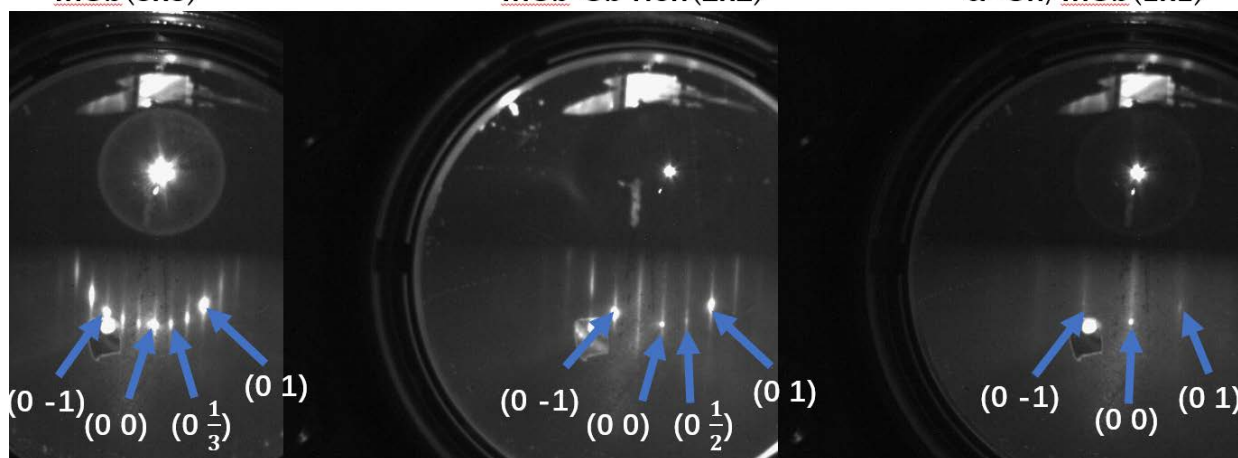
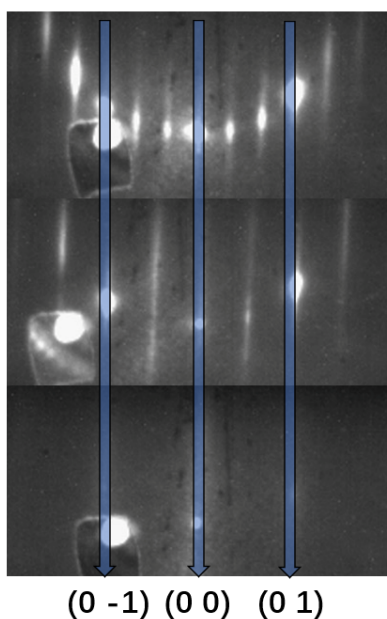
RHEEDパターン $\text{InSb}(3 \times 3)$ $\text{InSb-Sb rich}(2 \times 2)$ $\alpha\text{-Sn/InSb}(1 \times 1)$ 

図 8：RHEED パターン（横並び）

RHEEDパターン $\text{InSb}(3 \times 3)$ $\text{InSb-Sb rich}(2 \times 2)$ $\alpha\text{-Sn/InSb}(1 \times 1)$ 

・綺麗なサンプルを作成した

・ $(0\ 0)$ から $(0\ 1)$ までの間隔は
ほぼ同じ

→ InSb と $\alpha\text{-Sn}$ の格子定数
ほぼ同じ

InSb 基板上 $\alpha\text{-Sn}$ 薄膜の作製に成功

図 9：RHEED パターン（縦並び）

研究成果等：

本研究のまとめは以下のようになる。

- MBE 装置を立ち上げた。
- 超高真空で InSb 基板上 α -Sn 薄膜の作製に成功した。

また、今後の展望として、以下の事項をあげる。

- 今後は真空度と基板のホルダーを改良して、より良質な薄膜を作製する。
- ARPES により電子状態を詳細に観測して、界面制御により α -Sn の電子状態をコントロールしたい。