



角度分解光電子分光によるシリコン基板上ビスマス超薄膜の電子構造の解明

藤原翼¹、下川裕理²、山崎詩郎³、中辻寛²、平山博之³

1) 東工大総理工、2) 東工大物質理工、3) 東工大理

1. 測定実施日

2016年11月8日 10時 – 18時30分 (2シフト), BL7U

2016年11月9日 10時 – 18時30分 (2シフト), BL7U

2016年11月10日 10時 – 22時30分 (3シフト), BL7U

2016年11月11日 10時 – 14時 (1シフト), BL7U

2. 概要

超高真空下($\sim 10^{-8}$ Pa)において Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -B 表面上の Bi(110)超薄膜を作製し、表面電子状態バンド分散の角度分解光電子分光測定(ARPES 測定)を行った。濡れ膜を除いた蒸着量としては 3.5 ML と 5.5 ML の Bi(110)超薄膜を作製し、それぞれについて 51 eV と 40 eV のフォトンエネルギーを用いて等エネルギー面マッピングを行った。

3. 背景と研究目的

近年、電子機器の IoT 化が進んでおり、今後あらゆる電子機器がインターネットに繋がることが期待される。これによりサーバーの負荷が増大し、消費電力の増大が社会問題になると考えられる。近年はこの消費電力を LSI の線幅を数 nm オーダーまで狭めることで削減してきた。しかし、この手法による消費電力の削減は、線幅を原子サイズまで狭めることにより生じるリーク電流などの要因により頭打ちになると考えられる。そこでスピントロニクス技術により消費電力が従来に比べ圧倒的に少ないデバイスを開発することが今後求められてくる。しかしながらこれまでのスピントロニクス技術は、理論予測や特殊な化合物材料での研究に偏る傾向があった。本研究では人体に有害な Hg などの元素を含まず、Si と適合した材料の実現を検証する点で、スピントロニクスを現

実的かつ産業利用できるものに発展させる可能性がある。

本研究は、Si 基板と、非放射性元素として最も重く、スピン軌道相互作用による最も大きなスピン偏極度が期待できる Bi という材料の組み合わせで、新たなスピン偏極電子状態を実現しようとするもので、比較的単純かつ安全な物質を用いており、従来のシリコン電子デバイス技術との適合性も良いという点で、スピントロニクス分野において最も実用化に近い材料の開発を担う。実際に freestanding の Bi(110)超薄膜の第一原理計算により 2 原子層と 4 原子層の黒燐構造は 2 次元トポロジカル絶縁体になると予測されている。しかし Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上的 Bi(110)超薄膜は黒燐構造もしくはバルク構造のどちらをとるのか未だ明らかになっていない。そこで Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 基板上的 Bi(110)超薄膜の電子状態を詳細に調べることで原子構造を同定することを目的として実験を行った。

4. 実験内容

実験は BL7U の角度分解光電子分光装置を用いて行った。その超高真空試料準備室内で、ボロンを高濃度ドーピングした Si(111)基板の 1250 °C フラッシュ及び 900 °C アニーリングにより基板表面に Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 表面構造を作製し、さらにこの Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 表面上に室温で Bi 原子を蒸着することにより、蒸着量の異なる複数の Bi(110)超薄膜試料を作製した。得られた Bi(110)超薄膜表面の電子状態の分散関係と化学組成を光電子分光装置を用いて室温で測定した。

今回測定した試料はそれぞれ LEED 観察を行い、Bi(110)由来のスポットを確認した。また ARPES 測定後に試料を東京工業大学に持ち帰って大気下での AFM 測定を行った結果、濡れ膜を除いて 3.5 ML と 5.5 ML の蒸着量の Bi(110)超薄膜が形成されていることを確認した。

5. 結果および考察

ARPES 測定では、濡れ膜を除いて 3.5 ML の Bi(110)超薄膜に対して、フォトンエネルギー 51 eV での等エネルギー面マッピングを行い(Fig. 1.)、また濡れ膜を除いて 5.5 ML の Bi(110)超薄膜に対して、フォトンエネルギー 40 eV での等エネルギー面マッピング(Fig. 2.)を行った。Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B 上の Bi(110)

超薄膜は6つの回転ドメイン構造を持つ[1]。その為本来は6つのブリルアンゾーンを考慮する必要があるが、簡単の為、それぞれの等エネルギー面に対して主要な3つのドメインのBi(110)のブリルアンゾーンを重ねた(Fig. 1, Fig. 2)。
 3.5 MLと5.5 MLいずれも Γ 点回りで6回対称に見えるバンドの存在が確認できた。また5.5 MLの場合において51 eVに比べBi由来の表面状態に敏感な40eVの光子エネルギーを用いることで Γ -X方向に対して放射状に伸びるバンドの存在を発見した。

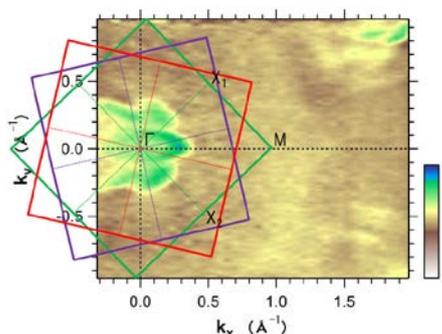


Fig.1 Bi(110)超薄膜試料(濡れ膜を除いた蒸着量3.5 ML)の等エネルギー面 ($h\nu = 51$ eV, $E_B = 0.2$ eV)

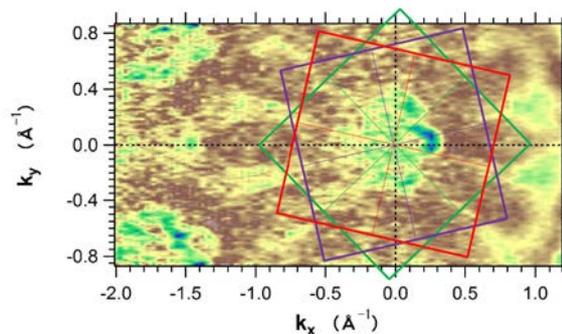


Fig.2 Bi(110)超薄膜試料(濡れ膜を除いた蒸着量5.5 ML)の等エネルギー面 ($h\nu = 40$ eV, $E_B = 0.2$ eV)

Freestandingにおける数原子層の黒燐構造とバルク構造ではM点近傍の表面状態の特徴が大きく異なることが第一原理計算から分かっている。特に Γ -M方向において、黒燐構造ではM点にバンドギャップが空いているのに対して、バルク構造ではM点に金属的なディラックコーン状のバンド分散が存在すると予測されている[2]。今回、主に Γ -M方向のバンド分散関係(Fig.3、Fig.4.)に注目する。

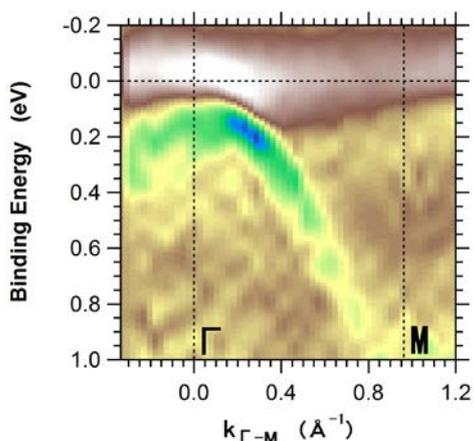


Fig.3 Bi(110)超薄膜試料(濡れ膜を除いた蒸着量3.5 ML)の Γ -M方向に対するバンド分散関係 ($h\nu = 51$ eV)

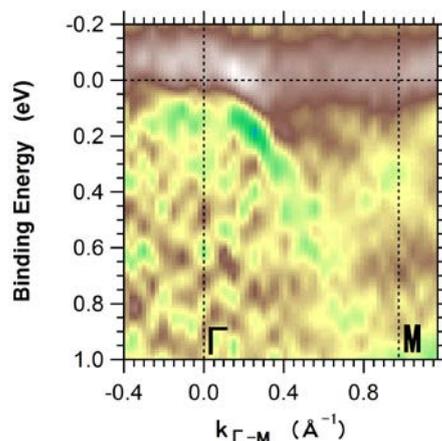


Fig.4 Bi(110)超薄膜試料(濡れ膜を除いた蒸着量5.5 ML)の Γ -M方向に対するバンド分散関係 ($h\nu = 40$ eV)

Fig. 3に濡れ膜を除いて3.5 MLの蒸着量のBi(110)超薄膜の Γ -M方向のバンド分散関係を示す。またFig. 4に濡れ膜を除いて5.5 MLの蒸着量のBi(110)超薄膜の Γ -M方向のバンド分散関係を示す。ただしFig.3とFig.4はそれぞれFig.1とFig.2の $k_y = 0 \text{ \AA}^{-1}$ における $k_x > 0 \text{ \AA}^{-1}$ 側のバンド分散関係である。結果、いずれの蒸着量の場合においても Γ 点において上に凸なバンドの存在を確認した。またいずれの蒸着量の場合においても、バルク構造で予測されているM点における金属的なディラックコーン状のバンド分散関係は確認されなかった。

6. 今後の課題

BL7Uにおいてその場で清浄なSi(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -B基板上のBi(110)超薄膜を成長し、その等エネルギー面マッピング、 Γ -M方向のバンド分散関係、 Γ 点近傍とM点近傍のバンド分散関係を観測した。

今回は濡れ膜を除いて蒸着量3.5 MLと5.5 MLのBi(110)超薄膜を作製し、ARPES測定することに成功した。しかし、いずれの蒸着量の場合においてもM点近傍の分散関係がシャープに見えなかった。これは、室温蒸着によって様々な膜厚の超薄膜が6つのドメイン構造を持って成長しているため、様々な膜厚のBi(110)島からの光電子を検出していることによる。最近、100K程度の低温でBi蒸着を行い、室温までゆっくりアニールすると、室温に比べて膜厚が揃うことが分かってきたので、より明確に膜厚依存性を議論する為には低温蒸着膜のARPES測定を行う必要がある。また現状の6ドメインではX点近傍においてドメインの分離が困難であるため、X点近傍に予測されるスピン偏極電子バンドの議論を行うことが難しいという課題がある。これに対して微傾斜基板にBiを蒸着することでシングルドメインの超薄膜を成長させることのできる可能性があるため、X点近傍のスピン偏極電子バンド分散関係の議論を行うことができるようになると思われる。

7. 参考文献

- [1] I. Kokubo, Y. Yoshiike, K. Nakatsuji, H. Hirayama, Phys. Rev. B91, 075429 (2015).
- [2] G. Bian, X. Wang, T. Miller, T.-C. Chiang, P. J. Kowalczyk, O. Mahapatra, S. A. Brown, Phys. Rev. B 90, 195409 (2014).