

スピナルブトランジスタ

Spin-Valve Transistor

水島 公一
MIZUSHIMA Koichi

金野 晃之
KINNO Teruyuki

山内 尚
YAMAUCHI Takashi

スピナルブトランジスタ研究の一環として、磁性積層膜をベース部に用いた3端子素子(スピナルブトランジスタ)を作製した。この素子は200%を超える大きな磁気抵抗効果を示し、磁気メモリなどへの応用が期待される。ベースを走行する電子のスピニに依存したナノメートル空間への量子閉込め現象が磁気抵抗効果を増大させる。さらに、この効果を利用するとナノメートルの分解能で磁化の観測が可能となる。

Very large magnetoresistance (MR) exceeding 200% was observed in hot electron transport across a magnetic multilayer which was incorporated as a base in a three-terminal device. It was also found that the spin-dependent quantum confinement in the base enhances MR. The MR was also used for observing magnetization with nanometer resolution.

1 まえがき

電子はスピニ磁気能率をもっているので、磁場中の電子の運動はそのスピニの向きに依存する。外部磁場が存在しない場合でも、強磁性体中の電子には強い内部磁場が働くので、電子の運動はそのスピニの向きによって異なっている。例えば、伝導電子の速度や不純物による散乱確率などがスピニの向きに依存している。このような電子のスピニに依存した伝導現象を利用したデバイスはスピナルブトランジスタと総称され、今日盛んに研究が進められている。

ここでは、スピナルブトランジスタと呼ばれる3端子素子の原理と、その素子特性に大きく影響するスピニの向きに依存した電子のナノメートル空間への量子閉込め効果について述べる。併せて、同じ原理を応用したナノメートル領域での磁化の観察法についても紹介する。

2 スピナルブトランジスタ

図1に示す磁性体／非磁性体／磁性体からなる磁性積層膜はスピナルブトランジスタと呼ばれ、大きな磁気抵抗効果を示すことが知られている。外部磁場により上下の磁性層の磁化を互いに平行な状態から反平行の状態に変化させると積層膜の電気抵抗が10%程度増大する。この大きな抵抗変化はすでに高感度の読み取り用磁気ヘッド(GMRヘッド)に応用されている。

図1のスピナルブトランジスタ膜をベース部に用いて、図2に示すスピナルブトランジスタを構成することができる。こ

(注1) 水の流れをバルブで調節するように、電流量を磁化(スピニモーメント)の向きで制御するのでスピナルブトランジスタと名づけられた。

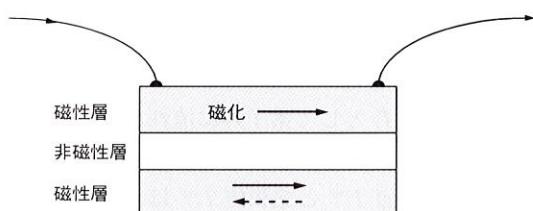


図1. スピナルブトランジスタ膜の模式図 上下の磁性体膜の磁化の向きが平行、反平行で電気抵抗が変化する。

Spin-valve film

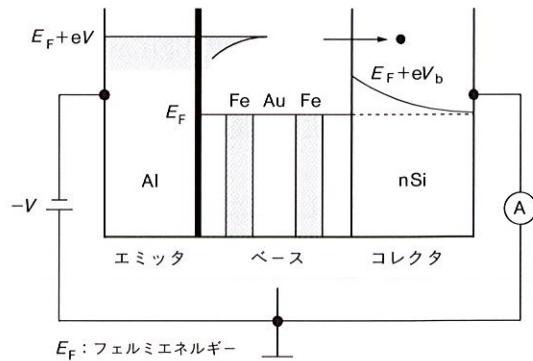


図2. スピナルブトランジスタの模式図 ベース部がスピナルブトランジスタ膜で構成されている。スピナルブトランジスタ膜の磁化が平行、反平行でコレクタ電流が変化する。

Spin-valve transistor

の素子はAl/AlO_xのエミッタ、磁性積層膜のベースおよびnSiのコレクタから成っている。エミッタからベース部に電子(ホットエレクトロン)がトンネル注入される。ベース積層膜は、図3に示すようにスピナルブトランジスタ膜Fe/Au/Feが最上層のAl膜と最下層のAu膜で挟まれた構造になつ

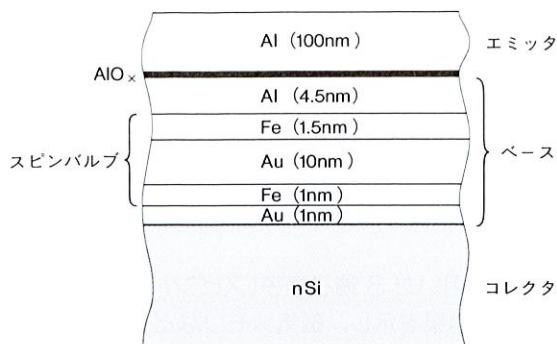


図3. スピンバルブトランジスタの積層構造 ベース部はFe/Au/Fe積層膜がAl膜とAu膜に挟まれた構造になっている。

Layer structure of spin-valve transistor

ている。前者は良好なトンネル絶縁膜 AlO_x を、後者はリード電流の少ないショットキー接合を形成するために、それぞれ挿入されている。ベース部に注入される電子のエネルギーはエミッタ電圧 $-V$ ($V > 0$) により変化する。電子のエネルギー eV がショットキー障壁の高さ eV_b を超えると、ベース部を透過した電子(の一部)は $n\text{Si}$ に流れ込み、コレクタ電流 I_c として素子外に流れ出る。

図4に示すように、 I_c の値は外部磁場により大きく変化する。 I_c の最小値 I_c^{\min} と飽和値 I_c^{sat} は、それぞれFe層の磁化が互いに反平行な場合と平行な場合のコレクタ電流に対応しているが、その比は3以上である。すなわち、200%を超える磁気抵抗効果比(MR比)が観測される。この値は上述の通常のスピンバルブ膜のMR比に比べて1けた以上大きい。

MR比の電圧依存性を図5に示す。電圧がショットキー障壁の高さに対応する電圧 V_b (0.8 V)に近づくとMR比は急速に減少する。図中の実線は後に述べるモデルによるフィッティング曲線である⁽¹⁾。

図2の素子の構成を少し変えて、ベース中的一方のFe

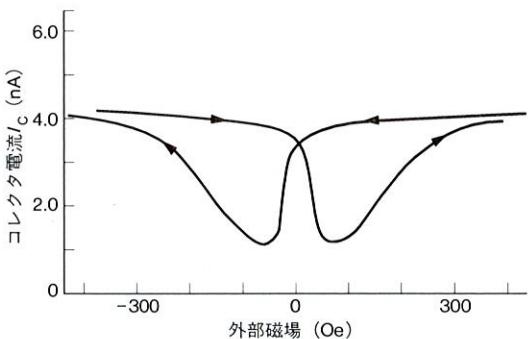


図4. 外部磁場によるコレクタ電流の変化 磁化平行の場合のコレクタ電流は、反平行の場合の3倍以上である。すなわち、200%を超えるMR比が観測される。

External field dependence of collector current

膜をエミッタに移すと図6に示す3端子素子が得られる。エミッタは数nmのFe超薄膜と厚いAu膜(100 nm)の積層構造になっている。この素子も100%程度の大きなMR比を示すが、図7に示すように、Fe膜厚の増大とともにMR比は急速に減少する。

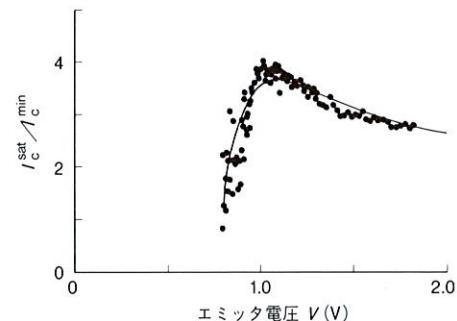


図5. MR比の電圧依存性 ショットキー障壁の高さに対応する電圧 $V_b = 0.8$ Vの近くでMR比の急激な減少が観測される。

Voltage dependence of MR ratio

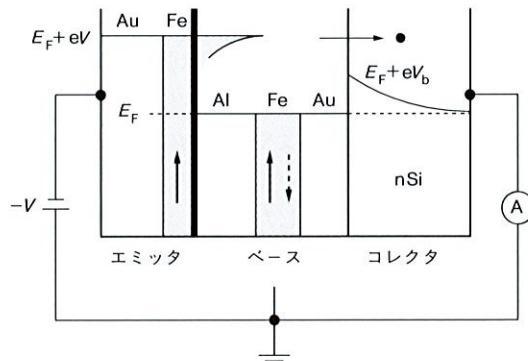


図6. 第二のタイプのトランジスタ エミッタがFe超薄膜とAu膜の積層膜から成っている。

Second type of spin-valve transistor

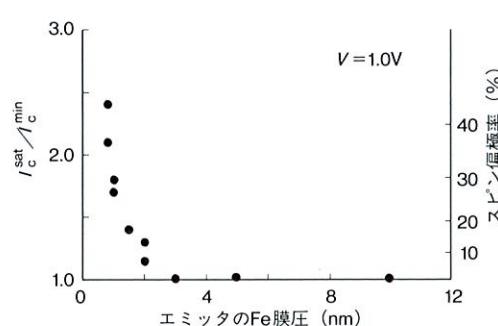


図7. MR比のエミッタFe膜厚依存性 第二のタイプのトランジスタのMR比はエミッタのFe膜厚に強く依存する。

Emitter Fe thickness dependence of MR ratio

3 磁性積層膜中のホットエレクトロン伝導

図2の素子が示す大きなMR比を理解するために、ベース積層膜中のホットエレクトロンの伝導について考える。トンネル接合を介してベースに注入された電子は接合面にほとんど垂直方向に進むことが知られている。これは電子がトンネル絶縁膜を斜めに透過する確率が小さいことから生ずる現象で、角度分布の半値幅は 10° 程度である。

一方、金属のベースと半導体のコレクタの間で電子は強く反射される。これは金属中と半導体中とで電子の波長が大きく異なるためであるが、反射の臨界角 θ_c はやはり 10° 程度である。すなわちベース/コレクタ界面にほぼ垂直に入射した電子だけがコレクタに流れ込むことができる。

図8(a)に示すように、トンネル注入された電子のうちほとんどパリスティックにベースを透過した電子だけがコレクタ電流に寄与し、ベース中で散乱を受けて小さな臨界角の外に出てしまった電子はコレクタ電流に寄与しない。MR比は、Feの磁化に平行なスピニ磁気能率をもった電子(アップスピニ電子)と反平行なスピニ磁気能率をもった電子(ダウンスピニ電子)の伝導が、磁性積層膜中で等価でないことから生ずる。Fe層の中ではダウンスピニ電子はアップスピニ電子よりも不純物散乱を受けやすく、さらにFe/Au界面においても前者は後者よりも反射されやすい。すなわちダウンスピニ電子の伝導度はアップスピニ電子に比較して小さい。

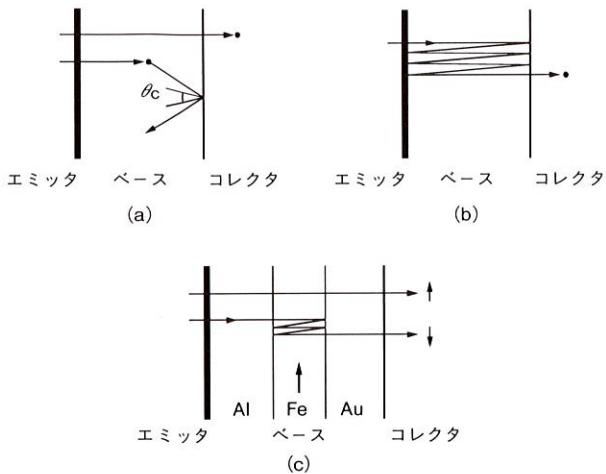


図8. ベース中のホットエレクトロン伝導 (a)ベース/コレクタ界面の反射。ベース中をほとんどパリスティックに透過した電子だけがコレクタ電流に寄与する。(b)ベース中の多重反射。ショットキー障壁の高さ eV_b に近いエネルギーをもつ電子はベース/コレクタ界面の量子力学的反射により、ベース中で反射を繰り返す。(c)ダウンスピニ電子の閉込め。Fe/Au界面の強い反射によりダウンスピニ電子はFe層内に閉じ込められる。

Hot electron transport in base: (a) refraction at base-collector interface, (b) multiple reflection in base, (c) quantum confinement of down-spin electrons in Fe layer

この素子のMR比に関する議論の詳細は原著論文^[1,2]に譲るが、この素子が通常のスピニバルブ素子に比較して極めて大きなMR比を示す第一の理由は、ベース積層膜にほぼ垂直に(一次元的に)運動する電子だけがコレクタ電流に寄与するためである。このような電子の伝導においては、上述のスピニによる伝導の違いがより強調される。

ベース中を走行する電子はFe層中のマグノンと呼ばれる磁気的な励起やAu層中のFe不純物(磁性不純物)などと相互作用をするが、これらの相互作用は電子スピニを反転させようとする。反転の特性長が短いとベースを走行中に、アップスピニ(ダウンスピニ)電子がダウンスピニ(アップスピニ)電子に変化してしまう。すなわちアップスピニ電子とダウンスピニ電子の区別がつかなくなるが、そのためにMR比が減少してしまう。図2の素子が大きなMR比を示す第二の理由はスピニ反転の特性長(電子がスピニ反転しないで進める平均距離)が約100 nmもあり、ベース積層膜の厚さ(約20 nm)に比較して十分長いためである。

しかし、図5に示したように、電圧がショットキーボードの高さに対応する電圧 V_b (0.8 V)に近づくとMR比は急速に減少する。 V_b の近くではベース/コレクタ間の量子力学的反射が強くなり、図8(b)に示したように、電子はベース中で反射を繰り返した後にコレクタに流れ込む。多重反射の結果ベース中の走行距離が増大し、スピニ反転の特性長より走行距離が長くなるとMR比が急速に減少する。

上述のようにダウンスピニ電子はFe/Au界面で強く反射されるため、図8(c)に示したようにFe層内にダウンスピニ電子が閉じ込められる。よく知られているように、電子が薄いFe層内に閉じ込められると、そのエネルギーは量子化され離散的な共鳴準位に分かれ。Fe層の厚さが1 nmでは準位の間隔は数100 meV程度と大きな値になる。このような量子化は、ダウンスピニ電子の伝導度をさらに低下させるだけでなく、スピニ反転の確率を低下させる。アップスピニ電子は量子化されていないが、そのエネルギーがたまたまダウンスピニ電子のエネルギーに一致しない限り、スピニ反転を起こしにくくなる。なぜならば、スピニ反転を起こすためには100 meV程度のエネルギーを伴った非弾性散乱が必要になるためである。

超薄膜中の量子閉込め効果は図6の素子においてより顕著に現れる。この素子のMR比は図7に示したようにエミッタのFe層の厚さに強く依存し、膜厚の減少とともに急速に増大する。ダウンスピニ電子はFe/Au界面で強い反射を受けるので、Fe超薄膜中に閉じ込められる。超薄膜中の電子の状態密度は図9に示すようにステップ状になるが、上述のように膜面にほぼ垂直方向に運動する電子だけ(図中の網掛け部)がトンネルに関与する。すなわちFe超薄膜からトンネルするダウンスピニ電子のエネルギーは実効的に離散化している。離散化に伴って生ずるスピニ反

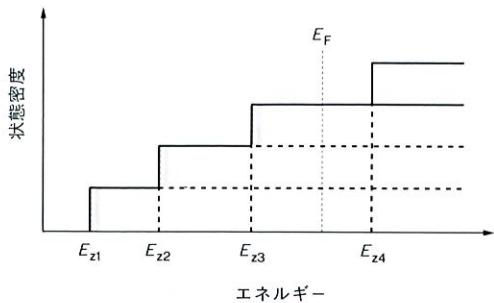


図9. 超薄膜中の電子状態密度 二次元電子はステップ状の状態密度を示す。網かけ部はトンネルに関与する電子の状態密度。

Density of states in ultrathin films

転確率の減少によって、エミッタからベースに注入される電子のスピン偏極率が増大する。

4 ナノスケールでの磁化観察

図2の素子のトンネル接合をSTM(走査型トンネル電子顕微鏡)探針で置き換えると図10に示す評価装置が得られる³⁾。STM探針からベース積層膜にホットエレクトロンを注入し、コレクタ電流を観測することによりナノスケールレベルで磁化の観察が可能になる。図11にコレクタ電流の磁場依存性を示す。図4と同様なヒステリシス特性を示し、ナノメートル領域での磁化の(相対的)向きの変化が観測されている。現在、磁化の二次元像を得るために測定装置の改良を進めている。

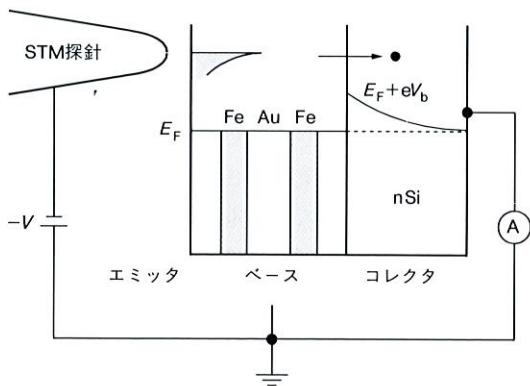


図10. ナノメートル領域での磁化観察 トンネル接合をSTM探針に置き換えることにより、ナノメートルレベルでの磁化の評価装置が得られる。

Observation of magnetization with nanometer resolution

5 あとがき

図2、図6の素子はベース積層膜をほとんど垂直に(一次元的に)進むホットエレクトロンのスピンに依存した伝

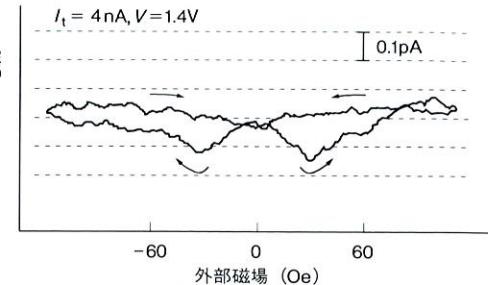


図11. コレクタ電流の磁場依存性 図10の装置で観測されたナノメートル領域でのコレクタ電流のヒステリシス曲線を示す。 I_t は STM 探針からベース部に流れ込んだトンネル電流。

Hysteresis curves of collector current in nanometer region

導現象を動作原理としているため、きわめて大きな磁気抵抗効果比が得られる。ナノメートル空間への一次元的な量子閉込めが、素子特性に重要な伝導のスピン依存性の増大、スピン反転の抑制などに寄与することがわかつてききた。

スピンに依存した伝導現象を利用したスピンデバイスは今後の発展が期待されているが、これまでの半導体デバイスともっとも異なる点は、電子の平均自由行程だけでなく、スピン反転の特性長(特性時間)が素子の特性に大きく影響することである。上述の量子閉じ込めによるスピン反転の抑制は、スピンエレクトロニクス共通の基盤技術として特に期待される。この現象をより明確化するとともに、図2、図6の素子を実用デバイスに近づけるためにも、半導体上への磁性積層膜形成技術の向上が望まれている。

文 献

- (1) Mizushima, K., et al. Strong increase of the effective polarization of tunnel current in Fe/AlO_x/Al junctions with decreasing Fe layer thickness. Phys. Rev. B **58**, 1998, p.4660.
- (2) Yamauchi, T. and Mizushima, K. Theoretical approach to the spin-dependent hot-electron transport in a spin valve. Phys. Rev. B **58**, 1998, p.1934.
- (3) Kinno, T., et al. Ballistic-electron-emission spectroscopy on an Fe/Au/Fe multilayer. Phys. Rev. B **56**, 1997, p.R4391.



水島 公一 MIZUSHIMA Koichi

研究開発センター 基礎研究所技監、理博。
新材料、新デバイスの探索に従事。
日本物理学会、応用物理学会会員。
Advanced Research Lab.



金野 晃之 KINNO Teruyuki

研究開発センター 基礎研究所。
先端評価技術開発に従事。
応用物理学会会員。
Advanced Research Lab.



山内 尚 YAMAUCHI Takashi

研究開発センター 基礎研究所。
材料、デバイスのシミュレータ開発に従事。
日本物理学会、応用物理学会、日本応用数理学会会員。
Advanced Research Lab.