

Bi/Cu(111)界面における酸化状態とラシュバスピンスplitに関する研究

物質系専攻 47-166020 栗原 暢人

指導教員：大谷 義近（教授）

キーワード：スピン、表面・界面、光電子分光、ラシュバ効果

1. 背景と目的

ラシュバ効果とは、二次元界面内を移動する電子にはたらくスピン軌道相互作用である。物質界面では空間反転対称性が破れており、界面垂直方向のポテンシャル勾配のため、界面を移動する電子に有効磁場が作用する。この有効磁場により、図1のようにバンド分散がスピンの方向によって分裂する。ラシュバ効果による up スピン、down スピンのバンド分散の分裂を図1(a)に示す。(b)はフェルミ面における波数 k 空間でのバンド分散の分裂である。このようなラシュバ効果がはたらく界面に対して垂直にスピン流を注入すると、電子がスピン偏極方向に直交する運動量を獲得

するため、界面平行方向に電流が流れる。この界面でのスピン流と電流の変換現象は Inverse Edelstein 効果(IEE)と呼ばれる。高効率な IEE の実現のため、巨大なラシュバ効果を示す重元素/金属界面が盛んに研究されている。例えば Bi/Cu(111) 界面では、角度分解光電子分光 (Angle-resolved photoemission spectroscopy [ARPES])

によってラシュバ効果によるバンド分裂が観測されており、ラシュバ効果の大きさを示すラシュバパラメータ (α_R) は約 -0.8 [$\text{eV} \cdot \text{\AA}$] と報告されている [1, 2]。またスピンプンピングの実験により、 $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 界面ではスピン流-電流変換が観測された [3]。しかし、金属/金属酸化物界面のバンド分散はまだ光電子分光によって観測されていない。本研究は、ARPES をもちいて金属/金属酸化物界面のバンド構造を観測することにより、界面におけるラシュバ効果の存在の裏付けを目的として行った。また、酸素曝露によるラシュバパラメータの変調が可能かを調べた。

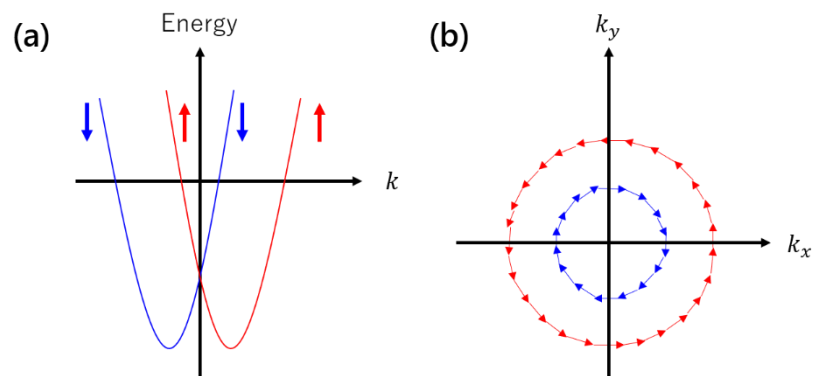


図1. (a) ラシュバ効果による up スピン(赤)、down スピン(青)のバンド分散の分裂 (b) 波数空間でのバンド分散の分裂

2. 実験方法

試料作製は次の方法で行った。まず基板の Cu(111) を Ar^+ スパッタリングとアニーリングで清浄化した。次に Bi を Cu(111) 清浄表面に抵抗加熱蒸着しアニーリングを行い、Bi を 1/3 原子層積層させた Bi/Cu(111) 試料を作製した。Bi/Cu(111) 試料を酸素雰囲気下に曝露することで試料を酸化させ、金属/金属酸化物界面の作製を試みた。酸素曝露量は 0, 100, 2000, 20000 Langmuir (L) とした。1 L は 1×10^{-6} Torr の気体分圧下に、1 秒間試料を曝すことで積層する膜厚と定義される。酸素曝露法によって、試料表面の結晶性を壊さずに金属/金属酸化物試料を作製し、界面のバンド分散を測定することが可能になった。酸素曝露による試料の酸化を、X線光電子分光法 (X-ray photoelectron spectroscopy [XPS]) で観測し、ARPES をもちいて界面

のバンド構造を測定した。得られたバンド分裂の幅と分散の曲率を解析することによりラシュバパラメータを見積もった。

3. 結果と考察

2000, 20000 L 酸素曝露した、Bi/Cu(111)界面での O 1s と Cu 2p の XPS を図 2(a), (b) に示す。O 1s のピークが現れていることから、酸素曝露量 2000, 20000 L で試料が酸化したことがわかった。XPS 測定により、酸素曝露法では Bi は酸化されず組成比 Cu_2O の酸化銅が作製されたことがわかった。酸素曝露量 2000 L の Bi/Cu₂O(111) 界面におけるバンド分散と、Fermi 面での運動量分散曲線 (Momentum distribution curve [MDC]) を図 3(a), (b) に示す。sp_z 軌道のバンドを (a) 内の赤い枠で示し、p_x, p_y 軌道のバンドを黄色の枠内に示した。sp_z 軌道は Bi の p_z 軌道と Cu の s 軌道が混成した軌道であり、Bi/Cu(111) 界面における sp_z 軌道のバンドは、Fermi 面近傍でラシュバ分裂する [1]。Fermi 面における sp_z 軌道バンドの MDC を 2 つのローレンチアンでフィッティングした結果、Bi/Cu₂O(111) 界面でバンドが分裂していることがわかった。したがって、金属/金属酸化物界面でのラシュバ効果の存在が裏付けられた。本実験で測定した酸素曝露量毎のラシュバパラメータと、各軌道の有効質量を表 1 にまとめた。

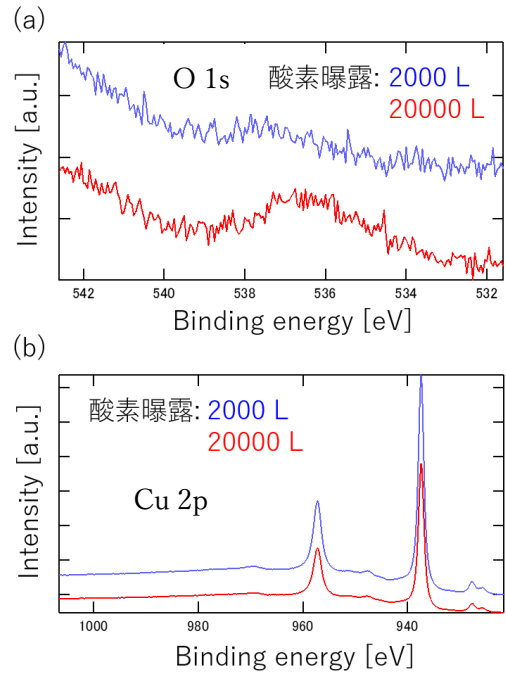


図 2. 2000, 20000 L 酸素曝露した Bi/Cu(111) 界面の XPS (a) O 1s (b) Cu 2p

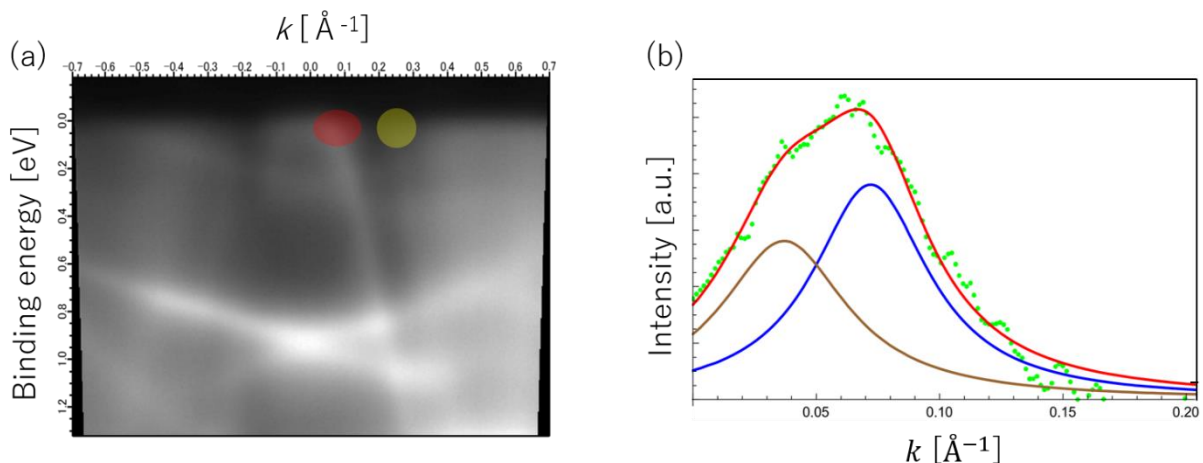


図 3. (a) ARPES で測定した酸素曝露量 2000 L での Bi/Cu₂O(111) 界面におけるバンド構造 (赤: sp_z 軌道、黄: p_x, p_y 軌道) (b) Fermi 面における sp_z 軌道バンドの MDC をローレンチアンでフィッティングした結果 (緑点: データ点 青, 茶線: 個々のフィッティング結果 赤線: 個々のフィッティング結果の和)

表 1. 酸素曝露量毎のラッシュバパラメータと各軌道の有効質量

酸素曝露量 [L]	p_x, p_y 軌道の有効質量	sp_z 軌道の有効質量	ラッシュバパラメータ [eV · Å ⁻¹]
0	$(0.537 \pm 0.007) m_e$	$(0.264 \pm 0.002) m_e$	0.807 ± 0.009
100	-----	$(0.242 \pm 0.002) m_e$	0.894 ± 0.009
2000	$(0.484 \pm 0.054) m_e$	$(0.149 \pm 0.004) m_e$	0.869 ± 0.134
20000	$(1.162 \pm 0.250) m_e$	$(0.103 \pm 0.003) m_e$	1.370 ± 0.196

p_x, p_y 軌道のバンドの有効質量は酸素曝露によって増加し、 sp_z 軌道のバンドの有効質量は減少していることがわかる。 p_x, p_y 軌道の有効質量が増加する理由は、酸素曝露により Bi/Cu(111) 界面に酸素原子が積層することで負電荷のポテンシャルバリアが生じ、界面平行方向へ電子が移動しにくくなるためだと考えられる。 sp_z 軌道の有効質量が減少する理由は、酸素原子による Cu 原子の電荷密度の変調によるものだと考える。酸素が Cu と結合することで Cu 原子から酸素原子へ電荷密度が移動し、Cu の電荷密度が変調されることが理論的に示唆されている [5]。変調された Cu の s 軌道と Bi の p_z 軌道と混成が強くなることで sp_z 軌道の有効質量は小さくなると推察される。

4. まとめ

酸素曝露法をもちいて Bi/Cu₂O(111) 界面を作製し、ARPES をもちいて金属/金属酸化物界面のラッシュバ分裂の観測に成功した。また酸素曝露量を 0, 100, 2000, 20000 L の 4 点で変えて、それぞれのラッシュバパラメータと有効質量を見積もることができた。酸素曝露量を増やすことにより、 sp_z 軌道のバンド分散の有効質量が減少し、酸素曝露法によるラッシュバパラメータの変調に成功した。

[参考文献]

- [1] H. Bentmann, T. Kuzumaki, G. Bihlmayer, S. Blugel, E. Chulkov, F. Reinert, and K. Sakamoto, Phys. Rev. B **84**(2011), 115426
- [2] L. Moreschini, A. Bendounan, H. Bentmann, M. Assig, K. Kern, F. Reinert, J. Henk, C. R. Ast, and M. Grioni, Phys. Rev. B **80**(2009), 035438
- [3] S. Karube, K. Kondou, and Y. Otani, Appl. Phys. Express **9**(2016), 033001
- [4] M. Biesinger, L. Lau, A. Gerson, and R. Smart, Appl. Surf. Sci. **257**(2010), 887
- [5] A. Soon, M. Todorova, B. Delley, and C. Stampfl, Phys. Rev. B **73**(2006), 165424

[学会発表]

栗原 暢人, 矢治 光一郎, 軽部 修太郎, 一色 弘成, 近藤 浩太, 飯盛 拓嗣,
木俣 基, 小森 文夫, 辛 埴, 大谷 義近,

「Bi/Cu(111) 界面における Rashba パラメータの酸素曝露の影響」,
第 72 回日本物理学会春季年会(大阪大学豊中キャンパス)