

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19206002

研究課題名（和文） スピン系の示す増幅作用に関する研究

研究課題名（英文） A research on the amplification function in spin-systems

研究代表者

鈴木 義茂 (SUZUKI YOSHISHIGE)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：50344437

研究成果の概要（和文）：

1) スピントランスファーによる増幅作用の研究

トンネル磁気抵抗素子に見られる負性抵抗の物理的機構を明らかにした。実験と計算により低温での増幅作用は歳差運動の開き角が注入電流によって制御されることによって、高温における増幅作用の増大は磁化の揺らぎが注入電流によって制御されることによって生じることを明らかにした。

2) 電圧誘起磁気異方性変化による増幅作用の研究

Au/Fe 超薄膜/MgO/ポリイミド/ITO の各層からなる接合において Fe 層の膜厚を 3 原子層程度とすることにより磁化の方向が電圧によって大きく変化することを見出した。この結果より、電圧による磁化の制御により増幅作用を引き出せる可能性があることを見出した。

研究成果の概要（英文）：

1) Amplification effect based on the spin-transfer torque

Physical mechanism to have the negative resistance appeared in magnetic tunnel junctions were clarified. Experimental and theoretical investigations revealed that the control of the precession angle and the thermal fluctuation of magnetization by an injected current are responsible for the amplification function at low and high temperatures, respectively.

2) Amplification effect based on the voltage induced anisotropy change

A large change in magnetization direction caused by an application of a voltage was found in Au/Fe ultrathin film/MgO/Polyimide/ITO junctions employing about 3ML thick Fe layer. The result indicates that an amplification function can be obtained from a control of a magnetization using an application of a voltage.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2008 年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2009 年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：スピン・増幅・スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

これまで、増幅作用といえば半導体素子の独壇場であった。これは、半導体では電荷密度が小さいために電荷の移動によって容易にバンドベンディングを制御して電気特性を変えることが出来るためである。しかし、この一方で、素子寸法が nm に近くなると素子内のキャリア数(ドーパントの)の揺らぎが素子特性のばらつきとなることが予想されている。

そこで、ドーパントの分布に依存しない増幅素子の実現が望まれる。そのために共鳴トンネルトランジスタや単一電子トランジスタが提案され精力的に研究されてきた。しかし、共鳴トンネルトランジスタでは大きな gm が得られないという問題があった。また、単一電子トランジスタについては室温で動作する素子を集積化する技術の実現が困難であった。

これに対して、近年、磁性多層膜ナノピラーに大きな電流を集中させると、磁性層間でスピン角運動量が移動するため、電流の向きにより磁化の配列を制御できることが示された。また、このとき巨大磁気抵抗効果を通してその電気抵抗も変化する。この現象を二端子素子としてみると一種のダイオード(整流器)と見ることが出来る。しかし、これまでの素子では磁気抵抗効果が 1%程度と小さく、しかも、大きなヒステレシスが有るために、このままではダイオードとしての利用は困難であった。ところが、本研究の代表者等は、(1)完全単結晶トンネル磁気抵抗素子の開発(産総研・キャノンアネルバに協力)

(2)スピン注入トルクによる強磁性共鳴の実現によりこの問題を解決し、室温で大きなダイオード効果を出すことに成功した(Nature 2005・研究開始当時特許出願中)。さらに代表者等は、この素子を定電圧モードで駆動すると負性抵抗が発生することを見出した(研究開始当時論文未発表)。

2. 研究の目的

スピン偏極電流とスピンの相互作用を巧みに利用することにより、スピン系に増幅作用を発現させると共に、スピン偏極電流の存在下におけるスピン系のダイナミクスを明らかにすることを目的とする。具体的には、金属など強磁性体・非磁性体へのスピン注入により磁化のダイナミクスを誘起し、その結果スピン系に増幅度が生じる機構を明らかにする。この研究はスピン系において非常に大きな伝達特性を持ち、Insec 程度の高速動作をし、さらに不揮発なメモリ動作を兼ね備えた「スピントラン

ジスタ」を創出するための基礎を与える。

3. 研究の方法

H19 年度：

H19 年度は、スピンドायオードを基礎としてスピン系が示す増幅作用の原理を探索する。そのためには、いくつかの系が考えられるが、本提案では以下の 2 つの道筋に沿って研究を展開する。

(1) 金属強磁性体における増幅作用の研究

H19 年度はまずトンネル磁気抵抗素子に見られる負性抵抗の物理的機構を明らかにするために以下のことを試みる。①負性抵抗の発現とともに発生すると考えられる高周波の発振出力を同時に観測する。②定電流駆動および定電圧駆動に対する応答の違いを明らかにする。以上の、実験のためには、直径 100nm 程度の円筒形の強磁性トンネル磁気抵抗素子を利用する。

また、スピン緩和に関係してあらわれるトルク(β 項、スピン蓄積トルク、フィールドライクタームなどと呼ばれている)を、スピン蓄積利用して助長することを試みる。具体的には、ダブルバリア構造により大きなスピン蓄積を実現する。そして、スピン蓄積の β 項に対する寄与をスピントルクダイオード効果を用いて詳細に検討し、 β 項による増幅作用発現の可能性を追求する。また、実際に交流磁場を加えることにより発生する増幅作用についても検討する。

(2) 非磁性体へのスピン注入によって発生する増幅作用の研究

非磁性体に注入したスピンを操作し、のちに磁気抵抗効果で検出する過程で増幅作用が生じる可能性がある。この研究のためには、スピン注入が可能で緩和時間の長い銅などの非磁性金属および有機物へのスピンの注入と検出を行う。独自に開発したマイクロストリップライン局所スピンドायナミクス測定法を用いて、強磁性金属と上述の非磁性体からなるグラニューラー系や有機物に注入されたスピンの検出とダイナミクスの測定を試みる。

H20 年度：

H20 年度も、スピンドायオードを基礎としてスピン系が示す増幅作用の原理を探索する。そのためには、いくつかの系が考えられるが、本提案では以下の 3 つの道筋に沿って研究を展開する。

(1) レイヤー構造における増幅作用の研究

H20年度はH19年度に引き続き、トンネル磁気抵抗素子に見られる負性抵抗の物理的機構を明らかにするために以下のことを試みる。①負性抵抗のマクロおよびマイクロマグネティクス計算による研究。②熱の影響の研究。③ダブルバリヤや多層構造におけるスピントルクと増幅作用の研究。以上の実験のためには、直径100nm程度の円筒形の強磁性トンネル磁気抵抗素子を利用する。このために多種物質製膜用蒸発源を購入する。

(2) 強磁性薄膜・細線における増幅作用の研究

ワイヤー型のトンネル磁気抵抗素子における磁壁の運動を研究することにより、スピン注入の影響下にある磁壁の運動を詳細に研究し、磁壁における増幅作用の発現の可能性およびその機構について明らかにする。H20年度は特に垂直磁化膜の導入について検討する。

(3) 非磁性体へのスピン注入によって発生する増幅作用の研究

非磁性体に注入したスピンを操作し、のちに磁気抵抗効果で検出する過程で増幅作用が生じる可能性がある。この研究のためには、スピン注入が可能で緩和時間の長い非磁性体が必要である。そこで、本研究では緩和時間が長いと考えられる有機物へのスピンの注入と検出を行う。また、この研究では特に注入されたスピンのダイナミクスを詳細に研究する必要がある。そのために、注入スピンの常磁性共鳴を測定するFET-ESR法について検討する。

H21年度：

H21年度は、スピンドायオード以外にも、高抵抗接合における電圧誘起磁気異方性変化を用いた増幅作用についてその原理を探究する。また、ワイヤー系、有機分子系においてスピン系が示す増幅作用についても引き続き検討する。

(1) レイヤー構造における増幅作用の研究

H21年度はH20年度に引き続き、トンネル磁気抵抗素子に見られる負性抵抗の物理的機構を明らかにするために以下のことを試みる。①負性抵抗およびその熱効果のフォッカープランク方程式による解析。②ダブルバリヤや多層構造におけるスピントルクと増幅作用の研究。

(2) 電圧スピン駆動を用いた増幅作用の研究

本研究により電圧印加で強磁性体の磁気異方性が変化できることが明らかとなった。本年度は、この効果を増幅に用いる可能性につい

て、種々の物質における電圧効果を見ることにより研究する。このために金属蒸発源を購入する。

(3) 強磁性ワイヤー及び非磁性体へのスピン注入によって発生する増幅作用の研究

強磁性ワイヤーに直接通電することにより磁壁の駆動が可能であることが知られている。この磁壁の駆動とトンネル磁気抵抗効果などを組み合わせることにより増幅作用が現れる機構を解明する。また、非磁性体に注入したスピンを操作し、のちに磁気抵抗効果で検出する過程で増幅作用が生じる可能性がある。この研究のためには、スピン注入が可能で緩和時間の長い非磁性体が必要である。そこで、本研究では緩和時間が長いと考えられる有機物へのスピンの注入と検出を行う。また、この研究では特に注入されたスピンのダイナミクスを詳細に研究する必要がある。そのために、注入スピンの常磁性共鳴を測定するFET-ESR法について昨年引き続き検討する。

4. 研究成果

(1) スピン注入トルクにより生じる増幅作用の研究

トンネル磁気抵抗素子に見られる負性抵抗と負性抵抗を利用した増幅作用の物理的機構を明らかにした。①実験により負性抵抗の発現とともに高周波が発生することを確認した。しかし、その周波数は当初予想されていた磁気共鳴の周波数(5GHz前後)のみではなく、低周波側でも大きくなっていることを見出した。これは、素子内の磁化の熱揺らぎが電流により増幅されたものである。②高周波や低周波揺らぎによる増幅作用の機構を明らかにするために、ランジュバンフィールドを導入したマクロスピンモデルによって有限温度の磁化の運動方程式を直接積分してその挙動を調べた。その結果、絶対零度では電流-磁界平面内のヒステシスの頂点の外側でのみ負性抵抗が現れるが、有限温度ではヒステシスが小さくなるとともに原点近くまで負性抵抗の領域が広がることを見出した。即ち、負性抵抗はヒステシスの外側では共鳴周波数に対応する歳差運動の開き角が電圧により変化することにより、また、有限温度・小磁界・小電流のもとでは熱揺らぎの大きさが電圧により制御されることにより生じることを明らかにした。また、スピントルクによる増幅素子では素子が小さくなるほど増幅が容易となることを見出した。

(2) スピンに対する電圧効果による生じる増幅作用の研究

電圧印加により発生する磁気異方性の変化

により磁化方向を制御することを試みた。その結果、Au/Fe 超薄膜/MgO/ポリイミド/ITO の各層からなる接合を作製し、Au および ITO 電極間に電圧を印加すると、磁化の方向が電圧によって大きく変化することを見出した。測定の結果、Fe/Au 界面に発生する垂直磁気異方性の数十分の一程度の異方性を電圧によって誘起できることがわかった。この結果、および、FMR による Fe 超薄膜のダンピング特性の評価結果を元にマクロマグネティックシミュレーションを行った結果、この程度の磁気異方性の変化であっても大きなトンネル磁気抵抗効果と組み合わせることにより電気信号の増幅が可能であることを見出した。

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 11 件)

- ① T. Nozaki, Y. Shiota, M. Shiraishi, T. Shinjo, Y. Suzuki, Voltage-induced perpendicular magnetic anisotropy change in magnetic tunnel junctions, Appl. Phys. Lett., Vol.96, 2010, 022506, 査読有
- ② T. Nozaki, M. Shiraishi, Y. Suzuki, rf amplification in a three-terminal magnetic tunnel junction with a magnetic vortex structure, Appl. Phys. Lett., Vol.95, 2009, 022513, 査読有
- ③ Y. Shiota, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Voltage-Assisted Magnetization Switching in Ultrathin Fe₈₀Co₂₀ Alloy Layers, Appl. Phys. Exp, Vol.2, 2009, 063001, 査読有
- ④ K. Konishi, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Current-Field Driven “Spin Transistor”, Appl. Phys. Exp., Vol.2, 2009, 063004, 査読有
- ⑤ Y. Suzuki, H. Kubota, Spin-Torque Diode Effect and Its Application, J. Phys. Soc. Jpn., Vol.77, No.3, 2009, p.031002, 査読有
- ⑥ K. Ohta, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Voltage control of in-plane magnetic anisotropy in ultrathin Fe/n-GaAs(001) Schottky junctions, Appl. Phys. Lett, Vol.94, 2009, 032501, 査読有
- ⑦ T. Maruyama, T. Nozaki, and Y. Suzuki. Large voltage-induced magnetic anisotropy change in a few atomic layers of iron, Nature Nanotechnology, Vol.4, 2008, 158 – 161, 査読有
- ⑧ S. Nishioka, R. Matsumoto, Y. Suzuki, Spin dependent tunneling spectroscopy in single crystalline bcc-Co/MgO/bcc-Co(001) junctions, Appl. Phys. Lett, 93, 2008, 12511, 査読有
- ⑨ H. Tomita, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Single-Shot Measurements of Spin-Transfer Switching in CoFeB / MgO / CoFeB, Appl. Phys. Express, Vol.1, 6. 2008, 061303, 査読有
- ⑩ R. Matsumoto, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Dependence on annealing temperatures of tunneling spectra in high-resistance CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions, Solid State Commun Vol.90, 11-12, 2007, pp574–578, 査読有
- ⑪ 鈴木義茂, スピン注入素子の高周波特性 – 発振・ダイオード効果とマグネティックノイズ –, まぐね, 日本磁気学会誌, vol. 2, No. 6, 2007, pp.282-290, 査読有

[学会発表] (計 19 件)

- ① 村上真一, 白石誠司, 鈴木義茂, Au/Fe/Au/MgO 構造における垂直磁気異方性とその電圧制御, 日本物理学会 2010 春, 2010/3/21, 岡山大学
- ② Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, M. Shiraishi, Y. Suzuki, 超薄膜 FeCo/MgO/Fe 接合における磁気異方性の電界制御, 応用物理学会 2010 春, 2010/3/19, 東海大学
- ③ 鈴木義茂, 野崎隆行, 塩田陽一, 丸山拓人, 白石誠司, 新庄輝也, 電界誘起磁化反転, 応用物理学会 2010 春, 2010/3/18, 東海大学
- ④ 石橋翔太, 鈴木義茂, 渡辺直樹, 強磁性トンネル接合素子におけるスピントルクダイオード電圧の磁場角度依存性, 応

- 用物理学会2010春, 2010/3/17, 東海大学
- ⑤ Y. Shiota, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Voltage induced magnetic anisotropy change in ultrathin Fe₈₀Co₂₀ / MgO junctions, 11th Intermag, 2010/1/21, Washington D.C.
 - ⑥ T.Yoshioka, M. Shiraishi, Y. Suzuki and Y.Uehara, Microwave-assisted magnetization switching in a perpendicularly magnetized film, 11th Intermag, 2010/1/19, Washington D.C.
 - ⑦ 塩田陽一, 白石誠司, 鈴木義茂, Au/FeCo合金/MgO 接合における電圧誘起磁気異方性制御, 日本金属学会, 2009/9/16, 京都大学
 - ⑧ 野崎隆行, 白石誠司, 鈴木義茂, Au/Fe/MgO/Feトンネル接合における電圧誘起磁気異方性変化, 第33回日本磁気学会学術講演会, 2009/9/14, 長崎大学
 - ⑨ 塩田陽一, 白石誠司, 鈴木義茂, 超薄膜 Fe₈₀Co₂₀ / MgO接合における電圧誘起磁化反転, 応用物理学会2009秋, 2009/9/10, 富山大学
 - ⑩ S. Ishibashi, Y. Suzuki, N. Watanabe, 低温におけるトンネル磁気抵抗素子のスピントルクダイオード測定, 応用物理学会2009秋, 2009/9/8, 富山大学
 - ⑪ K. Konishi, M. Shiraishi, Y. Suzuki, Current-field driven spin transistor, ICMFS2009, 2009/7/22, Berlin
 - ⑫ Y. Shiota, M. Shiraishi, and Y. Suzuki, Voltage induced magnetic anisotropy change in a Fe(001) alloy layers with perpendicular magnetization, INTERMAG, 2009/5/5, Sacramento CA
 - ⑬ 野崎隆行, 白石誠司, 鈴木義茂, 電圧印加による超薄膜Fe層の磁気異方性制御, 日本物理学会, 2008/9/22, 岩手大学
 - ⑭ 富田博之, 鈴木義茂, CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるスピン注入磁化反転の外部磁場方位依存性, 応用物理学会 2008秋, 2008/9/4, 中部大学
 - ⑮ 富田博之, 鈴木義茂, CoFeB/MgO/CoFeB接合におけるスピ

ン注入磁化反転の実時間測定, 第 32 回日本磁気学会学術講演会, 2008/9/1, 東北学院大学

- ⑯ 富田博之, 鈴木義茂, Real Time Measurements of Spin-Transfer Switching in CoFeB/MgO/CoFeB, INTERMAG2008, 2008/5/5, マドリッド国際会議場
- ⑰ 鈴木義茂, Voltage control of the in-plane magnetic hysteresis in Fe/Au/Fe(001) and Fe (001), INTERMAG2008, 2008/5/5, マドリッド国際会議場
- ⑱ 鈴木義茂, Role of the spin-torque, 2008 Annual Meeting, 2008/4/17, 韓国物理学会
- ⑲ H. Maekawa, M. Shiraishi, and Y. Suzuki, Detection of Current-Driven Magnetic Domain Wall Motions using Anisotropic Magnetoresistance Effect, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, 2007/ 5/28, The Shilla Jeju hotel

[図書] (計 1 件)

鈴木義茂, 「放射光 X 線磁気分光と散乱 (橋爪弘雄・岩住俊明編)」(附録:磁性多層膜における磁気的交換結合の振動とスピン分極)、株式会社アイピーシー、2007

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

- ①. 名称: 磁化制御方法、情報記憶方法、情報記憶素子及び磁気機能素子,
発明者: 鈴木義茂・野崎隆行・丸山拓人・塩田陽一
権利者: 鈴木義茂・野崎隆行・丸山拓人・塩田陽一
種類: PCT
番号: JP2009/000889
出願年月日: 2009 年 2 月 27 日
国内外の別: 外国
- ②. 名称: 磁化制御方法、情報記憶方法、情報記憶素子及び磁気機能素子,

発明者：鈴木義茂・野崎隆行・丸山拓人，
権利者：鈴木義茂・野崎隆行・丸山拓人，
種類：特願
番号：2008-120614
出願年月日：2008年5月2日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 義茂 (SUZUKI YOSHISHIGE)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：50344437

(2) 研究分担者

白石 誠司 (SHIRAISHI MASASHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号：30397682

(3) 連携研究者