

スピバルブトランジスタ

Spin-Valve Transistor

佐藤 利江 水島 公一

SATO Rie

MIZUSHIMA Koichi

半導体及び磁性体技術を材料，デバイスレベルで融合したスピエレクトロニクスと呼ばれる新領域が生まれつつあり，そこでは，電流の大きさが電圧だけでなく電子のスピン向きにも依存する種々のデバイスの提案がなされている。一方，ここ数年の高密度磁気記録の進展は著しく，テラビット/in²の記録密度を視野に入れた研究開発が必要になってきている。当社では，大容量磁気ストレージセンサヘッドへの応用をターゲットに据えて，新たな素子構造として磁性体/半導体融合新機能素子“スピバルブトランジスタ”を提案し開発を進めている。

A new field called spin electronics is now growing, in which technologies in the fields of semiconductors and magnetism are combined to produce new-concept devices. Toshiba has proposed a high-sensitivity magnetic field sensor called a spin-valve transistor, which is under development for application to a magnetic recording head for terabit magnetic storage.

1 まえがき

巨大磁気抵抗効果を利用したGMR(Giant Magneto Resistance)ヘッドの登場以来，磁気記録の記録密度は年率100%で向上しており，この傾向を単純に外挿すると，2005年以前に100G(ギガ:10⁹)ビット/in²に達し，2010年ころには1T(テラ:10¹²)ビット/in²を超える勢いである。しかしながら，500Gビット/in²あるいはそれを越える記録密度に対応できる磁気ヘッドのめどは立っており，これまでの素子に比べて飛躍的に高い性能を持つ素子が必要となる可能性が高い。

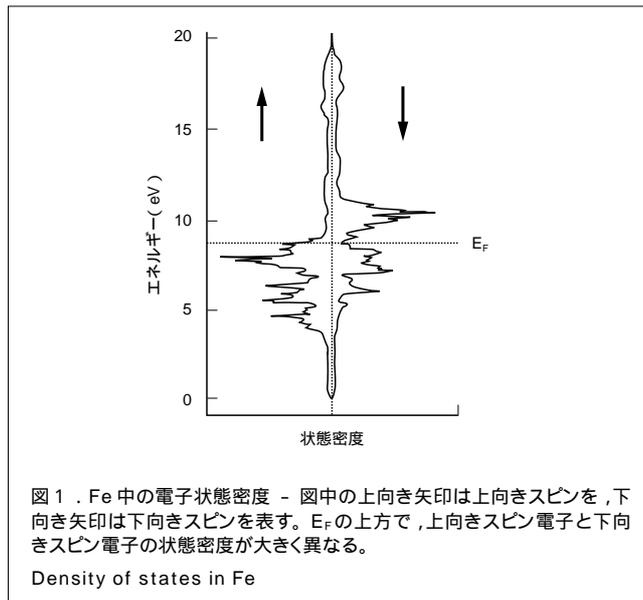
高性能素子に要求される第一の要件は，従来素子に比べて磁気抵抗効果比(MR比)が大きく，伝導度が記録媒体の磁場により大幅に変化することであるが，その実現のためには，伝導度が電子スピンの向きに強く依存する新材料あるいは新現象(新機構)を利用することが必要になると思われる。従来のGMR素子においては，フェルミ面上の伝導電子すなわちフェルミ準位E_Fを持ち，種々の方向のフェルミ速度v_Fを持つすべての電子が伝導に関与している。したがって，これらフェルミ面上の個々の電子が示す磁気抵抗効果の平均が，素子の磁気抵抗効果として観測される。

GMR素子に比べてより大きな磁気抵抗効果を示す素子を実現する一つの方法は，フェルミ面上の伝導電子に代えて，ある特定のエネルギーを持ち，結晶の特定方位に沿って進む電子の伝導現象を利用することではないかと思われる。伝導に寄与する電子のエネルギーと進む方向を最適化する

ことにより，伝導度のスピン依存性が強まり，MR比が増大することが期待される。

2 ホットエレクトロンのGMR効果

上で述べたように，素子のMR比は，伝導に関与する電子のエネルギーと結晶中での速度方向に依存すると考えられる。始めにエネルギーのみに着目し，図1に示した鉄(Fe)中の電子のスピンに依存した状態密度をながめると，フェル



ミ準位 (E_F) の上方 1 ~ 2 eV 付近で, 上向きスピン電子と下向きスピン電子の状態密度が大きく異なっていることがわかる。

電子のスピン角運動量とスピン磁気能率は逆方向を向いているが, スピン磁気能率(スピン角運動量)の向きが Fe の磁化の向きと平行(反平行)な場合を上向きスピン, 反平行(平行)な場合を下向きスピンと呼んでいる。Fe などの強磁性金属中では, E_F 近くに幅の広い s バンドと幅の狭い d バンドが混在あるいは混成しているが, E_F の上方 1 ~ 2 eV 付近に見られる下向きスピンの状態密度のピークは, d バンドの大きな状態密度に起因している。Fe 中の伝導現象に関する詳しい研究はなされていないが, 主として s バンドが伝導に関与し, d バンドは散乱の終状態として機能すると考えられている⁽¹⁾。すなわち, 伝導する s 電子が散乱される確率は, 空いた d バンドの状態密度にほぼ比例する。したがって, E_F の上方 1 ~ 2 eV で d バンドの状態密度が大きい下向きスピンの伝導電子 (s 電子) は, 上向きスピン電子よりも強く散乱される。状態密度のスピンの向きによる違いが大きい上記エネルギー領域の電子(ホットエレクトロン)は, フェルミ面上の電子(通常の伝導電子)よりも強いスピン依存伝導を示し, したがって大きな MR 比が期待される。次に, エネルギーに加えて, ある特定の結晶方位に沿って進む電子の伝導現象を考える。金 (Au) 及び Fe 中を $\langle 100 \rangle$ 方向に進む電子のエネルギーバンドを図 2 に示す。

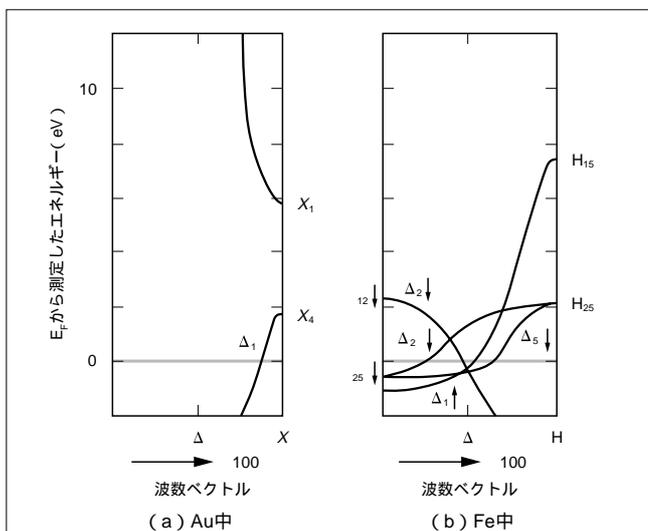


図 2 . Au 及び Fe 中を $\langle 100 \rangle$ 方向に進む電子のバンド構造 - 図中の上向き矢印は上向きスピンバンドを, 下向き矢印は下向きスピンバンドを表す。Fe 中の上向きスピンバンドは Au のバンドと同じ対称性 Δ_1 を持つ。
Band structure in Au (a) and Fe (b) along $\langle 100 \rangle$ direction

E_F 近くにあるバンドの対称性に注目すると, 非磁性の Au 中ではスピンの上向き, 下向きバンドの区別はなく, Δ_1 の対称性を持っている。一方, Fe 中のバンドは複雑であるが, 上向きスピンバンドはフェルミ準位の上方で Δ_1 の対称性を

持ち, 下向きスピンバンドは $\Delta_2, \Delta_2, \Delta_5$ の対称性を持っている。Au/Fe 界面において, 同じ対称性を持つバンド間を電子は強い反射を受けずに進むことができるので, E_F より高いエネルギーを持ち, $\langle 100 \rangle$ 方向に進む上向きスピン電子は界面を透過することができる。一方, 異なる対称性を持つバンド間を電子は進むことができないので, $\langle 100 \rangle$ 方向に進む下向きスピン電子は界面で強く反射される。すなわち, 強いスピン依存性を持つ界面反射が生じ, 高い MR 比が期待される。このような電子伝導を利用した素子を従来型の 2 端子素子で構成することは難しいが, 磁性体と半導体をハイブリッド化したトランジスタ構造を用いることで可能となる。われわれが開発を進めている“スピンバルブトランジスタ”と呼ばれる素子の開発状況を以下に述べる⁽²⁾⁽³⁾。

3 素子構造と特性

作製した素子の構造とエネルギーダイアグラムを図 3 に示す⁽³⁾。この素子はアルミニウム (Al)/Au のエミッタ, Fe (1 nm)/Au (7 nm)/Fe (1 nm) χ (001) 積層膜のベース及び n 型ガリウムヒ素 (nGaAs χ (001)) のコレクタから成っている。スピンバルブ膜 Fe/Au/Fe は, 中間の Au 層を厚く (7 nm) することにより, 上下の Fe 層が磁的に非結合の状態になっている。素子の寸法は $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ である。

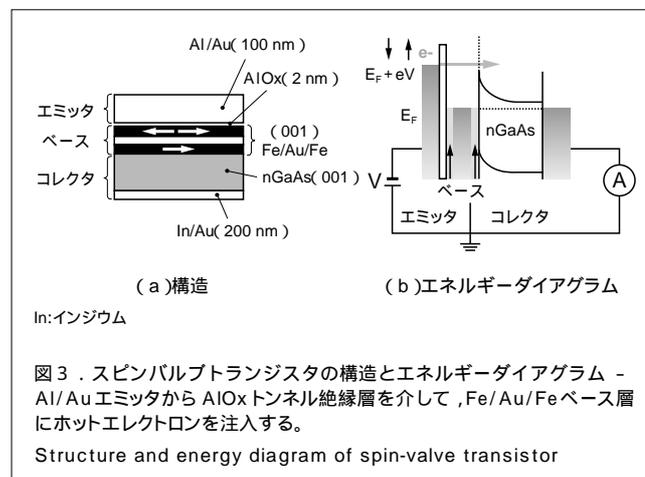
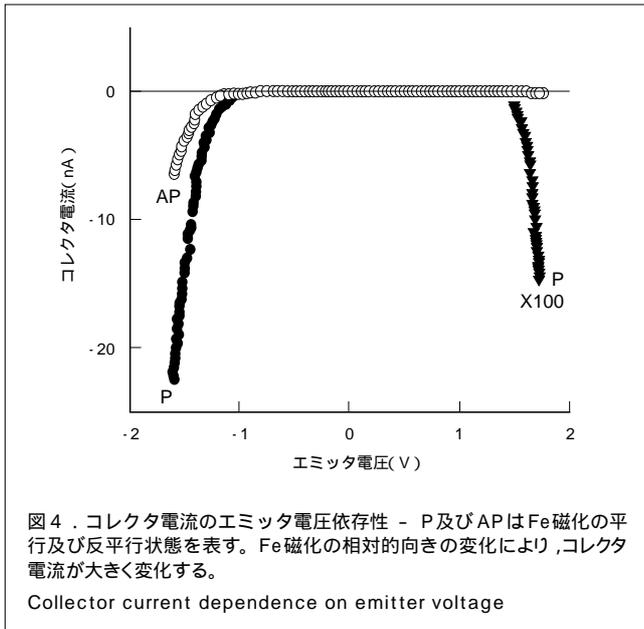


図 3 . スピンバルブトランジスタの構造とエネルギーダイアグラム - Al/Au エミッタから AlOx トンネル絶縁層を介して, Fe/Au/Fe ベース層にホットエレクトロンを注入する。
Structure and energy diagram of spin-valve transistor

ベース部にトンネル注入される電子(ホットエレクトロン)のエネルギーは, エミッタ電圧 $-V$ ($0 < V$) により変化させることができる。そのエネルギー分布の幅はトンネル膜の厚さに依存するが, 0.2 ~ 0.3 eV 程度と推定される。電子のエネルギー eV がショットキー障壁の高さ $eV_b = 0.6 \text{ V}$ を超えると, ベース部を透過した電子(の一部)は nGaAs に流れ込み, 図 4 に示したようにコレクタ電流が観測される。

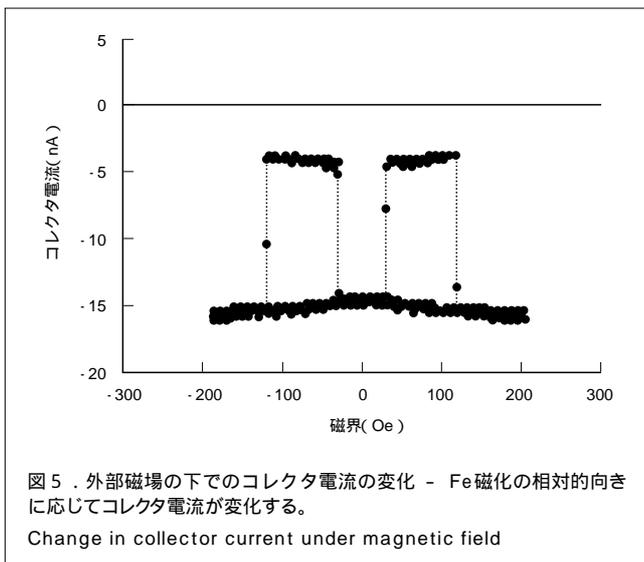
図中の曲線 P は上下の Fe の磁化が互いに平行な場合, 曲線 AP は互いに反平行な場合のコレクタ電流を示す。エミツ



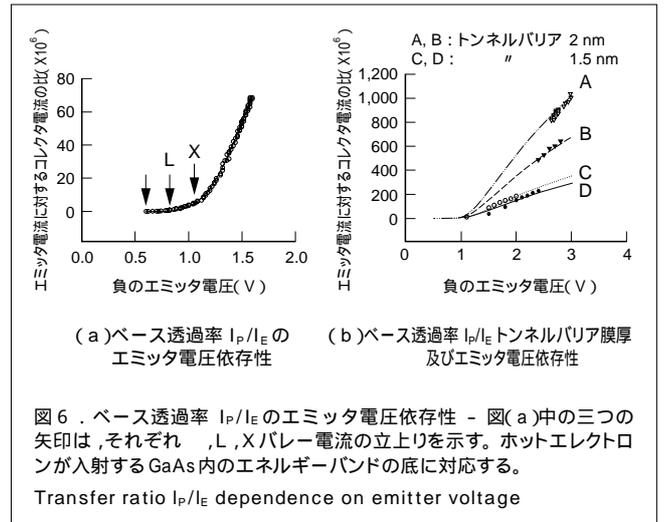
タに負電圧を加えた場合には,平行な場合の電流は反平行な場合の約4倍であり,約300%のMR比が得られている。エミッタに正電圧を加えた場合にも負電圧の場合と同じ向きに小さなコレクタ電流が流れるが,この電流は,ベース内に注入されたホールにより励起された(1粒子励起)電子によることが知られている。ショットキー接合のリーク電流を防ぐため,測定は77Kで行っている。

エミッタ電圧を一定に保った状態でベース膜面内の <110> 方向(容易磁化方向)に印加した磁場を変化させると,コレクタ電流は図5に示したように大きく変化する。高磁場側の電流の飛びは下部Fe層の保磁力Hcに対応し,低磁場側の飛びは上部Fe層の保磁力に対応している。

ベース透過率 I_P/I_E の電圧依存性を図6(a)に示す。ここで I_P は磁化が平行な場合のコレクタ電流, I_E はエミッタ電流で



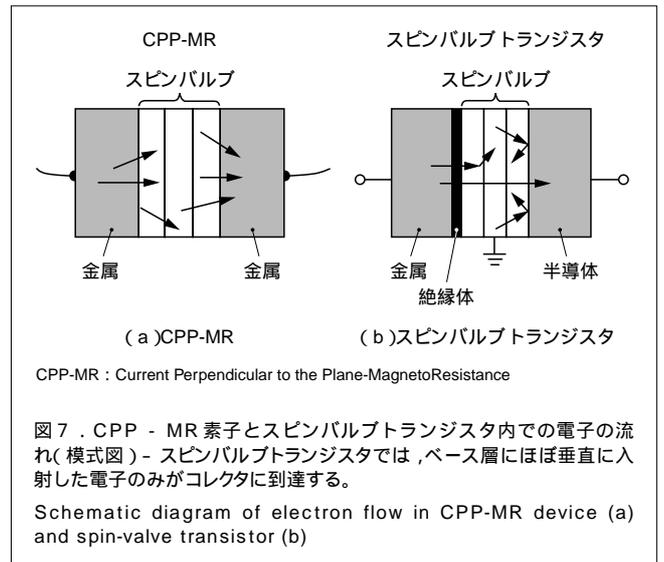
スピンバルブトランジスタ



ある。図中の曲線は次章で述べるモデルによるフィッティングであり, L, X は GaAs 内のエネルギーバンドのそれぞれのバレーの高さに対応した電圧を示している。透過率はサンプルにより異なるが,図6(b)に示したように,トンネルバリアが2 nmのサンプルA, Bは1.5 nmのサンプルC, Dより大きな透過率を示している。

4 ホットエレクトロンのスピン依存伝導特性

スピンバルブトランジスタでは,ベース積層膜中のスピンの依存した伝導現象に加えて,小さな臨界角 θ_c を持つ金属/半導体界面の回折現象が大きなMR比に寄与している。このことに関して,GMR素子と比較した模式図(図7)を用いて説明する。通常のGMR素子は膜面に電流を流して使うが,図7(a)ではスピンバルブトランジスタと比較しやすい



いように膜に垂直に流した場合を示してある。上で述べたようにGMR素子では種々の方向に進むすべての伝導電子が電流に寄与している。一方、スピンバルブトランジスタ(図7(b))では、エミッタからベースに電子がトンネル注入されるが、トンネル確率の角度依存性が強いので、トンネル膜にほぼ垂直に進む電子のみがベース内に注入される。角度分布の幅 Δ はトンネルバリアの幅と高さに依存するが、10~20°程度である。更に金属/半導体界面の強い回折効果により、界面にほぼ垂直に進む電子のみがコレクタに流れ込むことができる。界面での全反射の臨界角 θ_c は、金属と半導体中での電子の波長(あるいは運動エネルギー)の違いによって決まるが、この素子の場合10°程度と見積られる。すなわち、ベース積層膜にほぼ垂直に注入された電子のうち、ほとんどバリスティックにベースを透過した電子のみがコレクタ電流に寄与し、ベース内で散乱されて小さな臨界角 θ_c 外へ向きを変えた電子はコレクタに流れ込むことができない。GMR素子に比較して、ベース内での(スピンに依存した)散乱によりコレクタ電流が大きく減少するため、MR比が大きくなることが理解できる。

上記の回折現象を考慮して、磁化平行P及び反平行AP状態での上向き(下向き)電子によるコレクタ電流を式(1)で表す⁽²⁾⁽³⁾。

$$\left. \begin{aligned} I_{c, \uparrow}^P(V) &= C \int_0^V dV \Omega_c \exp \left[-\frac{L}{l_c} \left(\frac{2}{T_c} - 1 \right) \right] I_{\downarrow}(V, V) \\ I_{c, \uparrow}^{AP}(V) &= C \int_0^V dV \Omega_c \exp \left[-\frac{L}{2} \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} \right) \left(\frac{2}{T_c} - 1 \right) \right] I_{\downarrow}(V, V) \end{aligned} \right\} (1)$$

式(1)においてCは定数、 $I_{\downarrow}(V, V)$ はAl/Auエミッタに負電圧 $-V$ を印加した場合にベースに注入されるホットエレクトロン電流のエネルギー(電圧)スペクトルであり、エミッタ電流は、式(2)で表される。

$$I_E(V) = \int_0^V I_{\downarrow}(V, V) dV \quad (2)$$

T_c はベース/コレクタ界面での上向き(下向き)電子の透過率であり、 $L(2/T_c - 1)$ はベースにおけるホットエレクトロンの行路長である。 $\Omega_c \approx \pi \sin^2 \theta_c$ は界面反射の臨界立体角、 l_c はベース内での平均自由行程であり、フィッティングパラメータとなっている。コレクタ電流は、 L, X バレーそれぞれについて式(1)を用いて計算された電流の和として表される。図6(b)中の曲線は I のエネルギー依存性を無視し6.5nmとした場合を示してあるが、結果をよく再現している。

ベース透過率 I_P/I_E は、図6(b)に示したようにサンプル依存性が大きい、トンネル膜が厚いほど透過率が良くなる傾

向が見られる。このことは、透過率がトンネル接合のラフネスによって生じる注入電流のベース内での角度の広がり依存していることを示唆している⁽⁴⁾。言い換えれば、注入電流の広がりがベース/コレクタ界面の臨界反射角に比較してはるかに大きいので、注入電子のほとんどがコレクタに流れ込めないのではないかとと思われる。また、図2(a)に示した $Au < 100 >$ 方向のバンドギャップに対応した伝導の異常が観測されないことも、注入電流の広がり起因していると思われる。この素子を磁気ヘッドに応用するためにはベース透過率を高めることが不可欠であるが、そのためにはベース/コレクタ界面の透過率を高めるだけでなく、エミッタ/ベース間のトンネル接合の平坦(へいたん)化が重要であると考えられる。

5 あとがき

スピンバルブトランジスタ開発の現状を紹介した。100%以上の大きなMR比を示すこの素子を、数100 Gビット/in²以上の高密度磁気記録の読み出しヘッドとして応用するためには、ホットエレクトロンのベース透過率を高め、コレクタ電流密度を高めなければならない。数百MHzの動作速度と30dB以上のSN比を得るためには、現在10⁻³以下の透過率を10⁻²以上に高める必要があると予測されるが、それは金属/半導体界面の透過率の向上とトンネル接合の平坦化によって達成される可能性が十分あると考えている。

文献

- (1) Mott N. F. The Resistance and Thermoelectric Properties of the Transition Metals. Proc. R. Soc. 156, 1936, p.368 - 382., Electrons in Transition Metals. Adv. Phys. 13, 1964, p.325 - 422.
- (2) Mizushima, K., et al. Energy-Dependent Hot Electron Transport Across a Spin-Value. IEEE Trans. Magn. 33, 5, 1997, p.3500 - 3504.
- (3) Mizushima, K., et al. Strong increase of effective polarization of the tunnel current in Fe/AIOx/Al junctions with decreasing Fe Layer thickness. Phys. Rev. B 58, 8, 1998, p.4660 - 4665.
- (4) Sato, R., et al. Spin-value transistor with an Fe/Au/Fe (001) base. Appl. Phys. Lett. 79, 8, 2001, p.1157 - 1159.



佐藤 利江 SATO Rie

研究開発センター 新機能材料・デバイスラボラトリー研究主務。新機能デバイスの開発に従事。日本応用磁気学会、応用物理学会、日本物理学会会員。
Advanced Materials & Devices Lab.



水島 公一 MIZUSHIMA Koichi, D.Sc.

東芝リサーチ・コンサルティング(株) シニアフェロー、理博。新機能デバイスの開発に従事。日本物理学会、応用物理学会会員。
Toshiba Research & Consulting Co.