

## 定在波発光分光による Fe/Si 界面の電子状態の深さ方向変化 Depth distribution of electronic structure in Fe/Si interface measured by standing wave spectroscopy.

江島丈雄<sup>a</sup>、後藤智宏<sup>a</sup>、神野貴義<sup>a</sup>、倉光康太<sup>a</sup>

Takeo EJIMA<sup>a</sup>, Tomohiro GOTO<sup>a</sup>, Takayoshi JINNO<sup>a</sup>, Kouta KURAMITSU<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 東北大学 多元物質科学研究所

<sup>a</sup>IMRAM, Tohoku University

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、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 層に向か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。

Electronic structure change of Fe/Si interface according to the depth were investigated combining X-ray emission spectroscopy with standing wave method of which the phases of standing waves are determined by both reflection and total electron yield spectra. Spectral shape of Fe  $L_{2,3}$  emission resembles to that of Fe metal: a strong peak due to Fe  $3d \rightarrow Fe 2p_{3/2}$  transition was observed with a weak peak due to Fe  $3d \rightarrow Fe 2p_{1/2}$  forbidden transition. Peak position of Fe  $L_3$  emission peak shifts from low photon energy side to high photon energy side according to the emission depth moves from surface-side Fe layer to substrate-side Fe layer. This shift will represent that the number of Fe  $3d$  density of states around Fermi level decreases according to the movement of the emission depth.

キーワード：定在波法、X線発光分光、磁気多層膜、反射多層膜、Fe/Si 界面

**背景と研究目的：** 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い[1-6]。

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[7]。

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[8]、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。

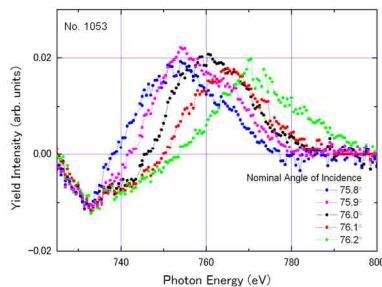
**実験：** 実験はBL27Uの発光分光計を用いて行った。初めに、定在波生成層となる  $W/B_4C$  多層膜に、評価層として Fe/Si/Fe 3層膜を蒸着した試料を導入し、全光電子収量法により吸収スペクトルを測定した。吸収スペクトルを基に定在波の位相を求め、発光位置を求めた。更に、今回の測定では入射波長を掃引することで腹の位置を移動させるために、あらかじめ Fe 金属の発光スペクトルを入射エネルギーを変えつつ測定して、発光強度が常に一定であるような励起エネルギー範囲を求めた。次に、そのエネルギー範囲で腹の位置を掃引できるように光の入射角を調整した。

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、

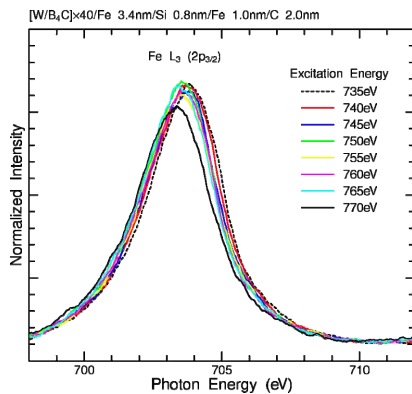
そのスペクトル形状の変化を求めた。腹の位置は、較正した入射エネルギーと入射角を基に、吸収スペクトルから定在波の位相を求め、その位相から定在波の腹の位置を求めた。発光スペクトルは定在波の腹の位置で最も発光強度が高い、と仮定した。測定はすべて室温で行った。

**結果および考察：** 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



**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.

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 のときが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 のときが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 703eV 付近は Fe 3d 電子の majority spin 状態、704eV 付近は Fe 3d 電子の minority spin 状態を反映している[9]。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 層に向か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。

**今後の課題：** 今回の結果から、定在波法と発光分光法を組み合わせから Fe/Si 界面の深さ方向の Fe3d 部分状態密度の変化が得られることが明らかになった。今後は、Si 膜厚の違いによる層間結合の異なる Fe/Si 界面での測定、入射光に円偏光を用いた測定、あらたな界面系への応用などを考えていきたい。

## 参考文献

- 1) P. Bruno and C. Chappert, Phys. Rev. Lett., **67** (1991) 1602.
- 2) W. Baltensperger and J. S. Helman, Appl. Phys. Lett., **31** (1990) 2954.
- 3) Z.-P. Shi, P. M. Levy, and J. L. Fry, Phys. Rev. B **49** (1994) 15159.
- 4) D. M. Edwards, et al., Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 493.
- 5) M. D. Stiles, Phys. Rev. B **48** (1993) 7238.
- 6) P. Bruno, J. Appl. Phys., **76** (1994) 6972.
- 7) S.-H. Yang, et al., J. Phys., Condens. Matter. **14** (2002) L407.
- 8) T. Ejima, T. Harada, and A. Yamazaki, Appl. Phys. Lett., **89** (2006) 021914.
- 9) C. F. Hague, et al., Phys. Rev. B **48** (1993) 3560