

高橋 隆

東北大学原子分子材料科学高等研究機構, 大学院理学研究科・教授

バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置の開発

§1. 研究実施の概要

材料科学や物性科学の分野で広く使われている高分解能光電子分光装置には、「表面敏感性」と「スピン分解測定の高難しさ」という2つの大きな問題点があり、これらの困難を解決するために我々は、バルク敏感でかつ高分解能測定の両立を可能とする新たな高輝度プラズマ放電管と、光電子のスピン分解測定を行う小型モットスピン検出器の開発を行う。本年度は、スピン分解測定システムの高性能化のために、主に小型モットスピン検出器の改良を行った。測定試料からの光電子を正しくスピン分解しているかを評価するため Sb(111)表面および Bi(111)表面についてスピン分解角度分解光電子分光実験を行い、装置の正常動作を確認した。製作したモット検出器を更に高効率化するため、ターゲット改良、ノイズ対策、漏洩磁場評価を行い、電子散乱効率(I/I_0)を 7×10^{-3} から 2×10^{-2} に向上した。電子分析器、電子偏向器、モット検出器、キセノン放電管、試料マニピュレーターを含むシステム全体でマッチング調整を行い、スピン分解時のエネルギー分解能 15meV を達成した。装置のスピン分解効率である有効シャーマン関数を評価するため、標準試料である Au(111)表面の作成を行い、表面ラッシュバ効果によりスピン分裂したバンドを確認した。様々な試料による実験から、装置の現在の有効シャーマン関数は 0.1 程度であると評価した。また、スピン分解測定用 PLD 薄膜作成装置の製作と調整を行い全システムに接続したほか、キセノン放電管の更なる安定化、新型分光器の設計・製作を行うとともに、複数のバルク試料やナノ薄膜表面試料について本格的な測定を開始し、物性発現に直接関与する微細電子構造の決定を行った。

§ 2. 研究実施体制

(1)「高橋」グループ

① 研究分担グループ長: 高橋 隆 (東北大学、教授)

② 研究項目

- モット検出器の改良と高性能化
- キセノンプラズマ放電管の高性能化
- PLD 薄膜作成装置の製作と調整
- 全システムのドッキングと総合調整、試料測定
- 総合調整、試料測定、データ解析、性能向上

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

(1) モット検出器の改良と高性能化

モット検出器の高電圧碍子、高電圧ケーブルとコネクタ、電源部、各電極の表面形状の改良を行い、高電圧印加時における放電・バックグラウンドノイズを抑え、実効的測定ノイズが 0.1cps 以下でのスピン分解測定を可能にした。また、装置の各パーツの磁化と装置内の漏洩磁場の検討を行い、理論上は電子スピンの測定への影響は無視できる事を確認した。製作したモット検出器の性能を評価するため、V 族半金属 Sb(111) 表面のショックレー準位について、表面平行方向と垂直方向の 2 方向についてスピン分解角度分解光電子分光実験を行った。表面ラシュバ効果により表面電子バンドが表面平行方向にのみスピン偏極している様子が明確に観測された事から、装置が試料のスピン方向を正しく測定している事を確認した。装置の高分解能化・高効率化のために、散乱ターゲットである金薄膜の改良を行った。開発当初は市販の金薄膜(直径 5mm ϕ , 厚さ 200 μ m)を用いていたが、ターゲットのサイズ拡大(10mm ϕ)、金表面の研磨、研磨面上に真空中で金を蒸着するなどの改良を行った。その結果、電子散乱効率(I/I_0)は 7×10^{-3} から 2×10^{-2} に向上した。さらに電子分析器の低パスエネルギーにおける動作調整を行い、スピン分解時にエネルギー分解能 20meV での

測定が可能となった。改良後の装置性能を評価するために、Sb(111) のショックレー準位について実験を行った結果、分解能 20meV において実質的な測定が可能であることを確認した (図 1)。Si 上にエピタキシャル成長させた Bi 薄膜についても実験を行い、装置

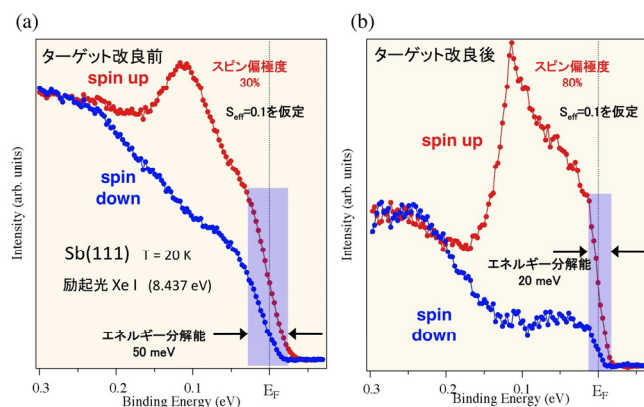


図 1 ターゲット改良前(a)と後(b)で測定した Sb(111)のスピン分解角度分解光電子スペクトル

の正常動作を確認した。更に標準試料となる Au(111) 単結晶表面を Ar イオンスパッタとアニールにより作成し、ラッシュバ効果によるスピンバンド分裂を明確に観測した。様々な試料による測定から、現在の装置の有効シャーマン関数を 0.1 と見積もった。

(2) キセノンプラズマ放電管の高性能化

キセノンプラズマ放電管の排気系改良と、マイクロ波とのマッチング条件の最適化により、キセノンプラズマの更なる安定化を行った。試料のバルク物性と表面物性をより明確に区別して測定を行うために、現行のキセノン放電管と同一の試料焦点位置にヘリウム放電管の発光共鳴線を集光し、キセノンプラズマ放電管とヘリウム放電管を同時に使用できる分光系の設計を行った。

(3) PLD 薄膜作成装置の製作と調整

MBE チェンバー、レーザーアブレーションシステム、試料加熱機構、超高真空チェンバー、ターゲットステージの製作と調整を行った。製作した装置の性能を確認するため、代表的な機能酸化物である強磁性ペロブスカイト酸化物 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ と、銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の作成を行った。AFM により、作成した薄膜の表面が原子層レベルで平坦である事を確認した。表面の電気抵抗測定による試料評価を行い、両試料ともバルク試料と同様の相転移を示す事を確認した。さらに、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ については角度分解光電子分光を行い、 $\text{O}2p$ バンドにおいて明確なバンド分散構造を見出したことから、良質な単結晶表面が得られている事を確認した。

(4) 全システムのドッキングと調整

PLD 薄膜作成装置を光電子分光装置に接続し、電子分析器、キセノンプラズマ放電管、極低温マニピュレーター、小型モット検出器、超高真空測定槽、試料準備・作成槽とのマッチング調整を行った。エネルギー分解能向上のため、電子分析器の電子レンズパラメータの調整、電子偏向器との接続の最適化、試料マニピュレーターの改良、漏洩磁場・電場の低減などについて、装置各部のバランスに留意して調整を行い、スピン分解時のエネルギー分解能 15meV を達成した。

(5) 総合調整、試料測定、データ解析、性能向上

幾つかのバルク試料について高分解能角度分解光電子分光測定を行い、試料の特異物性に関わる微細電子構造を決定した。実験により、高温超伝導体の超伝導発現機構^{1)-3),5),9)-12)}や、幾つかの遷移金属酸化物^{7),8)}および希土類化合物⁴⁾の磁性発現機構についての新たな知見を得た。試料準備・作成槽および PLD 薄膜作成装置

を用い、金属ナノ薄膜試料⁶⁾や酸化物薄膜試料を作成し、本格的なスピン分解光電子分光測定を開始した。

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

- (1) Evolution of pairing-induced pseudogap from superconducting gap in $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$
K. Nakayama, T. Sato, Y. Sekiba, K. Terashima, P. Richard, T. Takahashi, K. Kudo, N. Okumura, T. Sasaki, and N. Kobayashi
Phys. Rev. Lett., 102 (2009) 227006.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.227006
- (2) Fermi surface nesting induced strong pairing in iron-based superconductors
K. Terashima, Y. Sekiba, J. H. Bowen, K. Nakayama, T. Kawahara, T. Sato, P. Richard, Y.-M. Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, H. Ding, and T. Takahashi
Proc. Natl. Acad. Sci., 106 (2009) 7330.
DOI: 10.1073/pnas.0900469106
- (3) Band structure and Fermi surface of an extremely overdoped iron-based superconductor KFe_2As_2
T. Sato, K. Nakayama, Y. Sekiba, P. Richard, Y.-M. Xu, S. Souma, T. Takahashi, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, and H. Ding
Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 047002.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.047002
- (4) Magnetic Phase Transition of CeSb Studied by Low-Energy Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy
A. Takayama, S. Souma, T. Sato, T. Arakane, and T. Takahashi
J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 073702.
DOI: 10.1143/JPSJ.78.073702
- (5) Doping dependence of superconducting-gap anisotropy in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$
K. Nakayama, T. Sato, K. Terashima, T. Arakane, T. Takahashi, M. Kubota, K. Ono, T. Nishizaki, Y. Takahashi, and N. Kobayashi

- Phys. Rev. B, 79 (2009) 140503.
DOI: 10.1103/PhysRevB.79.140503
- (6) Peculiar Rashba Splitting Originating from the Two-Dimensional Symmetry of the Surface
K. Sakamoto, H. Kakuta, K. Sugawara, K. Miyamoto, A. Kimura, T. Kuzumaki, N. Ueno, E. Annese, J. Fujii, A. Kodama, T. Shishidou, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Sato, T. Takahashi, and T. Oguchi
Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 156801.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.156801
- (7) Metal-insulator transition of Na_xWO_3 studied by angle-resolved photoemission spectroscopy
S. Raj, T. Sato, S. Souma, T. Takahashi, D. D. Sarma, and P. Mahadevan
Mod. Phys. Lett. B, 23 (2009) 2819.
DOI: 10.1142/S0217984909021004
- (8) Reconstruction of Fermi surface and anisotropic excitation gap of $\text{Na}_{0.5}\text{CoO}_2$
T. Arakane, T. Sato, T. Takahashi, T. Fujii, and A. Asamitsu
Phys. Rev. B, 80 (2009) 081101R.
DOI: 10.1103/PhysRevB.80.081101
- (9) Observation of Dirac Cone Electronic Dispersion in BaFe_2As_2
P. Richard¹, K. Nakayama, T. Sato, M. Neupane, Y.-M. Xu, J. H. Bowen, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, X. Dai, Z. Fang, H. Ding, and T. Takahashi
Phys. Rev. Lett., 104 (2010) 137001.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.137001
- (10) Angle-resolved photoemission study of heavily electron-doped $\text{BaFe}_{2-x}\text{Co}_x\text{As}_2$
Y. Sekiba, T. Sato, K. Nakayama, K. Terashima, P. Richard, J. H. Bowen, H. Ding, Y.-M. Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, and T. Takahashi
Physica C, in press.
DOI:10.1016/j.physc.2009.11.137.
- (11) High-resolution ARPES study of electron-doped Fe-based superconductor $\text{BaFe}_{1.85}\text{Co}_{0.15}\text{As}_2$

T. Kawahara, K. Terashima, Y. Sekiba, J. H. Bowen, K. Nakayama, T. Sato, P. Richard, Y.-M. Xu, L. J. Li, G. H. Cao, Z.-A. Xu, H. Ding, and T. Takahashi
Physica C, in press.

DOI:10.1016/j.physc.2009.11.129.

- (12) Xenon-plasma-light ultrahigh-resolution ARPES study of low-energy single particle excitation gap in $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$

K. Nakayama, T. Sato, Y. Sekiba, K. Terashima, P. Richard, K. Kudo, N. Okumura, T. Sasaki, N. Kobayashi, and T. Takahashi

Physica C, in press.

DOI: 10.1016/j.physc.2010.01.001