

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04278

研究課題名(和文) 垂直磁気トンネル接合における困難軸特性モデルの構築とセンサー応用

研究課題名(英文) Hard-axis switching model of perpendicular anisotropy magnetic tunnel junctions and their sensor applications

研究代表者

三浦 貞彦 (Miura, Sadahiko)

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授

研究者番号：70750371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：垂直磁気異方性を有する磁気トンネル膜(構成：Ta/Ru/TaN/[Co/Pt]4/Ru/[Co/Pt]3/W/CoFeB/MgO/CoFeB(1.4)W/CoFeB/MgO/cap)をスパッタ法により形成し、フリー層直径10nm～90nmの素子を加工した。直径13～20nmの領域では、素子サイズの低下とともに保磁力は減少した。フリー層直径20nm以下ではMTJは困難軸特性を示し、垂直磁場に対するコンダクタンス変化10%、ダイナミックレンジ15～20 mT、磁気感度0.5～0.7%/mT、non-linearity 5%、Hoogeパラメータ $1 \times 10^{-10} [\mu\text{m}^2]$ が測定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

垂直磁化フリー層の容易軸方向の反転に関しては、シミュレーション、実験等の多数の研究が行われているが、困難軸方向の挙動、特に磁気センサーとしての磁気感度、ノイズ特性を評価する本研究のアプローチは少ない。加えてトンネル障壁に関する知見をノイズ特性から得ることが可能となり、極薄トンネル膜の理解という観点から極微細CMOSのゲート絶縁膜の理解の進展にも寄与する。

垂直方向に対する高感度磁気センサーの実証が可能となれば、そのコンパクト性から医療、車載等の応用が期待される。さらに1枚のウエハから3方向に対するコンパクトな高感度磁気センサーが可能であれば、上記の応用に加え、携帯端末等への応用が広がる。

研究成果の概要(英文)：Magnetic tunnel junctions with vertical magnetic anisotropy were prepared on Si/SiO₂ substrate by magnetron sputtering. The film composition was Ta/Ru/TaN/[Co/Pt]4/Ru/[Co/Pt]3/W/CoFeB/MgO/CoFeB/W/CoFeB/MgO/cap/hard mask material. A circular device with a free layer diameter of 10nm to 90nm was prepared by electron beam lithography and argon ion milling. With free layer diameters ranging from 20nm to 90nm, the coercive forces of the free layers were constant at about 140mT. With free layer diameter ranging from 13 to 20 nm, the coercive force decreased as the device size decreased. In the region of 13 to 20 nm in diameter, the coercive force decreased as the device size decreased. MTJ shows hard axis characteristics when the free layer diameter is 20 nm or less. The change in conductance with respect to the vertical Magnetic field is 10%, the dynamic range is 15 to 20mT, the magnetic sensitivity is 0.5 to 0.7% /mT, the non-linearity is 5%, and the Hooge parameter is $1 \times 10^{-10} [\mu\text{m}^2]$.

研究分野：磁気デバイス

キーワード：磁気トンネル接合 磁気センサー 垂直磁気異方性 困難軸特性 感度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

すべての物がインターネットにつながる IOT(Internet of Things)社会では、位置、運動量、加速度、温度、圧力等物理パラメータを測定するために、各種センサーが広く用いられている。

従来、磁気センサーに関してはホール素子及び異方性磁気抵抗 (Anisotropic Magnetoresistance: AMR) 素子が用いられている。これらのセンサーでは要求される感度とスイッチ機能を有する CMOS との抵抗の整合性から、寸法は平方ミリメートル台と大きく、消費電力が高く、コスト高であるという問題がある。

一方、巨大磁気抵抗効果を用いた GMR(Giant Magnetoresistance) センサー及びトンネル磁気抵抗効果を用いた磁気トンネル接合 (Magnetic Tunnel Junction: MTJ) では、小型化が可能で省電力のため、一部では実用化されている。特に MTJ 素子では高い MR 比から高感度が期待される。しかしながら従来の MTJ 素子を用いた磁気センサーの研究開発は、フリー層、固定層ともに面内磁化膜のものが多く (US Patent Pub. No. US2016/0163962 A1)、膜面垂直方向に関する磁気の検出が困難なため、3 軸センサーを作成するために傾けた基板に素子を作製する (US Patent Pub. No. 7564237)、あるいは、面内磁化膜の素子を下地に対して垂直に配置すること等が提案されている。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまで垂直磁気異方性を有する CoFeB/MgO/CoFeB MTJ を作製し、その磁気抵抗特性を測定してきた。作製した素子直径 ~46nm ではフリー層は垂直磁気異方性を示し、その保磁力は 100mT 程度であり、フリー層 CoFeB が垂直磁気異方性を保つための Co/Fe 組成比、膜中の B 濃度、キャップ層の材料、膜厚を明らかにしてきた。本研究ではそれらの実験条件を用いて、固定層は垂直磁気異方性を有し、フリー層の磁気異方性を素子寸法により制御することにより、垂直磁場に対して感度のある磁気センサーを作製、評価した。

3. 研究の方法

すべての積層構造は DC/RF スパッタリングを用い、300 mm Si 熱酸化膜上に成膜した。膜構成は Si/SiO₂/Ta/Ru/TaN/[Co/Pt]₄/Ru/[Co/Pt]₃/W(0.3)/CoFeB(1)/MgO/CoFeB(1.4)/W(0.3)/CoFeB(1)/MgO/cap 層/ハードマスク材料である。括弧内の数値は nm 単位での膜厚である。

[Co/Pt]₄/Ru/[Co/Pt]₃/W(0.3)/CoFeB(1) は磁化方向が固定化された固定層、CoFeB(1.4)/W(0.3)/CoFeB(1) は磁化方向が電子のスピンにより反転可能なフリー層として機能する。サンプルは成膜後、400 °C で一時間熱処理を行った。

積層膜は、電子線リソグラフィと Ar イオンミリングを用いて円形の素子形状に加工した。接合寸法は直径 10nm から 90nm まで変化させた。加工前の多層膜の磁気特性は VSM で評価した。加工前の多層膜の規格化抵抗 (RA)、磁気抵抗比は CIPT 法 (Current-in-plane tunneling measurement: 面内電流トンネル法) により行った。構造評価、出来栄評価は断面 TEM 観察を用いて行った。加工後の素子の磁気抵抗特性は垂直磁場印加の状態での DC 2 端子抵抗測定により行った。ノイズ測定は以下のように行った。時間分割の電圧変動は低ノイズのアンプにより増幅され波形生成高速測定ユニット (Waveform generator/fast measurement unit WGFMU) によってサンプリングされた。サンプルレートは 2kHz である。

4. 研究成果

(1) 素子加工前の多層膜の特性

素子加工前の磁性多層膜の磁化曲線のメジャー・ループ (-1 Tesla ~ +1 Tesla の磁化曲線) より、フリー層の磁化反転、磁化固定層のフロップ、磁化固定層における反強磁性結合の印加磁界による平行化が観測された。磁化曲線のマイナー・ループ (-0.1 Tesla ~ +0.1 Tesla の磁化曲線) より、フリー層は垂直磁気異方性を有し、その保磁力は 15mT 程度である。

面内電流トンネル (CIPT) 法を用いて評価した 300 mm ウエハの規格化抵抗 RA (Ω・μm²) の面内分布は 49 点測定点の平均は 12.0 Ω・μm²、分散は 8.4% であった。

面内電流トンネル (CIPT) 法を用いて評価した 300 mm ウエハの磁気抵抗比 (MR 比) の面内分布は 49 点測定点の平均は 161%、分散は 7.7% であった。

図 1 にこの磁性多層膜の断面 TEM 像を示す。MgO バリア、MgO キャップが連続膜であること、MgO キャップ、フリー層、MgO バリア、固定層が結晶化していることがわかる。MgO/垂直磁気異方性 CoFeB の異方性エネルギーは

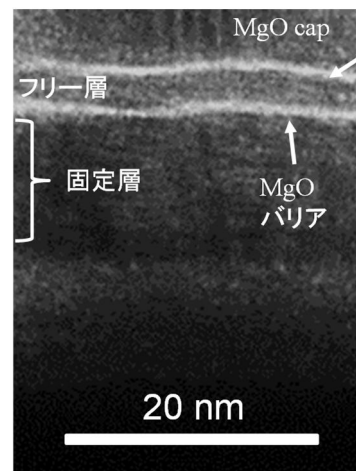


図 1: 磁性多層膜の断面 TEM 像

MgO/CoFeB 界面により発生することが知られている。MgO バリア/CoFeB と CoFeB/MgO キャップの 2 重の界面を有するため、一重界面の MgO バリア/CoFeB に比べ、異方性エネルギーの上昇が期待される。

(2) 素子加工後の MTJ の構造、磁気抵抗特性

素子加工後の磁気トンネル接合の素子構造を断面 TEM で評価した。上部電極とハードマスクがしっかりと接続していること、ハードマスクはほぼ垂直にエッチングされていること、MTJ 部が明確な構造として寸法が規定されていることが明らかになった。また、磁気トンネル接合素子内の MgO トンネル障壁、MgO キャップ膜が白い線として明確に観察されている。

図 2 に作製した磁気トンネル接合素子の保磁力 ($\mu_0 H_c$) の素子直径依存性を示す。なお、素子直径は MTJ が円形であると想定し、素子の平行状態での素子抵抗と規格化抵抗 RA より求めた。

素子直径が 30nm から 90nm までは保磁力 ($\mu_0 H_c$) は 140~150 mT とほぼ一定であった。素子直径が 30nm 以下においては、直径が短いほど保磁力が低下している。素子直径が 30nm 程度で、磁化反転が素子サイズの大きいときの磁化反転である磁壁移動モードから、素子サイズが小さいときの磁化反転である一斉回転モードに変化したことによる熱安定性係数の減少と関連付けられる。作製した磁気トンネル接合素子のオフセット磁界 ($\mu_0 H_{offset}$) の素子サイズ依存性は以下のような

る。素子直径が 90nm から 20nm まではオフセット磁界は素子直径の減少とともに、単調に減少した。20nm 以下においては、素子サイズの低下とともに急激にオフセット磁界が増加した。ピン層に比べ幾分フリー層の素子サイズは小さい。漏洩磁界の強度は固定層の端の部分で強い。素子サイズが大きい時には、フリー層は固定層の端の影響をあまり受けないが、素子サイズが小さくなるにつれて、フリー層全体が固定層の端の影響を受け、そのため素子サイズの低下とともに、オフセット磁界が急激に増加したと考えられる。

図 3 に作製した磁気トンネル接合素子の磁気抵抗比 (MR 比) の素子サイズ依存性を示す。素子サイズ 90nm から 30nm までは MR 比=160% とほぼ一定の値を示した。素子サイズ 30nm 以下では、MR 比は素子サイズの低下とともに減少する傾向にあるが、図 2 の保磁力のように急激な減少は観察されなかった。

MR 比は理論的に

$$MR \text{ ratio} = \frac{2P_1 \cdot P_2}{1 - P_1 \cdot P_2}$$

で表現される。ここで、 P_1 , P_2 は固定層及びフリー層の分極率である。熱安定性係数 に比べて分極率は素子サイズの影響を受けにくいと考えられる。

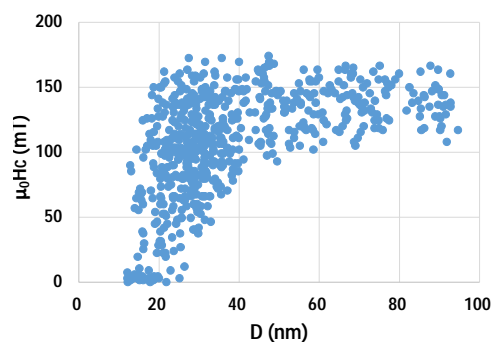


図 2: 保磁力の素子直径依存性

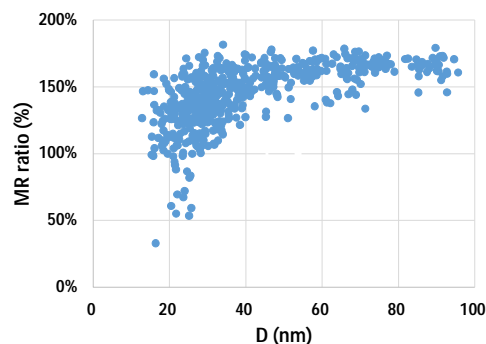


図 3: MR 比の素子直径依存性

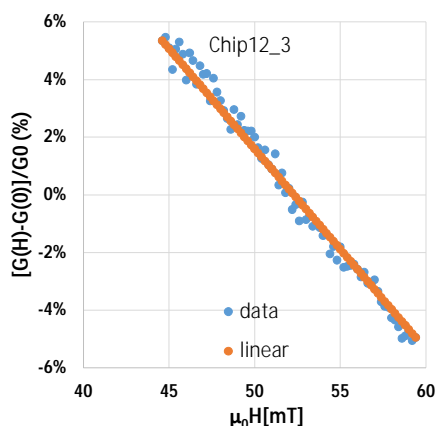


図 4(a) 磁気コンダクタンス特性とその線形性

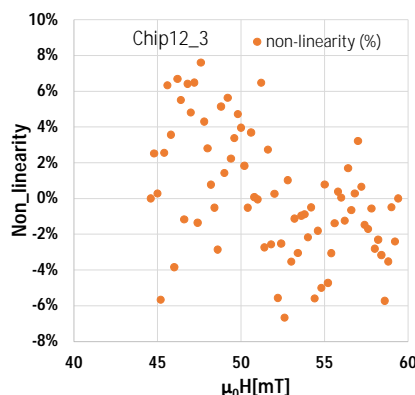


図 4(b) 磁気コンダクタンスの非線形性

(3) 磁気トンネル接合素子のセンサー特性

図4にチップ(12_3)のセンサー特性を示す。(a)は磁気コンダクタンス特性(%)とその線形性を、そして(b)は磁気コンダクタンスの非線形性をそれぞれ示す。

素子の低抵抗状態の抵抗値から MTJ の直径は 10nm と見積もられた。図4(a)より、磁気コンダクタンスの変化は 45mT から 60mT の間で約 10% であり、磁気感度としては 0.7%/mT である。図4(b)には、線形性からのずれを印加磁界の関数としてプロットした。最大で ±8% 程度のずれが観測された。他のチップ(11_4)でのセンサー特性も評価した。低抵抗状態の抵抗値から MTJ の直径は 12nm と見積もられた。磁気コンダクタンスの変化は 10mT から 30mT の間で約 10% であり、磁気感度としては 0.5%/mT である。線形性からのずれは最大で ±5% 程度であった。

(4) 磁気トンネル接合素子のノイズ特性評価

図5にチップ(1, 14)におけるバイアス電圧 0.02V 印加時の諸特性を示す。(a)は読み出し電流の時間変動を、(b)は読み出し電流値の頻度を、(c)は緩和時間と頻度を、そして(d)は周波数とパワースペクトラル密度の関係を示す。図5(b)のヒストグラムにおいて、読み出し電流 3.78×10^{-7} [A] のメイン・ピーク以外に読み出し電流 3.98×10^{-7} [A] にピークが存在する。そのため、閾値 3.96×10^{-7} [A] 以上の状態の頻度と緩和時間、および 3.79×10^{-7} [A] 以下の状態の頻度と緩和時間を(c)に示す。なお、図中 Parallel は高電流状態を Antiparallel は低電流状態をそれぞれ示す。同じ素子にバイアス電圧 0.08V 印加し、同様の諸特性を取得した。各状態での緩和時間とバイアス電圧の関係から交点の緩和時間は 2.8msec となり、これは $(=E/kbT)$ としては、14.8 となる。

図5(d)の周波数とパワースペクトラル密度との関係を示す。残念ながら、実験室の機械的振動が 9Hz とその高調波が観測された。

それを除くと周波数とパワースペクトラルとの関係はほぼ $1/f$ 則に従った。

そこから Hooge パラメータを導出すると 1×10^{-10} [μm^2] となった。

同様な測定はチップ(5, 16)においても実施した。チップ(5, 16)のヒストグラムにおいても、読み出し電流 7.642×10^{-6} [A] のメイン・ピーク以外に読み出し電流 7.665×10^{-6} [A] にピークが存在する。そのため、閾値 7.665×10^{-6} [A] 以上の状態の頻度と緩和時間、および 7.642×10^{-6} [A] 以下の状態の頻度と緩和時間を求めた。同じ素子に異なったバイアス電圧 0.08V での同様な測定を行い、緩和時間は 1.75msec となり、これは $(=E/kbT)$ としては、14.4 に対応する。

チップ(5, 16)の周波数とパワースペクトラル密度との関係においても、実験室の機械的振動が 9Hz とその高調波が観測された。それを除くと周波数とパワースペクトラルとの関係はほぼ $1/f$ 則に従った。そこから Hooge パラメータを導出すると 1×10^{-10} [μm^2] となった。

(5) 求めたデバイス パラメータと文献値の比較

素子を微細化し、フリー層を困難軸化した本研究で得られたデバイス パラメータと文献値を比較する。Nakano 等はフリー層を薄層化することにより垂直磁界に対する磁気センサーを作製し、CoFeB フリー層 1.8nm で磁気感度 0.3%/mT, nonlinearity 5% を報告した。

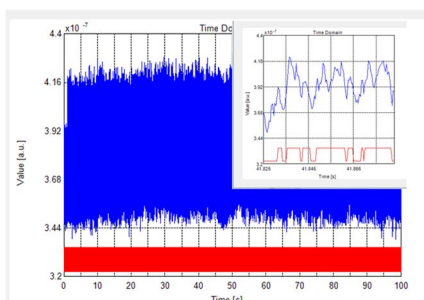


図 5(a) チップ(1,14)、0.02V 印加時の読み出し電流の時間変動

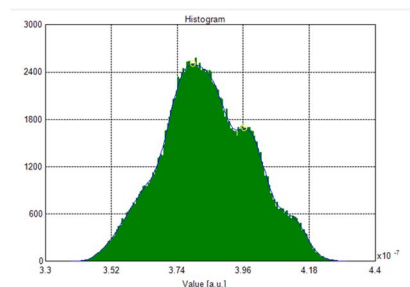


図 5(b) チップ(1,14)、0.02V 印加時の読み出し電流値のヒストグラム

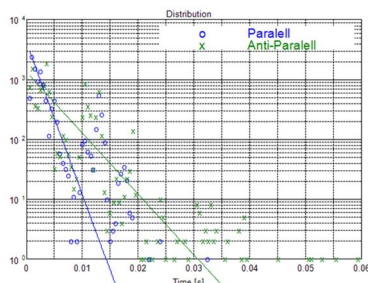


図 5(c) チップ(1,14)、0.02V 印加時の緩和時間と頻度

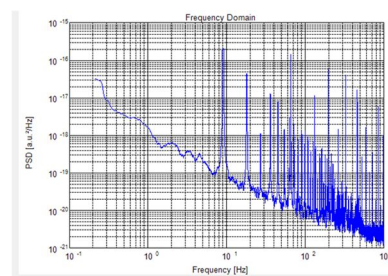


図 5(d) チップ(1,14)、0.02V 印加時の周波数とパワースペクトラル密度の関係

今回得られた 0.7%/mT, nonlinearity $\pm 8\%$ と同等と考えられる。

Hooge パラメータと規格化抵抗値がレビューされており、RA が低い素子で 1×10^{-10} [μm^2]の値が報告されており、我々のデータと同等と考えられる。

<引用文献>

T. Nakano, M. Oogane, T. Furuuchi, K. Ao, H. Naganuma and Y. Ando, "Magnetic Tunnel Junctions With [Co/Pd]-Based Reference Layer and CoFeB Sensing Layer for Magnetic Sensor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, No. 7, Art. No. 4001304, 2016

Z. Q. Lei, G. J. Li, William F. Egelhoff, Jr, P. T. Lai, and Philip W. T. Pong, "Review of Noise Sources in Magnetic Tunnel Junction Sensors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, No. 3, p. 602, 2011

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------