

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540327

研究課題名 (和文) 定在波分光法による埋もれた界面の価電子帯評価法の開発

研究課題名 (英文) Probing valence band of buried interfaces with soft x-ray standing wave spectroscopy

研究代表者

江島 文雄 (EJIMA TAKEO)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：80261478

研究成果の概要：

Fe/Si 多層膜の界面層の電子状態を知るために、位相制御をした定在波法と発光分光法を組み合わせて、Fe/Si 界面の深さ方向の電子状態の変化を調べた。得られた Fe  $L_{2,3}$  発光スペクトルのスペクトル形状は、ほぼ Fe 金属のスペクトル形状に類似して、Fe  $3d \rightarrow Fe 2p_{3/2}$  遷移による強度の強い  $L_3$  発光と、禁制遷移である強度の弱い Fe  $3d \rightarrow Fe 2p_{1/2}$  遷移による  $L_2$  発光を示した。Fe  $L_3$  発光スペクトルのピーク位置は、表面側 Fe 層から基板側 Fe 層に向って高エネルギー側にシフトした。これは発光点が表面側から基板側に移動するに従って、フェルミ準位近傍の Fe  $3d$  電子の状態密度が多い状態から少ない状態に変化していると考えられる。以上により、定在波法を用いた埋もれた界面の価電子帯の評価法が確立された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：埋もれた界面、価電子帯、定在波、位相制御、多層膜、Fe/Si 界面

## 1. 研究開始当初の背景

ナノスケールで積層制御された磁気多層膜では、多層膜の強磁性層間にはたらく磁気相互作用 (層間結合) を理解することが重要である。特に磁性層の Fe 層と非磁性層の Si 層を積み重ねた Fe/Si 多層膜は、それまで知られていた磁性層・非磁性層共に金属からなる磁性多層膜とは異なり、非磁性層

が半導体からなる。現在この Fe/Si 多層膜の層間結合のモデルとして 4 つが提案されており、それらのモデルはすべて界面層がその磁気相互作用を支配するが、界面層の価電子帯構造が実験的に明らかになっていないため、各モデルの優劣は必ずしもはっきりとしなかった。

## 2. 研究の目的

定在波は周期構造をもつ物質にブラッグ条件を満たすように光を入射したときに生成され、入射角、入射波長などを変化させることで、定在波の腹の位置を動かすこと（位相シフト）が出来る。X線領域の各種分光測定と定在波の位相シフトを組み合わせることで、物質の深さ方向の情報を得る手段となる。

本研究では、定在波を生成するために反射多層膜を利用し、その位相情報を吸収スペクトルから実験的に求め、得られた位相情報から Fe  $L_{2,3}$  発光スペクトルの発光位置を求める。このようにして求めた Fe  $L_{2,3}$  発光スペクトルを深さ方向で比較することで、Fe/Si 磁性多層膜の層間結合を担うと考えられる Fe/Si 界面の Fe 3d 電子状態を明らかにする。

## 3. 研究の方法

実験はSpring-8のBL27Uの発光分光計を用いて行った。初めに、定在波生成層となるW/B<sub>4</sub>C多層膜に、評価層としてFe/Si/Fe 3層膜を蒸着した試料を導入し、全光電子収量法により吸収スペクトルを測定した。吸収スペクトルを基に定在波の位相を求め、発光位置を求めた。更に、今回の測定では入射波長を掃引することで腹の位置を移動させるために、あらかじめFe金属の発光スペクトルを入射エネルギーを変えつつ測定して、発光強度が常に一定であるような励起エネルギー範囲を求めた。次に、そのエネルギー範囲で腹の位置を掃引できるように光の入射角を調整した。

このようにして得られた入射角は76.0度で、入射光の波長を振ることで定在波の腹の位置を変えつつFe  $L_{2,3}$ 発光スペクトルを測定し、そのスペクトル形状の変化を求めた。腹の位置は、校正した入射エネルギーと入射角を基に、吸収スペクトルから定在波の位相を求め、その位相から定在波の腹の位置を求めた。発光スペクトルは定在波の腹の位置で最も発光強度が高い、と仮定した。測定はすべて室温で行った。

## 4. 研究成果

Figure 1 に入射角を変えつつ測定した吸収スペクトルから、Fe 金属の吸収スペクトルをバックグラウンドとして差し引いたものを示す。入射角を75.8度から0.1度ずつ増やすに従って、ピーク位置が低エネルギー側

から高エネルギー側にシフトしていく様子がはっきりと分かる。これは、定在波の腹の位置が入射角と入射エネルギーの変化により変わっていく様子を示している。Fig. 1より得られた定在波の腹の位置は、入射エネルギーの一次関数となった。

Figure 2 に入射エネルギーの異なる発光スペクトルの測定結果を示す。スペクトルは入射エネルギー位置で横軸を規格化し、縦軸はバックグラウンドを引いた後のピーク面積で規格化した。すべての入射エネルギーでスペクトル形状は Fe 金属のスペクトルと同様の形状を示した[9]。Fig. 2の解析結果から、入射エネルギーが735eVのときに最も定在波の腹の位置が深い基板側で、入射エネルギーが770eVのときに定在波の腹の位置が浅い表面側となる。発光スペクトルは、入射エネルギーが735eVのときにスペクトルのピーク位置が703.5eVとなり最もピーク高さが小さい。入射エネルギーが高くなるに従って、ピーク位置は高エネルギー側にシフトし、そのピーク強度も徐々に上がっていく。入射エネルギーが765eVのときのスペクトルのピーク位置は704eVで最も高く、同時にピーク高さも高

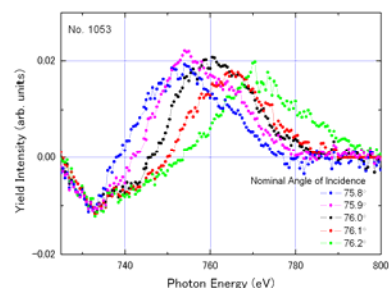


Figure 1. XAS spectra of Fe/Si/Fe tri-layer changing incident photon energy.

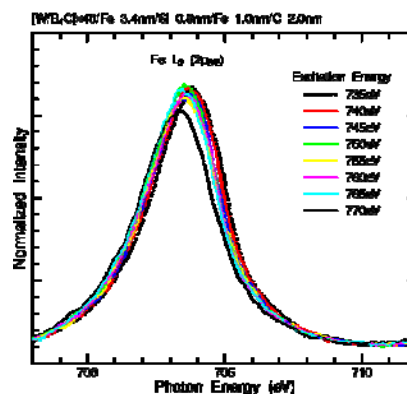


Figure 2. XES spectra of Fe 3d  $\rightarrow$  Fe 2p<sub>3/2</sub> transition changing incident photon energy. Emission peak shifts from low energy side to high energy side according to the increase of incident photon energy.

い。

入射エネルギーが定在波の腹の位置の一次関数であることから、入射エネルギーを変えつつ測定した Fe L<sub>3</sub> 発光スペクトルのピークシフトは、Fe/Si 界面の深さ方向の Fe 3d 部分状態密度の変化を表わしている。得られたスペクトルの形状を Fe 金属の Fe 3d 電子状態を基に考えると、Fe L<sub>3</sub> 発光ピークの 702eV 付近および 705eV 付近は Fe 3d 電子の majority spin 状態、703.5eV 付近は Fe 3d 電子の minority spin 状態を反映している。従って、入射エネルギーの増加に伴って低エネルギー側にシフトする発光ピークは、基板側の Fe 層から表面側の Fe 層に向ってフェルミ準位近傍の Fe 3d 電子の majority spin が減っていく様子を表わしていると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Makoto WATANABE, Tadashi HATANO, Katsuhiko SAITO, Weibing HU, Takeo EJIMA, Toshihide TSURU, Masahiko TAKAHASHI, Hiroaki KIMURA, Toko HIRONO, Zhangshan WANG, Mingqi CUI, Masaki YAMAMOTO, Mihiro YANAGIHARA, Multilayer polarization elements and their applications to polarimetric studies in vacuum ultraviolet and soft X-ray regions, Nuclear Science and Techniques, 19(4), 193-203(2008) (査読有)
2. 柳原美広 X線結像光学 (X-ray imaging optics) 光学, 36(4), 179-180(2007. 4) (査読有)
3. Kosuke Sato, Masaki Sugawara, Takayoshi Jinno, Mitsunori Toyoda, Tadashi Hatano, Akira Arai, Mihiro Yanagihara, X-ray magnetic circular dichroism studies for Fe/Si interfaces using standing waves, Journal of Physics: Conference Series, 83, 012012-1-6 (2007) (査読無)
4. T. Ejima, A. Yamazaki, K. Sato, and Y.

Nakamura, "Photoelectron spectroscopy with phases of standing waves observed by total electron yield and reflection spectra", CP879, SRI: The 9<sup>th</sup> International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, ed. by J. -Y. Choi and S. Rah, AIP p.1634 (2007). (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 定在波分光法によるFe/Si多層膜界面の電子状態の変化」後藤智宏、江島丈雄、神野貴義、倉光康太、柳原美廣、第22回日本放射光学学会年会放射光科学合同シンポジウム2009年1月11日(東京大学、本郷キャンパス) 4B003
2. 「定在波分光法によるFe/Si多層膜界面の電子状態の変化」後藤智宏、神野貴義、江島丈雄、第8回東北大学多元物質科学研究所研究発表会2008年12月11日(東北大学 片平さくらホール) P139
3. 「Fe/Si多層膜界面のSi厚の違いによる電子状態の変化」後藤智宏、神野貴義、江島丈雄、日本物理学会2008年秋季大会 2008年9月23日(岩手大学 上田キャンパス) 23pXA-1
4. 「Fe/Si多層膜界面のSi厚の違いによる電子状態の変化」後藤智宏、神野貴義、江島丈雄、第69回応用物理学会学術講演会2008年9月3日(中部大学 春日井キャンパス) 3p-R-1
5. 「X線定在波の位相計測を用いた分光測定のプロファイル制御: Fe/Si界面への応用」江島丈雄、UVSOR Lunch Seminar、2008年7月3日(分子科学研究所)
6. 「波長40~30nmにおけるワイドバンド反射多層膜」後藤智宏、江島丈雄、木村真一、日本放射光学学会(立命館大学びわこ草津キャンパス) 2008年1月13日 13P019
7. 「波長40~30nmにおけるワイドバンド反射多層膜の設計・作製」後藤智宏、江島丈雄、木村真一、第7回東北大学多元物質科学研究所研究発表会2007年12月12日(東北大

学 片平さくらホール) P089

8. 「波長 40~30nmにおけるワイドバンド反射多層膜の設計・作製」後藤智宏、江島丈雄、木村真一、第 62 回応用物理学会東北支部学術講演会、2007 年 12 月 6 日 (八戸工業大学工学部) 7pB1
9. 「定在波光電子分光法による Fe/Si 界面の価電子帯スペクトル」江島丈雄、後藤智宏、神野貴義、日本物理学会 第 62 回年次大会 2007 年 9 月 23 日 (北海道大学札幌キャンパス) 23pPSA-14

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

江島 丈雄 (EJIMA TAKEO)  
東北大学・多元物質科学研究所・准教授  
研究者番号：80261478

##### (2) 研究分担者

柳原 美廣 (YANAGIKARA MIHIRO)  
東北大学・多元物質科学研究所・教授  
研究者番号：40174552

##### (3) 連携研究者