Preparation of Magnetic Tunnel Transistors with Double Tunnel Junctions

H. Nakanishi, H. Omae, Y. Fujiwara, M. Jimbo*, T. Kobayashi, S. Shiomi

Department of Physics Engineering, Mie Univ., Kurima-machiya-machi 1577, Tsu 514-8507, Japan

* Daido Institute of Technology, Takiharu 10-3, Minami-ku, Nagoya 457-8530, Japan

Magnetic tunnel transistors (MTTs) with double tunnel junctions were prepared in order to investigate the emitter voltage dependence of a magneto-current (MC). A three-terminal structure was fabricated, using metal shadow masks. It was observed that hot electrons contributed to a collector current. A transfer ratio of over 10^{-3} was obtained in an MTT with double tunnel junctions. The MC decreased gradually with increasing emitter voltage. The emitter voltage at which the MC decreased to half its original value was over 1.5 V.

Key words: magnetic tunnel transistor, hot electron, tunnel junction, spin valve, transfer ratio

ダブルトンネルジャンクションを用いたマグネティックトンネルトランジスタ

中西晴久・大前春喜・藤原裕司・神保睦子*・小林正・塩見繁

三重大学物理工学科, 三重県津市栗真町屋町 1577 (〒514-8507)

*大同工業大学, 名古屋市南区滝春町 10-5 (〒457-8530)

1. はじめに

スピンバルブトランジスタ(SVT)^{1,2}やマグネティックトンネルトランジスタ(MTT)³⁻⁶は半導体と磁性体を組み合わせた 3 端子素子である。両者ともに、エミッタ電極からホットエレクトロンをベース層に注入する構造になっている。注入された電子のうち、ベース層内で散乱されず、コレクタ側のショットキー障壁を越えることが出来た電子のみをコレクタ電流として観測し、このコレクタ電流は 300%以上の大きな磁気電流効果(MC)を示す。しかし、ホットエレクトロンのみを観測するという原理上、電流透過率(コレクタ電流のエミッタ電流に対する比率)は非常に小さく、 10^{-5} 程度となっている。電流透過率を増加させる 1 つの方法として、コレクタ側のバリアをトンネルバリアとする方法が考えられる。

そこで、本研究ではエミッタバリア、コレクタバリア共に AlO_x を用いたダブルトンネルジャンクション MTT を作製し、電流透過率および MC のエミッタバイアス依存性を検討したので報告する。また、本実験で作製した素子のコレクタバリアの高さが約 2eV と高いために、ベースに注入された電子の内、ベース層で散乱されずにコレクタにトンネルした電子をホットエレクトロンと定義した。

2. 試料作製方法

試料は dc および rf マグネトロンスパッタ法を用い、熱酸化膜付 Si 基板上に作製した。到達真空度は 5×10^{-6} Pa 以下である。 AlO_x 酸化膜は、6.5 Pa の純酸素中で dc 逆スパッタにより作製した。酸化電力はエミッタ、コレクタバリアともに約 24 W であり、酸化時間はそれぞれ 75 秒と 50 秒である。

試料の膜構成および測定回路図を Fig. 1(a)(b)に示す。本実験では Fig. 2 に示す 3 つの異なる金属マスクを用いて、3 端子構造を実現した。この時の、エミッターベースおよびベース-コレクタ接合の面積はそれぞれ、 0.4×0.1 ,

$0.3 \times 0.2 \text{ mm}^2$ となる。エミッタ、ベース、コレクタ電極は Fig. 1 (a)のように構成されており、それぞれ AlO_x 膜により絶縁されている。エミッタ側の Co は保磁力を増大させるため、成膜後、純酸素中で数秒酸化した。

本実験での測定はすべて 77K で行った。

Fig. 1 Illustrations of (a) sample structures and (b) experimental setup.

Fig. 2 Arrangement of the metal masks.

3. 実験結果および考察

Fig. 1(a)の素子に対して、エミッター-ベース、ベース-コレクタ間の電流-電圧特性を測定した。結果を Fig. 3 に示す。Fig. 4 (a)(b)には、それぞれの接合のトンネル磁気抵抗効果 (TMR) の測定結

果を示す。

Fig. 3 より、どちらの接合でも非線形な電流-電圧特性が得られており、トンネル障壁が形成されていることがわかる。Simmons の式⁸⁾より見積もられるバリア高さと幅はエミッタ側が約 3eV, 1.4nm, コレクタ側が約 2.3eV, 1.6nm であった。Fig.4 (a),(b)はバイアス電圧 10mV を印加した測定結果であり、縦軸を電流値としている。ベース-コレクタでは保磁力差型の TMR ループが確認できるが、ベース-エミッタではマイナーループとなっている。これはエミッタ側の Co 成膜後に純酸素中で酸化しているため、Co-CoO の反強磁性結合が生じているためである。

Fig. 3 Current-voltage characteristics for each junction.

Fig. 4 TMR loops for (a)base-collector and (b) emitter-base junctions.

次に、今回作製した MTT において、Rodary らが行った実験⁹⁾と同様の方法でホットエレクトロンの確認を行った。具体的な実験方法は以下の通りである。

Fig. 5 Schematic illustrations of the tunneling process.

- (1) Fig. 1(b)の回路において $V_{EB}=0V$ として、 V_{BC} を変化させて、コレクタ電流を測定する。これを I_{C0} とする。

I_{C0} の測定は Fig. 5(a)のように、 $V_{EB}=0V$ のときに V_{BC} を変化させる場合に相当する。電圧はコレクタバリアに印加されることになるため、コレクタバリアの電流-電圧特性（図中ではトンネルする電子が e_{bc} で表されている）のみが現れる。

- (2) Fig. 1(b)の回路において $V_{EB}=0.5V$ および $1V$ として、 V_{BC} を変化させて、同様にコレクタ電流を測定する。これを I_{C1} , I_{C2} とする。本実験の素子のベース層の抵抗は $1k\Omega$ 以下であるが（エミッタ、コレクタ側の接合抵抗はそれぞれ約 $100k\Omega$, $200k\Omega$ ）ベース層での電圧降下を少なくするため $-0.5V < V_{BC} < 0.5V$ とした。このとき、ベースに流れる電流は $40\mu A$ 以下であった。

$V_{EB}=0.5V$ もしくは $1V$ の電圧を印加することは、Fig. 5(b)のように、エミッタ電極からベース層にホットエレクトロンを注入することに対応している。注入された電子はベース層で散乱され、ベース電極へ流れるが、一部は、コレクタバリアをトンネルして、コレクタ電流となる。そのため、Fig. 5(c)のように V_{BC} を変化させた場合、コレクタでは、ベース-コレクタ間の電流-電圧特性に加えて、エミッタからコレクタへ向かう電子の分だけ電流が増加することになる。

- (3) I_{C1} ・ I_{C0} および I_{C2} ・ I_{C0} を求める。

この差分の電流にホットエレクトロンが含まれていると考えられる。

これらの実験結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。

Fig. 6 では I_{C0} , I_{C1} , I_{C2} すべて非線形な電流-電圧特性を示していることがわかる。 I_{C0} において、 $V_{BC}=0.5V$ の時の電流値は約 $2.4\mu A$ であり、Fig. 3 で示されているベース-コレクタ間の電流-電圧特性から得られる値とほぼ同じ値になっている。また、 I_{C0} と I_{C2} を比べると、 I_{C2} がどの電圧でも大きくなっており、 V_{EB} により、エミッタ電極からベース層へ注入された電子が、コレクタ電極へ到達していることがわかる。Fig. 7 には I_{C1} ・ I_{C0} および I_{C2} ・ I_{C0} を示す。どちらも、電流の差が一定にはならず、 V_{BC} の増加とともに非線形に増加している。

Fig. 6 Current-voltage characteristics of a collector barrier for emitter-base voltages.

Fig. 7 Hot electron contribution to the collector current.

ここで、Fig. 7 に現れた I_{C1} ・ I_{C0} および I_{C2} ・ I_{C0} の V_{BC} 依存性を考察するため、エミッタ電極からコレクタ電極へ向かう電子を 2 種類のエネルギーにわけて考える。1 つはベース層でほとんどエネルギーを失って、ベース層のフェルミ準位からコレクタ電極へトンネルする電子。もう 1 つは、ベース層で散乱されず、高いエネルギーを持ったままコレクタ電極へトンネルする電子である。これらは Fig. 5(b)(c)において e_H , e_L として表されている。

$V_{BC}=0V$ の状態 Fig. 5(b)では、ベース層で散乱されてほとんどエネルギーを失った後、コレクタ電極へトンネルする電子 e_L と、ベース層で散乱されず、高いエネルギーを持ったままコレクタ電極へ到達する電子 e_H が存在する。この状態で、ある一定の正のバイアスを V_{BC} を印加すると、Fig. 5 (c) で示されるように、コレクタバリアの形状が変化するため、 e_H が増加し、その結果、コレクタ電流が増加

すると考えることができる。(図中ではバイアス電圧 V_{BC} によって流れる電子 e_{be} は省略されている。) V_{BC} を大きくしていけば、 e_H はさらに増加すると考えられ、その増加はエミッタ電極から注入される電子のエネルギー分布に対応すると考えることができる。したがって、Fig. 7 に現れている I_{C1} ・ I_{C0} および I_{C2} ・ I_{C0} の非線形な増加は、コレクタ電流にホットエレクトロンが含まれていることを示していると考えられる。

コレクタ電流の MC ループを Fig. 8 に示す。この時 $V_{EB}=0.1[V]$, $V_{BC}=0V$ である、図中にエミッタ、ベース、コレクタ各電極の磁化状態を示している。エミッタ電極の Co の保磁力が大きいために、今回の実験の範囲内では磁化が反転せず、4 つの磁化状態を取っていることがわかる。MC の見積り値は 300 Oe の磁界印加時の電流値 I_{CP} と $+70\text{ Oe}$ の磁界印加時の電流値 I_{CAP} を用いて、

$$MC = (I_{CP} - I_{CAP}) / I_{CAP} \times 100 [\%]$$

として見積もることとした。見積もられた MC は約 18%であった。コレクタバリアとしてショットキー障壁を用いた MTT では 200%以上の MC が得られるが、今回の MTT では 1 桁小さい値となった。

Fig. 8 Typical magneto-current loop of an MTT with double tunnel junctions.

電流透過率 (コレクタ電流のエミッタ電流に対する比: I_C/I_E) および MC のエミッタ電圧 (V_{EB}) 依存性を Fig. 9, 10 に示す。Fig. 9 の実線は 300 Oe の磁界を印加して測定したもの、破線は $+70\text{ Oe}$ の磁界のときのものである。この時、 $V_{BC}=0V$ である。電流透過率は $V_{EB}=0.1V$ 以上でほとんど一定の値 (1.2×10^{-3}) となっていることがわかる。

Fig. 9 Emitter-base voltage dependence of transfer ratios.

Fig. 10 の MC は Fig. 9 より見積もったものである。参考のため、同じ試料を室温で測定したものも同時に示しておく。MC は最大約 20% 程度であり、エミッタ電圧の増加とともに減している。 $V_{EB}=1.5V$ のときに MC は 15% 以上の値を示しており、通常の TMR 素子よりも、バイアス電圧依存性が小さいことがわかる。そこで、MC の値が半分になる電圧 $V_{1/2}$ を見積もってみると、77K で 1.5V 以上、室温でも 1.0V 以上になる。

Fig. 10 Emitter-base voltage dependence magnetor- current.

この MTT のエミッタ電圧依存性を考察するために、Fig. 11 の試料を用いて、エミッタ、コレクタそれぞれから電子を注入した場合の MC の電圧依存性を測定した。測定回路と測定結果を Fig. 12 に示す。実線はエミッタ（非磁性電極）から電子を注入した時のコレクタ電流の MC であり、横軸は E-B 間電圧に対応する。また、破線はコレクタ（磁性電極）から電子を注入した時のエミッタ電流の MC であり、横軸は C-B 間電圧に対応する。破線の電圧依存性は通常の TMR のバイアス依存性と同様の傾向を示しており、MC の値が半分になる電圧は 0.5V 以下となっている。一方、エミッタ（非磁性）側から注入した場合、MC の値が半分になる電圧は Fig. 10 のように比較的大きな値を示している。

エミッタ（非磁性）側からホットエレクトロンを注入した場合、MC はベース層でのバルク散乱と、ベースからコレクタへの TMR 効果の大きさに依存すると考えることができる。コレクタから注入した場合もベース層内でのバルク散乱の効果は同じであると考えられるので、Fig. 10 のエミッタ電圧が高い所での比較的大きな MC はホットエレクトロンによる TMR 効果によって生じていると考えることができる。

Fig. 11 Sample structure of another type of MTT.

Fig. 12 Emitter, collector voltage dependence of the magnetor- current for the collector and emitter injections.

4. まとめ

エミッタバリア、コレクタバリア共に AlO_x トンネルバリアを用いた MTT を作製し、その電流透過率、MC のエミッタ電圧 (V_{EB}) 依存性を検討した。

V_{EB} を一定として、ベース-コレクタ間の電流-電圧特性を測定した結果、ホットエレクトロンがコレクタ電流に含まれている可能性があることがわかった。

電流透過率のエミッタ電圧依存性では、電圧を印加するとすぐに透過率は減少するが、0.1V 以上ではほとんど変化しないことが分かった。この時の値は 1.2×10^{-3} であり、従来の MTT に比べて 1 桁大きな値となった。

MC のエミッタ電圧依存性は通常の TMR 素子のバイアス依存性よりも小さく、MC の値が半分となるエミッタ電圧は 1.5 V 以上になる。この高い電圧範囲での MC は、主に、ベースからコレクタへトンネルするホットエレクトロンによる TMR の寄与であると考えられる。

References

- 1) D. J. Monsma, J. C. Lodder, J. A. Popma and B. Dieny, Phys. Rev. Lett. **74**, 5260 (1995).
- 2) P. S. A. Kumar, R. Jansen, O. M. J. van't Erve, R. Vlutters, P. de Haan and J. C. Lodder, J. Magn. Magn. Mater. **214**, L1 (2000).
- 3) K. Mizushima, T. Kinno, T. Yamauchi and K. Tanaka, IEEE Trans. Magn. **33**, 3500 (1997).
- 4) S. Dijken, X. Jiang and S. S. P. Parkin, Appl. Phys. Lett. **80**, 3364 (2002).
- 5) T. Hirose, Y. Fujiwara, M. Jimbo, T. Kobayashi, S. Shiomi and M. Masuda, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 2479 (2004).
- 6) T. Hirose, Y. Fujiwara, M. Jimbo, T. Kobayashi and S. Shiomi, J. Magn. Magn. Mater. **286**, 124 (2005).
- 7) W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev. **102**, 1413 (1956).
- 8) J. G. Simmons, J. Appl. **34**, 1793 (1963).
- 9) G. Rodary, M. Hehn, T. Dimopoulos, D. Lacour, J. Bangert, H. Jaffrés, F. Montaigne, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, A. Schuhl and J. Wecker, J. Magn. Magn. Mater. **290-291**, 1097 (2005).

2005年10月19日受理, 2005年12月5日再受理, 2006年1月16日採録