深さ分解 XMCD による FeRh 合金薄膜の クラスターイオン照射効果の評価

Depth profile of ferromagnetism induced by energetic cluster ion irradiation in FeRh thin films

松井利之^{A)}、杣 龍之介^{A)}、斎藤勇一^{B)}、岩瀬彰宏^{A)} Toshuyuki Matsui^{A)}, Ryunosuke Soma^{A)}, Yuichi Saitoh^{B)}, Akihiro Iwase^{A)} ^{A)} Osaka Prefecture University ^{B)} Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Depth profile of irradiation-induced ferromagnetism in FeRh alloy was estimated by the XMCD measurement. The result shows that the magnetic moment induced by C2 cluster ions near the surface is larger than that induced by C1 single atom ions.

Keyword: XMCD, surface magnetic moment, cluster ion effect.

1.1 はじめに

我々はいままで、FeRh 合金薄膜における Au₃, C₆₀ などのクラスターイオン照射効果について明らかに してきた。しかしながら、クラスター効果が薄膜試 料内のどの領域にまで及んでいるのか、などは未だ 明らかにできていない。そこで本実験では、KEK-PF における深さ分解 XMCD (X線磁気円2色性)測定 により、カーボンクラスターイオン照射効果の深さ 依存性を定量的に評価し、FeRh 合金におけるクラス ターイオン照射効果について本質的な理解をするこ とで、表面領域における深さ方向の磁気改質を定量 的に制御できる可能性を見出すことを目指した。

3.2 実験方法

3.2.1 FeRh 合金薄膜の作製

イオンビームスパッタリング法を用いて、膜厚が 50 nm の FeRh 合金薄膜を作製し、製膜後試料に対し て真空炉で均質化熱処理を行った。なお、未照射の 状態では、全ての試料で同じ飽和磁化の値を示すこ とを SQUID 磁化測定により確認している。

3.2.2 クラスターイオンビーム照射

量子研究機構高崎量子応用研究所において、0.5 MeV の C_1 単原子イオン、1.0 MeV の C_2 クラスター イオンの照射を行った。なお、各々の照射において、 照射された C 原子の総数、単位時間あたりに照射さ れる C 原子数、そして、C 原子 1 個当たりの速度と いった照射パラメータはすべて同一となるように照 射条件を定めた。また、照射量は 1.5×10^{14} C/cm²~ 4.5×10^{14} C/cm² とした。

3.2.3 深さ分解 XMCD 測定による磁気特性評価

イオン照射した試料に関して深さ分解 XMCD 測定 による表面磁性測定を行った。XMCD スペクトルか ら深さ方向の磁気情報を得るためには X 線の吸収強 度を深さの関数として測定する必要がある。試料に X 線が吸収されると内殻に空孔が生じ、その緩和過 程において放出される Auger 電子の数は吸収強度に 比例すると考えてよい。Auger 電子の実効的な脱出 深度は出射角によって異なる。すなわち、垂直方向 に入射される電子は比較的深いところからでも脱出 できるのに対して、すれすれ出射の電子は浅いとこ ろからしか脱出できない。このことを利用して、電 子の出射角によってスペクトルを選別して検出すれ ば、異なる検出深度に対する一連の吸収スペクトル を得ることができる。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 深さ分解 XMCD 測定による磁気特性評価

各照射試料について、得られた XMCD スペクトル から求めた Fe 原子 1 個当たりの磁気モーメントの 検出深度依存性を Fig. 1 に示す。各検出深度におけ る磁気モーメントの値は、試料表面から各検出深度 までの平均磁気モーメントを表している。磁気モー メントの深さプロファイルが各照射試料によって異 なっていることは明らかである。また、照射した C 原子の個数などが同一にも関わらず、単原子イオン 照射と C₂ クラスターイオン照射では磁気モーメン ト絶対値が異なっている。



Fig.1 Probing depth dependence of magnetic moment of Fe atom for irradiated samples under the fluence of 1.5×10^{14} C/cm² and 4.5×10^{14} C/cm².

3.3.3 解析

得られた磁気モーメントの検出深度依存性をより 定量的に考察する為に、試料の極表面領域(~20 Å) をさらに8層に分けたモデルを考えた。検出深度 *x* で観測される磁気モーメント *y*(*x*)は、*a* を面間距 離、*i* を層の番号として次式で表される。

$$y(x) = \frac{M(top) + \sum_{j=2}^{n} M(j) \cdot exp\left(-\frac{(j-1)a}{x}\right)}{\sum_{j=1}^{n} exp\left(-\frac{(j-1)a}{x}\right)}$$
(3.1)

ここでM(top)は薄膜試料の最表面層の磁気モーメン トを表しているが、最表面については、酸化や表面 吸着等によりXMCDシグナルが正確に得られない領 域のため、M(top)は0 µb/atomと仮定する。我々はこの モデルを用いて、各層(第1層~第8層)における磁気モ ーメントの値を適当に決めることで得られるシミュ レーション結果が、測定結果と一致するように解析 を行った。さらには、以前の測定で得られている 「FeRh合金薄膜にイオン照射をした際に弾性的はじ き出しにより付与されるエネルギーとそれにより誘 起される飽和磁化との関係性」を用いることで、弾 性的付与エネルギーの深さ挙動も明らかにすること まず、FeRh合金薄膜試料にC1単原子イ ができる。 オン照射をした場合について述べる。TRIMシミュレ ーションで得られた結果より、極表面領域(~20 Å)に おいて、エネルギーはほぼ均一に付与される(Fig. 2(a))。その為、磁気モーメントy(x)も、深さ方向に均 - に分布していると評価できる。これらのパラメー タを用いることで得られたシミュレーション結果を Fig. 3(a)の点線に示す。図より、得られたシミュレー ション結果は、深さ分解XMCDにより得られた測定 結果と良い一致を示していることが分かる。



Fig.2 Depth profile model of the apparent deposition energy by elastic collision with (a) C_1 ion and (b) C_2 cluster ion beam irradiation.



Fig.3 Depth dependence of the magnetic moment of Fe atom for irradiated samples with (a) C_1 ions and (b) C_2 cluster ions. The dotted lines represent the simulation result, details of which are written in the text.

次に、C2クラスターイオン照射をした場合を考える。 C₂クラスターイオン照射の場合、TRIMを用いて付与 エネルギーを計算することはできない。その為、照 射量が小さい場合について、Fig.3(b)に示された深さ 分解XMCDにより得られた深さプロファイルの挙動 を説明する為には、磁気モーメントy(x)が、深さ方向 に対し、第5層目以降でピークを持つといった分布モ デルが適切である。その結果、第5層目以降にピーク を持つような実効的な付与エネルギーの深さプロフ ァイルを持つと結論付けることができた(Fig. 2(b))。 次に、照射量が大きい場合について考えると、Fig. 2(b)に示したエネルギー付与挙動を仮定することで、 シミュレーション結果は測定結果と良い一致を示し た(Fig. 3(b))。つまり、C₂クラスターイオン照射につ いてFig. 2(b)に示されたエネルギー付与挙動をとれ ば、照射量が小さい場合も大きい場合も、Fig.3(b)に 示された点線のように、深さ分解XMCDにより得ら れた深さプロファイルの挙動を説明することができ る。従って、極表面領域において、C2クラスターイ オン照射をした際の実効的なエネルギー付与挙動は、 単原子イオン照射の場合と比べ、Fig.4に示されたピ ークを持つ曲線を描くと評価できた。

[H27-4]



Fig.4 Estimated depth profile of the apparent deposition energy by elastic collisions.

これらより、クラスターイオンビーム照射は、特 に表面領域において、より効率的に実効的なエネル ギーを付与することができると結論付けることがで き、単原子イオン照射に比べて、表面領域により効 率的に強磁性を誘起することができることを明らか にした。

3.4 まとめ

表面領域において、クラスターイオンビーム照射 は、単原子イオン照射に比べ、より効率的に実効的 なエネルギーを付与することで、効率的にFeRh合金 の磁気改質をできることを本実験で明らかにした。 従って、クラスターイオン照射の照射量を適切に選 択することにより、表面領域に、単イオン照射とは 異なる様々な磁気深さプロファイルを作製できる。 これは、FeRh合金の磁気改質の応用といった観点で 非常に興味深い。