

【技術分類】 1 - 5 - 2 MRAM / 書き込み技術 / スピン注入磁化反転技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@S; G11C11/15,140

【技術名称】 1 - 5 - 2 - 1 スピン注入磁化反転 - Cu/Co/Cu/Co/Cu/Pt/Au

【技術内容】

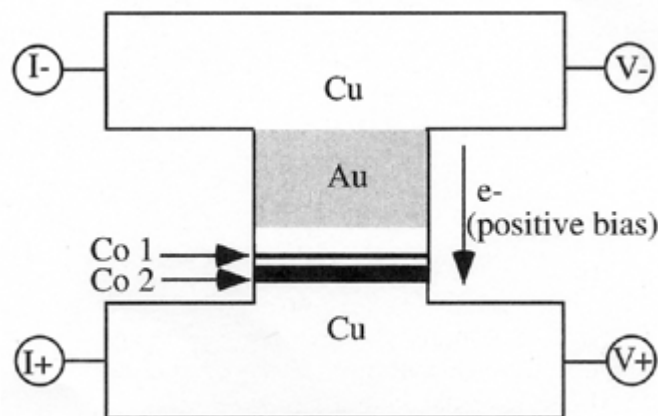
理論計算で、強磁性導体 (ferromagnetic conductor) を貫流するスピン偏極電流 (spin-polarized current) は、導体の磁気モーメントにトルクを与えることが予想されている。

酸化した Si の基板の上に Cu(1200)/Co(100)/Cu(60)/Co(25)/Cu(150)/Pt(30)/Au(600) の多層膜をスパッタし、500 の Cr 層をマスクとしてイオンミリングにより $130 \pm 30\text{nm}$ 径の素子を切り出した (図 1)。

本試料により、理論で予測されたスピン移転効果を確認した。図 2 aに室温で膜に平行な磁場H、1200 および 1600 Oeをかけながら測定した微分抵抗 dV/dI と電流の関係を示す。1200 Oeの曲線から、素子が低抵抗状態で電流Iを0から増やしていくと dV/dI は9mAと13mAで急上昇する (電流密度で0.7および $1.0 \times 10^8 \text{A/cm}^2$ に相当)。この後電流を下げていくと高抵抗が維持され、電流がマイナスになってはじめて低抵抗になるようなヒステリシスを示す。抵抗の急変は、二つのCo層の磁化方向が変わることに対応しており、低抵抗状態は平行磁化状態に対応する。

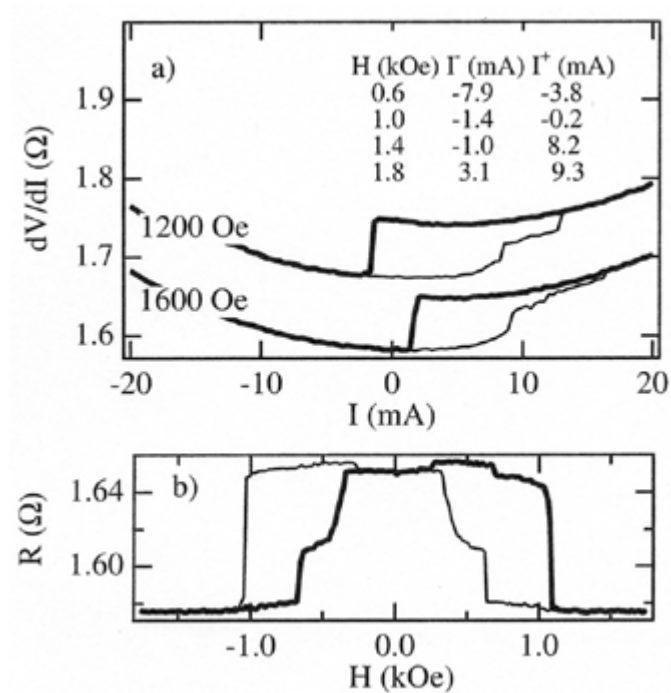
【図】

図 1 60 Cu 層 (白色部) で分離された Co 層 (黒色部) で構成された柱状の素子。正バイアスのとき、電子は薄い Co 層 (1) から厚い Co 層 (2) に流れる。



出典:「Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co /Cu /Co Pillars」, 「Phys.Rev.Lett. Vol.84 No.14」, 2000 年 4 月 3 日、J. A. Katine、F. J. Albert、R. A. Buhrman、E. B. Myers、D. C. Ralph 著、The American Physical Society 発行、3149 頁 Fig.1 Schematic of pillar device with Co (dark) layers separated by a 60 Cu (light) layer. At positive bias, electrons flow from the thin (1) to the thick (2) Co layer.

図 2 (a) (図 1 の)柱状素子の dV/dI が電流スイープに対してヒステリシスジャンプを持つことを示す。電流スイープは0から始まり、細線は電流の増加、太線は減少過程に対応する。高電流域で線が重なるため、1200 Oe 線は上方向にずらして表示した。図中の表は、完全に平行状態から離れ始めるとき (I+) および戻り始めるとき (I-) の限界電流を示す。(b)同じサンプルのゼロバイアス磁気抵抗ヒステリシスループ。



出典:「Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co /Cu /Co Pillars」,
「Phys.Rev.Lett. Vol.84 No.14」, 2000 年 4 月 3 日、J. A. Katine、F. J. Albert、R. A. Buhrman、
E. B. Myers、D. C. Ralph 著、The American Physical Society 発行、3150 頁 Fig.2 (a) dV/dI of
a pillar device exhibits hysteretic jumps as the current is swept. The current sweeps begin
at zero; light and dark lines indicate increasing and decreasing current, respectively. The
traces lie on top of one another at high bias, so the 1200 Oe trace has been offset vertically.
The inset table lists the critical currents at which the device begins to depart from the fully
parallel configuration (I^+) and begins to return to the fully aligned state(I^-). (b) Zero-bias
magnetoresistive hysteresis loop for the same sample

【出典 / 参考資料】

「Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co /Cu /Co Pillars」,
「Phys.Rev.Lett. Vol.84 No.14」, 2000 年 4 月 3 日、J. A. Katine、F. J. Albert、R. A. Buhrman、
E. B. Myers、D. C. Ralph 著、The American Physical Society 発行、3149 - 3152 頁

【技術分類】 1 - 5 - 2 MRAM / 書き込み技術 / スピン注入磁化反転技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@S; G11C11/15,140

【技術名称】 1 - 5 - 2 - 2 スピン注入磁化反転 - Cu/Co/Cu/Co/Au

【技術内容】

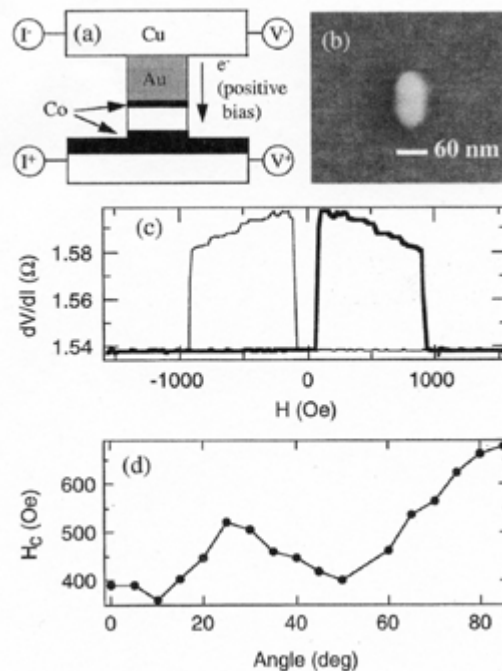
図 1(a)は実験に使用したナノ柱状デバイスの概念図を示す。スパッタにより Cu(80nm) /Co(40nm) /Cu(6nm) /Co(2.5nm)/Au(10nm)複層膜を酸化した Si 基板上に積層し、Au をパターニングした後、Au をマスクに Ar イオンミリングにより底部の Co にちょうどかかるところまで削り取った。この段階での SEM 像を図 1(b) に示す。パターンの平面形状は引き伸ばした六角形であり、おおよそ 60nm × 130nm の寸法である。この後平坦化処理を行い、上部電極をつけて実験用サンプルとした。

ナノマグネットの長軸方向に与えた磁場による微分抵抗の変化を図 1(c)に示す。磁場を 0 から ± 1600 Oe までスキャンしていくと約 ± 50 Oe で微分磁気抵抗が急増する。この点で下部のパターニングしていない Co の磁化が反転し、二つの Co が反平行状態になったことを示している。磁場の絶対値が 900 Oe 付近で微分磁気抵抗が急減し、この段階でパターニングした Co のナノマグネットの磁化が反転し平行状態になったことを示している。図 1(d)にナノマグネットの磁化が完全に反転する磁場の強さ H_c を、ナノマグネットの長軸と磁場の方向のなす角度の関数として示した。 H_c はナノマグネットの長軸と直角の方向で、容易軸と比べて約 2 倍であった。

ナノ柱状デバイスの上部および下部の電極間に ± 10mA の電流サイクルをかけ微分抵抗 - 電流曲線に急速な抵抗の上昇および下降を伴うヒステリシスが起こることを確認した。これは、スピン偏極電子による磁化の反転が起こっていることを示している。

【図】

図 1 (a)実験に使用したナノ柱状デバイスの概念図。(b)Co ナノマグネットの SEM 像。(c)ナノマグネットの長軸方向に与えた磁場による微分抵抗の変化。(d)ナノマグネットの磁化が完全に反転する磁場の強さ H_c のナノマグネットの長軸と磁場の方向のなす角度による変化。(d)と(c)のサンプルは同じではなく、製造工程のばらつきにより保磁力が異なっている。



出典：「Spin-polarized current switching of a Co thin film nanomagnet」, 「Appl. Phys. Lett Vol.77 No.23」, 2000年12月4日、ALBERT F J, KATINE J A, BUHRMAN R A, RALPH D C 著、American

Institute of Physics 発行、3810 頁 Fig. 1. (a) A schematic cross section of the nanopillar device used for the study of spin-transfer switching of Co nanomagnets. (b) A scanning electron micrograph of the Co nanomagnet before the top Au electrode covers the structure. (c) The differential resistance dV/dI as a function of magnetic field H applied parallel to the long axis of the nanomagnet. (d) The critical field H_c that is required to complete the transition to the fully aligned, low resistance state of a different nanopillar device as a function of the angle between the field and the long axis of the nanomagnet. The device in (d) has a different coercive field than the device in (c) due to nanofabrication variation.

【出典 / 参考資料】

「Spin-polarized current switching of a Co thin film nanomagnet」, 「Appl. Phys. Lett. Vol.77 No.23」, 2000 年 12 月 4 日、ALBERT F J、KATINE J A、BUHRMAN R A、RALPH D C 著、American Institute of Physics 発行、3809-3811 頁

【技術分類】 1 - 5 - 2 MRAM / 書き込み技術 / スピン注入磁化反転技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@S; G11C11/15,140

【技術名称】 1 - 5 - 2 - 3 スピン注入磁化反転 - Co/Cu/Co

【技術内容】

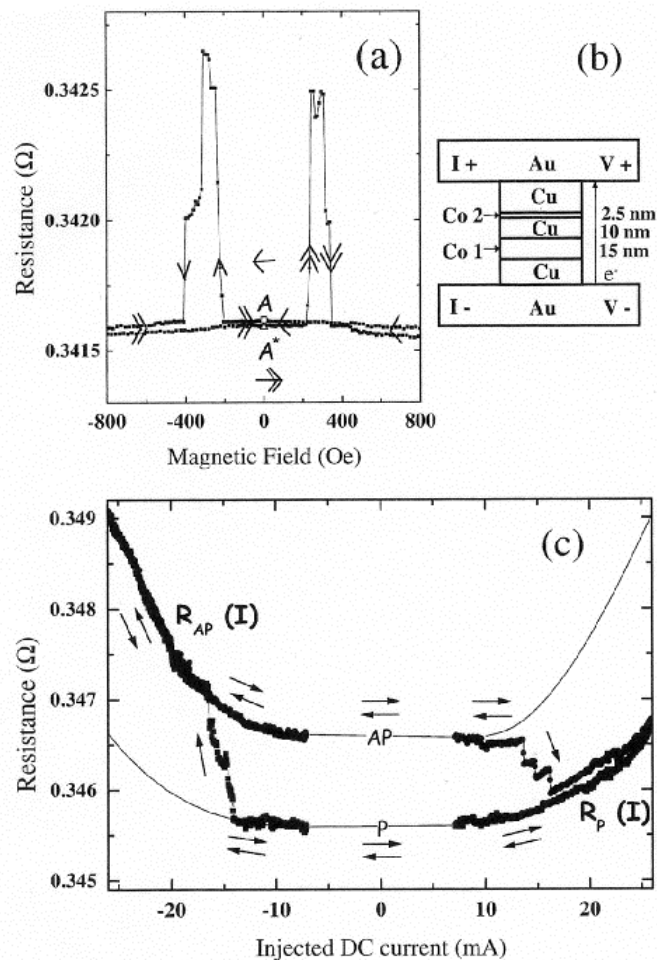
図 1(b)に構造概念図を示す、上下にAuの電極を取り付けた $200 \times 600 \text{ nm}^2$ の Co(15nm) / Cu(10nm) / Co(2.5nm) を積層した柱状接合 (以下ピラーと呼ぶ) の GMR 曲線を図 1(a) に示す。

電流による磁化の反転実験 (図 1(c)) では、ピラーはあらかじめ 5500 Oe の正磁場 (あるいは負磁場) で飽和しておき、磁場を一旦 0 に戻す。この状態で二つの Co 層の磁化は平行状態にあり、図 1(a) の点 A (あるいは A*) の状態にある。

A の状態から電流を増やしていくと図 1(c) の $R_p(I)$ のカーブに沿って可逆的に抵抗が増えていく。電流を - に増やしていくと最初 $R_p(I)$ のカーブに沿って動き特定の限界電流、 I_c^p 、(約 -15mA) で急激に抵抗が増加し高抵抗状態に移る。この後、マイナスの最大電流から +15mA の間では可逆的に $R_{AP}(I)$ 曲線上を動く、電流が限界電流 I_c^{AP} 、(約 +15mA) を超えると $R_p(I)$ 上に不可逆的に低下する (この低下は数段階にステップ状に起こる)。この二つの間の抵抗差、約 $1 \text{ m}\Omega$ は GMR の大きさに相当していて、電流により平行、反平行の二つの磁化状態間のスイッチが起きていることに対応している。

【図】

図 1 (a) 30K $I=50 \mu\text{A}$ における $200 \times 600 \text{ nm}^2$ Co/Cu/Co ピラー (pillar) の GMR 曲線。(b) ピラーの層構成概念図。(c) 電流による抵抗変化。1 本の矢印は一方向の、2 本の矢印は双方向の遷移を示す。電流が 0 付近では技術的な問題によりノイズが多いためグラフから除外した。細線の曲線は、対称性を仮定した $R_{AP}(I)$ と $R_p(I)$ の外挿線である。



出典：「Spin-polarized current induced switching in Co/Cu/Co pillars」, 「Appl. Phys. Lett Vol.78 No.23」, 2001年6月4日、GROLLIER J、CROS V、HAMZIC A、GEORGE J M、JAFFRES H、FERT A、FAINI G、YOUSSEF J B、LEGALL H著、American Institute of Physics 発行、3664頁 FIG. 1. (a) GMR curve of a 200X600 nm² Co/Cu/Co pillar at 30 K with (b) schematic of a pillar; (c) resistance as a function of current. Single arrows (double arrows) indicate the irreversible (reversible) parts of the cycle. The measurement at low current (flat part of the variation) were noisy for technical reasons and have been omitted from the figure. The thin lines have been obtained by symmetry and are guides for the extrapolation of $R_{AP}(I)$ and $R_P(I)$.

【出典 / 参考資料】

「Spin-polarized current induced switching in Co/Cu/Co pillars」, 「Appl. Phys. Lett Vol.78 No.23」, 2001年6月4日、GROLLIER J、CROS V、HAMZIC A、GEORGE J M、JAFFRES H、FERT A、FAINI G、YOUSSEF J B、LEGALL H著、American Institute of Physics 発行、3663-3665頁

【技術分類】 1 - 5 - 2 MRAM / 書き込み技術 / スピン注入磁化反転技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@S; G11C11/15,140

【技術名称】 1 - 5 - 2 - 4 スピン注入磁化反転技術 - スイッチ電流の温度特性

【技術内容】

磁気多層膜を縦貫するスピン偏極電流 (spin-polarized current) は、強磁性モーメントの方向を変え、磁極の反転を起こしうる。

Cu(80nm)/Co(40nm)/Cu(6nm)/Co(3nm)/Au(10nm)の多層膜を電子線リソグラフィーとイオンミリングを使って $50\text{nm} \times 50\text{nm}$ (サンプル1) から $130\text{nm} \times 60\text{nm}$ (サンプル3) の柱状に切り出した (図1(a))。イオンミリングを制御し厚いCo膜をフィルム層として残した (図の下部)。

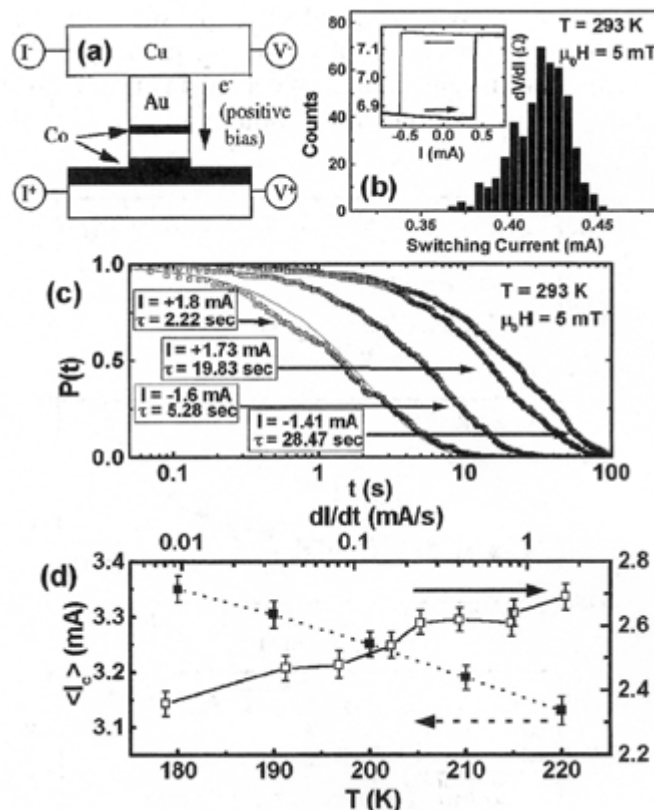
試料の両端の電極からバイアス電流を流す。電流をスイープしながら電圧を測定し、微分抵抗 (dV/dI) を求める。二つの磁性層 (Co) の磁化が平行している状態で電流を - から + にスイープすると dV/dI は臨界電流 I_c で急増する。この点で薄いCoナノ磁石は厚いCoフィルムに反平行に磁化する。反平行磁化状態は、電流が逆転して I_c になるまで保たれ、この点でスピン移送効果でナノ磁石がもとの平行磁化に戻る (図(b)の挿入図)。磁石の反転する電流 I_c のヒストグラムから反転電流がある分布を持つことがわかる (図(b))。

電流を I_c 近傍で一定に保ったまま置くと、反転するまでに時間がかかる。この反転するまでの待ち時間も確率的な分布を示し、時間 t までに反転しない確率は指数減衰曲線に近似できる (図(c))。

温度の減少 (■) あるいは電流スイープ速度の増加 (□) により I_c の分布は高電流側に動く (図(d))。

【図】

図1 (a)ナノ柱状素子 (nanopillar device) の模式図。[(b)の挿入図]素子1の抵抗変動と電流の関係。(b)素子1の平行から反平行への遷移のスイッチ電流の分布。(c)素子2の待機時間分布。分布は関数 $e^{-t/\tau}$ に回帰した。(d)素子3の $H=0$ におけるスイッチ電流 I_c の中央値の温度依存性 (■) と室温下での電流スイープ速度依存性 (□)。たての棒は I_c の分布の 2σ 巾を示す。



出典：「Thermally Activated Magnetic Reversal Induced by a Spin-Polarized Current」, 「Phys. Rev. Lett. Vol.89 No.19」, 2002 年 11 月 4 日、E. B. Myers、F. J. Albert、J. C. Sankey、E. Bonet、R. A. Buhrman、D. C. Ralph 著、The American Physical Society 発行、196801-1 頁 Fig.1 (a) Schematic of the nanopillar device. [(b) inset] Differential resistance vs I for device 1. H is along the easy axis of the nanomagnet. (b) Distribution of switching currents for device 1, for the parallel to antiparallel transition. (c) Waiting time distributions for device 2. The distributions are fit to the function $e^{-t/\tau}$. (d) Dependence of the mean switching current $\langle I_c \rangle$ on T (closed squares) and current-sweep rate at room T (open squares) for device 3 at $H = 0$. The bars show the width $2\sigma_{I_c}$ of the distribution.

【出典 / 参考資料】

「Thermally Activated Magnetic Reversal Induced by a Spin-Polarized Current」, 「Phys. Rev. Lett. Vol.89 No.19」, 2002 年 11 月 4 日、E. B. Myers、F. J. Albert、J. C. Sankey、E. Bonet、R. A. Buhrman、D. C. Ralph 著、The American Physical Society 発行、196801-1 - 196801-4 頁

【技術分類】 1 - 5 - 2 MRAM / 書き込み技術 / スピン注入磁化反転技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@S; G11C11/15,140

【技術名称】 1 - 5 - 2 - 5 スピン注入磁化反転技術を用いた MRAM

【技術内容】

電流磁界書き込みではメモリセルサイズにほぼ反比例して書き込み電流が増加するのに対し、スピン注入磁化反転によればメモリセルの微細化により電流を下げるができるため MRAM の大容量化のキーテクノロジーと考えられている。

図 1 (a) に示すようにスピン注入磁化反転では電流方向によって磁化方向 (“0”、“1” 情報) を規定できる。電流注入のみで書き込みが可能であり、電流量によって書き込み、読み出しを制御する。

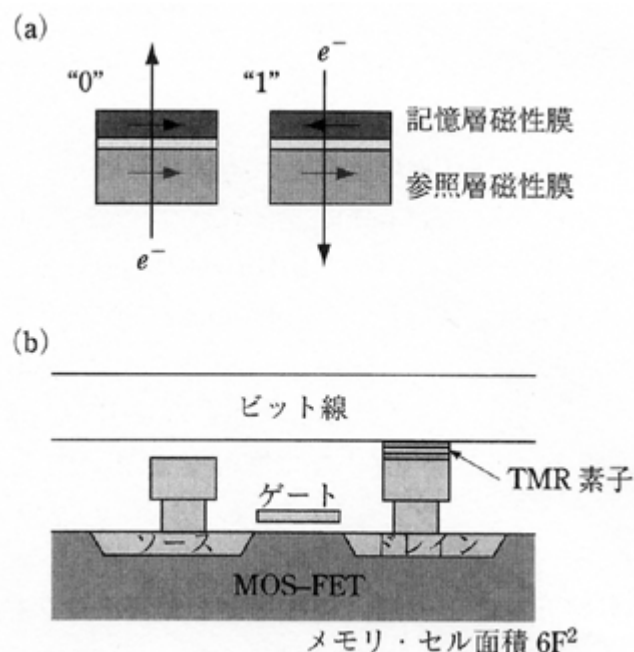
したがって、書き込み用の磁界発生電流線 (ワード線) が不要であり、MRAM の構造が簡素化するとともにメモリセル面積を 1 トランジスタ + 1 TMR 素子構造の理論的な最小面積である $6F^2$ (F は設計ルール) に縮小できる (図 1 (b))。

現状では、室温でスピン注入磁化反転が行えるのは GMR 膜に限られているが抵抗変化率が小さいため得られる出力は 0.1mV 程度である。実用化のためには 100mV 程度の出力が必要であり、TMR 膜の使用が不可欠である。TMR 膜を実用化するには、絶縁破壊耐圧から反転電流値を現状より 2 桁低い 0.1mA 以下にする必要がある。反転電流を低減するためには飽和磁化 M_s 、フリー磁性層の異方性磁界 H_{ani} 、膜厚 d の低下が必要で、 M_s の低下は特に有効と考えられる。あわせてスピン注入磁化反転効率を向上させる方策、例えばハーフメタル材料を使って、磁性膜の分極率を高める等の工夫が求められる。

図 2 記憶セルサイズの減少に伴う書き込み電流の推移を示す。スピン注入磁化反転技術は記憶セルサイズの減少に伴い書き込み電流が減少するので大容量 MRAM の実現に重要である。

【図】

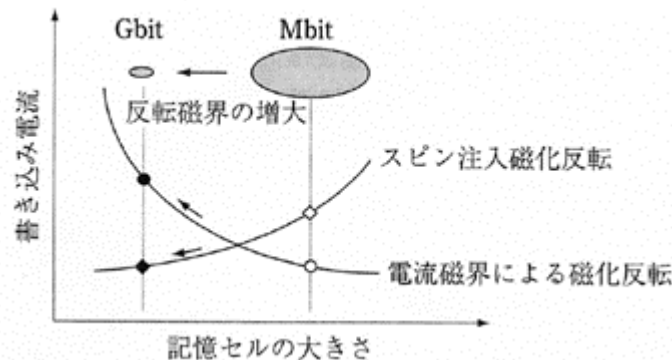
図 1 スピン注入磁化反転技術を用いた MRAM。



出典：「スピン注入磁化反転の現状と課題」、「まてりあ Vol.42 No.9」、2003 年 9 月 20 日、屋上公二郎、鈴木義茂著、社団法人日本金属学会発行、646 頁 図 10 スピン注入磁化反転技術を用いた MRAM. (a) 電流方向によって磁化方向 (“0”、“1” 情報) を規定できる。電流注入のみで書き込みが可能であり、電流量によって書き込み、読み出しを制御する. (b) 書き込み用の磁界発生電流線 (ワード線) が不要であるため、MRAM の構造が簡素化する. メモリセル面積は、1 トランジスタ + 1 TMR 素子

構造の理論的な最小面積である $6F^2$ (Fは設計ルール) に縮小する。

図2 スピン注入磁化反転と電流磁界による磁化反転でのセルサイズと書き込み電流の関係



出典：「スピン注入磁化反転の現状と課題」,「まてりあ Vol.42 No.9」, 2003年9月20日、屋上公二郎、鈴木義茂著、社団法人日本金属学会発行、646頁 図9 記憶セルサイズの減少に伴う書き込み電流（磁化反転）電流の変化のイメージ。電流磁界による磁化反転では、必要電流は、記憶セルサイズの減少にほぼ比例して増加する。このため、Gbit 超の大容量を実現できるセルサイズ(100nm オーダー)では、もはや、書き込みは困難となる。スピン注入磁化反転が有効に機能するのは、セルサイズが 200nm 程度以下においてである。

【出典 / 参考資料】

「スピン注入磁化反転の現状と課題」,「まてりあ Vol.42 No.9」, 2003年9月20日、屋上公二郎、鈴木義茂著、社団法人日本金属学会発行、640 - 647 頁

【技術分類】 1 - 5 - 2 MRAM / 書き込み技術 / スピン注入磁化反転技術

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@S; G11C11/15,140

【技術名称】 1 - 5 - 2 - 6 交換結合型スピバルブの電流による磁化スイッチング

【技術内容】

電流による磁化スイッチング (CIMS: current-induced magnetization switching) 材料として従来使われている Co /Cu /Co 積層膜などの擬似スピバルブ型ではなく、交換結合型スピバルブ (ESPV: exchange-biased SPV) 膜を用いて CIMS 実験を行った。

サンプルは高真空スパッタ装置で作成した。膜の構造は Cu(20nm) / IrMn(10nm) / Co₉₀Fe₁₀(5nm) / Cu(6nm) / Co₉₀Fe₁₀(d₁nm) / Ru(d₂nm) / Cu(5nm) / Ta(2nm) で、d₁は 2.5 と 5.0nm、d₂は 0 と 0.45nm であった。作成した ESPV ピラーの模式図を図 1 (b) に、ピラー部の上端 (図 1 (b) の A 部) の SEM 像を図 1 (a) に示す。断面形は 280 × 90nm² である。

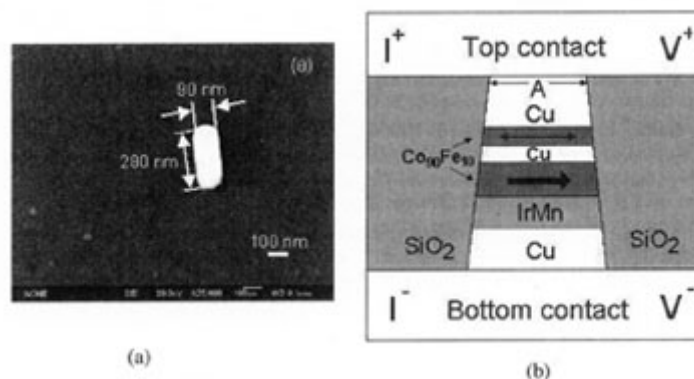
d₁が 2.5nm で d₂が 0 (すなわち Ru 層が無い) ESPV1 と d₂が 0.45nm の ESPV2 の二つのサンプルについて CIMS の測定を行った結果を図 2 に示す。測定はサンプルの反磁性状態を安定化させるため 90 Oe の磁場をかけた状態で行った。図 2 の差し込み図は同じサンプルの GMR ループの測定結果である。

ESPV 1 の場合、抵抗は、電流を増加してもほぼ一定であるが、電流が限界値 I_P ~ 27mA (限界電流密度 J^{AP→P} = 1.1 × 10⁸ A/cm² 付近で平行 (P) 状態に相当する低値に遷移する。電流が低下して I_P ~ -54mA (限界電流密度 J^{P→AP} = 2.1 × 10⁸ A/cm²) で抵抗が反平行 (AP) 状態に相当する高値に再び遷移する。限界電流密度は Co /Cu /Co の場合の ~ 10⁷ A/cm² と比べてはるかに高い。

フリー層と上部電極 Cu 層の間に Ru 層を入れた ESPV2 の場合も電流スイッチが起きていることがみられ CIMS 挙動は ESPV1 と同様であるが、限界電流が大幅に低下し 2.2 × 10⁷ A/cm² となった。

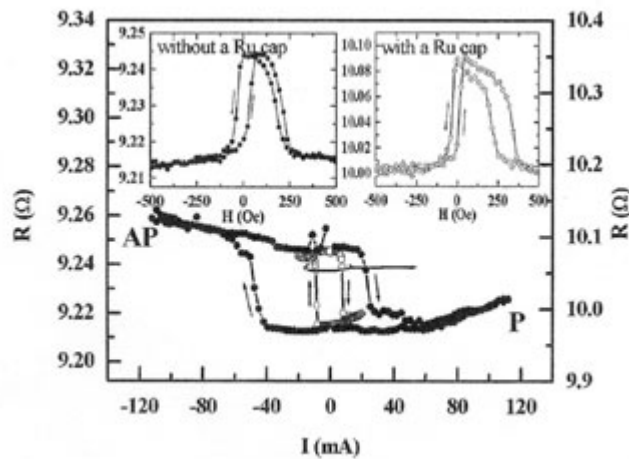
【図】

図 1 (a) ピラー部の上端 (図 1 (b) の A 部) の SEM 像。(b) 作成した ESPV ピラーの模式図。



出典: 「Effective Reduction of Critical Current for Current-Induced Magnetization Switching by a Ru Layer Insertion in an Exchange-Biased Spin Valve」, 「Phys.Rev.Lett Vol.92」, 2004 年 4 月 23 日、Y. Jiang、S. Abe、T. Ochiai、T. Nozaki、A. Hirohata、N. Tezuka、K. Inomata 著、The American Physical Society 発行、167204-2 頁 FIG. 1. (a) SEM image of the top view of an ESPV pillar. (b) Schematic cross-sectional diagram of a patterned CPP ESPV pillar.

図 2 ESPV1 (黒丸) と ESPV2 (白丸) のスワイプ電流による抵抗変化。いずれも 90 Oe の外部磁化のもとで測定した。差し込み図は同じサンプルの GMR ループを示す。



出典：「Effective Reduction of Critical Current for Current-Induced Magnetization Switching by a Ru Layer Insertion in an Exchange-Biased Spin Valve」, 「Phys.Rev.Lett Vol.92」, 2004 年 4 月 23 日、Y. Jiang、S. Abe、T. Ochiai、T. Nozaki、A. Hirohata、N. Tezuka、K. Inomata 著、The American Physical Society 発行、167204-2 頁 FIG. 2. Resistance (R) vs sweeping dc current (I) for ESPV 1 (closed circle with lines) and ESPV 2 (open circle with lines). Both curves have been measured under 90 Oe magnetic field. The insets show the GMR loops of ESPV 1 (closed circle with lines) and ESPV 2 (open circle with lines).

【出典 / 参考資料】

「Effective Reduction of Critical Current for Current-Induced Magnetization Switching by a Ru Layer Insertion in an Exchange-Biased Spin Valve」, 「Phys.Rev.Lett Vol.92」, 2004 年 4 月 23 日、Y. Jiang、S. Abe、T. Ochiai、T. Nozaki、A. Hirohata、N. Tezuka、K. Inomata 著、The American Physical Society 発行、167204-1 - 167204-4 頁