

【技術分類】 4 - 2 TMR 素子の展開および将来技術 / スピンメモリ

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; H01L29/66@T

【技術名称】 4 - 2 - 1 原子間力顕微鏡技術を用いて作製した平面型トンネル接合素子

【技術内容】

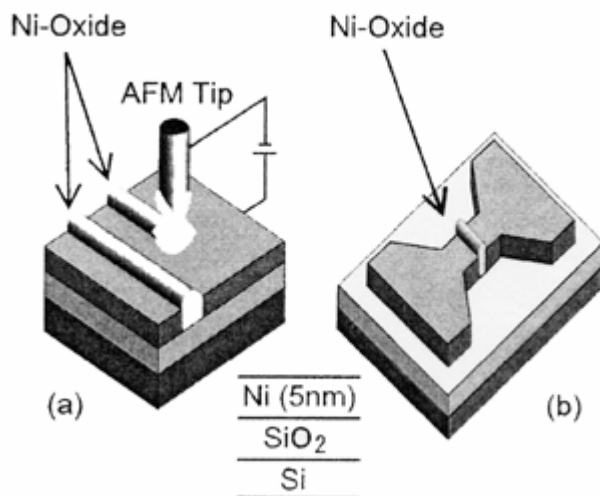
原子間力顕微鏡 (AFM) は、観測手段だけでなく、ナノメートル寸法の電子デバイスの作製手段にもなる。水分を含んだ雰囲気中で、金属薄膜上にセットした AFM チップに、負電圧バイアスを印加することにより、金属表面を選択的に陽極酸化することができる。

図 1(a) は、 $\text{SiO}_2$  上の Ni 薄膜を AFM 陽極酸化する様子を示す。AFM チップを走査することにより、選択的に細線状に酸化することができる。図 2(b) は、この Ni 酸化部を横方向トンネル障壁膜に用いた平面型トンネル接合を示す。40 - 200 nm 幅の障壁部が選択的に形成され、室温でクーロンブロッケード効果に基づく性能が得られる。レジスト塗布などの工程は必要としない。

図 2 は、AFM ナノ酸化で形成した平面型 2 重トンネル接合による、強磁性単電子トランジスタを示す。アイランド部とソースおよびドレインとの境界にある 2 つの障壁部を、AFM ナノ酸化で形成している。ソースおよびドレイン強磁性体電極の磁化を平行に保ち、アイランド部の強磁性体電極の磁化を、ソースおよびドレイン電極の磁化に対して平行または逆平行にスイッチすることにより、1 ビットの情報を記憶することができる。

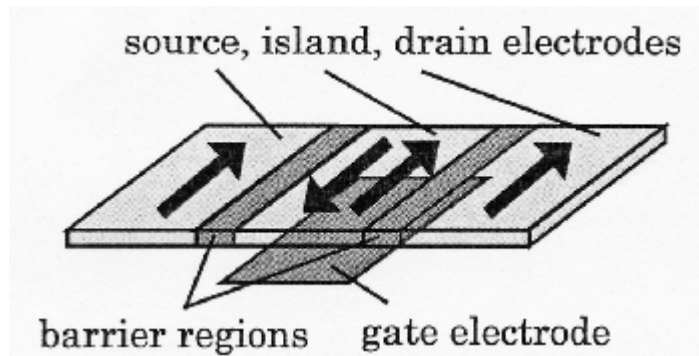
【図】

図 1 AFM ナノ酸化技術(a)と平面型トンネル接合(b)



出典：「Planar-type Ferromagnetic Tunnel Junctions Fabricated by Atomic Force Microscope for Nonvolatile Memory」, 「Japanese Journal of Applied Physics Vol.40 No.1」, 2001年1月15日、Yasushi Takemura、Jun-ichi Shirakashi 著、社団法人応用物理学会発行、128頁 Fig.1 Schematics of AFM nano-oxidation technique and planar-type ferromagnetic tunnel junction.

図 2 平面型 2 重トンネル接合を用いた強磁性単電子トランジスタ



出典：「Planar-type Ferromagnetic Tunnel Junctions Fabricated by Atomic Force Microscope for Nonvolatile Memory」, 「Japanese Journal of Applied Physics Vol.40 No.1」, 2001年1月15日、Yasushi Takemura、Jun-ichi Shirakashi 著、社団法人応用物理学会発行、129頁 Fig.3 Schematic of planar-type double tunnel junction of ferromagnetic single electron transistor.

【出典 / 参考資料】

「Planar-type Ferromagnetic Tunnel Junctions Fabricated by Atomic Force Microscope for Nonvolatile Memory」, 「Japanese Journal of Applied Physics Vol.40 No.1」, 2001年1月15日、Yasushi Takemura、Jun-ichi Shirakashi 著、社団法人応用物理学会発行、128 - 129頁

【技術分類】 4 - 2 TMR 素子の展開および将来技術 / スピンメモリ

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; H01L29/66@T

【技術名称】 4 - 2 - 2 スピン依存単電子トンネリングデバイス : 量子井戸変調素子

【技術内容】

磁気トンネル接合 (MTJ) において、電極中に量子井戸を形成すると、スピン分極輸送のバイアス依存性が変調を受け、新しい種類のスピン電子デバイスが得られる。

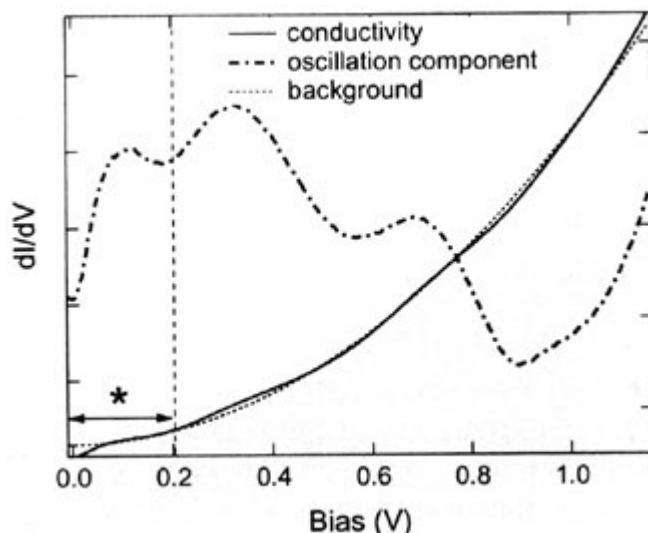
実験では、MTJの底部電極にスピン分極量子井戸状態を生成した。MTJとしては、Cr(001)下層膜上に2 - 9 MLの極薄単結晶Fe(100)膜を堆積し、Cr(100)(20 nm)/ Fe(100) (nML)/ Al-O (1.7 nm)/ FeCo (20 nm)構造とした。接合形状は  $3 \times 10 \mu\text{m}^2$ の長方形とした。トンネル分光法を用い、2 Kにおいて、このトンネル接合の電気伝導度のバイアス依存性を測定した。

図1の実線は、得られた微分電気伝導度 ( $dI/dV$ ) のバイアス依存性を示す。ここで、バイアス電圧の正方向は、多結晶 FeCo 電極から単結晶 Fe(100)電極の向きである。矢印で示した低バイアス領域では、マグノンやフォノン支援トンネル効果によるゼロバイアス異常性が観測されている。さらに、全体にわたって振動成分が観測される。

一点差線は、この振動成分を示す。微分電気伝導度曲線から、Simmons の電流電圧式によるバックグラウンドを差し引いて求めた。振動成分は正バイアスでのみ観測される。すなわち、バイアス電圧を正方向に増やしていくと、単結晶 Fe 電極内の量子井戸の電子準位に応じて、トンネル効果が変化することを示している。この振動成分による変調を利用した新しい素子が期待される。

【図】

図1 Fe (9 ML)/ Al-O (1.7 nm)/ FeCo (20 nm)の微分電気伝導度と振動成分



出典 : 「Quantum-well effect in magnetic tunnel junctions with ultrathin single-crystal Fe(100) electrodes」, 「Applied Physics Letters Vol.79 No.26」, 2001年12月24日、T NAGAHAMA、S YUASA、Y SUZUKI、E TAMURA 著、American Institute of Physics 発行、4382頁 Fig.1 Differential conductivity and oscillation component for Fe (9 ML)/ Al-O (1.7 nm)/ FeCo (20 nm). The oscillation component is extracted by subtracting the background from the conductivity. In the region indicated by the arrow, the influence of inelastic tunneling due to magnon and phonon is dominant.

【出典 / 参考資料】

「Quantum-well effect in magnetic tunnel junctions with ultrathin single-crystal Fe(100) electrodes」, 「Applied Physics Letters Vol.79 No.26」, 2001年12月24日、T NAGAHAMA、S YUASA、Y SUZUKI、E TAMURA 著、American Institute of Physics 発行、4381 - 4383 頁

【技術分類】 4 - 2 TMR 素子の展開および将来技術 / スピンメモリ

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; H01L29/66@T

【技術名称】 4 - 2 - 3 スピン依存単電子トンネル・トランジスタ

【技術内容】

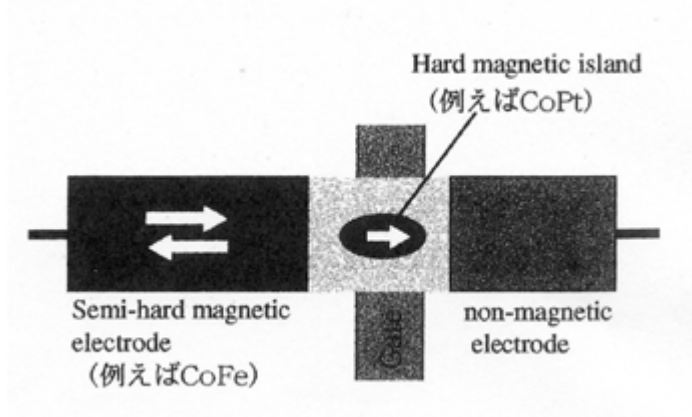
強磁性トンネル接合 (MTJ) では、トンネルコンダクタンスのスピンの依存に基づいたトンネル磁気抵抗 (TMR) が現れる。一方、微小なトンネル接合において、電荷が素電荷に量子化されて、電子 1 個 1 個のトンネリングが系全体の伝導に大きく影響する伝導現象を、単電子トンネル伝導 (SET) という。スピン依存 SET トランジスタは、この 2 つの現象を組み合わせた素子である。TMR デバイスとしての働きに、トランジスタの働きが加わった多機能デバイスである。

図 1 は、スピン依存 SET トランジスタの図解である。チャンネル部には、ある程度保磁力の高い CoPt などの磁性微粒子を用い、その磁化の向きは不変とする。ソース、ドレイン電極のいずれかを磁性体とし、磁性粒子との間には磁化反転によって TMR が現れる。電極のもう一方は非磁性体とし、磁性粒子との間に TMR が生じないようにする。2 つのトンネル接合では、コンダクタンスの磁場依存性が異なり、その違いが電流のバイアス電圧依存性の違いとなって現れ、TMR が増大する。

スピン依存 SET トランジスタの応用としては、MRAM の構成素子としての可能性が考えられる。

【図】

図 1 スピン依存単電子トンネル・トランジスタ



出典：「スピン依存単電子トンネル現象とその応用 (スピンエレクトロニクスの現状と将来展望)」、  
「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.121」, 2001 年 10 月 23 日、薬師寺啓、三谷誠司、高梨弘毅著、  
社団法人日本応用磁気学会発行、38 頁 Fig.8 A schematic illustration of a ferromagnetic SET transistor.

【出典 / 参考資料】

「スピン依存単電子トンネル現象とその応用(スピンエレクトロニクスの現状と将来展望)」、  
「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.121」, 2001 年 10 月 23 日、薬師寺啓、三谷誠司、高梨弘毅著、社団法人日本応用磁気学会発行、33 - 39 頁

【技術分類】 4 - 2 TMR 素子の展開および将来技術 / スピンメモリ

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; H01L29/66@T

【技術名称】 4 - 2 - 4 ソースとドレインにショットキー接合を用いたスピン MOSFET

【技術内容】

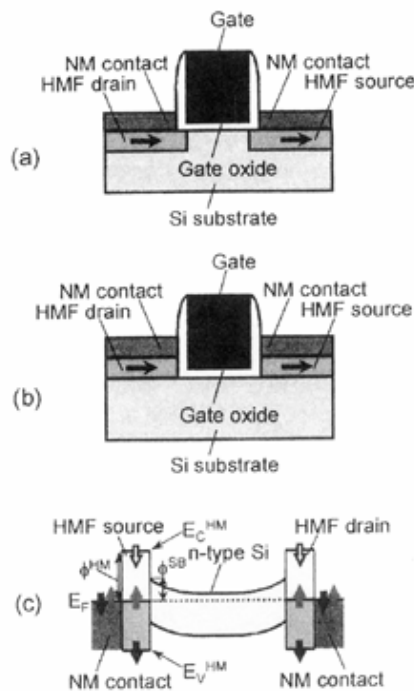
MOSFET では、ソースとドレインは、チャンネルとのコンタクトだけでなく、オフ電流や基板電流に対するブロッキングコンタクトの役割をする必要がある。ここでは、ソースとドレインに、強磁性体 / 半導体接合によるショットキー接合を用いる。強磁性体としては、通常の強磁性体金属でもハーフメタル強磁性体 (HMF) でも良いが、HMF の方が磁気電流比を大きく取れる。

図 1 は、HMF ショットキー接合を用い、キャリアを電子とする、蓄積チャンネル型スピン MOSFET の構造を示す。ゲート電極、ゲート絶縁膜、半導体基板からなる MOS 構造と、HMF からなるソースとドレインから構成される。(a) はプレーナ構造で、Si 層へ磁性元素をドーピングすることによって、HMF 層を形成する。(b) は、HMF 膜を、Si 層上に成長または堆積して形成する場合である。いずれも HMF の上部には非磁性 (NM) コンタクトを形成する。

図 1(c) は、スピン MOSFET のチャンネル領域近傍におけるバンド構造を示す。HMF のバンド構造は、一方のスピンの対しては金属的になるが、他方のスピンに対しては絶縁体 (半導体) 的になる。そのため、片方のスピンのみを通過させるスピントラフィルタ効果を有する MOSFET が可能になる。

【図】

図 1 HMF ショットキー接合を用いたスピン MOSFET の素子構造(a)および(b)とバンド構造(c)



出典:「スピン MOSFET とその応用(スピンエレクトロニクスの現状と将来)」、日本応用磁気学会研究会資料 Vol.134、2004年1月29日、菅原聡、田中雅明著、社団法人日本応用磁気学会発行、94頁 Fig.1 (a) and (b) Possible device structures and (c) band diagram of the spin MOSFET.

【出典 / 参考資料】

「スピン MOSFET とその応用(スピンエレクトロニクスの現状と将来)」、日本応用磁気学会研究会資料 Vol.134、2004年1月29日、菅原聡、田中雅明著、社団法人日本応用磁気学会発行、93 - 100頁

【技術分類】 4 - 2 TMR 素子の展開および将来技術 / スピンメモリ

【 F I 】 H01L27/10,447; G11C11/15,110; H01L43/08@Z; H01L29/66@T

【技術名称】 4 - 2 - 5 スピン MOSFET を用いた不揮発性メモリセル

【技術内容】

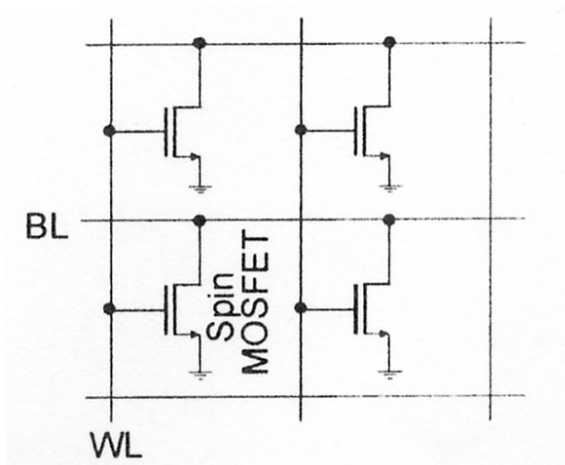
スピン MOSFET は、それだけで、1 ビットの不揮発性メモリセルになる。強磁性体からなるソースとドレインの相対的な磁化状態を、平行磁化または反平行磁化にすることによって、2 値の情報を記録できる。また、これらの磁化状態に対応した出力（ドレイン電流）から、磁化状態を検出して、読出動作を行う。

図 1 に、スピン MOSFET を用いた不揮発性メモリセルの構造を示す。ゲートをワード線（WL）に接続し、ソースを接地し、ゲートをビット線（BL）に接続する。1 個のメモリセル当たりの素子数がスピン MOSFET 1 個であるだけでなく、配線も非常に簡単になる。

情報の書き換えは、選択したメモリセル上で交差するビット線とワード線に電流を流す。両者の合成磁界によって、選択されたメモリセルのフリー層を反転させる。その際、非選択セルが磁化反転しないように、電流値を設定しておく。情報の読出には、選択セルに接続されたワード線とビット線にバイアスを加え、スピン MOSFET のドレイン出力電流を検出する。スピン MOSFET では、磁気電流比を非常に大きく取れるため、読出エラーが少なく、高速読出が可能である。

【図】

図 1 単一のスピン MOSFET を用いた不揮発性メモリセル



出典：「スピン MOSFET とその応用（スピンエレクトロニクスの現状と将来）」、「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.134」、2004 年 1 月 29 日、菅原聡、田中雅明著、社団法人日本応用磁気学会発行、98 頁 Fig.9 Nonvolatile memory cell using a single spin MOSFET.

【出典 / 参考資料】

「スピン MOSFET とその応用（スピンエレクトロニクスの現状と将来）」、「日本応用磁気学会研究会資料 Vol.134」、2004 年 1 月 29 日、菅原聡、田中雅明著、社団法人日本応用磁気学会発行、93 - 100 頁