

新博士紹介

1. 氏名 小嗣真人 (Max-Planck-Institute of Microstructure Physics)
2. 論文提出大学 大阪大学
3. 学位種類 理学博士
4. 取得年月日 2001年3月
5. 題目 「Construction of a new display-type spherical mirror analyzer and spin polarized photoelectron diffraction using circularly polarized light」
(新型二次元表示型球面鏡分析器の建設と円偏光を用いたスピン偏極光電子回折)
6. 使用施設 (ビームライン) SPring-8 BL25SU
7. 要旨

[Introduction]

近年、表面あるいは界面の磁性について数多くの研究結果が報告されてきた。特に GMR や exchange bias などに代表される非常に興味深い物性は、物理として重要であるだけでなくそれらを利用したハードディスクのヘッド、ディスクまた磁気記憶 RAM など、直接工業面への幅広い応用がすでに実用化されており、表面、界面の磁性は非常に重要な研究課題といえる。

放射光を用いた表面界面磁性の研究には PEEM, XMCD, MCDAD, MLDAD, ゴンプレートイメージングなど数多くの手法が利用されている。今回我々はそれらに加えてスピン偏極光電子回折 (SPPD) という新しい実験手法を提案した。

元来、光電子回折とは構造解析の手法の一つであり、放出電子波の回折効果を利用したものである。放射光を試料表面に入射し、ターゲットとなる原子 (emitter) の任意の内殻を励起する。放出光電子はその近傍の原子 (scatterer) により散乱され、直接波と回折波の干渉効果により回折パターンを形作る。短距離秩序に敏感なため、emitter 近傍の構造解析に有用である¹⁾。また光電子ホログラフィーの手法と組み合わせることにより、3次元的な原子構造の解析をすることも可能である。

初の SPPD の試みは C. S. Fadley らによって成された³⁾。彼らは無偏光の X 線源を用いて、反強磁性体である MnO, KMnF₃ について SPPD 実験を行った。しかしこの方法では試料は反強磁性体のバルクに限られ、反強磁性秩序の観測にとどまっていた。他の磁性体や磁性薄膜への応用は未だ達成されていなかった。

我々は光源に円偏光を利用することで、選択的に光電子のスピンをスイッチできる事に着目した。Figure 1 は円偏光励起における $2p \rightarrow ed$ のそれぞれの光スピン、励起軌道、光電子のスピン、終状態の l_z に対する選択則と励起確率である。光の偏光と励起軌道あるいは試料磁化の方向をかえる事で放出光電子 (直接波) のスピン偏極方向を任意に選択できる。例えば σ^+ の光で $2p_{3/2}$ を励起した際、 l_z

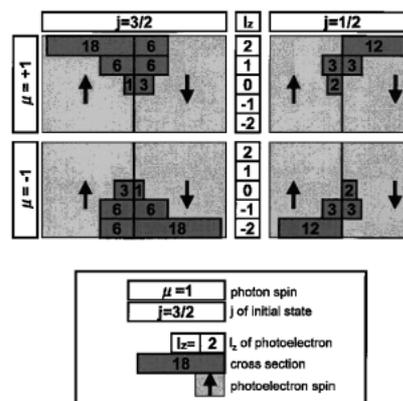


Figure 1. Selection rule and cross section in $2p \rightarrow ed$ excitation by using circularly polarized light; When $2p_{3/2}$ was excited by σ^+ circularly polarized light, the photoelectron having l_z of 2 is 50% spin polarized, and that having l_z of 1 is 0% spin polarized, and that having l_z of 0 is -50% polarized.

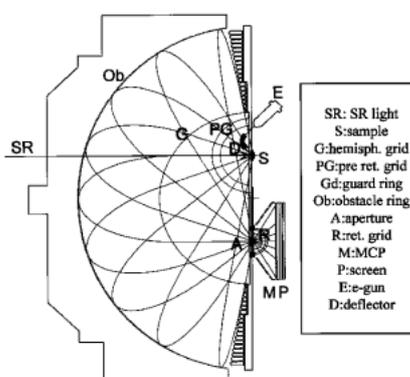


Figure 2. Schematic view of new display-type spherical mirror analyzer: The emitted photoelectrons are converged to a focal point with keeping both kinetic energy and momentum by use of a spherical electric field. Energy and momentum analyses is achieved at once. G: a hemispherical grid, A: small exit aperture, S: a sample, M: a pair of microchannel plate, P: a phosphorous screen, E: an electron gun, Gd: guard rings, Ob: obstacle rings, R: set of retardation grids, The positions of S and A are symmetric with respect to the center O. excitation source (SR) is introduced through a hole N.

$=2$ の光電子は50%, $l_z=1$ では0%, $l_z=0$ では-50%の偏極度を持つ。そして直接波のスピン偏極方向と散乱原子のスピン方向に応じて散乱ポテンシャルもわずかながら変化する。その変化は回折強度中に必ず現れるはずであるから、回折パターンを注意深く解析することでエミッター近傍の磁性を反映した知見が得られる。我々は、後述の二次元表示型球面鏡アナライザと第3世代の高輝度円偏光放射光を用い、Fe(10ML)/W と Fe whisker において、 p -軌道励起の円偏光 SPPD を行ったのでその結果を報告する。

[Experiment]

我々はまず SPring-8 BL25においてディスプレイ型球面鏡分析器の建設を行った⁴⁾ (Fig. 2)。同アナライザは、放

出光電子の角度分解とエネルギー分解測定を一度にできるという優れた利点があり、短時間で全立体角の光電子放出角度分布 (PEAD) を測定が可能であるため、汚染の早い表面の研究に適した分析器である⁵⁾。我々の建設した新型分析器には次のような改良点がある。

アナライザの直径を300 mm から600 mm へと大幅に拡大し、20 μm の工作精度で作成した。障害リング電極数を従来の10倍の260本にすることでエネルギー分解能を向上した。障害リングを組立式でなく、アルミのブロックから一体で削出すこととし、組立誤差をなくした。各電極は、アルミ基板上に絶縁層を蒸着した後、隙間をマスキングしてAu 薄膜を蒸着させることで作成された。3重の μ メタルシールドを真空槽内に装備。半球グリッドは、形を維持するため、従来のメッシュ製のものからTi半球板に電子ビームで穴開けしたものに置き換えた。基本性能の評価は電子銃の弾性散乱ピークを用いて行った。その結果エネルギー分解能は約4倍の $dE/E_{\text{pass}}=0.25\%$ となり、角度分解能は2倍の $\pm 0.6^\circ$ に向上された。

そして次にその装置を用いFe(10ML)/W(110)においてSPPDを行った。

試料Fe(10ML)/W(110)は次のようにして作成された。基盤Wの清浄化は下記に示すような酸素吸着とアニールを繰り返すことで得られた。室温で基盤を 3×10^{-4} Paの酸素雰囲気中に300秒曝露させ、その後ヒーターにより30秒間1700 $^\circ\text{C}$ まで加熱する。表面の評価をLEEDとAESにより行い、その後Feを10ML蒸着させた。蒸着レートはRHEED振動により見積もった。作成表面の清浄さはAESにより確認した。10ML-Fe磁性薄膜は真空槽内の永久磁石NEOMAXを接近させることで磁化させた。容易磁化軸は $[\bar{1}\bar{1}0]$ である。

実験の配置をFig. 3に示す。放射光は試料表面に対し 45° 方向から入射した。 z 軸は光の進行方向に沿って取り、光スピンは z 軸に沿ってそれぞれ σ^+ 、 σ^- とした。 θ 、 ϕ は z 軸に対する極角、方位角としてとった。試料の磁化方向は $[\bar{1}\bar{1}0]$ であり、簡単のため、 z 成分のみを考え M^- とする。W(110)はbccで格子定数は3.16 \AA 、Feはその上にエピタキシャル成長しているため、格子間隔は同じと考えた。

[Result & discussion]

我々は σ^+ と σ^- の両円偏光を用いて、Fe $2p_{1/2}$ ($E_k=196$ eV) と $2p_{3/2}$ ($E_k=209$ eV) の二つの内殻準位に対して計4回の光電子回折測定を行った。試料の磁化方向はMCDにより確認された。いずれの測定も室温で行われた。回折パターンに対するバックグラウンドの寄与や測定効率の角度依存性などの除去は $I=I_{\text{signal}}/I_{\text{BG}}$ により注意深く行われた。画像一枚あたりの測定時間は約30分であった。

Figure 4に両円偏光を用いて測定した $2p$ 内殻PEAD画像を示す。試料の各結晶軸方向を丸印で示す。画面中央が

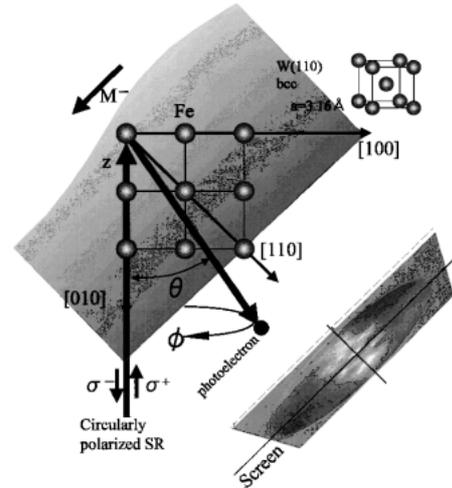


Figure 3. Experimental Geometry of SPPD on Fe/W(110). Circularly polarized light was incident 45° from sample surface of $[110]$, and its direction is parallel to $[0\bar{1}0]$ crystal axis of Fe/W(110). Each crystal axis was indicated in the figure. Sample magnetization is parallel to $[\bar{1}\bar{1}0]$. Photoelectron displays PEAD image on the screen at 45° diagonally from light axis.

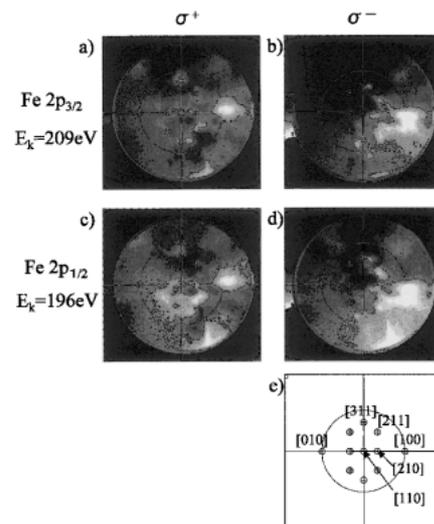


Figure 4. Spin polarized photoelectron diffraction pattern from Fe/W(110) by using circularly polarized light; SPPD images are measured on Fe $2p_{3/2}$ ($E_k=209$ eV) and $2p_{1/2}$ ($E_k=196$ eV) for both helicity of σ^+ and σ^- . The energy of SR was set to about 920 eV. Brightness of the image is proportional to the photoelectron intensity. The white circles and index numbers indicate the direction of corresponding crystal axis(e). The horizontal direction of the image corresponds to $[\bar{1}\bar{1}0]$, and the vertical direction corresponds to $[00\bar{1}]$, these are indicated as blue lines in each figure.

ノーマルエミッションの $[110]$ に相当する。

目視では右側の $[100]$ 前方散乱ピーク (FFP) のみが観測されている印象を受けるが、これは円偏光の電場ベクトルが $\theta=90^\circ$ を向いているため光電子強度が極大となるためであり、実際はいずれの結晶軸 ($[010]$, $[110]$, $[311]$,

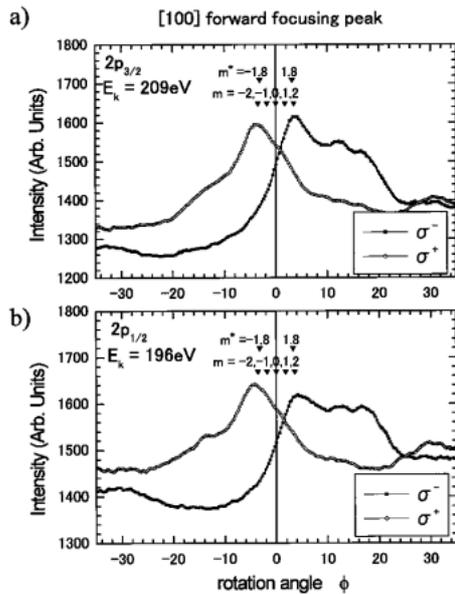


Figure 5. Angular profile of [100] FFP on Fe/W(110); These lineprofiles were estimated in vertical direction in Fig. 4-2 with a width of 5° in horizontal direction. The ordinate was converted to the azimuthal angle around the light axis. The PEADs of Fe $2p_{3/2}$ are shown in (a) and those of $2p_{1/2}$ are shown in (b). The strange dip around -20° is due to stray electrons. This region corresponds to the upper part of the screen.

[211], [210]) にそっても FFP が観測されている。そしていずれの FFP においても偏光の切り替えに応じて角度分布、強度の特徴的な変化を示した。我々はその中でもっとも顕著な変化を示した [100] FFP について注目し、定量的評価を行った。

Figure 5 は [100] FFP の光電子強度の、 $\theta = 90^\circ$ での ϕ 依存性をプロットしたものである。明確な特徴として、偏光の切り替えによる FFP ピークの回転が確認される。この回転は、円偏光の電場ベクトルの回転によるもので、光電子が励起光の電場ベクトルを感じて回転しながら放出されることに起因する。

この回転角 Δ は

$$\Delta = \frac{l_z}{kr \sin^2 \theta}$$

で与えられる²⁾。 k は波数、 r は emitter と scatterer の原子間隔である。その計算値を図中の ▼印で示す。計算結果は実験結果とよく一致している。

同時に、偏光の切り替えによって、 FFP 強度が変化していることも確認できる。 Figure 5(a) では $I(\sigma^+) < I(\sigma^-)$ であるが (b) では $I(\sigma^+) > I(\sigma^-)$ となり、 $2p_{3/2}$ と $2p_{1/2}$ では逆の傾向を示している。

これらの FFP の強弱の傾向を、励起内殻ごとに、直接波のスピンの方向と scatterer のスピンの方向とについて

Table 1. The relation between the FFP intensity, photoelectron's spin and scatterer's spin. The scattering intensity becomes strong when the photoelectron's spin and scatterer's spin are anti-parallel, and it becomes weak when these are parallel.

| Photon spin | Core level | Photoelectron's spin | Scatterer's spin | FFP intensity | Asymmetry |
|-------------|------------|----------------------|------------------|---------------|-----------|
| σ^+ | $2p_{3/2}$ | \uparrow | \uparrow | Weak | 4% |
| σ^- | | \downarrow | \uparrow | Strong | |
| σ^+ | $2p_{1/2}$ | \downarrow | \uparrow | Strong | 7% |
| σ^- | | \uparrow | \uparrow | Weak | |

まとめたものを Table 1 に示す。ここで、非対称性 $Asym$ は、 $|(I^+ - I^-)/(I^+ + I^-)|$ で定義した。

Table 1 から、直接波のスピンの方向と scatterer のスピンの方向が平行の際は FFP 強度が弱くなり、反平行の際に強くなるという一貫した傾向が確認された。また、 $2p_{1/2}$ 励起の方が高い非対称性を示した。

回折強度の強弱については、スピンの散乱への寄与を考慮することで説明できる。

一般に光電子回折においてスピンを考慮した散乱ポテンシャル H は

$$H = V + V_{ex} + V_{so}$$

のように与えられる。

V はスピンと独立な項で主に electro-static 相互作用で表される引力ポテンシャルである。 V_{ex} はスピン交換散乱の項で、 $V_{ex} \propto \mathbf{s} \cdot \mathbf{S}$ で与えられる反発ポテンシャルである。なお \mathbf{s} は直接波のスピンの方向、 \mathbf{S} は scatterer のスピンの方向である。 V_{so} はスピン軌道相互作用の項で、 $V_{so} \propto \mathbf{L} \cdot \mathbf{s}$ で与えられるが、この場合はエネルギーが低いので無視できる。ここでの寄与の大小関係は $V > V_{ex} > V_{so}$ である。そして V_{ex} はスピンの平行、反平行によって

$$V_{ex} \propto \rho(r)^{1/3} \text{ (平行の時)}$$

$$V_{ex} = 0 \text{ (反平行の時)}$$

の二通りの値をとる。なお ρ は scatterer の電子密度である。このわずかな散乱ポテンシャルの差が散乱強度に影響を与えると説明される。平行の際を考えてみよう、 V_{ex} は反発ポテンシャルであり、散乱ポテンシャル H がわずかに浅くなることを意味する。一般的にはその様な場合には phase shift は減少し散乱因子も減少する。その結果、総じて散乱強度が小さくなる。実験結果は平行のときに強度が減少しており、この説明と一致する。

また $2p_{3/2}$ より $2p_{1/2}$ の非対称性が高いことについては次のように説明される。 [100] FFP は $\theta = 90^\circ$ であり、この角度においては $l_z = \pm 2$ の電子が大半を占めている⁶⁾。

Figure 1によれば、 $2p_{1/2}$ 励起のスピンの偏極度は100%で、 $2p_{3/2}$ の場合は50%となり、 $2p_{1/2}$ 励起の方が $2p_{3/2}$ よりも高く、 V_{ex} も増大する。ゆえに高い交換散乱の効果が期待される。

これらの傾向は二度目の実験でも同様の傾向を示し、再現性が確認された。さらに我々はFe whiskerについても同様のSPPD実験を行った。幾つかのFFP中に同様の交換散乱の寄与が確認され、その傾向もFe/W(110)の結果と同様であった。

我々はFe/W(110)において円偏光放射光を用いてスピンの偏極光電子回折を行い。その回折パターン中に交換散乱を観測することができた。そして励起軌道、光スピンをスイッチすることで特徴的な変化をFFP中に見出すことが

できた。これは試料の強磁性秩序を直接実験的に観測したことを示唆するものである。

参考文献

- 1) C. S. Fadley: Synchrotron Radiation Research Advance in Surface and Interface Science **vol. 1** chapter 9, edited by R. Z. Bachrach, Springer, Berlin
- 2) H. Daimon et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **32** Part 2, (10A) pp. L1480-L1483 (1993)
- 3) C. S. Fadley et al.: J. Appl. Phys. **63**, 3506 (1988)
- 4) M. Kotsugi et al.: Nucl. Instrum. And Meth. A.
- 5) H. Daimon et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**(2) Feb. (1995) 1510
- 6) H. Daimon et al.: PRB submitted

(受付番号01068)