

北海道大学工学部 ○阿部 裕司 浜田 弘一 石田 巖 西村 生哉 岡田 亜紀良  
 廣田 榮一

要旨

強磁性体/絶縁膜/強磁性体の三層の薄膜で構成されるトンネル接合 MR(磁気抵抗)素子を作製するためのトンネル接合の条件について、真空蒸着 Al 膜を自然酸化した絶縁膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用い、I-V 特性の測定から検討した。また、トンネル接合のトンネル障壁について解析を行った。

1 トンネル接合 MR 素子について

トンネル接合 MR 素子は、強磁性体電極/絶縁膜/強磁性体電極の三層膜から構成される。絶縁膜が、十分薄くなると両電極間にトンネル電流が流れる。トンネル電流の理論式は、以下の式で与えられ<sup>1)</sup>、電圧に対し電流が非線形に変化する。

$$i(T) = i_0 \frac{4\pi b_{11} kT}{\sin(2\pi b_{11} kT)} \exp(-b_{12} V^2) \sinh(b_{11} V) \dots (1)$$

但し

$$i_0 = 120 \times 10^4 T^2 \frac{\exp(-b_{10})}{(2\pi b_{11} kT)^2} \text{ A/m}^2$$

$k$  : ボルツマン定数(=1.3806 × 10<sup>-23</sup> J · s)

$T$  : 絶対温度(K)

$b_{10}, b_{11}, b_{12}$  : 定数

この電流は、絶縁膜をトンネルしようとする電子の状態の数とトンネルした後の行き先の電子の状態の数の積に比例する。強磁性体金属は、フェルミ面でアップスピンとダウンスピンの電子の状態密度が異なるため、外部磁場により 2 つの電極の磁化を平行にした場合(図 1(a)(c))と反平行にした場合(図 1(b)(d))とでは、トンネルコン

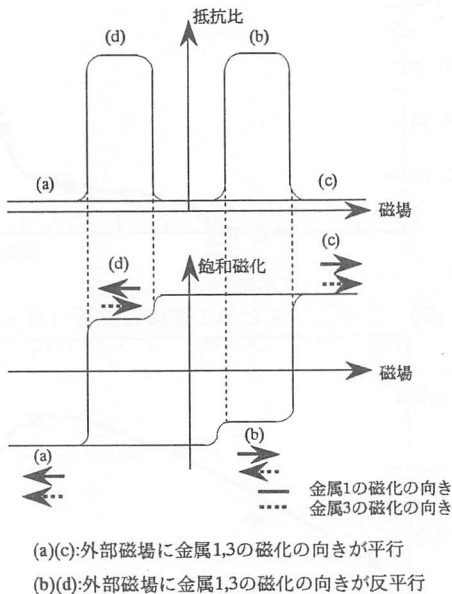


図1 2層薄膜の磁化曲線とトンネルMR効果

ダクタンス、すなわち、抵抗に変化がある<sup>2)</sup>。これが、トンネル接合 MR 効果の原理である。この素子の特徴は、弱い外部磁場で大きな抵抗変化を生ずることである。

トンネル接合 MR 素子のコンダクタンス  $G$  は、理論的にトンネル障壁を図 2 のように考えると、以下の式で与えられる<sup>3)</sup>。

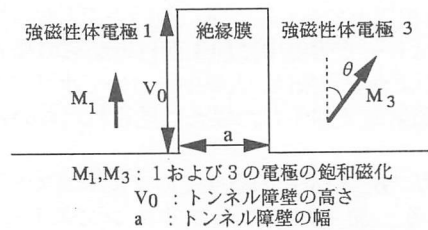


図2 トンネル接合MR素子のポテンシャル障壁

$$G = G_0(1 + \alpha_1 \alpha_3 \cos \theta) \dots (2)$$

但し

$\alpha_1, \alpha_3$  : 1 および 3 の電極のスピンの偏極率

$\alpha_1 \times \alpha_3$  と  $M_1 \times M_3$  は比例関係

$G_0$  : 磁化に依存しない定数

1975 年 Fe/Ge/Co 接合において、トンネル接合 MR 素子が、実験的にはじめて報告された<sup>4)</sup>。現在までに、トンネル接合 MR 素子に関する実験報告は、いくつかなされている<sup>5)</sup>が、その数は極めて少ない。その原因の一つは、トンネル接合に適したトンネル障壁として、数十 Å 程度の均一で、かつ、安定な絶縁膜の形成が困難であることが挙げられる。

本研究は、トンネル接合 MR 素子を作製するためのトンネル接合を強磁性体膜として磁化の大きな FeCo と保持力が小さく角形の磁化曲線を持つパーマロイを用い、絶縁膜として真空蒸着した Al 膜の膜厚および酸化日数を変え自然酸化させた絶縁膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて作製し、I-V 特性の測定から絶縁膜の状態を検討した。また、 $J$  (電流密度)- $V$  特性からトンネル障壁の解析を行った。

2 実験方法および結果

2-1 トンネル接合 MR 素子試料の作製法

1.0 × 10<sup>-4</sup> Pa の真空中で、26mm × 26mm のガラス基板上に下部電極 FeCo を 1000 Å 真空蒸着し、続

いて、真空を破ることなく Al を 100~600Å 蒸着した。大気中で、その Al 膜を自然酸化させ絶縁膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を形成した後、数個の平行な上部電極パーマロイを 1000Å 蒸着した。尚、パーマロイは、長手方向に一軸異方性をつけるため磁界中で蒸着した。この素子の構成を図 3 に示す。

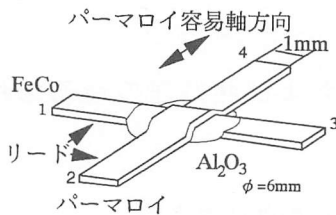


図3 トンネル効果MR素子の構成

### 2-2 トンネル接合

図 3 において電極 1 から 2 への電圧を変化させ、電極 1, 2 を流れる電流  $I$  と電極 3, 4 間の電圧  $V$  を測定(四端子法)し、 $I$ - $V$  特性を得た。絶縁膜の作製条件と  $I$ - $V$  特性の測定結果を表 1 に示す。 $I$ - $V$  特性が、非線形を有するものをトンネル接合有とし、比例関係にあるものをトンネル接合無とした。

表 1 絶縁膜の作製条件とI-V特性

試料番号	絶縁膜		I-V特性測定	
	Al膜厚 (Å)	酸化日数	抵抗値(Ω)	トンネル接合の有無
(1)	500	3	25	有
			※50	有
(2)	100	16	※200	有
(3)	100	22	※2k	有
			100	無
(4)	600	80	※3k	有
			700	無

同じ絶縁膜上に、数個の上部電極を同時に蒸着してもその位置により抵抗値がばらつき、また、トンネル接合が見られない位置もあった。

### 2-3 トンネル障壁の解析

$I$ - $V$  特性の測定の結果、トンネル接合の特徴が見られた試料について、電流を電流密度で置き換えた  $J$ - $V$

表 2 J-V特性のフィッティングによるトンネル障壁解析

試料番号	トンネル障壁の高さ(eV)
(1)	3.01
(2)	2.65
(3)	2.74
(4)	3.47

特性を図 4 に示す。尚、番号は表 1 で抵抗値の前に※の付いた試料に対応する。図中のプロットは測定値で、実線は、式(1)で与えられるトンネル接合の  $I$ - $V$  特性の理論式に温度を 300K としてフィッティングさせた結果である。このように、測定値が理論式によくフィットしていることから、これらの試料は、トンネル接合を形成していることが確認された。

式(1)の理論式の定数は、図 2 のような矩形ポテンシャル障壁を考えると、ポテンシャルの高さ

$V_0$  は  $b_{10}/4b_{11}$  (eV) で与えられる。フィッティングして得られた障壁の高さの結果を表 2 に示す。

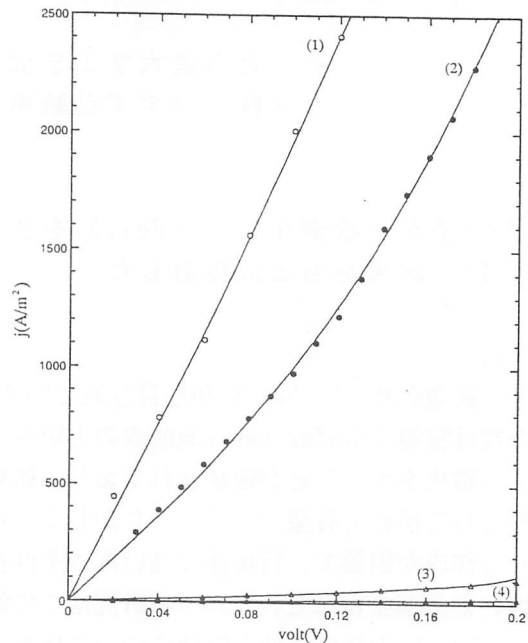


図4 トンネル接合の J-V特性

### 3 考察

酸化日数の増加に従い抵抗が増えているが、2-3 で述べたように、上部電極の位置により抵抗値がばらつき、また、トンネル接合が見られない試料もあり、Al 膜の膜厚および酸化日数と  $I$ - $V$  特性との間には系統的な関係が見られなかった。こうした原因は、絶縁膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の形成条件の違いよりは、Al 膜のムラや表面状態が微妙に影響を与え、絶縁膜の欠陥濃度が上部電極の位置によって違うためであると考えられる。その為、トンネル抵抗に違いがあり、極端に欠陥密度が大きい部分ではトンネル接合が見られなかった。均一で十分薄くかつ安定な絶縁膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の作製について、さらに詳細な検討が必要である。現在、スパッタ Al 膜を自然酸化した絶縁膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いた素子の作製や、Al 膜の電子顕微鏡観察を行って検討している。

表 2 のトンネル障壁の高さは、図 4 の抵抗率に対応した違いが見られなかった。トンネル電流の透過率は、トンネル障壁の高さと幅に依存するので、図 4 の抵抗率の違いを Simmons のトンネル電流の理論式からトンネル障壁の幅と高さを求め、表 2 の結果とともに検討を加えている。

### 参考文献

- 1) R. Stratton, J. Phys. & Chem. Solids, 23, 1177 (1962)
- 2) 前田 貞通: 固体物理 15, No. 3 (1980) 171
- 3) J. C. Slonczewski, Phys. Rev. B39, 6995 (1989)
- 4) M. Julliere, Phys. Lett. 54A, 225 (1975)
- 5) 宮崎 照宣, 日本応用磁気学会"磁性多層膜の新しい機能専門研究会"第 15 回研究会資料. 31 (1995)