

# 電子のスピンを自在に操作～先端レーザー技術が拓く光スピン制御～

著者：矢治 光一郎、黒田 健太

## 【はじめに】

電子は、電気的な性質である電荷と磁気的な性質であるスピンという二つの性質を併せ持つ。従来のエレクトロニクス分野では、電子の電荷としての性質のみを利用してきたが、これと併せてスピンも制御できれば、より高速かつ低消費電力でデバイス応用できるのではないかと考えられ活発に研究が行われている。これまでスピンを制御するために磁場、電場、光、熱がよく使われてきた。一方、電子には位相があり、この自由度もスピン制御のために利用できるのではないかと考えられる。

強いスピン軌道相互作用によってスピン偏極した表面状態を持つ物質の代表例として、トポロジカル絶縁体やラッシュバ型スピン分裂をもつ表面が挙げられる。これらの表面電子状態ではスピン方向は電子の運動量によって決まるというのが標準的なモデルである。ところが電子の軌道に着目すると、その対称性によって結合するスピンの向きが異なる「スピン軌道エンタングルメント」という状態にある。本研究では、スピン軌道エンタングルメント状態にある電子バンドからレーザーの偏光を利用してアップスピン電子とダウンスピン電子を同時に光励起して重ね合わせることで、自在にスピンの向きを制御できることを解明した[1,2]。

## 【実験結果】

試料には、その表面電子状態が強いスピン軌道相互作用によりスピン偏極していることが知られている Bi および Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 単結晶を用いた。実験は東京大学物性研究所・極限コヒーレント光科学研究センターにおいて開発されたレーザー光励起によるスピン・角度分解光電子分光 (laser-SARPES) 装置を用いて行われた[3]。図 1(a)の幾何学配置で測定された Bi(111)単結晶薄膜表面の  $\bar{\Gamma}\bar{M}$  鏡映面上におけるスピン分解バンド図を図 1(b,c)に示す[4]。鏡映面垂直方向のみに表面電子状態のスピン偏極が観測され、 $\bar{\Gamma}$  点に対してスピンの向きは反転している。ところが、*p* 偏光励起と *s* 偏光励起では観測される全てのスピン偏極の向きが反対になっている。光学遷移のパリティ選択則によると、*p* 偏光励起(ベクトルポテンシャルの対称性が偶)では始状

態が鏡映面に対して対称な波動関数 ( $|\psi_{\text{sym}}\rangle$ ) を、*s* 偏光励起(ベクトルポテンシャルの対称性が奇)では始状態が鏡映面に対して非対称な波動関数 ( $|\psi_{\text{asym}}\rangle$ ) を選択的に励起する。したがって、*p* 偏光と *s* 偏光でスピンの向きが反転するという事は、波動関数の対称成分と非対称成分がそれぞれ反対向きのスピンと結合していることを意味している。そして、Bi(111)のスピン縮退が解けた表面電子状態の固有関数は、 $|\psi_{\text{sym},\uparrow}\rangle$  と  $|\psi_{\text{asym},\downarrow}\rangle$  あるいは  $|\psi_{\text{sym},\downarrow}\rangle$  と  $|\psi_{\text{asym},\uparrow}\rangle$  の線形結合で書ける。一般に、スピン軌道相互作用と鏡映

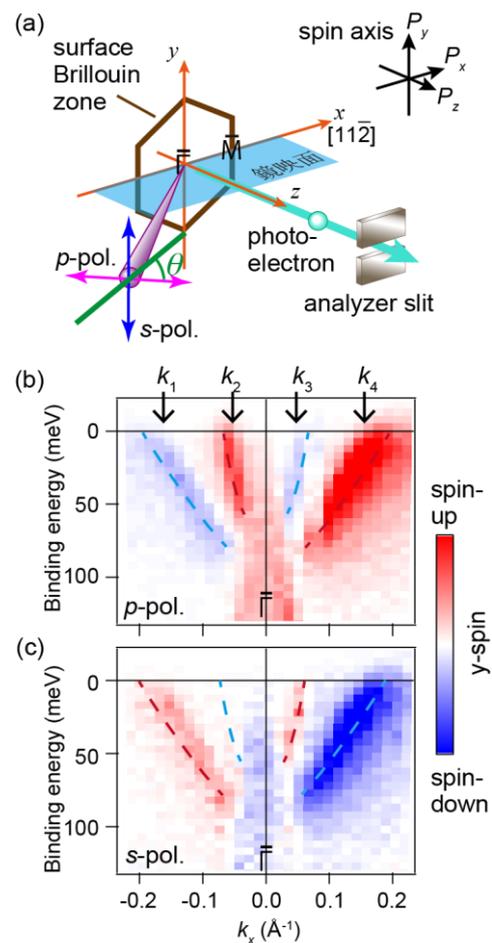


図 1 (a) SARPES 測定の幾何学配置の概略図。(b) *p* 偏光条件および(c) *s* 偏光条件で測定された Bi(111)のラッシュバ分裂表面電子状態のスピン分解バンド図。赤色と青色はお互いに反対向きのスピンをあらわす[4]。点線は表面電子バンドを示したガイド線。



プスピン電子(スピノル $|\uparrow_y\rangle$ と定義)とダウンスピン電子(スピノル $|\downarrow_y\rangle$ と定義)の重ね合わせは、その複素係数の比の絶対値  $u$  と位相差  $\alpha$  をパラメータとして、 $|\uparrow_y\rangle + ue^{i\alpha}|\downarrow_y\rangle$  とあらわされる。ここで、 $y$  方向をスピン量子化軸にとっている。この式は、アップスピン状態とダウンスピン状態を重ね合わせることで任意の方向を向いたスピン状態を作り出すことができるということを意味している。したがって、直線偏光の回転角  $\theta$  を変化させれば同時励起される  $|\psi_{\text{sym},\uparrow}(\mathbf{k})\rangle$  と  $|\psi_{\text{asym},\downarrow}(\mathbf{k})\rangle$  の比を変えることができ、 $\theta$  に依存して光電子のスピンベクトルの方向が回転する。

### 【まとめと展望】

本研究では、スピン軌道エンタングルメント状態にある電子バンドからアップスピン電子とダウンスピン電子を同時に光励起すると、それらの干渉により任意の向きのスピンを作り出すことができる“光スピン制御”の基本原理を解明した。今回のデモンストレーションでは、励起光として  $7\text{eV}$  の光を利用したため、光励起された電子は光電子として真空中に飛び出してしまっていたが、励起光のエネルギーをもっと低くすれば電子を固体内に留めておくことができる。この場合でも同様の概念が使えると予想している。本研究成果は、光だけでなく電子の位相の自由度も利用したスピン制御の新しい概念として多岐にわたる応用と発展が期待される。

### 【謝辞】

本研究は、辛埴、小森文夫、原沢あゆみ、豊久宗玄、石田行章、中山充大、近藤猛、小林功佳の各氏との共同研究により行われました。また、真空紫外レーザー光システムの開発では、渡部俊太郎、Chuangtian Chen の各氏にお世話になりました。本研究は JSPS 科研費 26287061、15K17675 の助成を受けて行われました。

### 【参考文献】

1. K. Kuroda, K. Yaji, M. Nakayama, A. Harasawa, Y. Ishida, S. Watanabe, C.-T. Chen, T. Kondo, F. Komori and S. Shin, Phys. Rev. B **94** (2016) 165162.
2. K. Yaji, K. Kuroda, S. Toyohisa, A. Harasawa, Y. Ishida, S. Watanabe, C. T. Chen, K. Kobayashi, F. Komori and S. Shin, Nat. Commun. **8** (2017) 14588.

3. K. Yaji, A. Harasawa, K. Kuroda, S. Toyohisa, M. Nakayama, Y. Ishida, A. Fukushima, S. Watanabe, C. Chen, F. Komori and S. Shin, Rev. Sci. Instrum. **87** (2016) 053111.
4. 矢治光一郎、黒田健太、小森文夫、辛埴、固体物理 **52**, 559 (2017).

