

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2008～2008

課題番号：20042012

研究課題名（和文） MgO - 強磁性トンネルトランジスタの開発

研究課題名（英文） Fabrication of MgO magnetic tunnel transistor

研究代表者

長浜 太郎 (NAGAHAMA TARO)

独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：20357651

研究成果の概要：優れたコヒーレントトンネリング特性を示す MgO バリアをエミッタに用いた MgO-強磁性トンネルトランジスタ (MgO-MTT) を作製し、その伝導特性を調べた。ベース層の薄膜化、コレクタ材料の最適化により伝導特性は大きく向上することが分かった。また、その特性は界面共鳴状態の影響を受けており、界面の電子状態を調べる新しいツールとしても活用可能であることが分かった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	0	2,000,000
年度			
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	0	2,000,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：スピントロニクス TMR MgO ホットエレクトロン

1. 研究開始当初の背景

スピン流を活用したデバイスであるスピントロニクス素子はポストシリコンの第一候補として精力的に研究が進められている。その中でも強磁性トンネルトランジスタ (MTT) は新規スピントロニクスデバイスとして注目を集めている。その構造は半導体基板上に強磁性トンネル接合を成長したものであり、バイアス電圧下ではトンネル電流がホットエレクトロンとしてコレクタに注入される。その結果、閾値電圧以上で非線形な特性を持つコレクタ電流が流れ、また大きな磁気電流効果 (MC 効果) を示す。MTT の研究は各国で行われており、興味深い伝導現象の解明が進んでいる。また、電流値は小さいながらも、

Si へのスピン注入が電氣的に観測されるなどの、これまでにない特徴的な現象も報告されている。しかし、電流の注入効率 (コレクタ電流/エミッタ電流) が非常に小さいという点が大きな問題であった。

2. 研究の目的

本提案では出力電流の増大を実現するために、単結晶 MgO バリアを用いた MTT を作製し、Hot-electron の注入効率を飛躍的に改善することを目的とする。これまでの研究ではバリアにアモルファス AlOx を用いており、トンネルプロセスは非コヒーレントであった。MgO バリアを用いることで、エミッタ電流はコヒーレントトンネリングした 1

電子(s 電子)が支配的となる。そのため以下のようなメカニズムによる伝導特性の改善が期待される。単結晶膜を利用することにより、不純物散乱、粒界での散乱、界面ラフネスによる散乱が抑制される。前方収束効果による $k_{\parallel} = 0$ 電子の増大により、ベース/コレクタ界面での反射が抑制される。s 電子が主になることにより、電子電子散乱などによる散乱が抑制される。以上のような理由による注入効率の増大を実現する。具体的には、ベース層のさらなる薄膜化、ショットキー障壁高さを制御することによる注入効率の改善、およびベース/コレクタ界面への界面挿入層の活用などを行って、伝導特性の制御を行う。

3. 研究の方法

製膜は、GaAs(100)基板上に半導体 MBE チャンバーを用いて GaAs(001)をホモエピタキシャル成長した後、金属 MBE チャンバー内で Fe(001)/MgO/Fe(001)MTJ を製膜する。この二つのチャンバーはトランスファーチューブで結ばれており、移送の際にも超高真空中に保持される。MTJ 上部に酸化保護層を蒸着後、大気中に取り出し、フォトリソグラフィ、Ar イオンエッチングを用いて縦型三端子素子に加工し、磁気伝導特性を評価する。作製した素子の評価は半導体パラメータ及びプローバを用いて詳細に行った。このプローバは、電磁石が付属しており、また低温に冷やすことができる(試料ステージ位置で 20K、試料温度は 40K 程度)。これらを用いて、伝導特性、磁気伝導特性、その温度特性の評価を行った。また、本研究では三端子デバイスとしての応用も視野に入れて、ベース/コレクタ間にも電圧を印加した場合の電気特性、磁気伝導特性の測定も行った。

(1)ベース層の薄膜化

ベース層内での散乱を減らしてコレクタ電流を増大させるには、ベース層厚を薄くすれば良い。一方で、ベース層を薄くすると縦型三端子素子加工は困難さを増す。本研究では 3nm のベース層を持つ MTT を作製し、注入効率を MC 比を測定した。また、その膜厚依存性から Hot-electron のベース層中への侵入長を見積もった。

(2)ベース・コレクタ間のショットキー障壁高さの制御

MTT ではベースコレクタ間のショットキー障壁高さは、伝導特性を決める重要なパラメータである。これまで金属ベース材料を変えてその変化を見た報告例はあるが、半導体コレクタ側を積極的に制御した報告はない。そこで本研究では GaAs コレクタを InGaAs、AlGaAs としてショットキー障壁高さを変え、その際の伝導特性の変化を調べた。

(3)GaAs/Fe 界面の制御

一般に GaAs/Fe 界面では As が Fe 層中に拡散、あるいは Fe 表面に偏析とするとされている。そのような As は Hot-electron の大きな散乱源となるため、できるかぎり抑制しなければならない。そのため、GaAs 表面を As が豊富な As 面ではなく Ga 面とするために、GaAs 再成長後に 530 度でアニールを行った。また、Fe ベース層以降の製膜は基板加熱せずに室温で行った。さらに Fe 層や MgO 層成長後の熱処理も行わなかった。次に、さらに積極的に拡散を抑えるために GaAs/Fe 界面にストップ層として超薄 Al 層あるいは超薄 GaOx 層を挿入することを試みた。GaOx 蒸着は単結晶蒸着源を用いて電子銃過熱で行った。製膜時は RHEED で成長の様子を観察しながら行った。

4. 研究成果

図 1 に典型的な MTT のエミッタ電流 (I_e) とコレクタ電流 (I_c) をしめす。横軸はエミッタバイアス電圧 (V_e) である。回路はベース接地回路で、コレクタバイアス電圧 (V_c) は 0V である。 I_e に関しては通常のトンネル接合同様の構造であるので、いわゆるトンネル接合のトンネル電流となっている。一方、 I_c に関しては、 V_c はゼロなので、基本的には電流は流れないが、 V_e がショットキー障壁高さを越えると、Hot electron が流れるようになる。すなわち I_c の立ち上がる V_e となる。図 1 では約 0.7V 程度であり、GaAs/Fe のショットキー高さの文献値と一致する。

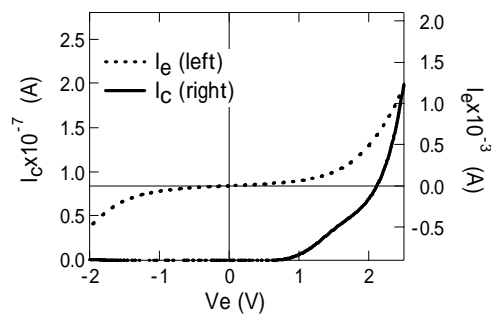


図 1 MTT のエミッタ電流 I_e とコレクタ電流 I_c のエミッタでバイアス電圧依存性

さらに Fe(001)ベース層の膜厚を変えたところ、ベース層を薄くするほど注入効率の大幅な向上が観測された。これは明らかにベース層内の散乱が減少したことに起因するものである。また、MC 比に関しては若干の減少は見られるものの、薄くしても 200%以上の値を維持することも分かった。これは少数スピンの侵入長が 3 nm よりも十分に短いことによると考えられる。各特性の膜厚依存性を

まとめたものを表 1 に示す。

	Fe(20nm)	Fe(10nm)	Fe(5nm)	Fe(3nm)
MR ratio (I_e)	80%	57%	35%	41%
MC ratio (I_e)	250%	288%	220%	210%
efficiency (10^{-6})	45	210	1400	2400

表 1 伝導特性のベース膜厚依存性

さらに注入効率の膜厚依存性から Hot electron のベース層中の侵入長を見積もり、その Ve 依存性を調べた。具体的には I_c はベース層厚に指数関数的に依存すると仮定して、減衰長を見積もった。その結果、MgO - MTT では AlO の減衰長よりも大きな値を持ち、また低 Ve で大きく増大することが分かった。この Ve 依存性はモデル計算によりよく再現される。そのため、MgO ではコヒーレントトンネリングが実現しており、シンプルなたンネルプロセスであることが示唆された。

次にコレクタ材料を変えてショットキーバリア高さを制御した結果について述べる。文献では InGaAs では GaAs よりも I_c が小さくなり、AlGaAs では逆に I_c が大きくなる。実際に I_c の立ち上がりから I_e を見積ると、InGaAs では 0.5V、GaAs は 0.7V、AlGaAs では 1.0V となり、ほぼ文献値と一致した。図 2 に各コレクタ材料での注入効率の Ve 依存性を示す。

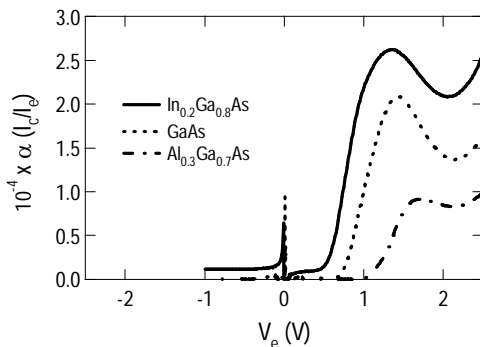


図 2 各コレクタ材料での注入効率

が小さいほど注入効率が高いことが分かった。これはバリアが低いほど、より低エネルギーの電子がコレクタ電流に寄与できるためだと考えられる。また、MC 比は逆の傾向を示し、バリア高さが低いほど MC 比も低くなることが分かった。これは非弾性散乱による MC 比の低下なども影響していると思われるが、詳細なメカニズムは現時点では分かつ

ていない。さらに図 2 を見ると注入効率の Ve 依存性に明瞭なピーク構造が見られる。また、このピーク位置は I_c に依存し、大きな I_c のコレクタ材料ほどピーク位置は高バイアスに移動することがわかった。このピーク構造の起源にはいくつか考えられる。一つはコレクタ材料の電子状態を反映したピーク構造である。しかし、各材料のバンド構造からはこのピーク位置は説明できない。次に考えられるのは Fe ベース層内に形成された量子井戸準位によるという考え方である。しかし、かなり Fe ベース層が厚い MTT でも観察されることや、 I_c 依存性が説明できないことから、量子井戸準位ではないことが分かる。最後に考えられるのは GaAs/Fe 界面の界面共鳴準位である。これについては、名古屋大学の本多らによって計算され、そのエネルギー準位が本実験で観測された位置と一致した。また、 I_c に対する依存性も理論計算と実験結果は良い一致を示した。よって、このピーク構造は界面共鳴準位によるものと考えられる。このような界面準位が確認されたのは本研究が初めてであり、MgO - MTT が界面電子状態を調べる新しいツールとして利用できることを示している。

次に GaAs/Fe 界面の改善の試みについて述べる。まず GaAs 表面の Ga-rich 面と As-rich 面での違いであるが、大きな特性の改善は見られなかった。これは、Ga-rich 面とはいえ、ある程度の As 原子が表面に残っているためではないかと考えられる。また、GaAs/Fe 界面挿入層については、Al と GaO を試みた。Al については GaAs 基板上に成長し、RHEED を観察した所、複雑なパターンを示し複雑な双晶構造を形成しているらしいことがわかった。さらにこの上に製膜を続けて素子を作製したが、機能する素子はできなかった。おそらく 3 次元的な成長をしてしまい、ピンホールが空いているのだと考えられる。また GaO はアモルファス成長し、素子がするとやはり機能しなかった。理由は不明だが、やはりピンホールによるものと考えられる。

最後に 3 端子動作の測定結果であるが、ベース接地、エミッタ接地両回路で、Heiblum らにより報告された全半導体で作製されたホットエレクトロントランジスタと同様の伝導特性を示すことが確認された。

以上のように、MgO バリアをエミッタに用いることにより、MC 比・注入効率共に既存の AlO よりも向上することが分かった。今後、各界面の改善や、MgO エミッタの品質向上などにより、優れたスピン注入素子の実現可能であると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 3件)

長浜太郎、齋藤秀和、湯浅新治 MgO-強磁性トンネルトランジスタ出力特性のショットキーバリア高さ依存性 第63回日本物理学会秋季大会 2008年9月22日 岩手大学(盛岡市)

長浜太郎、齋藤秀和、湯浅新治 MgO-強磁性トンネルトランジスタの伝導特性 第32回日本磁気学会学術講演会 2008年9月14日 東北学院大学(仙台市)

長浜太郎、齋藤秀和、湯浅新治 MgO-強磁性トンネルトランジスタの電流注入効率 第69回応用物理学会学術講演会 2008年9月5日 中部大学(春日井市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長浜 太郎 (NAGAHAMA TARO)

(独)産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：20357651

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし