

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月4日現在

機関番号：51601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22810021

研究課題名（和文） 新奇電子デバイス創成へ向けたインバース電流誘起磁化反転現象の応用に関する研究

研究課題名（英文） Application of the inverse current induced magnetization switching phenomena for novel electronics device

研究代表者

磯上 慎二（ISOGAMI SHINJI）

福島工業高等専門学校・一般教科・准教授

研究者番号：10586853

研究成果の概要（和文）：インバース電流誘起磁化反転現象は、働くスピントルクの方向が磁化固定層のスピ分極率の符号で決まるとする従来の理論では説明がつかない現象で、新たに磁化自由層も反映する可能性があることを示した。強磁性共鳴を用いたところ Fe_4N 薄膜の磁気緩和定数は 0.007 であることが判った。同手法にてスピポンピング効果を検討したところ、 Fe 薄膜の場合よりスピポンピング効果のエンハンスが確認された。これは Fe_4N 薄膜が有するマイノリティースピン伝導を反映していると結論付けた。

研究成果の概要（英文）：Inverse current induced magnetization switching phenomena is not fully understood by conventional spin torque theory showing that the spin torque direction is determined by the spin polarization of the pinned layer. It might be due to the spin polarization of the free layer as well. Using ferro-magnetic resonance technique, the damping factor of Fe_4N thin film is found to be 0.007. Using the same technique, the spin pumping effect of Fe_4N system is enhanced comparing to that of Fe system. It is concluded that such the enhancement reflects the minority-spin conduction in Fe_4N film.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,210,000	363,000	1,573,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,310,000	693,000	3,003,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノデバイス

キーワード：窒化鉄，スピン，磁性，電流誘起磁化反転，磁気抵抗効果

1. 研究開始当初の背景

電流誘起磁化反転方式を採用した不揮発性磁気メモリデバイス（スピンランダムアクセスメモリ）が 2005 年の国際会議で初めて発表されてから、消費電力の低減を実現可能なデバイスとして注目され始め、研究開発が盛んになった。現在では既に試作までされて

いるが、実用的な範囲までの大容量化、また同時に次世代のデバイス開発に課題を残している。それらを解決するために、申請者らの研究グループでは、標準となっていた磁性材料を、スピ分極率の符号が負という極めて興味深い材料特性を有する Fe_4N に置き換えることに取り組んできた。 Fe_4N は理論計算によると、フェルミ面におけるスピ分極

率の符号が負という特徴的なバンド構造を有し、またマイノリティスピンが電気伝導を担う事から、新奇デバイス創成に直接貢献できる物質である。申請者は MgO トンネル磁気抵抗素子への導入を試みた。これまでに確認された新奇なデバイス特性には、①インバース磁気抵抗効果、②インバース電流誘起磁化反転がある。インバース磁気抵抗効果はトンネル障壁層を挟んだ両側の強磁性電極の磁化配列が平行（反平行）のときに電気抵抗が大きく（小さく）なる現象である。これは従来の電気特性と反対である。その上、MgO トンネル障壁のコヒーレントトンネル過程を活かし、抵抗変化率をエンハンスした。インバース電流誘起磁化反転は、電流を流す向きが磁化固定（自由）層から自由（固定）層であるときに、好まれる磁化配列が反平行（平行）配列となる。これは従来の配列とは反対である。

以上のデバイス特性は今後の新しい電子デバイスの創成を可能とするものである。しかしながら、検証実験で明らかとなった既述の現象論的なデバイス特性の原理解明と応用提案は未だ解決されていないのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 磁気抵抗素子の反転電流密度は、飽和磁化、スピン注入効率（スピン分極率）、体積、異方性磁界、ダンピング定数などで決まる。従来はこれら多数のパラメータの制御で反転電流密度の低減化を図ってきた。しかし試行錯誤の末に積層構造の複雑化を伴い、結局、効率的な低減化には至っていないのが現状である。これを解決するためには、Fe₄N を有するトンネル磁気抵抗素子のインバース電流誘起磁化反転原理を如何に活用するかが重要である。またその場合、他の積層部分との整合性を再検討する必要も出てくる可能性がある。以上を鑑みて本申請では、可能な限り単純な積層構造を維持しながらの効率的な反転電流密度の低減を目標に掲げる。

(2) 次に、MgO トンネル磁気抵抗素子は地磁気センサー、ノーマル電流誘起磁化反転はスピントルクダイオードなど、磁気メモリの範疇を超えたデバイスへ盛んに応用されている。この研究動向を鑑みると、インバース電流誘起磁化反転という新奇な物理現象もデバイス応用化が必須であると考えられる。Fe₄N の導入により、従来に対して別のスピン伝導(Minority-spin 伝導)を自在に操れるようになったことから、新奇デバイス創成に関して大いに期待が持てる。よって本申請 2

番目の目的として新奇デバイス創成のための技術課題の明確化を掲げる。そのために期間内にスピンドYNAMIXSに関する原理検証実験（強磁性共鳴実験とマイクロ波発振実験）を実施する。

3. 研究の方法

デュアルピン型 MgO 強磁性トンネル接合素子の作製へ向けて、保磁力差型スピントルク素子の開発とスピン輸送特性の確認を行う。成膜には DC および RF マグネトロンスパッタリング法を用いて、有機洗浄された熱酸化膜付 Si 単結晶基板上に室温下で成膜する。Fe₄N 薄膜の作製には、Ar と N₂ の混合ガスを用いた反応性スパッタリング法で成膜し、成膜後は 300°C で 20 分間の基板加熱を *in-situ* で行う。電子線リソグラフィと Ar イオンミリング、リフトオフ法によって連続膜を微細加工し、面内サイズ約 100×250 nm² の素子を作製する。スピン輸送特性は DC 四端子法にて、外部磁場を掃引しながら素子の電気抵抗を測定する。印加するバイアス電圧は 5 mV で統一する。

負のスピン分極率を有する材料のスピンダイナミクスに関する原理検証へ向けて、具体的に Fe₄N 薄膜の磁気緩和定数の定量化とそのメカニズムの解明をする。磁気緩和定数の測定には強磁性共鳴装置を用いる。積層膜は熱酸化膜付き Si 単結晶基板の上に成膜し、*as-depo*、連続膜試料を 3 mm 角にへき開して測定する。外部磁場は 16 kOe まで掃引する。導波管とマイクロ波キャビティから試料全体にマイクロ波を印加し、得られる反射電力を掃引磁場に対してプロットする。外部磁場に対して試料を回転させて測定を行う。磁気緩和定数の解析には数値フィッティングを用いて、薄膜の本質的な磁気緩和と薄膜のラフネスや磁氣的不均一性起因の外因的な磁気緩和を分離する。

試料は過年度まで申請者が所属していた東北大学工学研究科 電子工学専攻 高橋・角田・齊藤研究室（研究協力者：高橋 研教授、角田匡清 准教授）へ定期的に出向して作製する。評価は、大学に存在しない装置を申請者の研究室に立上げ、双方で平行して行う。原理検証実験の具体的アプローチと結果の分析は、佐久間昭正 教授（東北大学工学研究科 応用物理学専攻）、そしてマイクロ波発振実験で実績がある、遠藤 恭 准教授（東北大学工学研究科 電気・通信工学専攻）らと適宜技術相談をして軌道修正を行う。

4. 研究成果

(1) Fe₄N 薄膜を磁化固定層とした保磁力差型磁気抵抗素子の作製.

マイクロ波発振素子デバイスの発振には高い電流密度を必要としている。これを低減する為には、発振する磁性膜のスピンの与えるトルクを増大すればよい。この思想のもとに、本研究では Fe₄N を磁化固定層としたデュアルピン型 MTJ を提案した。RKKY 相互作用を発現する 3 層構造、CoFeB/Ru/CoFeB、を磁化固定層とする従来型に対して、1 層の Fe₄N とすることで作製プロセス負荷の軽減のみならず発振電流密度の低減も期待できる。

そこで本研究では Fe₄N を磁化固定層、CoFeB を磁化自由層とする MTJ の最適化と磁気抵抗特性の評価を行った。MnIr 反強磁性層との接合では Fe₄N の磁化を強く一方向に固着できないことが明らかとなった。保磁力差型 MTJ の作製を試みた。作製した検証 MTJ サンプルの膜構成は、熱酸化膜付き Si 基板/Cu 下部電極/Fe₄N (磁化固定層)/MgO 障壁層/CoFeB (磁化自由層)/上部電極である。連続膜に対して、電子線リソグラフィと Ar イオンミリングを用いて 100 × 200 nm² 程度のピラー状に微細加工を行った。図 2 には保磁力差型 MTJ の磁気抵抗曲線を示す。外部磁場の値が $H_{ext} = \pm 0.1$ kOe および ± 0.28 kOe における抵抗値の変化はそれぞれ、CoFeB 磁化自由層、Fe₄N 磁化固定層の磁化反転に対応している。また抵抗のジャンプが急峻であることから、一斉磁化反転が実現できていると推察される。これは CoFeB フリー層が単磁区化していることを示唆し、単一モードの発振を得るためには必須である。また、このときのインバース磁気抵抗変化率は、室温で 9.2%であった。

以上の検討より、マイクロ波発振デバイスの低電流密度動作に最適な膜構成として、Fe₄N を磁化固定層とする保磁力差型 MTJ が有用であることを明らかとした。

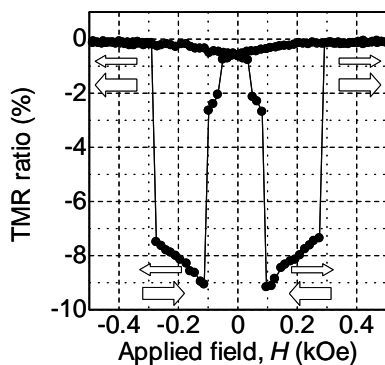


図1 保磁力差型MgO磁気抵抗素子の磁気抵抗曲線.

(2) Fe₄N 薄膜の磁気緩和定数の定量化と磁気緩和機構の解明.

磁気緩和定数 (α) は反転電流密度を決定づけるパラメータであり、実用上は小さいほど好ましい。現行のスピン트로ニクス材料 (Fe, Co, Ni, あるいはそれらの合金) の磁気緩和定数は盛んに研究され、データベース化されている。本研究では従来の測定方法と同一条件で、負のスピンの極率を有する Fe₄N 薄膜の値を求めたところ、 $\alpha = 0.007$ であることを初めて明らかとした。これは Ni-Fe 合金薄膜、あるいは巨大磁気抵抗効果を発現する CoFeB (高温熱処理後) と同等であることが判った。よってデバイス応用上は大きな問題にならないといえる。

スピンプンピングは磁気緩和の反作用として生成されたスピン流が、接合する非磁性薄膜へ流れ出る現象であることが理論予測されている。従って、磁気緩和機構はスピンプンピング現象を介して理解する事ができる。図 2 は Fe および Fe₄N に関して、磁気緩和定数の増大を比較した結果である。用いた積層膜構成は熱酸化膜付き Si 基板/MgO 下地層/Fe₄N or Fe/Pt or Cu キャップ層である。Fe に着目すると Pt 有りの場合は、無しの場合に比べて磁気緩和定数は矢印で示されるように増大している。また膜厚の低減に伴い、増大量がエンハンスしている事も見て取れる。一方で、Fe₄N の結果に着目すると、Pt 有りの場合は、無しの場合に比べて磁気緩和定数は同様に増大している。また膜厚の低減に伴い、増大量がエンハンスしている事も見て取れる。しかし特筆すべきは、Pt による増大効果が、Fe₄N の方で顕著な点である。これは Pt キャップ層へ流入してスピン緩和された Fe₄N 層からのマイノリティスピン量が、Fe 層からのそれより多いことを示唆している。以上の結果より、Fe₄N 薄膜の磁気緩和に寄与するのは主として、3d マイノリティスピンであると結論付けた。

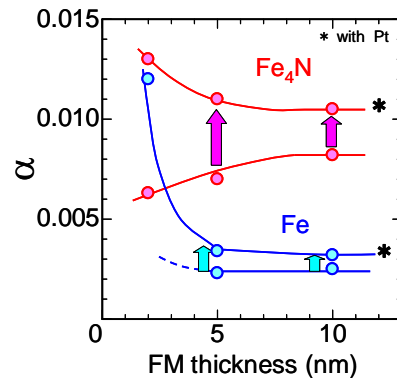


図2 Fe および Fe₄N 薄膜の磁気緩和定数 (α) の強磁性膜厚依存性.

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)

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) Shinji Isogami, Masakiyo Tsunoda, Yousuke Komasaki, Akimasa Sakuma, and Migaku Takahashi, “Inverse current induced magnetization switching in magnetic tunnel junction with Fe₄N free layer”, Applied Physics Express, 3, (2010), 103002, DOI:10.1143/APEX.3.103002

〔学会発表〕(計4件)

(1) 磯上慎二, 角田匡清, 大兼幹彦, 佐久間昭正, 高橋 研 「負のスピンの分極率を有する Fe₄N 薄膜の磁気緩和定数」, 東北大学電気通信研究所 第2回共同プロジェクト研究会 「負のスピンの分極材料を用いたスピントロニクスデバイスの研究」, 2012年2月21日, 仙台.

(2) 磯上慎二, 角田匡清, 大兼幹彦, 佐久間昭正, 高橋 研, 「負のスピンの分極率を有する Fe₄N 薄膜の磁気緩和定数」, 第35回日本磁気学会学術講演会, 2011年9月27日, 新潟.

(3) 磯上慎二, 角田匡清, 駒崎洋亮, 佐久間昭正, 高橋 研, 「 γ -Fe₄N 強磁性電極を有する強磁性トンネル接合のインバース電流誘起磁化反転」, 東北大学電気通信研究所 第1回共同プロジェクト研究会 「負のスピンの分極材料を用いたスピントロニクスデバイスの研究」, 2010年9月29日, 仙台.

(4) 磯上慎二, 角田匡清, 駒崎洋亮, 佐久間昭正, 高橋 研, 「Fe₄N/MgO/CoFeB-MTJ のインバース電流誘起磁化反転」, 第34回日本磁気学会学術講演会, 2010年9月4日, つくば.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯上 慎二 (ISOGAMI SHINJI)

福島工業高等専門学校・一般教科・准教授
研究者番号: 10586853

