

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：17201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13726

研究課題名(和文) 角度分解光電子分光線および円2色性の偏向型2次元マッピングによる表面電子状態研究

研究課題名(英文) Surface electronic structure studied by linear and circular dichroism of the two-dimensional angle-resolved photoemission mapping

研究代表者

高橋 和敏 (Takahashi, Kazutoshi)

佐賀大学・シンクロトロン光応用研究センター・准教授

研究者番号：30332183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：2次元走査型角度分解光電子マッピング測定システムにおいて、放射光とレーザーを励起光とした線および円2色角度分解光電子分光におけるマッピング手法を確立した。これを用いて、Si(111)上のBi(111)単結晶薄膜の表面電子状態について広波数範囲において試料面内方位角も制御しながら円2色ARPESマッピングの測定を行った。その結果、表面状態のARPESマッピングではバルク結晶の3回対称性も反映した円2色コントラストを示すことや、S2状態では従来報告のなかった特異なコントラストを示すことなど、新規な知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Two-dimensional (2D) mapping on angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) provides a rich variety of information concerning the electronic and atomic structure of solids and surfaces. In this work, photoemission spectrometer of 2D-mapping type has been employed to obtain the ARPES mapping with keeping the geometry between the sample and light. Circular polarization at the photon energy between 8 and 9 eV has been achieved using a MgF₂ 1/4 wave plate. Using this system, two-dimensional CD-ARPES mapping of Rashba-split surface state on Bi(111) film on Si(111) substrate has been demonstrated. Strong CD in ARPES mapping of S1, S2 and S3 surface states on Bi(111) shows not only a symmetry corresponding to surface lattice but also the electronic coupling with bulk states. The observed CD contrast of the surface states on Bi(111) seem entangled with spin and local angular momentum, as well as experimental geometry and the two-dimensional character of surface state.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：角度分解光電子分光 放射光 レーザー

1. 研究開始当初の背景

角度分解光電子分光(ARPES)における直線偏光選択則は、複雑な価電子帯バンド構造から軌道対称性への励起選択則に基づいて観測対象を選択可能であることから、本質的なバンド分散を実験的に決定する際に有効である。また、左右円偏光での励起による角度分解光電子スペクトルの円 2 色性(CD-ARPES)は、スピン-軌道依存の電子状態分析に関して強力なプローブである。これらの実験手法は、固体および表面電子物性研究の高度化のみならず、軌道やスピン自由度、さらにはバレー自由度を用いた新奇電子デバイス実現の観点からも重要である。

しかしながら、現在までに行われているスピン分解 ARPES や直線偏光依存 ARPES 測定および CD-ARPES 測定においては、検出効率の低さを補うためにエネルギーおよび角度分解能を低下させた条件での測定に制限されていたり、試料を回転させながらの測定を行う必要があるなどのために幾何配置の変更に伴う外因的な強度変動が含まれたりするなど、一層の研究進展のためには、新たなアイデアによる、データ取得の高精度化と高効率化が必要であった。これを解決するためには、2 次元バンドマッピングでの検出効率の向上、励起光源であるレーザーと放射光の偏光特性を活用した測定手法の高度化が有効である。

2. 研究の目的

本研究では、SAGA-LS の佐賀大学ビームラインに設置している偏向型角度分解光電子 2 次元マッピング測定システムにおいて、励起光である真空紫外放射光について左右円偏光可変とし、スピントロニクス応用とも関連して高い関心を集めている、Bi 薄膜上のスピン分裂した表面電子状態などについて、広い波数範囲について ARPES マッピングにおける円 2 色性測定手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本提案では、従来の光電子分析器の入射スリット平行方向(θ_x 方向)の同時測定と、それに垂直な θ_y 方向での静電レンズ内での電子軌道走査の組み合わせにより、検出効率やエネルギー分解能、幾何配置を保持したままの 2 次元マッピング $E(k_x, k_y)$ を行う手法に、励起光の偏光制御性を付加することによる高度化を行う。また、整備した装置を用いて、Bi(111)単結晶薄膜の表面電子状態、Bi ナノ薄膜などの試料系についての検証測定を行う。

4. 研究成果

(1) 偏向型角度分解光電子 2 次元マッピング測定システムを設置した佐賀大学ビームラインの PGM ステーションにおいて、後置集光鏡真空槽と光電子分析装置真空槽の間

に、ビームライン光軸から待避可能な 1/4 波長板回転機構を整備し、波長板角度を制御測定ソフトウェアから変更できるようにした。波長板は光子エネルギー 8-9eV において有効なものであり、設置位置での光スポットサイズに合わせ 20mm×20mm の外寸である。これにより左右円偏光を任意に切り替えながら長時間計測とできた。また、試料は極角方向(θ)および面内方向(ϕ)について回転可能である。

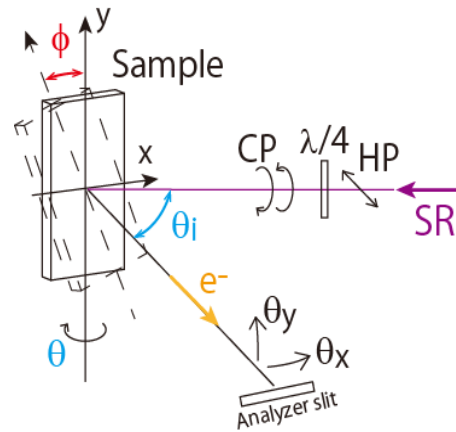


図 1 . 1/4 波長板を使用する放射光での円 2 色 ARPES 測定配置の模式図

(2) Si(111)上に作製した Bi(111)単結晶膜について広い波数範囲にわたって、CD-ARPES マッピングを測定した。Bi(111)表面の S1 および S2 表面状態は、そのスピンおよび軌道角運動量に起因するもののみではなく、バルク結晶の対称性も反映した特有の 2 色性を示すことが見出された。また、S2 および S3 状態においては、幾何学配置と電子状態の 2 次元性に基づいて記述されると考えられる θ_x 方向において節を示す 2 色性が観測されることがわかった。

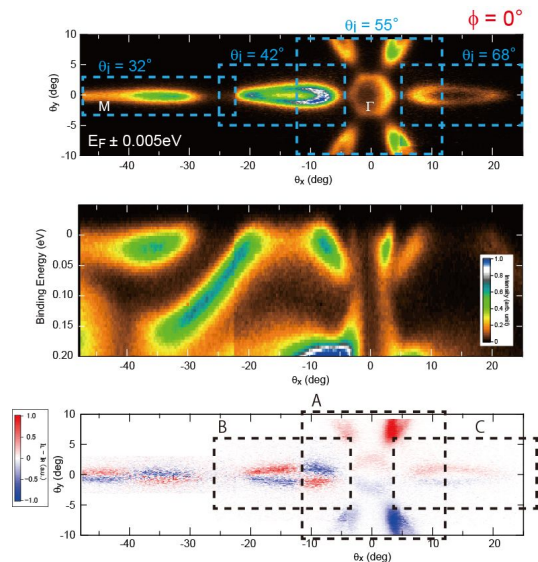


図 2 . Bi(111)/Si(111)上の表面状態のフェルミ面マッピング、ARPES マッピングおよびフェルミ

面での円 2 色マッピング

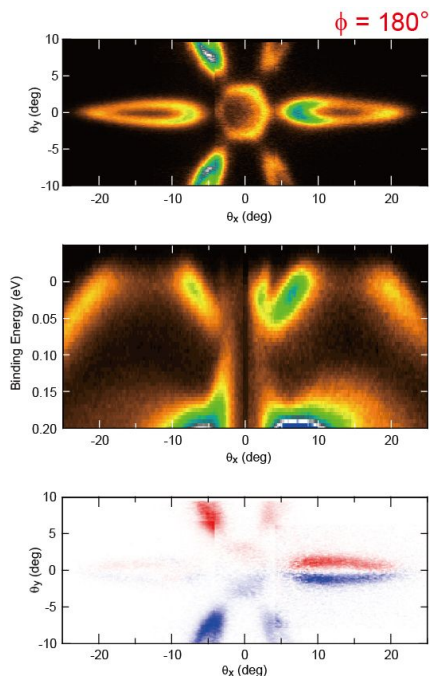


図3 . 試料を面内で 180°回転させたときのフェルミ面マッピング、ARPES マッピングおよびフェルミ面での円 2 色マッピング

(3) グラフェンを基板とした Bi(110)超薄膜においては、1BL, 2BL および 3BL について膜厚に依存した特有の量子化バンドが形成されているが、これらについても明瞭な 2 色性が観測され、例えば光子入射面に対して垂直な方向の波数の増加に伴い 2 色性の符号が逆転するなどの興味深い振る舞いが見出された。

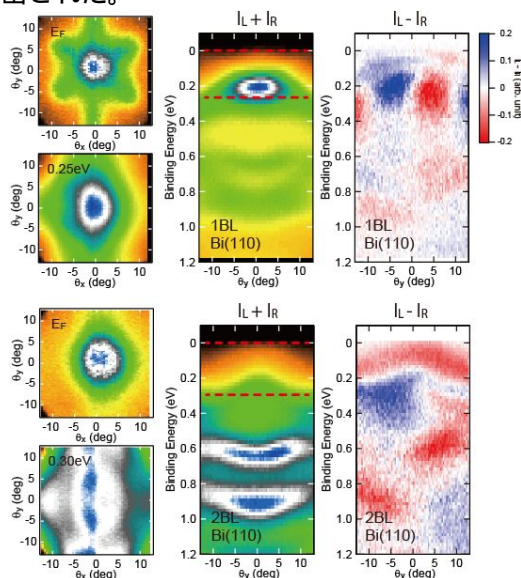


図4 . Bi(110)超薄膜の CD-ARPES マッピング

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 8 件)

1. Bi(111)表面状態の角度分解光電子マッピングにおける円 2 色性

高橋和敏, 今村真幸, 山本勇, 東純平
日本物理学会 2018 年秋季大会、京田辺市、2018.9.9-12

2. Circular dichroism in angle-resolved photoemission spectra of surface state on Bi(111)

K. Takahashi, M. Imamura, I. Yamamoto, and J. Azuma

International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2018), Taipei, 2018.6.10-15

3. Electronic states of Bi(110) ultrathin films studied by photoemission spectroscopy with laser and synchrotron radiation (invited)

K. Takahashi, M. Imamura, I. Yamamoto, and J. Azuma

Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment 2018 (LSC2018), Yokohama, 2018.4.23-27

4. シンクロトロン光とレーザーによる時間分解光電子分光の現状 (シンポジウム)

高橋和敏

日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年) 野田市、2018.3.22-25

5. 佐賀大学ビームライン光電子分析装置の高度化 III

今村真幸、高橋和敏、山本勇、東純平
第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、つくば市、2018.1.8-10

6. 放射光及びレーザー光電子分光によるグラフェン上 Bi(110)超薄膜の電子状態研究

高橋和敏

第 12 回励起ナノプロセス研究会、淡路市、2017-3.29-30

7. グラフェン上 Bi(110)超薄膜の角度分解 2 光子光電子分光

高橋和敏, 今村真幸, 豊福一仁, 山下陽平, 山本勇, 東純平

日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年) 豊中市、2017.3.17-20

8. グラフェン上 Bi(110)超薄膜の放射光およびレーザー光電子分光

高橋和敏, 今村真幸, 豊福一仁, 山下陽平, 山本勇, 東純平

第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、神戸市、2017.1.7-9

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.slc.saga-u.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

高橋 和敏 (Takahashi Kazutoshi)
佐賀大学・シンクロトロン光応用研究センター・准教授
研究者番号：30332183