

# R E-T M二層膜における交換結合の強さの評価

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 物理工学専攻

檜 山 菜 月

# RE-TM 二層膜における交換結合の強さの評価

Evaluation of Strength of Exchange-Coupling in RE-TM Films

平成 18 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 物理工学専攻

檜山 菜月



# 目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 光磁気記録媒体	1
1.3 DWDD	2
1.3.1 はじめに	2
1.3.2 再生原理	2
1.3.3 移動層に求められる特性	3
1.4 交換結合	4
1.4.1 強磁性交換結合と反強磁性交換結合	4
1.4.2 フェロ磁性体における AFC	4
1.4.3 RE-TM 膜の磁氣的性質	5
1.4.4 RE-TM 交換結合二層膜	6
1.4.5 フェリ磁性体における AFC	9
1.5 本研究の目的と概要	10
第2章 界面磁壁エネルギーと交換結合エネルギー	11
2.1 はじめに	11
2.2 界面磁壁のできる場合とできない場合	11
2.3 界面磁壁エネルギー	12
2.4 交換結合エネルギー	13
2.5 Gd-Fe-Co 二層膜や Tb-Fe-Co 二層膜の AFC	13
第3章 実験方法	14
3.1 はじめに	14
3.2 試料作製	14
3.2.1 装置	14
3.2.2 条件	15
3.2.3 組成	17
3.3 測定方法	17
3.3.1 $M-H$ ループ	17

3.3.2 膜厚 .....	18
3.3.3 Kerr 効果 .....	18
3.3.4 熱的安定性 .....	18
<b>第4章 Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co の AFC とスパッタガス圧の影響 .....</b>	<b>19</b>
4.1 はじめに .....	19
4.2 試料 .....	19
4.3 $M-H$ ループと Kerr ループ .....	21
4.4 スパッタガス圧の影響 .....	22
4.4.1 $2M_{st}H_w$ の AFC 層膜厚依存性 .....	22
4.4.2 $2M_{st}H_w$ の熱的安定性 .....	23
<b>第5章 Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co の AFC .....</b>	<b>25</b>
5.1 はじめに .....	25
5.2 試料 .....	25
5.3 $M-H$ ループと Kerr ループ .....	27
5.4 $2M_{st}H_w$ の AFC 層膜厚依存性 .....	28
5.5 $2M_{st}H_w$ の熱的安定性 .....	28
<b>第6章 Gd-Fe-Co 二層膜と Tb-Fe-Co 二層膜 .....</b>	<b>30</b>
6.1 はじめに .....	30
6.2 AFC 層が Ru の場合 .....	30
6.3 AFC 層が Rh の場合 .....	31
6.4 交換結合エネルギーの AFC 層膜厚依存性 .....	31
<b>第7章 総括 .....</b>	<b>33</b>
謝辞 .....	35
参考文献 .....	36
論文目録 .....	37

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

エコロジーとエコノミー，これらを共存させていくことが，私たちの未来の生活をさらに豊かにしていくための一つの条件である．記録媒体をとってもそうである．小さな媒体に多くの情報を詰め込むことができれば，資源の節約にも，経済面の節約にもなる．そこで私たちは，より大容量の媒体を求めるのである．2004 年 1 月にソニー株式会社から発表された「Hi-MD<sup>1)</sup>」は MD との互換性を持つ光磁気ディスクの 1 つであり，磁壁移動検出方式(DWDD:Domain Wall Displacement Detection)を用いることによって，MD と同サイズにしながら 1GB の容量を持ち，音楽データだけでなく PC データ，画像，動画を扱うことが可能である．エコロジーとエコノミーを共存させた技術は，今後，私たちの生活をより良く支えていくだろう．

### 1.2 光磁気記録媒体<sup>2)</sup>

光磁気記録には，希土類(Gd, Tb など)と 3d 遷移金属(Fe, Co など)の非晶質合金薄膜が使用されている．この希土類-3d 遷移金属(Rare Earth-3d Transition Metal:RE-TM)膜を膜面に垂直方向に磁化するように異方性を持たせ，角形ヒステリシスを有する垂直磁化膜とする．これを外部磁界により 1 方向に磁化した後，レーザーを照射する．照射領域はキュリー温度 $T_c$ 以上になり，照射領域周囲の自発磁化の残る部分からの反磁界によって，磁化が反転され，温度下降とともに記録される．また外部から磁界を加える方法もあり，温度下降とともに外部磁界方向に磁化が復活し，記録される．よって，光の断続による書き込みの制御と，光による温度上昇のもとでの磁界の断続による書き込み制御の方法が可能となる．前者を光変調記録(LIM:light intensity modulation)，後者を磁界変調記録(MFM:magnetic field modulation)と呼ぶ．後者では，高密度記録になると磁界変調の周波数を高くしなければならず，磁界発生ヘッドの設計，特に，その熱損失が厳しくなっていく．また両方の特徴を活かし，光と磁界の同時変調による高密度記録法もある．

再生は，磁化の向きによる反射光の偏波面の回転角に違いを生じる現象，すなわち磁気光学効果を利用する．記録された磁化の向きが上向きか下向きかによって反射光の偏波面が逆向きに回転する現象(Kerr 効果)を利用し，検出した偏波面の回転を検光子により光の強弱に変換し，これを受光素子により電圧として検出する．

消去は，記録と同様に，レーザー光を照射し，外部磁界を加え，記録前の磁化の方向に戻すことにより行う．よって，MFM 方式では，消去と記録を同時に行うことができる．

## 1.3 DWDD

### 1.3.1 はじめに

磁気記録は線記録密度が高く、光記録はトラック密度が高い。光磁気記録は磁気記録でもあり光記録でもあるので、高線密度、高トラック密度の両立を実現できる高密度に優位なストレージ技術である。よって現行の赤色レーザーでも高密度記録は可能となるが、記録磁区が小さくなることで再生信号量が激減し、この検出限界が記録密度の限界となってしまう。この限界を打破するための方法のひとつに、再生する瞬間だけ記録磁区を拡大して再生信号を増幅する技術、磁区拡大再生がある。その中のひとつである磁区磁壁移動検出(DWDD: domain wall displacement detection)方式について述べる。

### 1.3.2 再生原理<sup>3)</sup>

DWDD 方式は、温度勾配による磁壁移動現象という磁性膜の性質を利用した再生方式である。DWDD 方式における再生原理図を図 1-1 に示す。記録媒体は、小さな磁壁抗磁力を呈する移動層(Displacement layer)、相対的に低いキュリー温度 $T_c$ を有する切断層(Switching layer)、及び大きな磁壁抗磁力を持つ記録層(Memory layer)からなる交換結合三層膜である。

記録膜面上を再生用レーザー光で局所的に加熱すると、記録膜面には図 1-1(a)に示したような温度分布が形成される。これに伴い磁壁エネルギー密度 $\sigma$ の分布は図 1-1(b)のように形成される。温度が上昇するほど $\sigma$ は低下するので、記録媒体の最高温度位置でもっとも低くなるような分布を形成する。この結果、移動層内の磁壁を $\sigma$ の低い高温側へ移動させようとする磁壁駆動力(Driving force)  $F$ が図 1-1(c)に示すように発生する。

媒体温度が $T_c$ よりも低い場所では、各磁性層が互いに交換結合しているため、温度勾配による磁壁駆動力が作用しても記録層の大きな磁壁抗磁力に阻止されて磁壁移動は起こらない。ところが、媒体温度が $T_c$ よりも高い場所では、移動層と記録層との交換結合が切断されるため、磁壁抗磁力の小さな移動層中の磁壁は、温度勾配による磁壁駆動力で磁壁の移動ができるようになる。このため媒体の走査に伴って結合切断領域に侵入した瞬間に、移動層中の磁壁の高温側への磁壁移動が起こる。

この磁壁移動は、記録膜中の信号に対応した間隔で形成されている磁壁が、媒体走査に伴って $T_c$ の位置を通過するたびに発生する。従って、媒体を一定速度で走査すると、記録されている磁壁の空間的間隔に対応した時間間隔で磁壁移動が発生することになる。この磁壁移動の発生を検知することにより、記録信号を再生することができる。

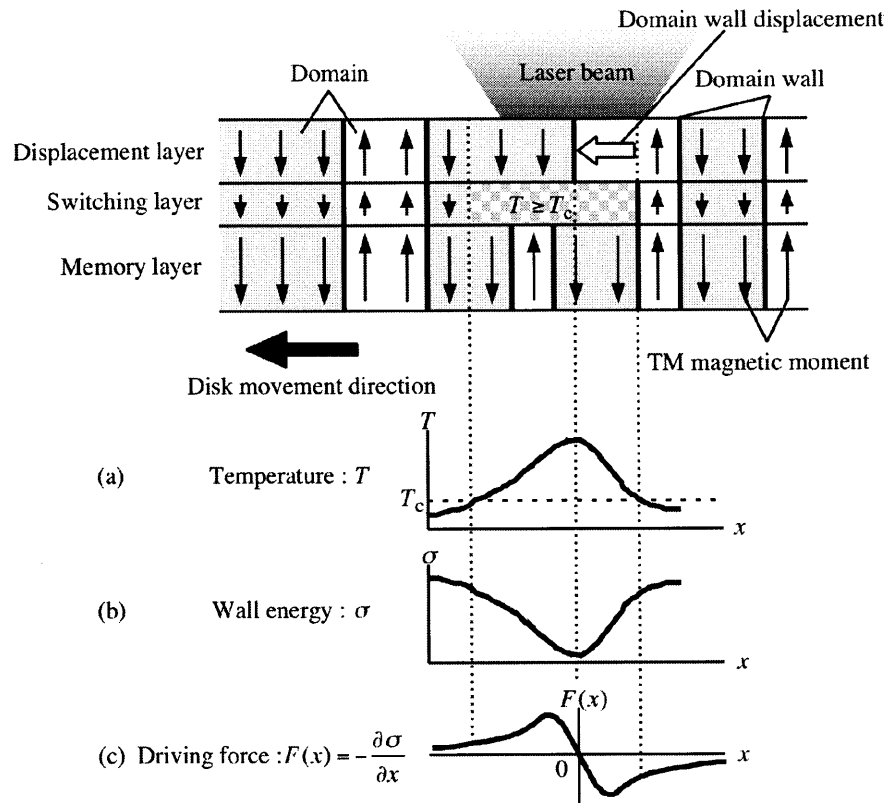


図 1-1 DWDD の再生

### 1.3.3 移動層に求められる特性

DWDD の問題点は、移動層において、記録層の記録マーク長の違いによる浮遊磁界が発生、変動するため、移動磁壁にかかる磁壁駆動力も変動してしまうことである。そこで、浮遊磁界の影響を小さくするために移動層の磁化を小さくする必要がある。移動層を二層膜にし、磁化を反平行に結合させ見かけ上の磁化をゼロにすることができれば、浮遊磁界の影響を受けなくて済むと考えられている。この結合に強磁性交換結合を利用すると、二層を異なる組成で成膜する必要があるが、磁壁移動はある温度範囲で行なわれるので、その全温度範囲で見かけの磁化をゼロにすることができない。これは、組成が違ふことから二層の温度依存性が異なるので、加熱時に二層の磁化の大きさが異なってしまうことによる。そこで、結合に反強磁性交換結合を利用して、二層とも同じ組成の二層膜を用いれば、磁壁移動が行なわれる全温度範囲で見かけの磁化をゼロにすることができ、移動磁壁が浮遊磁界の影響を受けなくすることが可能となる。強磁性交換結合と反強磁性交換結合については、1.4.1 で詳しく述べる。

## 1.4 交換結合

### 1.4.1 強磁性交換結合と反強磁性交換結合

磁性層内ではスピン-スピン間に交換相互作用が働いている。この磁性層を複数層重ねると、その界面においても交換相互作用が働き、この状態を“磁性層間で交換結合している”と表現する。この交換結合には、強磁性交換結合(Ferromagnetic Exchange Coupling;FC)と反強磁性交換結合(Antiferromagnetic Exchange Coupling;AFC)の二通りがある。例えば、Coのような強磁性層を単純に二層重ねたとすると、二層の界面では交換相互作用が働き、一層目と二層目のスピンは同じ方向を向く。このように界面を挟んでスピンが平行に並ぶ場合が FC である。また、強磁性層間に Ru などの薄い非磁性層を挟むことで、負の交換相互作用が働くようになり、一層目と二層目のスピンが反平行に並ぶことが知られている。このように界面を挟んでスピンが反平行に並ぶ場合が AFC である。そして FC と AFC は磁性層間に挟む非磁性層の厚さによって振動的に現れることが知られている。

### 1.4.2 フェロ磁性体における AFC<sup>4)</sup>

フェロ磁性体において、磁性層間に Cr, Ru, Cu などの非磁性遷移金属の薄い層(Spacer 層)を挟むことで隣接する磁性層が AFC となることはよく知られている。ここで、フェロ磁性体である Co において、層間に 3d, 4d, 5d 遷移金属を挟んだ多層膜系の交換結合の強さと振動周期の系統的な変化の研究が報告されているので紹介する。表 1-1 において  $2J$  は AFC が得られた場合の 1 次ピークでの交換結合の強さである反強磁性交換結合エネルギー  $J$  の 2 倍の値であり、 $t_{\text{peak}}$  はそのときの Spacer 層の膜厚である。 $J$  でなく  $2J$  と示したのは、磁性層がフェリ磁性体の場合の交換結合の強さと比較する際にわかりやすくするためである。反強磁性交換

表 1-1 様々な元素の AFC 層における  $t_{\text{peak}}$  と  $2J$ <sup>4)</sup>

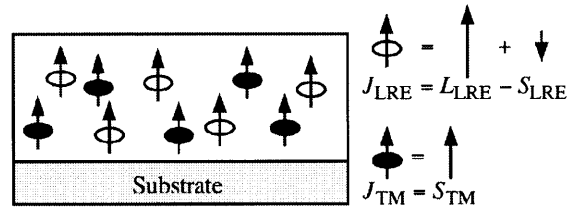
Element									
$t_{\text{peak}}$ (Å)		$2J(\text{erg}/\text{cm}^2)$							
Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu		
No Coupling	9   0.2	7   0.48		Ferro-Magnet	Ferro-Magnet	Ferro-Magnet	8   0.6		
Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag		
No Coupling	9.5   0.04	5.2   0.24		3   10	7.9   3.2	No Coupling	No Coupling		
Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au		
No Coupling	7   0.02	5.5   0.06	4.2   0.82		4   3.7	No Coupling	No Coupling		



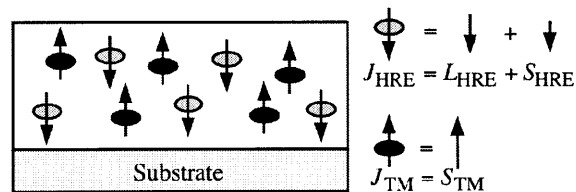
結合エネルギーについては、第 2 章で詳しく述べる。表 1-1 より、Ru を Spacer 層に用いた時が  $2J$  が最も大きく、 $t_{\text{peak}} = 3\text{\AA}$  のときに  $10\text{erg/cm}^2$  となっている。また、Rh の場合では  $t_{\text{peak}} = 7.9\text{\AA}$  のときに  $2J = 3.2\text{erg/cm}^2$  となっている。今後は、Ru や Rh のように磁性層間に反強磁性交換結合力を働かせるために挟む Spacer 層を、AFC 層と呼ぶこととする。

#### 1.4.3 RE-TM 膜の磁氣的性質<sup>2)</sup>

RE-TM 非晶質合金材料では、RE のスピンの TM のスピンは反平行に結合する。La から Eu までの軽希土類(LRE: Light Rare Earth)を含む合金では、LRE のスピン  $S_{\text{LRE}}$  と LRE の軌道角運動量  $L_{\text{LRE}}$  が反平行で  $S_{\text{LRE}}$  より  $L_{\text{LRE}}$  の方が大きいので LRE の全角運動量  $J_{\text{LRE}}$  と TM のスピン  $S_{\text{TM}}$  が平行に結合するため、フェロ磁性を示す。一方、Gd から Lu までの重希土類(HRE: Heavy Rare Earth)を含む合金では、HRE のスピン  $S_{\text{HRE}}$  と HRE の軌道角運動量  $L_{\text{HRE}}$  が平行であるので HRE の全角運動量  $J_{\text{HRE}}$  と  $S_{\text{TM}}$  が反平行に結合するため、フェリ磁性を示す。フェロ磁性体における原子磁気モーメントの模式図を図 1-2(a)に、フェリ磁性体についてを図 1-2(b)に示す。



(a) Alloy of Light Rare Earth (LRE) and 3d Transition Metal



(b) Alloy of Heavy Rare Earth (HRE) and 3d Transition Metal

図 1-2 RE-TM 膜における原子磁気モーメント

LRE-TM 合金膜は、フェロ磁性であるために磁化が大きくなり、反磁界エネルギー  $2\pi M_s^2$  が大きく、垂直磁化膜になりにくい。HRE-TM 合金膜では、フェリ磁性であるので磁化がそれ程大きくなり、 $2\pi M_s^2$  が小さいので容易に垂直磁化膜が得られる。そのため、光磁気記録媒体には HRE-TM 合金膜が主に用いられている。本研究で用いる試料も HRE-TM 合金膜であり、今後はこれを単に RE-TM 膜と示す。ここで  $M_s$  は飽和磁化であり、フェリ磁性では RE の副格子磁化  $M_{RE}$  と TM の副格子磁化  $M_{TM}$  が反平行に結合するため、

$$M_s = |M_{RE} - M_{TM}| \quad (1-2)$$

で与えられる。ここで、 $M_{RE}$  と  $M_{TM}$  が等しく  $M_s = 0$  となることを補償組成と言う。本研究では、 $M_{RE}$  が  $M_{TM}$  より大きい場合を RE-rich、その逆の場合を TM-rich と呼ぶ。

#### 1.4.4 RE-TM 交換結合二層膜<sup>5)</sup>

RE-TM 二層膜において、外部磁界  $H = 0$  で第一層の磁化  $M_{s1}$  と第二層の磁化  $M_{s2}$  が平行になるタイプを P(Parallel)-type、反平行になるタイプを A(Antiparallel)-type と呼び、それぞれ図 1-3(a)、図 1-4(a)に示す。

P-type において RE-TM 二層膜を FC させた場合を図 1-3(b)に示す。各層の TM 副格子磁化  $M_{TM}$  同士及び RE 副格子磁化  $M_{RE}$  同士は平行に結合するため、両層 TM-rich、あるいは両層 RE-rich となる。それに対して AFC させた場合を図 1-3(c)に示す。各層の  $M_{TM}$  同士及び  $M_{RE}$  同士は反平行に結合するため、第一層が RE-rich で第二層が TM-rich、あるいはその逆の組み合わせとなる。

また、A-type においては、FC の場合を図 1-4(b)、AFC の場合を図 1-4(c)に示す。FC では各層の  $M_{TM}$  同士及び  $M_{RE}$  同士は平行に結合するため、第一層が TM-rich で第二層が RE-rich、あるいはその逆の組み合わせとなる。AFC の場合は各層の  $M_{TM}$  同士及び  $M_{RE}$  同士は反平行に結合するため、両層 TM-rich、あるいは両層 RE-rich となる。

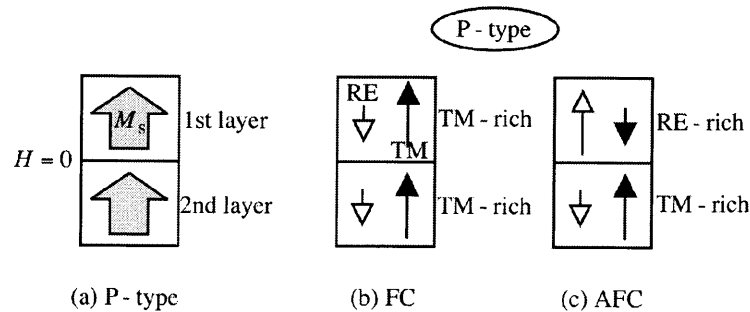


図 1-3 P-type における FC と AFC

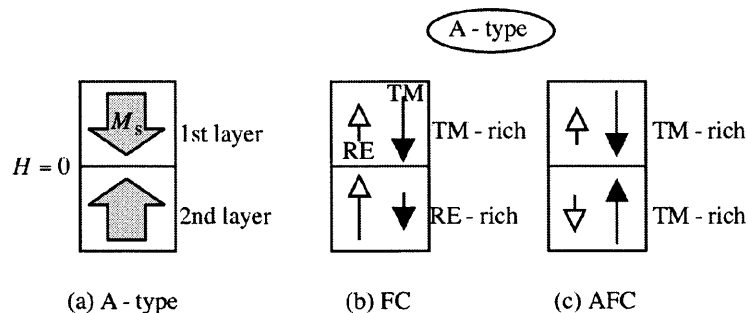


図 1-4 A-type における FC と AFC

図 1-5 に A-type の FC, AFC それぞれの  $M-H$  ループ, Kerr ループを示す. 図より,  $M-H$  ループだけでは FC, AFC の区別がつかないことがわかる. 一方 Kerr ループを見ると区別がつく. RE-TM 膜における Kerr 効果は, 赤色ないし近赤外における範囲中では, 主として TM 原子の磁化から生じており, Kerr 回転角の極性は  $M_{TM}$  の向きによって変わる. 本研究においては TM-rich の場合を右上がりのループとし, FC か AFC かの判断は Kerr ループにて行なった. また, 図 1-5 に示すような三段になっている  $M-H$  ループは A-type に特有なもので, これを異常ループと呼び, ここから交換結合の強さを算出できる. 交換結合の強さの算出については第 2 章で詳しく述べる. また, 条件によってこの異常ループは図 1-6 のように 2 段ループとなる. その場合は図に示したようにマイナーループを持ち, これを利用して交換結合の強さを算出できる. ちなみに P-type では, Gd-Fe-Co や Tb-Fe-Co のように補償組成付近でしか垂直磁化膜とならない場合, 二層の組成が近くなることで同時反転しやすく, 交換結合の強さを  $M-H$  ループから算出することができないことがあるので, 本研究では A-type 二層膜のみを作製した.

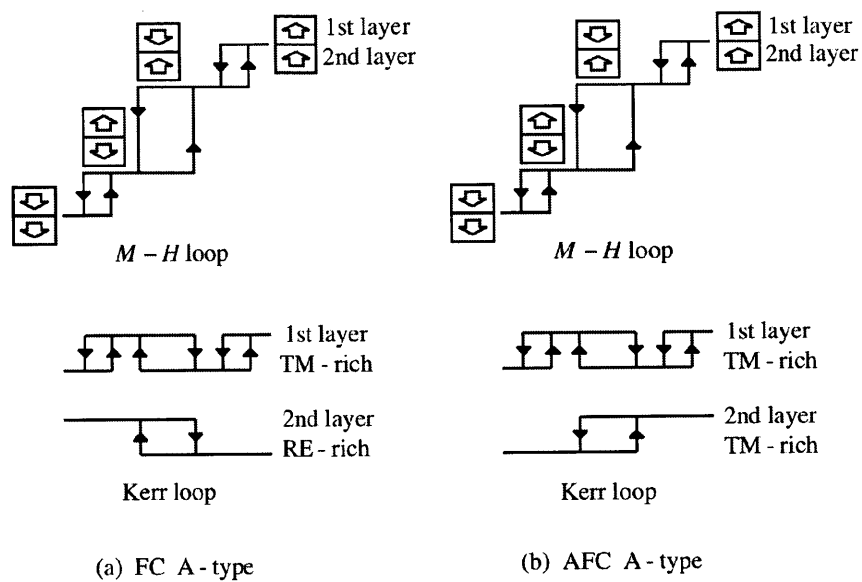


図 1-5 A-type における  $M-H$  ループと Kerr ループ(異常ループ)

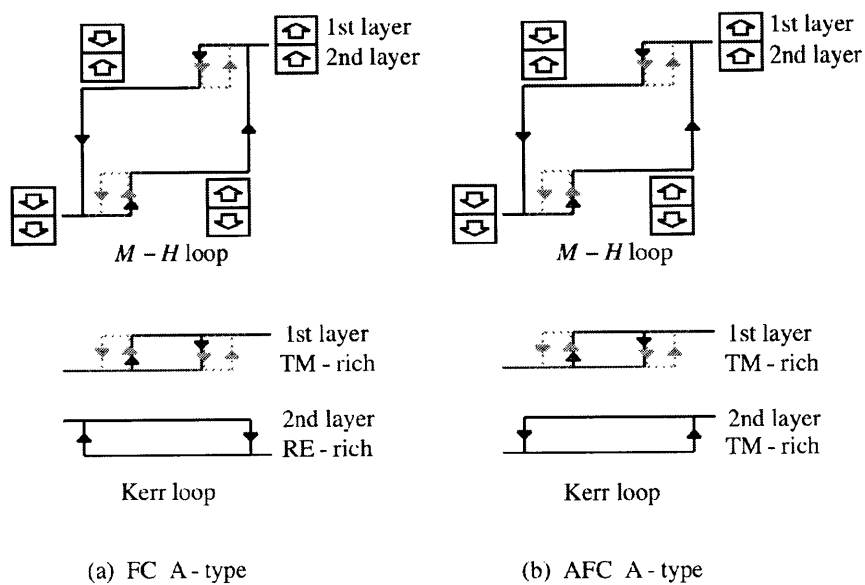


図 1-6 A-type における  $M-H$  ループと Kerr ループ(2 段ループ (点線はマイナーループを示す))

#### 1.4.5 フェリ磁性体における AFC

DWDD の移動層に用いられているフェリ磁性体, RE-TM 膜においても, AFC 層として Ru を挟むことで AFC が得られると報告がある. 図 1-7 に磁性層が Gd-Fe-Co, Tb-Fe-Co それぞれの場合の界面に蓄積されるエネルギー  $2M_{st}H_w$  の Ru 膜厚依存性を示す. ここで  $2M_{st}H_w$  は  $M-H$  ループから求めるのであるが, 詳細については第 2 章で述べる. Gd-Fe-Co 層間に Ru を挟んだ場合には, Ru 膜厚  $t_{\text{peak}} = 3\text{\AA}$  で  $2M_{st}H_w$  が最大となり, 約  $0.8\text{erg/cm}^2$  が得られている<sup>6)</sup>. また, Tb-Fe-Co 層間に Ru を挟んだ場合にも, やはり  $t_{\text{peak}} = 3\text{\AA}$  で  $2M_{st}H_w$  が最大となり, 約  $1.2\text{erg/cm}^2$  が得られている<sup>7)</sup>.

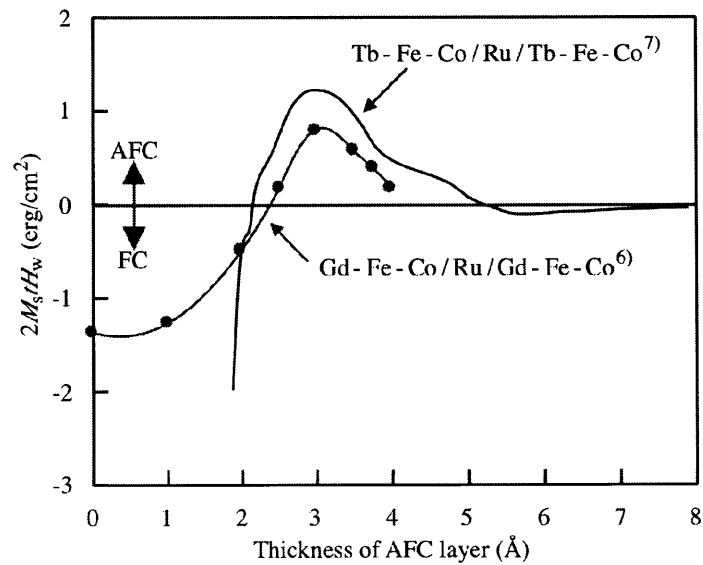


図 1-7 Gd-Fe-Co/Ru/Gd-Fe-Co<sup>6)</sup>と Tb-Fe-Co/Ru/Tb-Fe-Co<sup>7)</sup>における  $2M_{st}H_w$  の Ru 膜厚依存性

## 1.5 本研究の目的と概要

DWDD の移動層には、1.3.3 に示したように、

- 1) 記録層からの浮遊磁界の影響を受けないように見かけの磁化をゼロにすることが求められることから、A-type 二層膜にする必要がある。また、
- 2) 磁壁移動が行なわれる全温度範囲で見かけの磁化をゼロにすることを満たすため、二層の組成が等しくなるように A-type の AFC 二層膜を作製することが求められる。さらに、
- 3) 記録・再生時のレーザー加熱による交換結合エネルギーの熱的安定性の向上を実現することも必要である。

そこで、より大きな反強磁性交換結合エネルギーが得られる AFC 二層膜を作るため、Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co を AFC させることを試み、さらに成膜時にスパッタガス圧を変化させてみた。また、AFC 層が Ru の場合、磁性層が Gd-Fe-Co の時よりも Tb-Fe-Co の時の方が、AFC 時、界面に蓄積されるエネルギーが約 1.5 倍大きくなっていることが報告されているので、Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co を AFC させることを試み、Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co の結果と比較した。そして、これら AFC 二層膜の熱的安定性について調べ、FC 二層膜の熱的安定性と比較することで、実際に DWDD の移動層として実現可能かどうかを評価した。

また、界面に蓄積されるエネルギーを表す量として、界面磁壁エネルギーと交換結合エネルギーの 2 つが用いられるが、第 2 章で述べるように、これらは厳密に使い分けする必要があると考えられる。過去に報告された Gd-Fe-Co/Ru/Gd-Fe-Co、Tb-Fe-Co/Ru/Tb-Fe-Co と今回成膜した Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co、Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co の界面に蓄積されるエネルギーが、界面磁壁エネルギーなのか、交換結合エネルギーなのかを検討したので報告する。

以下に本研究の概要を述べる。

第 1 章では、光磁気ディスクの記録・再生原理を簡潔に説明した。また FC 及び AFC 二層膜について簡潔に述べた。

第 2 章では、界面磁壁エネルギーと交換結合エネルギーについて述べる。

第 3 章では、試料作製方法及び試料の評価方法について述べる。

第 4 章では、Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co について、AFC 二層膜を得ることができたので、その界面に蓄積されるエネルギーの Rh 膜厚依存性と熱的安定性について述べる。また、スパッタガス圧を変化させたときの界面に蓄積されるエネルギーへの影響について述べる。

第 5 章では、Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co について、AFC 二層膜を得ることができたので、その界面に蓄積されるエネルギーの Rh 膜厚依存性と熱的安定性について述べる。

第 6 章では、Gd-Fe-Co/AFC/Gd-Fe-Co、Tb-Fe-Co/AFC/Tb-Fe-Co(AFC=Ru,Rh)の界面に蓄積されるエネルギーが界面磁壁エネルギーなのか交換結合エネルギーなのか検討する。

最後に第 7 章で本研究を総括する。

## 第2章 界面磁壁エネルギーと交換結合エネルギー

### 2.1 はじめに

RE-TM 二層膜の交換結合の強さは、界面に蓄積されるエネルギーの大きさで評価されるが、このエネルギーは界面磁壁エネルギー  $\sigma_w$  または交換結合エネルギー  $J$  で表されている。これまでは  $\sigma_w = 2J$  と解釈されてきたが、これらは厳密に区別すべき量と考えられる。

### 2.2 界面磁壁のできる場合とできない場合

FC の場合、磁界を印加しない安定状態(図 2-1(b))では、二層のスピンは同じ方向を向いている。その状態から磁界を印加して二層のスピンを反平行にすると界面にエネルギーが蓄積される。このとき、図 2-1(a)に示したようにスピンの徐々に回転して界面磁壁を作る場合がある。また図 2-1(c)に示したように界面を挟んでスピンの反平行になる場合が考えられる。このようにスピンの界面で  $180^\circ$  回転している状態を、界面磁壁に対して、 $180^\circ$  スピン回転と呼ぶことにする。

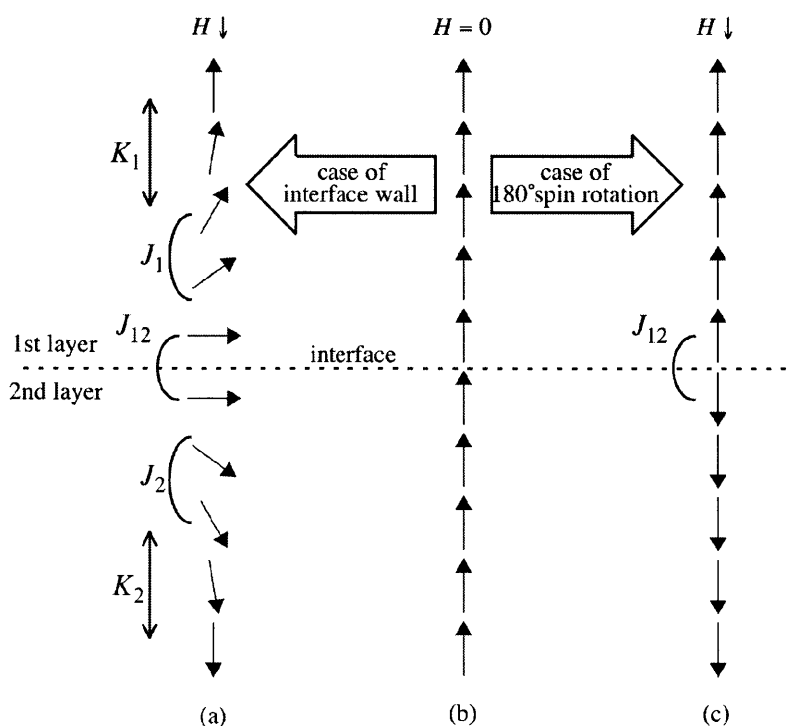


図 2-1 FC における(a)界面磁壁と(c) $180^\circ$ スピン回転

一方 AFC の場合、磁界を印加しない安定状態(図 2-2(b))では、二層のスピンは反平行を向いている。その状態から磁界を印加して二層のスピンを平行にすると界面にエネルギーが蓄積される。このとき、図 2-2(a)に示したように界面磁壁を作る場合と、図 2-2(c)に示したように界面を挟んでスピンの平行になる場合が考えられる。このようにスピンの同じ方向を向く状態を  $0^\circ$  スピン回転と呼ぶことにする。

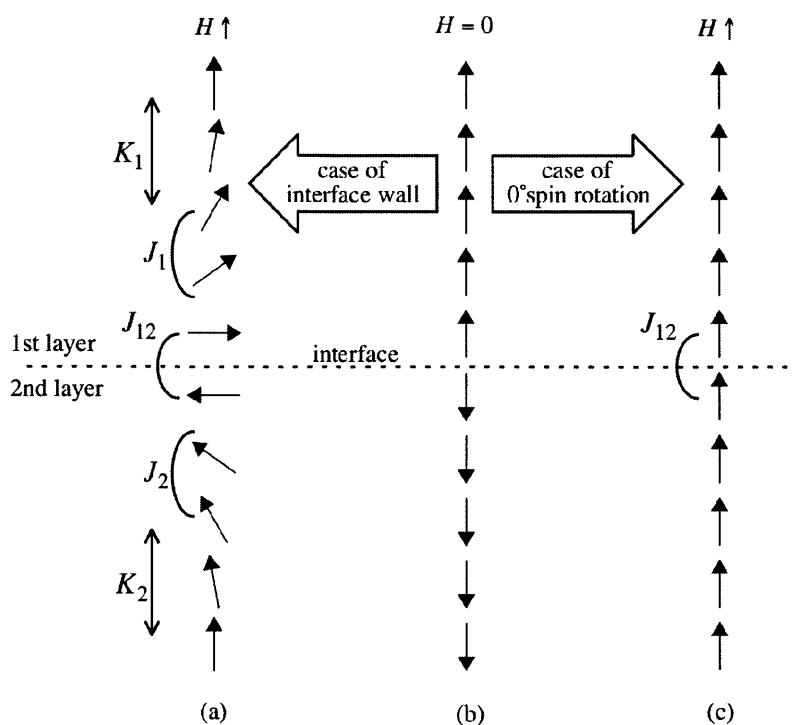


図 2-2 AFC における(a)界面磁壁と(c) $0^\circ$ スピン回転

### 2.3 界面磁壁エネルギー

図 2-1(a), 図 2-2(a)に示すように界面磁壁を作っているとき、界面に蓄積されるエネルギーを界面磁壁エネルギー  $\sigma_w$  と呼ぶことにする。  $\sigma_w$  は二層の間の交換積分  $J_{12}$  だけでなく各層内での交換積分  $J_1$ ,  $J_2$  と、各層の磁気異方性エネルギー定数  $K_1$ ,  $K_2$  に依存する。

例えば Gd-Fe-Co/Gd-Fe-Co の FC の場合、各層の膜面垂直方向に磁気異方性を持っている。二層のスピンの反平行になったとき、磁壁を作らないと界面に巨大なエネルギーが蓄積されてしまう。そこで界面磁壁を作って、エネルギーを下げていることがシミュレーションからわかっている<sup>9)</sup>。よって Gd-Fe-Co/Gd-Fe-Co の FC の場合、界面に蓄積されるエネルギーは  $\sigma_w$  であると言える。仮に界面磁壁を作らないで  $180^\circ$  スピン回転するときの界面に蓄積されるエネルギーを見積もると、  $\sigma_w$  に比べて 1~2 桁大きくなると考えられる。



## 2.4 交換結合エネルギー

図 2-1(b), 図 2-2(b)に示すように  $180^\circ$  スピン回転, または  $0^\circ$  スピン回転しているとき, 界面に蓄積されるエネルギーを交換結合エネルギー  $2J$  と呼ぶことにする.  $2J$  は二層間の交換積分  $J_{12}$  にのみ依存し,  $J_1$ ,  $J_2$  や  $K_1$ ,  $K_2$  には無関係である.

例えば Co/Ru/Co の AFC の場合, 磁界を印加していないときは, スピンは界面を挟んで反平行となっている. そこへ十分大きな磁界を印加すると, シミュレーションから, 界面を挟んでスピンの平行となるので  $0^\circ$  スピン回転していると考えられる<sup>8)</sup>. よって, Co/Ru/Co の AFC の場合, 界面に蓄積されるエネルギーは  $2J$  であると言える.

## 2.5 Gd-Fe-Co 二層膜や Tb-Fe-Co 二層膜の AFC

Gd-Fe-Co 二層膜や Tb-Fe-Co 二層膜の AFC の場合, 磁界をかけてスピンを平行にしたとき, 界面磁壁を作る場合と  $0^\circ$  スピン回転する場合の 2 通りが考えられる. 界面に蓄積されるエネルギーは図 2-3 のような  $M-H$  ループより, 実験的に  $2M_{st}H_w$  と求められる. ここで  $M_s$ ,  $t$  はループシフトする層の飽和磁化, 膜厚で,  $H_w$  はループシフト量である. 界面磁壁ができている場合,  $2M_{st}H_w = \sigma_w$  となり,  $0^\circ$  スピン回転している場合は  $2M_{st}H_w = 2J$  となる. 今後, Gd-Fe-Co 二層膜や Tb-Fe-Co 二層膜の AFC の場合のように  $\sigma_w$  と  $2J$  のどちらになるか判断できない場合, 界面に蓄積されるエネルギーは  $2M_{st}H_w$  で示す.

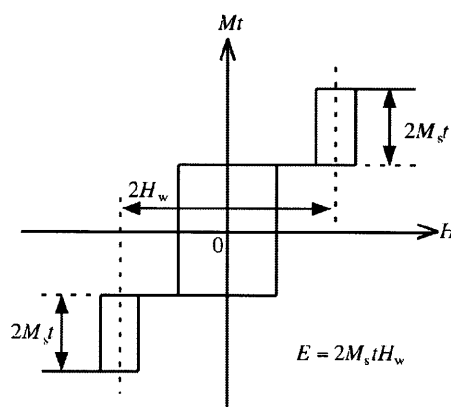


図 2-3 界面に蓄積されるエネルギー  $2M_{st}H_w$  の算出

## 第 3 章 実験方法

### 3.1 はじめに

本研究では、試料である薄膜の作製にスパッタ法を用いた。スパッタ法は、各種記録媒体(MO, DVD, HDD, MRAM)や半導体、電子部品の製造といった幅広い分野で不可欠な技術となっている。本章では、スパッタ装置の紹介と、試料の作製条件および作製した試料の磁気特性評価方法を述べる。

### 3.2 試料作製

#### 3.2.1 装置

本研究では、図 3-1 に示す高速 3 元 RF マグネトロン型スパッタリング装置(日本真空技術製 MHL-2304RD)を用いて試料を作製した。マグネトロンスパッタリング法とは、陰極となるターゲットから放出される二次電子を磁石(マグネット)によりターゲット近傍に束縛させ、ターゲット近傍で希ガスの電離を促進させることにより、高密度プラズマを生成させ、効率の良いスパッタリングを行う方法である。スパッタ源としては、マグネトロン式スパッタ源を 3

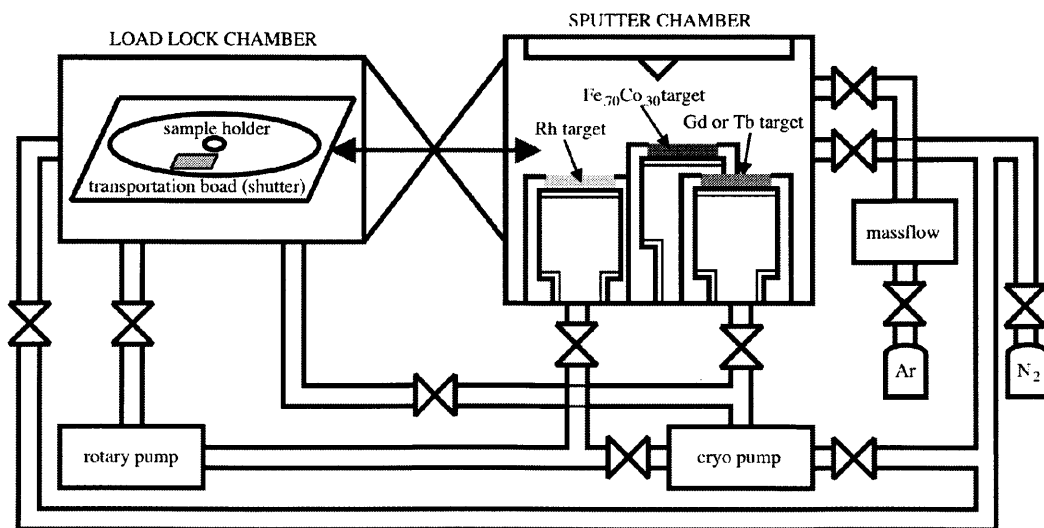


図 3-1 高速 3 元 RF マグネトロン型スパッタリング装置

つ有している。また、スパッタ用電源としては、RF13.56MHz、出力 1kW の高周波電源を 3 つ有しているため、3 元同時スパッタリングも可能である。基板は LOAD LOCK CHAMBER 内と SPUTTER CHAMBER 内を移動することが可能である。そのため、ターゲット交換以外は、SPUTTER CHAMBER 内を常に真空に保つことができ、ターゲットの酸化を極力防ぐことができる。

### 3.2.2 条件

試料の基板には、通常のスライドガラス(76mm×26mm×0.8~1.0mm)を用い、プリ洗浄として脱イオン水で 5 分以上、続いて洗浄液(セミコクリーン)で 10 分以上、最後に脱イオン水で 10 分以上超音波洗浄を行い、その後アルコールで水切りしドライヤーで乾燥させた。

試料作製に当たり、真空槽内の排気は油回転ポンプにより LOAD LOCK CHAMBER 内及び SPUTTER CHAMBER 内を 40Pa まで粗引きし、クライオポンプに切り換えて LOAD LOCK CHAMBER 内及び SPUTTER CHAMBER 内を  $2.0 \times 10^{-4}$  Pa 以下まで本引きを行った。ターゲットには Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>合金、Rh、及び Gd または Tb を用いた。

表 3-1 試料作製条件

vacuum level		$\leq 2 \times 10^{-4}$ Pa
Ar gas pressure		0.2 – 0.4Pa
substrate rotational speed		20rpm
presputter time		3minutes
AFC layer	Rh	0.09 – 0.11Å / sec
Gd - Fe - Co layer	Gd	0.22 - 0.24Å / sec
	Fe – Co	0.23 – 0.25Å / sec
Tb - Fe - Co layer	Tb	0.15 – 0.21Å / sec
	Fe – Co	0.19 – 0.25Å / sec
protective layer under layer	Rh	0.44Å / sec

表 3-1 に試料の作製条件を示す。成膜はすべて RF マグネトロンスパッタ法で行った。Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>と Gd または Tb のスパッタリングレートは、Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>のみ、Gd のみ、Tb のみをそれぞれスパッタして求めた。詳しいスパッタリングレートは 4.2, 5.2 に示す。スパッタリングレートの決定は 3.2.3 に示す手順で行なった。その際、同時スパッタにおいてスパッタリングレートが高いと、AFC 層界面の Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>濃度が変動してしまうことが懸念される。AFC 層界面に Co が多くなると交換結合力を高める Enhancement 層として働くとの報告<sup>9)</sup>から、Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>の濃度は大きな影響を与えと考えられる。そこで磁性層のスパッタリングレートは、AFC 層との界面における Fe-Co の濃度になるべく変動しないように低い値とした。

また、図 3-2 に示すように TM 副格子磁化の温度変化の方が RE 副格子磁化の温度変化よりも小さいことから、TM-rich の方が広い温度範囲において、比較的、組成が安定する膜を得ることができるので、二層の組成が同じでよい AFC 二層膜を作る場合には、両層が TM-rich となるように成膜した。

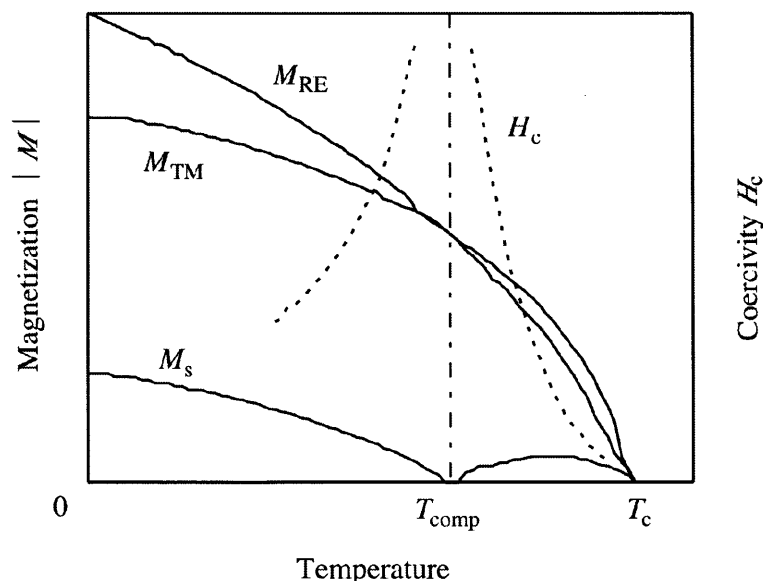


図 3-2 RE-TM 膜における磁化と保磁力の温度依存性

### 3.2.3 組成

RE (RE=Gd,Tb)と Fe-Co のスパッタリングレートは次の手順で決定した.

RE の堆積速度, 原子量, 密度をそれぞれ  $V(\text{RE})$ ,  $W(\text{RE})$ ,  $\rho(\text{RE})$ ,  $\text{Fe}_{1-y}\text{-Co}_y$  [ $y=0.3$ ] の堆積速度を  $V(\text{Fe-Co})$ , Fe の原子量, 密度をそれぞれ  $W(\text{Fe})$ ,  $\rho(\text{Fe})$ , Co の原子量, 密度をそれぞれ  $W(\text{Co})$ ,  $\rho(\text{Co})$ , アボガドロ数を  $N_A$  とし, 単位時間, 単位面積に堆積する RE, Fe-Co の原子数をそれぞれ  $N(\text{RE})$ ,  $N(\text{Fe-Co})$  とすると,

$$N(\text{RE}) = \frac{V(\text{RE})}{\frac{W(\text{RE})}{\rho(\text{RE})}} N_A \quad (3-1)$$

$$N(\text{Fe-Co}) = \frac{V(\text{Fe-Co})}{(1-y)\frac{W(\text{Fe})}{\rho(\text{Fe})} + y\frac{W(\text{Co})}{\rho(\text{Co})}} N_A \quad (3-2)$$

となり, RE の原子量パーセントは,

$$\frac{N(\text{RE})}{N(\text{RE}) + N(\text{Fe-Co})} \times 100 \quad (3-3)$$

として与えられる. RE-TM 膜は補償組成付近でしか垂直磁化膜が得られないことから, (3-3) 式で与えられる値が補償組成に近くなるように, また, 3.2.2 に示したようにスパッタリングレートがなるべく小さくなるように,  $V(\text{RE})$  と  $V(\text{Fe-Co})$  を決めた. Gd-Fe-Co の補償組成は Gd 約 20at%<sup>10)</sup>, Tb-Fe-Co の補償組成は Tb 約 24at%<sup>11)</sup> と報告されている.

## 3.3 測定方法

### 3.3.1 $M-H$ ループ

本研究において, 磁化曲線の測定は, 作製した試料を  $1.0\text{cm} \times 1.0\text{cm}$  に切り, 振動試料型磁力計(東英工業(株)VSM\_5 型)によって測定した. VSM は, S.Forner によって考案された磁化の測定方法で, 一定周波数, 一定振幅で試料を振動させ, それによって検出コイルに誘起される交流の誘導起電力をロックインアンプにより検出するものである. この測定は, 相対測定であるので標準試料によって校正を行う必要があり, 標準試料には, 測定試料と同じ形状の高純度 Ni を用いた.

### 3.3.2 膜厚

膜厚測定には触針式の表面粗さ測定器(株式会社 東京精密 surfcom)を用いた。触針式というのは、針の先に曲率半径数  $\mu\text{m}$  からその 1/10 程度のダイヤモンドやサファイヤをつけた触針が、ステップの位置で上下に変化するのをサンプルの移動によって機械的、光学的あるいは電氣的に拡大して読み取るものである。本研究では、あらかじめガラス基板に水性マジックで線を引いておき、その上からスパッタリングをした後、線を引いた部分をエタノールで拭いて取り除き、その段差を測定した。

### 3.3.3 Kerr 効果

極 Kerr 回転角の測定には分光垂直カー効果測定装置(日本科学エンジニアリング株式会社 BH-M800 型)を用いた。この装置は、偏光子によって直線偏光させた光を試料に入射させ、試料からの反射光の Kerr 回転角成分を検光子により光の強度成分に交換し、フォトディテクタで電気信号に変換して検出するものである。

### 3.3.4 熱的安定性

試料の加熱には試料加熱チャンバー(ネオアーク株式会社 BH-800TC4)を用いた。大気中で 3 分間、加熱温度に保持した後、5 分間以上空冷してから  $M-H$  ループを測定し、 $2M_{st}H_w$  を求めた。加熱温度を少しずつ上げていき、以上の過程を  $2M_{st}H_w$  が算出できなくなるまで繰り返して熱的安定性を求めた。

## 第 4 章 Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co の AFC と

### スパッタガス圧の影響

#### 4.1 はじめに

これまでに、フェリ磁性 Gd-Fe-Co 膜において、Co に代表されるフェロ磁性と同様、二層間に Ru を挟むことで AFC が得られることがわかっている<sup>9)</sup>。そこで、本研究では Gd-Fe-Co 二層間に Rh を挟んで AFC させることを試みた。また、更に大きな交換結合力を得るために、スパッタ条件を変えることを試みた。それにはスパッタガス種を変えてみる、レートを変えてみる、などいくつかの方法が考えられるが、本研究ではスパッタガスとして Ar を用い、その Ar ガス圧を変化させて、交換結合の強さに影響があるかどうかを調べた。Ru を AFC 層として用いた垂直磁気記録 AFC 媒体の場合には Ar ガス圧が低いときほど反強磁性交換結合力が大きくなり、そのピークを示すときの Ru 膜厚は Ar ガス圧が低いときほど薄い方へシフトするという報告がされている<sup>12)</sup>。

#### 4.2 試料

図 4-1 に実験で作製した試料の膜構成を示す。下地層と保護層の Rh は磁性層 Gd-Fe-Co の酸化を防ぐための層である。AFC 層の Rh は二層間に反強磁性交換結合力を働かせるための層である。磁性層は Gd ターゲットと Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub> 合金ターゲットの同時スパッタにより成膜し、FC の場合には二層を RE-rich と TM-rich の異なる組成で、AFC の場合は二層とも TM-rich で成膜した。スパッタリングレートを表 4-1 に示す。成膜する際、スパッタガスである Ar のガス圧は、0.2, 0.3, 0.4Pa と変化させた。

protective layer	Rh	70Å
magnetic layer	Gd - Fe - Co	500Å
AFC layer	Rh	0-12Å
magnetic layer	Gd - Fe - Co	500Å
under layer	Rh	70Å
substrate		

図 4-1 Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co 膜構成

表 4-1 Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co スパッタリングレート

AFC layer	Rh	0.11Å /sec
Gd - Fe - Co    TM - rich	Gd	0.22Å /sec
	Fe - Co	0.25Å /sec
Gd - Fe - Co    RE - rich	Gd	0.24Å /sec
	Fe - Co	0.23Å /sec
under and protective layer	Rh	0.44Å /sec



### 4.3 $M-H$ ループと Kerr ループ

図 4-2(a)に実際に測定した FC A-type ( $R_h=0\text{\AA}$ , Ar ガス圧 $=0.4\text{Pa}$ ), (b)に AFC A-type ( $9.5\text{\AA}$ ,  $0.4\text{Pa}$ )の  $M-H$ ループと Kerr ループの結果を示す. ここでは, 基板側を第一層, 膜面側を第二層とした. Kerr ループの極性は, TM-rich のときに右上がりとした. (a)では, Kerr ループより, 第一層が TM-rich, 第二層が RE-rich であり, 異常ループを示していることから, FC A-type であることがわかる. また(b)では, Kerr ループより, 第一層, 第二層共に TM-rich であり, やはり異常ループを示していることから AFC A-type であることがわかる. したがって, Gd-Fe-Co 二層膜において, 層間に Rh を挟むことで AFC が得られることがわかった. 同様に  $0.2\text{Pa}$ ,  $0.3\text{Pa}$  の場合も, AFC させることができた,

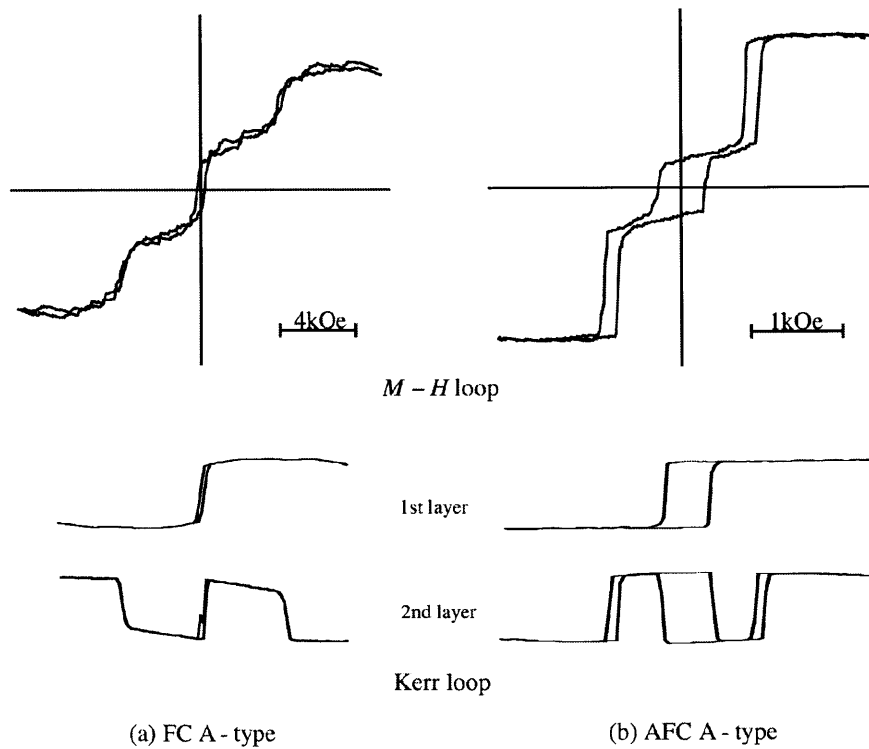


図 4-2 Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co の  $M-H$ ループと Kerr ループ

#### 4.4 スパッタガス圧の影響

##### 4.4.1 $2M_{st}H_w$ の AFC 層膜厚依存性

各 Ar ガス圧における界面に蓄積されるエネルギー  $2M_{st}H_w$  の Rh 膜厚依存性を図 4-3 に示す。また図 4-4 には、各 Ar ガス圧について図 4-3 の Rh 膜厚が 6.0~10.0Å の部分を拡大したものを示す。 $2M_{st}H_w$  の値は、FC の場合には負、AFC の場合には正として示した。図 4-3 からわかるように、Ar ガス圧が 0.2Pa の場合、Rh 膜厚が 0~7.0Å の範囲で FC、8.0~10.0Å の範囲で AFC となった。Rh 膜厚が 10.0Å よりも厚くなると、異常ループを得ることができなかった、また AFC の時、 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 7.5~8.5Å で最大値、約 0.83 erg/cm<sup>2</sup> となった。Ar ガス圧が 0.3Pa の場合には、Rh 膜厚が 0~7.0Å の範囲で FC、7.5~10.0Å の範囲で AFC となった。Rh 膜厚が 10.0Å よりも厚くなると、やはり、異常ループを得ることができなかった、また AFC の時、 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 8.5~9.5Å で最大値、約 0.74 erg/cm<sup>2</sup> となった。Ar ガス圧が 0.4Pa の場合は、Rh 膜厚が 0~6.0Å の範囲で FC、7.0~12.0Å の範囲で AFC となった。Rh 膜厚が 12.0Å 以上では異常ループを得ることができなかった。 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 8.5~10.0Å で最大値、約 0.7 erg/cm<sup>2</sup> となった。結果、図 4-4 から明らかなように、Ar ガス圧が低いときほど大きな  $2M_{st}H_w$  が得られ、そのピークとなるとき Rh 膜厚は Ar ガス圧が低いときほど薄い方にシフトした。これは、スパッタガス圧を低くしたことで、膜構造が緻密になったのが原因であると考えられる。この結果は Ru を AFC 層として用いた垂直磁気記録 AFC 媒体の場合<sup>12)</sup>と同様である。

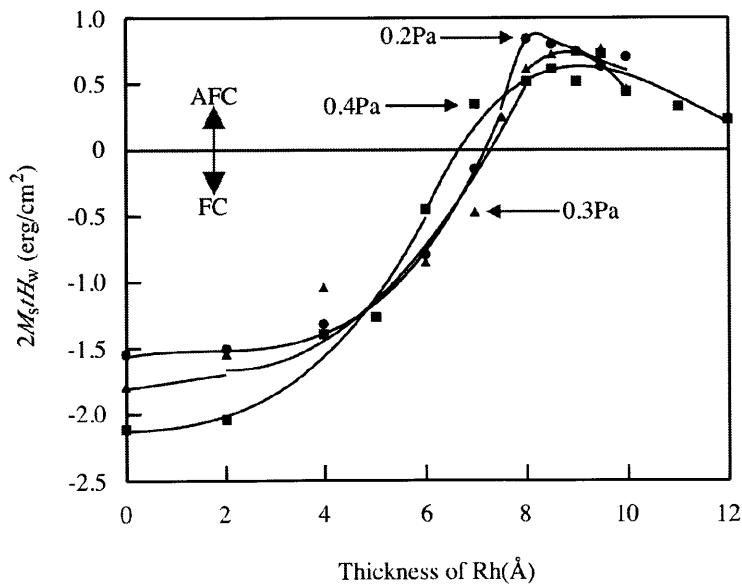


図 4-3 各ガス圧における  $2M_{st}H_w$  の Rh 膜厚依存性

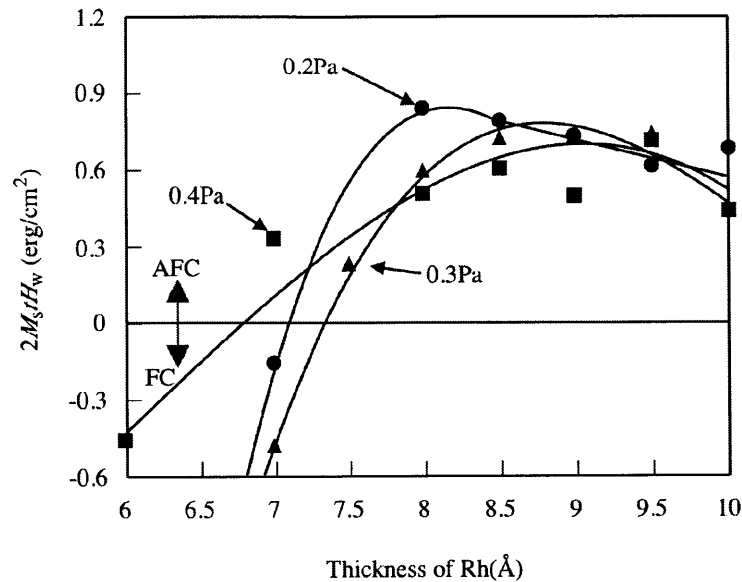


図 4-4 各ガス圧における  $2M_{st}H_w$  の Rh 膜厚依存性(第一ピーク)

#### 4.4.2 $2M_{st}H_w$ の熱的安定性

DWDD の移動層に AFC 二層膜を用いる場合には、FC 二層膜を用いる場合に比べて、記録・再生時のレーザーによる加熱によって、交換結合の強さが大きく変化してしまうことが懸念される。そこで、各スパッタガス圧で成膜した AFC 二層膜の熱処理温度に対する界面に蓄積されるエネルギー  $2M_{st}H_w$  の変化を調べ、スパッタガス圧を変化させることで、熱的安定性にどのように影響するか調べた。そして FC 二層膜の熱的安定性と比較した。

図 4-5 に熱処理温度に対する  $2M_{st}H_w$  の変化を示す。試料はスパッタガス圧が 0.2, 0.3 及び 0.4 Pa のそれぞれの場合に、AFC 時、 $2M_{st}H_w$  が最大となった試料と同じ Rh 膜厚の試料を用いた。それぞれ各 Gd-Fe-Co 層の膜厚が  $500\text{\AA}$ 、下地層と保護層の Rh 膜厚が  $70\text{\AA}$  であり、AFC 層である Rh 膜厚は 0.2 Pa の場合には  $8.0\text{\AA}$ 、0.3 Pa の場合には  $9.5\text{\AA}$ 、0.4 Pa の場合には  $9.5\text{\AA}$  である。また比較のために、スパッタガス圧が 0.4 Pa のときの FC 二層膜の結果も示す。FC 二層膜が  $150^\circ\text{C}$  以上で、熱処理温度が上昇するにつれて  $|2M_{st}H_w|$  が減少したのに対して、AFC 二層膜では、0.2 Pa の場合には  $110^\circ\text{C}$  以上で、0.3 Pa の場合には  $120^\circ\text{C}$  以上で、0.4 Pa の場合には  $100^\circ\text{C}$  以上で熱処理温度が上昇するにつれて  $|2M_{st}H_w|$  が減少した。

これらの AFC 二層膜の $|2M_{st}H_w|$ の減少は、熱処理によって AFC 層の Rh が拡散してしまったことによるものと考えらる。また、スパッタガス圧を変化させることによる熱的安定性への影響はあまりないことから、AFC 二層膜の成膜時のスパッタガス圧を変化させても、FC 二層膜と同じ程度の熱的安定性を得ることはできないと考えられる。

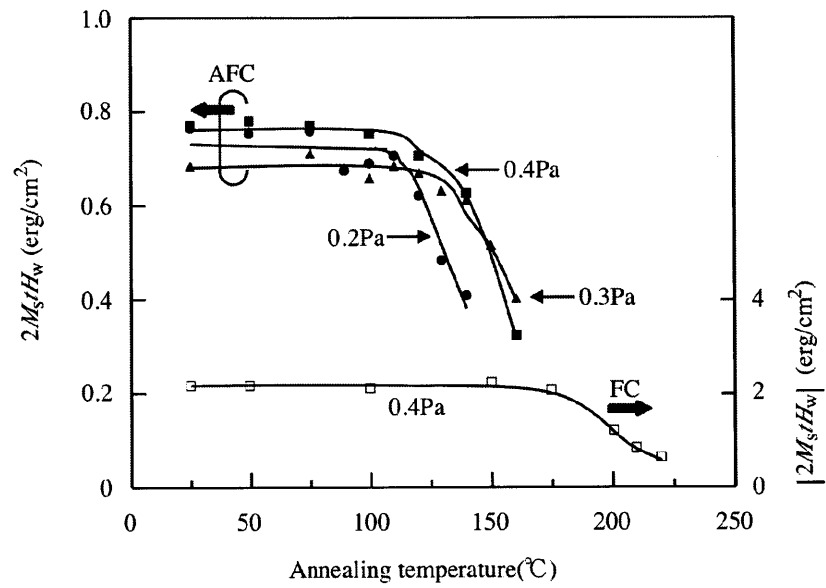


図 4-5 各ガス圧における  $2M_{st}H_w$  の熱的安定性

## 第 5 章 Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co の AFC

### 5.1 はじめに

これまでに、フェロ磁性において層間に AFC 層として Ru や Rh などを挟むと AFC が働くことが知られているが、RE-TM フェリ磁性である Gd-Fe-Co や Tb-Fe-Co においても層間に Ru を挟むことで AFC が働くことが報告されている<sup>67)</sup>。また、第 4 章で報告したように、Gd-Fe-Co において層間に Rh を挟んで AFC が働くこともわかっている。そこで本研究では、Tb-Fe-Co において、層間に Rh を挟むことで AFC 二層膜を作製することを試みた。

また、表 5-1 に磁性層の種類、AFC 層の種類、及び  $2M_{st}H_w$  の第一ピークが現れる AFC 層膜厚の関係について示す。これまでの報告を比較してみると、 $2M_{st}H_w$  のピークが現れる AFC 層膜厚は、磁性層の種類によらず、AFC 層の種類によってだいたい決まっていると考えられる。このことから、Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co についても、約 7.5~10.0Å で  $2M_{st}H_w$  のピークが現れると推測される。

表 5-1 第一ピークが現れるときの AFC 層膜厚

AFC layer	magnetic layer	$t_{\text{peak}} (\text{\AA})$
Ru	Co	3
	Gd-Fe-Co	3
	Tb-Fe-Co	3
Rh	Co	7.9
	Gd-Fe-Co	7.5–10

### 5.2 試料

図 5-1 に実験で作製した試料の膜構成を示す。(a)は FC 二層膜の膜構造、(b)は AFC 二層膜の膜構造である。下地層と保護層の Rh は磁性層 Tb-Fe-Co の酸化を防ぐための層である。磁性層は Tb ターゲットと Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>合金ターゲットの同時スパッタにより成膜し、FC の場合には二層を RE-rich と TM-rich の異なる組成で、AFC の場合は二層とも TM-rich で成膜した。スパッタリングレートを表 5-2 に示す。成膜する際、スパッタガスである Ar のガス圧は 0.4Pa で一定とした。

protective layer	Rh	70Å	70Å
magnetic layer	Tb - Fe - Co	300Å	40Å
AFC layer	Rh	$t$ Å	$t$ Å
magnetic layer	Tb - Fe - Co	150Å	300Å
under layer	Rh	70Å	70Å
substrate			

(a) FC

(b) AFC

図 5-1 Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co 構成

表 5-2 Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co スパッタリングレート

AFC layer	Rh	0.09Å/sec
Tb - Fe - Co    TM - rich	Tb	0.15Å/sec
	Fe - Co	0.25Å/sec
Tb - Fe - Co    RE - rich	Tb	0.21Å/sec
	Fe - Co	0.19Å/sec
under and protective layer	Rh	0.44Å/sec

### 5.3 $M-H$ ループと Kerr ループ

図 5-2(a)に FC A-type ( $R_h=3.0\text{\AA}$ ), (b)に AFC A-type ( $9.0\text{\AA}$ )の  $M-H$  ループと Kerr ループの測定結果を示す. ここでは, 基板側を第一層, 膜面側を第二層とした. Kerr ループの極性は, TM-rich のときに右上がりとした. (a)では, Kerr ループより, 第一層が TM-rich, 第二層が RE-rich であり, 第一層が逆ループを示していることから, FC A-type であることがわかる. また(b)では, Kerr ループより, 第一層, 第二層共に TM-rich であり, 第二層が逆ループを示していることから AFC A-type であることがわかる. ここで第二層の Kerr ループが 2 段になっているが, これは第二層が  $40\text{\AA}$  と非常に薄いため, 第二層側から Kerr ループを測定すると第一層まで光が透過し, 第一層の磁化状態まで測定してしまったことによる. これらの結果から, Tb-Fe-Co 二層膜において, 層間に Rh を挟むことで反強磁性交換結合させることができたと言える.

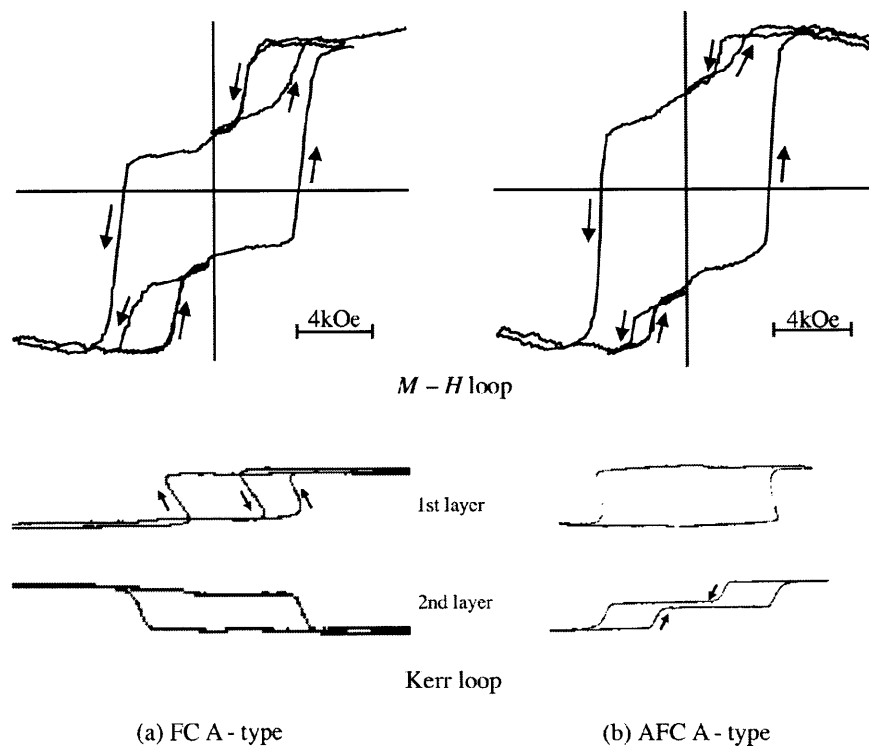


図 5-2 Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co の  $M-H$  ループと Kerr ループ

#### 5.4 $2M_{st}H_w$ の AFC 層膜厚依存性

界面に蓄積されるエネルギー  $2M_{st}H_w$  の Rh 膜厚依存性を図 5-3 に示す。  $2M_{st}H_w$  の値は、FC の場合には負、AFC の場合には正として示した。 Rh 膜厚が 3.0Å, 4.0Å のときは FC を示したが、Rh 膜厚が 9.0Å のときは AFC を示した。 Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co については、  $2M_{st}H_w$  のピークが約 7.5~10.0Å 前後で現れると推測できるので、この結果から、  $2M_{st}H_w$  の最大値は約 0.7 erg/cm<sup>2</sup> 程度であると考えられる。

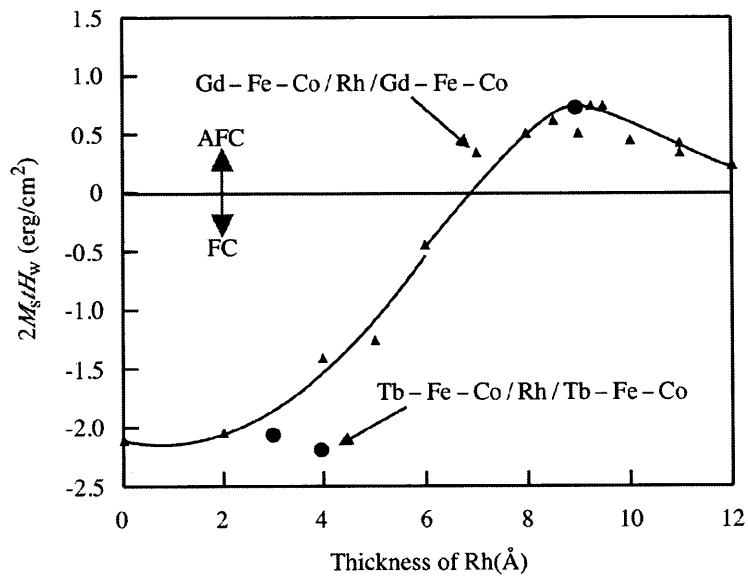


図 5-3  $2M_{st}H_w$  の Rh 膜厚依存性

#### 5.5 $2M_{st}H_w$ の熱的安定性

図 5-4 に熱処理温度に対する  $|2M_{st}H_w|$  の変化を示す。実験に用いた試料は、FC 二層膜(Tb-Fe-Co 150Å/Rh 3.0Å/Tb-Fe-Co 300Å)と、AFC 二層膜(Tb-Fe-Co 300Å/Rh 9.0Å/Tb-Fe-Co 40Å)である。図より、FC 二層膜は熱処理温度が 130℃ 以上になると、熱処理温度が上昇するにつれて  $|2M_{st}H_w|$  が減少した。それに対して AFC 二層膜は熱処理温度が 100℃ 以上になると  $|2M_{st}H_w|$  が減少した。この AFC 二層膜の場合の  $|2M_{st}H_w|$  の減少は、熱処理によって AFC 層の Rh が拡散してしまったことによるものと考えられる。これらの結果から、Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co を AFC させた場合は、FC させた場合に比べて、熱的安定性が悪くなることがわかった。またこの結果は、Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co の結果と同様であった。



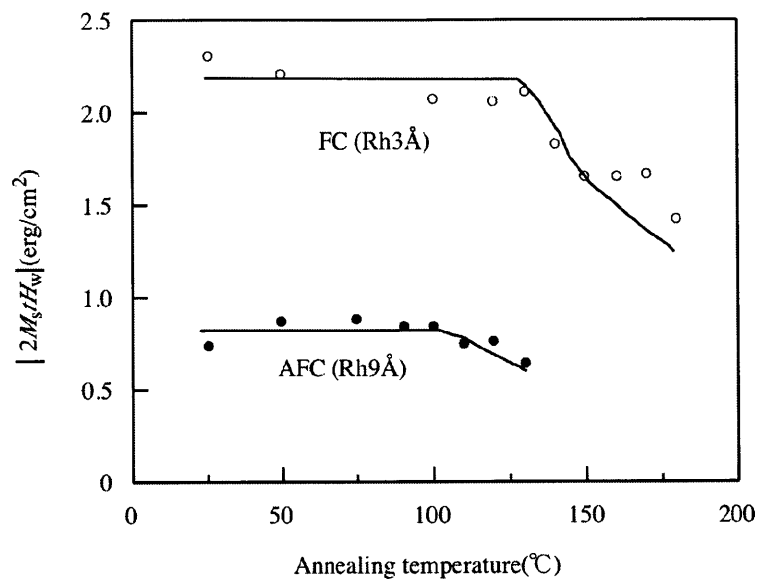


図 5-4  $2M_{st}H_w$  の熱的安定性

## 第 6 章 Gd-Fe-Co 二層膜と Tb-Fe-Co 二層膜

### 6.1 はじめに

AFC の場合、磁界を印加しない安定状態では、二層のスピンは反平行を向いている。その状態から磁界を印加して二層のスピンを平行にそろえると界面にエネルギーが蓄積される。このとき、 $0^\circ$  スピン回転する場合と、 $0^\circ$  スピン回転では非常に大きなエネルギーが蓄積されてしまうためにそのエネルギーを小さくしようと界面磁壁を作る場合の 2 つのパターンが考えられる。そこで本研究で作製した Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co, Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co と、これまでに報告されている Gd-Fe-Co/Ru/Gd-Fe-Co<sup>6)</sup>, Tb-Fe-Co/Ru/Tb-Fe-Co<sup>7)</sup>の結果を照らし合わせて、AFC 時、これらが界面において  $0^\circ$  スピン回転しているのか界面磁壁を作っているのかを考察した。

また、FC の場合には、磁界を印加しない安定状態では、二層のスピンは平行を向いていて、その状態から磁界を印加すると二層のスピンは反平行となって、界面にエネルギーが蓄積される。このときの界面の様子についても考察した。

### 6.2 AFC 層が Ru の場合

まず、AFC 層が Ru のものについて考えてみる。図 1-7 に Gd-Fe-Co/Ru/Gd-Fe-Co と Tb-Fe-Co/Ru/Tb-Fe-Co における Ru 膜厚に対する  $2M_{st}H_w$  の変化を示したが、Gd-Fe-Co/Ru/Gd-Fe-Co は、稲垣らによって今回使用したスパッタ装置と同じものを用いて成膜したものである。それに対して Tb-Fe-Co/Ru/Tb-Fe-Co は田口らにおいて別の装置で成膜されたものである。第一ピークでの  $2M_{st}H_w$  は Gd-Fe-Co/Ru/Gd-Fe-Co では約  $0.8 \text{ erg/cm}^2$ <sup>6)</sup>なのに比べて Tb-Fe-Co/Ru/Tb-Fe-Co の方は約  $1.2 \text{ erg/cm}^2$ <sup>7)</sup>と 1.5 倍程度大きくなっている。Gd-(Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>)二層膜と Tb-(Fe<sub>80</sub>Co<sub>20</sub>)二層膜の違いに対しては、二層間の交換積分  $J_{12}$  が大きく異なる理由は考えにくい。したがって、この  $2M_{st}H_w$  の約 1.5 倍の差の原因は、磁気異方性が界面磁壁エネルギーに影響するのに対して交換結合エネルギーには影響しないことから、Gd-Fe-Co と Tb-Fe-Co の磁気異方性の違いであり、そのことから界面磁壁ができている可能性がある。しかし、この場合は成膜装置が異なるため、例えば、到達真空度の低い装置では界面における残留ガス吸着により界面における交換積分が低下する、などが考えられることから、実験結果を安易に比較することはできない。ちなみに、シミュレーションでは、Gd-Fe-Co 二層膜の場合には  $0^\circ$  スピン回転しているという結果が報告されている<sup>8)</sup>。

### 6.3 AFC 層が Rh の場合

次に、AFC 層が Rh のものについて考えてみる。図 5-3 に Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co と Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co における Rh 膜厚に対する  $2M_{st}H_w$  の変化を示したが、この場合は、試料はどちらも同じスパッタ装置を用いて成膜したものである。第一ピークでの  $2M_{st}H_w$  は、図 5-3 より、Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co では約  $0.7 \text{ erg/cm}^2$ 、Tb-Fe-Co/Rh/Tb-Fe-Co でも約  $0.7 \text{ erg/cm}^2$  と、ほぼ等しくなっている。これらのことから、 $2M_{st}H_w$  は磁性層の磁気異方性に影響していないことがわかる。つまり、 $0^\circ$  スピン回転していると思われ、界面に蓄積されるエネルギー  $2M_{st}H_w$  は交換結合エネルギー  $2J$  であると考えられる。

このことから、AFC 層が Ru の場合についても、第一ピークでの  $2M_{st}H_w$  の値が異なったのはスパッタ装置が異なることによるものと考えられ、AFC 時には  $0^\circ$  スピン回転していて、第一ピークでの  $2M_{st}H_w$  の値は  $2J$  であると推測される。

### 6.4 交換結合エネルギーの AFC 層膜厚依存性

図 1-7 や図 5-3 を見ると、FC 時と AFC 時で、界面に蓄積されるエネルギーの大きさ  $2M_{st}H_w$  があまり変わらず、一見、AFC 層を挟んでも挟まなくても交換結合の大きさがほとんど変わらないように思えてしまう。しかし AFC 層を全く、またはほとんど挟んでいないときと  $10\text{\AA}$  近く挟んだときとで、界面における交換積分  $J_{12}$ 、すなわち交換結合エネルギー  $2J$  があまり変わらないことは考えにくい。そのことから、Gd-Fe-Co 二層膜や Tb-Fe-Co 二層膜において、FC 時には、 $180^\circ$  スピン回転するよりも界面磁壁を作ること、界面に蓄積されるエネルギーを小さくしていると考えられる。そこで、図 6-1 に、仮に界面磁壁を作らないと想定した場合の、AFC 層膜厚に対する界面に蓄積されるエネルギー、すなわち AFC 層膜厚に対する交換結合エネルギー  $2J$  の変化を示した。試料は Gd-Fe-Co/Rh/Gd-Fe-Co と仮定して、Rh を挟んでいないときの  $2J$  を

$$2J = \frac{4A}{a} \quad (6-1)$$

として算出した。ここで  $A$ 、 $a$  はそれぞれ分子場近似で求めた交換スティフネス定数、原子間距離である。図からわかるように、 $2J$  の大きさは AFC 層を挟んでいない試料の方が  $10\text{\AA}$  近く挟んだものよりもはるかに大きい。また、実際に実験で求められる界面に蓄積されるエネルギー、すなわち界面磁壁エネルギー  $\sigma_w$  と比べると、 $2J$  の方が 1~2 桁大きくなっているのがわかる。

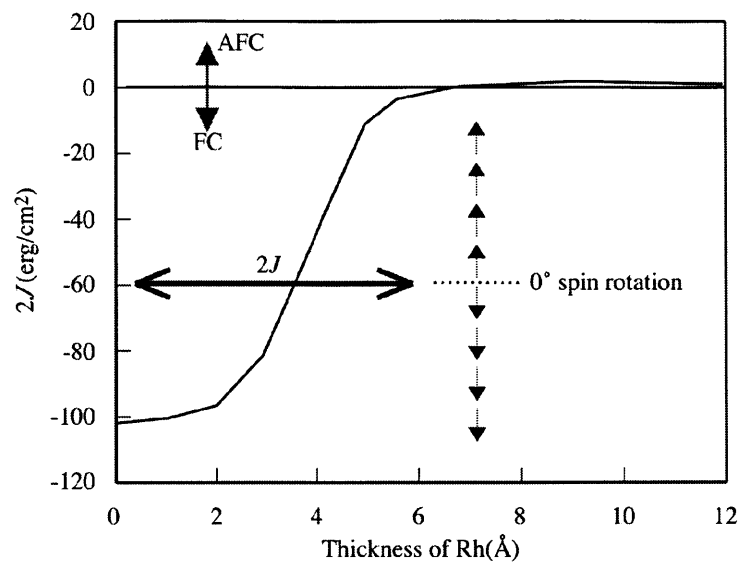


図 6-1  $2J$  の Rh 膜厚依存性

## 第7章 総括

エコロジーとエコノミーを共存させること、これが今後の様々な技術開発における一つのテーマになることは間違いないだろう。記録媒体をとっても同様であり、私たちは更に更にと、大容量の媒体を求め続けるのである。

記録密度の増加にともなう光磁気記録における問題点として、記録磁区が小さくなることで再生信号量が激減し、この検出限界が記録密度の限界となってしまうことが挙げられる。これを打破するための方法の一つに、再生の瞬間だけレーザーの熱によって記録磁区を拡大して再生信号を増幅する技術、磁区磁壁移動検出方式(DWDD)がある。DWDD には、希土類-3d 遷移金属(RE-TM)強磁性交換結合(FC)多層膜が用いられている。その層の一つである移動層を二層にし、その間に反強磁性交換結合(AFC)を働かせることにより、ジッタの少ない再生信号を得ることが期待できる。

本研究では、RE-TM 膜として Gd-Fe-Co や Tb-Fe-Co を用いて AFC 二層膜を作製し、二層間に働く交換結合の強さや熱耐性について調べた。また、Gd-Fe-Co AFC 二層膜においてはスパッタによる成膜時、スパッタガスである Ar のガス圧を変化させて、それによる交換結合の強さと熱耐性への影響を調べた。さらに、作製した RE-TM AFC 二層膜について、界面にエネルギーを蓄積する際の界面におけるスピンの様子について考察した。これらの結果を以下にまとめる。

(1) Gd-Fe-Co 層間に AFC を働かせるために Rh を挟んだ。結果、AFC を得ることができた。

スパッタガスである Ar のガス圧が 0.2Pa の場合、Rh 膜厚が 0~7.0Å の範囲で FC、8.0~10.0Å の範囲で AFC となった。また AFC の時、 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 7.5~8.5Å で最大値、約 0.83 erg/cm<sup>2</sup> となった。

0.3Pa の場合、Rh 膜厚が 0~7.0Å の範囲で FC、7.5~10.0Å の範囲で AFC となった。 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 8.5~9.5Å で最大値、約 0.74 erg/cm<sup>2</sup> となった。

0.4Pa の場合、Rh 膜厚が 0~6.0Å の範囲で FC、7.0~12.0Å の範囲で AFC となった。 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 8.5~10.0Å で最大値、約 0.7 erg/cm<sup>2</sup> となった。

Ar のガス圧が低いときほど大きな  $2M_{st}H_w$  が得られ、そのピークとなるときの Rh 膜厚は Ar ガス圧が低いときほど薄い方にシフトした。

FC 二層膜が 150℃以上で、熱処理温度が上昇するにつれて  $|2M_{st}H_w|$  が減少したのに対して、AFC

二層膜では、0.2Pa の場合には 110℃以上で、0.3Pa の場合には 120℃以上で、0.4Pa の場合には 100℃以上で熱処理温度が上昇するにつれて $|2M_{st}H_w|$ が減少した。

(2) Tb-Fe-Co 層間に AFC を働かせるために Rh を挟んだ。結果、AFC を得ることができた。

AFC の時、 $2M_{st}H_w$  は Rh 膜厚が約 7.5~10.0Å で最大値が得られると推測できることから、実験結果より最大値は約 0.7 erg/cm<sup>2</sup>程度であると考えられる。

FC 二層膜が 160℃以上で、熱処理温度が上昇するにつれて $|2M_{st}H_w|$ が減少したのに対して、AFC 二層膜は熱処理温度が 100℃以上になると $|2M_{st}H_w|$ が減少した。

(3) Gd-Fe-Co FC 二層膜の場合と Gd-Fe-Co または Tb-Fe-Co AFC 二層膜の場合とでは、蓄積エネルギーが比較的近い値となっているが、これは FC の場合には蓄積エネルギーを下げるために界面に磁壁をつくっているのに対して、AFC の場合には界面を挟んでスピンの平行に向いているためと考えられる。そして、Rh を数原子挟むことによって得られる AFC の交換積分は、通常の FC の交換積分より 1~2 桁小さいと推測される。

以上のことから、Gd-Fe-Co や Tb-Fe-Co において、二層間に AFC 層として Rh を挟むことで AFC が得られることを示した。また、Gd-Fe-Co 二層膜に関してはスパッタガスである Ar のガス圧を下げることで交換結合を強くできることを示した。しかし、Gd-Fe-Co 二層膜や Tb-Fe-Co 二層膜において、AFC 二層膜の熱耐性は FC 二層膜よりも悪い結果となった。したがって、DWDD に AFC 二層膜を用いるには、熱耐性を高めるための方法を模索する必要があると言える。

## 謝辞

本研究は、三重大学 工学部 物理工学科 ナノエレクトロニクス研究室において行なったものであります。

本研究を遂行するにあたって、御助言いただくとともに、いつも温かく見守ってくださった同学部教授 工学博士 塩見繁先生に深く感謝いたします。

本研究の遂行、ならびに本論文の作成にあたって多大なる御配慮と数々の御教示をいただき、更に、何度もご馳走になったり、入院先に顔を見せに来てくださったり、大変お世話になった同学部助教授 工学博士 小林正先生に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたって様々な御指導を賜り、また進路について相談にのっていただいたり、韓国での研究会では発表会やその他の時間も大変お世話になりました同学部助手 工学博士 藤原裕司先生に深く感謝いたします。

日常の実験における様々な面でお世話になり、またお酒の席では楽しいお話をたくさん聞かせてくださいました同学 技術専門職員 前田浩二氏に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたって、数々の御助言を頂きました白鳥力氏(キャノン)に深く感謝いたします。

最後になりましたが、共に実験に励んだ安田友則氏をはじめとして、共に学び、共に悩み、共に活動し、共に楽しみを分かち合い、共に…いろいろありますが、とにかく一緒に過ごしてきたナノエレクトロニクス研究室在學生に深く感謝いたします。

ナノエレクトロニクス研究室 檜山菜月

2007/01/30

## 参考文献

- 1) 日経エレクトロニクス, 2004.2.2, 日経 BP 社(2004), p.28.
- 2) 逢坂哲彌, 山崎陽太郎, 石原宏編集:記録・メモリ材料ハンドブック, 朝倉書店(2000), pp.178-179, p.184.
- 3) 白鳥力:日本応用磁気学会誌, **23**, No.2, 764 (1999).
- 4) S.S.P.Parkin:Phys.Rev.Lett., **67**, 3598 (1991).
- 5) 小林正:名古屋大学博士論文(1985), p.23.
- 6) 稲垣明, 恒岡雅也, 大島敦, 小林正, 藤原裕司, 塩見繁, 白鳥力:“RE-TM 膜における反強磁性交換結合”, 日本応用磁気学会誌, **28**, 312 (2004).
- 7) 田口潤, 森河剛, 松本孝治, 庄野敬二:第 27 回日本応用磁気学会学術講演会要集(2003), p.487.
- 8) 林秀晃:三重大学修士論文(2006), p.24, p.25.
- 9) A.Inomata, B.R.Acharaya, E.N.Abarra, A.Ajan, D.Hasegawa and I.Okamoto, *J.Appl.Phys.* 91, 7671(2002).
- 10) 栗岡良幸:三重大学修士論文(2004), p.15.
- 11) 稲垣智広:三重大学修士論文(2004), p.17.
- 12) E. Girt and H. J. Richter:IEEE Trans. Magn., **39**, 2306(2003).



## 論文目録

- 1 檜山, 稲垣, 小林, 藤原, 塩見, 白鳥: "Gd-Fe-Co 膜における反強磁性交換結合", 第 29 回日本応用磁気学会講演概要集, 21pE-7, p.325 (2005).
- 2 Hiyama, Hayashi, Inagaki, Kobayashi, Fujiwara, Shiomi and Shiratori: "Interface Wall Energy and Exchange-Coupling Energy in Antiferromagnetic Exchange-Coupling", The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan, MAG-05-153, p.135 (2005).
- 3 檜山, 小林, 藤原, 塩見: "希土類-3d 遷移金属二層膜における反強磁性交換結合", 第 30 回日本応用磁気学会講演概要集, 12aA-7, p.131 (2006).
- 4 南, 梅村, 檜山, 小林, 藤原, 塩見: "RE-TM 膜における反強磁性交換結合", 電気学会若手セミナー「アドバンスト・マグネティックス(第 1 回)」 (2006).
- 5 梅村, 南, 檜山, 小林, 藤原, 塩見: "反強磁性交換結合における交換結合エネルギー", 電気学会若手セミナー「アドバンスト・マグネティックス(第 1 回)」 (2006).