

機関番号：14401

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048026

研究課題名（和文） スピン流高周波・熱デバイスの研究

研究課題名（英文） Research on Spin current driven high frequency and heat devices

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）：

強磁性層間の反強磁性的な磁気結合を利用して 20GHz を超える磁気共鳴モードをつくり、このモードを電流の直接通電により誘起することに成功した。

ボルツマン方程式に基づく理論を構築し、強磁性体中の熱勾配によりスピン流が発生すること、非平衡なスピン波により大きなゼーベック効果が期待できることを示した。さらに、拡散的なスピン流の発生に伴うエネルギーの散逸についての理論を構築した。

さらに、トンネル磁気抵抗素子が半導体を超える高周波の整流作用を示すことを実証した。

研究成果の概要（英文）：

By using a magnetic interlayer coupling a magnetic resonance mode with over 20 GHz was realized and successfully excited by a direct injection of electric current.

By developing a theory based on a Boltzmann's treatment of electron, we showed that a temperature gradient may cause a spin-current and non-equilibrium spin-wave distribution may result in a large Seebeck coefficient. In addition, we showed an equation to evaluate energy dissipation in a diffusive spin-current.

We showed that the tunneling magneto-resistive device may show a superior diode sensitivity compared with the semiconductor diodes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,300,000	0	7,300,000
2008年度	9,200,000	0	9,200,000
2009年度	9,200,000	0	9,200,000
2010年度	7,300,000	0	7,300,000
年度			
総計	33,000,000	0	33,000,000

研究分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料 応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶光学

キーワード：スピン流・磁性体ナノ構造・高周波特性・熱輸送・スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

1999年に電流の注入による磁化反転(スピン注入磁化反転：SIMS)が実現し(E. B. Myers *et al.* : SCIENCE, 285 (1999) 867)、スピ

ン流の概念の重要性が認識され始めた。また、2003年にはスピン偏極した電流の注入による磁化の自励発振が(S. I. Kiselev, *et al.* : Nature **425** (2003) 380)、2004・5年には本

研究グループ(当時は産総研)により 200psec の超高速スピン注入磁化反転 (Appl. Phys. Lett., , **85** (2004) 5358) と GHz 領域の高周波のダイナミックな整流作用 (Nature, **438**(2005)339) が実現され、スピン流による GHz 領域のダイナミクスが注目されるようになった。さらに、本グループでは産総研が開発した MgO バリヤ高性能磁気抵抗素子 (S. Yuasa *et al.*, Nature Materials, **3** (2004)868) を用いて、トンネル磁気抵抗素子からの発振出力をこれまでの 10000 倍に増大した (Nature Physics, **4**(2008) 803)。以上、本研究の開始時にはスピン流の注入により GHz 領域のスピンダイナミクスの制御が可能であり、これが大きな磁気抵抗効果と結びつく大きな出力やゲインが得られるという可能性が見出されていた。

さらに、当時、産総研では強磁性多層膜から出来たナノピラーに電流を流すと冷却作用が生じることを見出した (A. Fukushima *et al.*, Jpn. J. of Appl. Phys., **44** (2005)L12-L14)。スピン流が熱の移動に寄与したり、逆に熱によりスピン流が発生する可能性が示唆されたが、当時、スピン流の熱力学に関してはほとんど未開拓の分野となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、反強磁性結合多層膜や反強磁性体などのスピン波とスピン流との結合機構を解明し、スピン流の超高速ダイナミクスの学理を確立するとともに、スピン流高周波・ミリ波・THz 波デバイスの可能性を明らかにすることを第一の目的とする。

さらに、まったく未踏の研究領域であるスピン流の熱力学について、スピン流による熱の輸送・吸収、熱によるスピン流の発生などスピン流に関する非平衡熱力学の確立につながる知見を得ることを第二の目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず、種々の反強磁性結合した強磁性多層膜を作製し、その膜にスピン流を注入することにより、種々の共鳴モードとのスピン流の結合を調べる。このとき交換結合定数に比例して周波数の増大するモードを特に見つけ出す。このために、スピン波素子作製装置を購入立ち上げる。その後、測定装置を高度化するとともに交換結合の大きな系を作製しミリ波域での励起とその検出

を可能とする。ついで、実際の反強磁性体やフェリ磁性体へのスピン流の注入も試み、これらの物質のスピン流の下でのダイナミクスを明らかにする。さらに、これらの物質の界面において大きな磁気抵抗効果を生じさせ、高周波出力を高効率に取り出す研究も平行して行う。以上の研究により、スピン流の超高速ダイナミクスの学理を明らかにし、ミリ波・THz への応用の基礎を確立する。

一方、産総研では強磁性多層膜から出来たナノピラーに電流を流すと冷却作用が生じることを見出した。しかし、この現象へのスピン自由度およびスピン流の寄与は明らかになっていない。そこで、本研究では、まず、縦型または横型の比較的大きな試料を用いて熱の発生・吸収を詳細に測定するための素子および装置開発を行う。その一方でスピン流と熱の問題を扱う基本的な物理モデルを構築する。これらにより、磁性体におけるスピンと熱の輸送のダイナミクスを明らかにする。

4. 研究成果

強磁性体中を流れるスピン流は、局在磁化の反転や歳差運動、さらには一様な強磁性状態の不安定化などを引き起こす。反強磁性構造に電流を印加した場合、電流によりその磁気構造の不安定化や、高い反強磁性共鳴周波数に起因する高周波発振現象が期待される。本研究では、反強磁性結合膜に直流電流を印加し周波数領域の測定を行うことで、スピントルクにより誘起される磁化の自励発振現象を観測し、その外部磁場依存性について調べた。また、実験結果とマクロスピンモデルによる計算との比較を行った。

試料は分子線エピタキシー装置により作製された Fe/Cr/Fe 薄膜を、電子線リソグラフィとイオンミリングを用いて $0.1 \times 0.15 \text{mm}^2$ サイズの GMR (巨大磁気抵抗効果接合膜) ピラー構造に加工したものである。スペクトラムアナライザとロックインアンプによる変調法を用いて高周波出力スペクトルの高感度測定を行った。その結果、反平行磁化配置でスピントルク発振が誘起され、一方、スピンプリップが生じた後の中間状態では磁化のスイッチングが観測された。また、マクロスピンモデルを用いて計算した素子抵抗の磁場および電流依存性から反平行磁化配置において磁化の自励発振に起因する

抵抗の低下が観測されている。これらの計算から得られた発振周波数の磁場依存性より、反平行磁化配置においては、低磁場のとき主に光学モードが誘起され、高磁場領域では音響モードが主な歳差運動の励起モードであることがわかった。即ち、低磁場領域において交換結合を用いて高い周波数の発振を実現できることが分かった。

一方、産総研では強磁性多層膜から出来たナノピラーに電流を流すと冷却作用が生じることを見出した。しかし、この現象へのスピン自由度およびスピン流の寄与は明らかになっていない。そこで、本研究では、まず、温度勾配がある場合のスピン流の発生と熱の伝搬についてボルツマン方程式の取扱いに基づく理論を構築した。その結果、強磁性体中の熱勾配によりスピン流が発生すること、さらに、非平衡なスピン波により大きなゼーベック効果が期待できることが見出された。また、拡散的なスピン流の発生に伴うエネルギーの散逸についての理論を構築した。

さらに、トンネル磁気抵抗素子が示す高周波の整流作用について詳細に研究し、室温で半導体の整流感度を大きく越えることを実証した。また、ノイズについても詳細な測定を行い、条件によってはS/Nにおいても半導体ダイオードを超える可能性があることを示した。

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 10 件)

- ① A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, "Boltzmann approach to dissipation produced by a spin-polarized current", Phys. Rev. B. 83, 012401-1-4 (2011). 査読有
- ② S. Ishibashi, T. Seki, T. Nozaki, H. Kubota, S. Yakata, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and Y. Suzuki, "Large Diode Sensitivity of CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions", Appl. Phys. Exp. 3, 073001-1-3 (2010). 査読有
- ③ Takeshi Seki, Hiroyuki Tomita, Teruya Shinjo, and Yoshishige Suzuki, "rf auto-oscillations in antiferromagnetically coupled layers with different coupling strengths", Appl. Phys. Lett. 97, 162508-1-3 (2010). 査読有
- ④ A. A. Tulapurkar and Y. Suzuki, "Contribution of electron-magnon scattering to spin-dependent Seebeck effect in a ferromagnet", Solid State Comm., 150, 466-470 (2010). 査読有
- ⑤ T. Seki, H. Tomita, M. Shiraishi, T. Shinjo, and Y. Suzuki, "Coupled-Mode Excitations Induced in an Antiferromagnetically Coupled Multilayer by Spin-Transfer Torque", Appl. Phys. Exp. 3, 033001-1-3 (2010). 査読有
- ⑥ T. Wada, T. Yamane, T. Seki, T. Nozaki, Y. Suzuki, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and N. Watanabe, "Spin-transfer-torque-induced rf oscillations in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions under a perpendicular magnetic field", Phys. Rev. B 81, 1 104410-1-7 (2010). 査読有
- ⑦ 和田朋之, 山根健量, 関 剛斎, 野崎隆行, 鈴木義茂, 久保田 均, 福島章雄, 湯浅新治, 前原大樹, 永峰佳紀, 恒川孝二, D. D. Dyayaprawira, 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発振の磁場方位依存性, JMSJ 日本磁気学会 第 33 巻, 4 号 379-383 (2009) 査読有
- ⑧ T. Seki, H. Tomita, A. Tulapurkar, M. Shiraishi, T. Shinjo and Y. Suzuki, "Spin-transfer-induced ferromagnetic resonance for Fe/Cr/Fe layers with an antiferromagnetic coupling field", Appl. Phys. Lett. 94, 212505-1-3 (2009). 査読有
- ⑨ D. Hatanaka, S. Tanabe, H. Kusai, R. Nouchi, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki and M. Shiraishi, "Enhanced magnetoresistance due to charging effects in a molecular nano-composite spin device", Phys. Rev. B 79, 235402-1-5 (2009). 査読有
- ⑩ Do Bang, T. Nozaki, D. D. Djayaprawira, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kunota, T. Nagahama, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, Y. Nagamine, N. Watanabe, and H. Itoh, "Inelastic tunneling spectra of MgO barrier magnetic tunneling junctions showing large magnon contribution.", J. Appl. Phys. 105, 07C924-1-3 (2009). 査読有

〔学会発表〕(計 56 件)

- ① 塩見元輝, 強磁性トンネル磁気接合素子におけるミキシング効果, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011/03/26, 神奈川工科大学
- ② 石橋翔太, FeB フリー層を有する MTJ 素子における巨大なスピントルクダイオード感度, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011/03/26, 神奈川工科大学
- ③ 升方康智, 強磁性トンネル接合素子におけるスピントルク発振の温度依存性, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011/3/25, 神奈川工科大学
- ④ 升方康智, MgO 障壁強磁性トンネル接合素子を用いたスピントルク発振の高出力化に向けて, 電気通信学会, 2011/1/20, パナソニック企業年金基金 松心会館
- ⑤ 鈴木義茂, 高感度スピントルクダイオード, 「スピン流の創出と制御」平成 22 年度成果報告会, 2011/1/6, 東京大学 武田先端知ビル
- ⑥ 阪井裕孝, 分子ナノコンポジットにおけるクーロンブロッケード磁気抵抗, 「スピン流の創出と制御」平成 22 年度成果報告会, 2011/1/6, 東京大学 武田先端知ビル
- ⑦ 塩見元輝, 強磁性トンネル磁気接合素子におけるミキシング効果, 「スピン流の創出と制御」平成 22 年度成果報告会, 2011/1/6, 東京大学 武田先端知ビル
- ⑧ 小西克典, 電流磁場駆動型スピントランジスタ, 「スピン流の創出と制御」平成 22 年度成果報告会, 2011/1/6, 東京大学 武田先端知ビル
- ⑨ 石橋翔太, Magnetic field angular dependence of spin torque diode voltages in magnetis γ c tunnel junctions, MML2010(2010IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers), 2010/9/23, Barkeley CA, USA(Invited)
- ⑩ 石橋翔太, CoFeB/MgO/CoFeB 磁気トンネル接合における巨大なダイオード感度, 第 34 回日本磁気学会学術講演会(2010), 2010/9/7, つくば国際会議場
- ⑪ 関 剛斎, RF Auto-Oscillation in Antiferromagnetically-Coupled Layers by Spin-Transfer Torque, ISAMMA2010, 2010/7/15, 仙台国際センター
- ⑫ 升方康智, Spin-torque induced RF oscillation in magnetic tunnel junctions with an Fe-rich CoFeB free, 2010/7/15, 仙台国際センター
- ⑬ 富田博之, トンネル磁気抵抗素子における負性抵抗の発現と高周波増幅, 特定領域研究夏の研究会 22 年度, 2010/6/24, 京都大学きはだホール
- ⑭ 阪井裕孝, ルブレ γ n-Co ナノコンポジットの伝導機構と磁気抵抗効果のチャンネル長依存性, 特定領域研究夏の研究会 22 年度, 2010/6/24, 京都大学きはだホール
- ⑮ 鈴木義茂, Fe-rich組成CoFeBフリー層を有する強磁性トンネル接合素子における高周波発振, 特定領域研究夏の研究会 22 年度, 2010/6/23, 京都大学きはだホール
- ⑯ 鈴木義茂, Voltage control of Magnetic Anisotropy in Au/FeCo(001) Ultrathin Layer/MgO Junctions, 6th RIEC International Workshop on Spintronics, 2010/2/6, 東北大学(Invited)
- ⑰ 吉岡 孝, Microwave-assisted magnetization switching in a perpendicularly magnetized film., 11th Intermag 2010, 2010/1/19, Washington D. C., USA
- ⑱ 鈴木義茂, Contribution of Electron-Magnon Scattering to Spin-Dependent Seebeck Effect in a Ferromagnet, 特定研報告会(スピン流の創出と制御 研究会) 21 年度, 2010/1/14, 東京大学
- ⑲ 関 剛斎, 反強磁性結合膜におけるスピントルク発振の磁場依存性, 特定研報告会(スピン流の創出と制御 研究会) 21 年度, 2010/1/13, 東京大学
- ⑳ 村本和也, グラフェン薄膜スピバルブにおける高バイアス電圧下でのスピン注入信号減少の起源, 特定研報告会(スピン流の創出と制御 研究会) 21 年度, 2010/1/13, 東京大学
- 21 関 剛斎, Spin-Transfer-Torque-Induced RF Oscillation for Fe/Cr/Fe Layers with an Antiferromagnetic Coupling Field, SSDM2009, 2009/10/9, 仙台国際ホテル
- 22 鈴木義茂, Spin control by application of electric current and voltage, Royal Society scientific Discussion Meeting The spin on electronics, 2009/9/29, The Royal Society, London (Invited)
- 23 小椋裕介, Co 電極を有するルブレ γ n単結晶トランジスタの伝導特性, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009/9/27, 熊本大学
- 24 吉岡 孝, 異常ホール効果を用いたマイクロ波アシスト磁化反転評価法, 第 33 回日本磁気学会学術講演会, 2009/9/14, 長崎大学 文教キャンパス
- 25 関 剛斎, 反平行結合 Fe/Cr/Fe 膜におけるスピントルク発振, 第 33 回日本

- 磁気学会学術講演会, 2009/9/13, 長崎大学 文教キャンパス
- 26 村本和也, グラフェン薄膜スピバルブにおける高バイアス電圧下でのスピン注入信号減少の起源, 応用物理学会, 2009/9/10, 富山大学
- 27 三苦伸彦, Establishment of spin injection into a single layer graphene at room temperature, フラレン・ナノチューブ総合シンポ, 2009/9/1, つくば国際会議場
- 28 Ashwin Tulapurkar, Magnetization Switching by spin current generated by temperature gradient, 特定研報告会 (スピン流の創出と制御 研究会), 2009/8/10, 北海道大学 学術交流会館
- 29 富田博之, CoFeB/MgO/CoFeB 接合におけるナノ秒領域のスピン注入磁化反転と熱の効果, 2009/8/10, 北海道大学 学術交流会館
- 30 三苦伸彦, 単層グラフェンへの室温におけるスピン注入手法の確立, 2009/8/10, 北海道大学 学術交流会館
- 31 関 剛斎, 反強磁性結合膜におけるスピントルク発振, 特定研報告会 (スピン流の創出と制御 研究会), 2009/8/9, 北海道大学 学術交流会館
- 32 関 剛斎, 反平行結合膜におけるスピン流と強磁性共鳴モードの結合, 2009年春季第 56 回応用物理学関連連合講演会, 2009/4/2, 筑波大学
- 33 関 剛斎, Fe/Cr 積層膜における磁場およびスピントルク誘起強磁性共鳴, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 20 年度, 2009/01/08, 東北大学
- 34 Tulapurkar Ashwin, 強磁性ナノピラーにおける熱効果, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 20 年度, 2009/01/08, 東北大学
- 35 鈴木義茂, 反平行結合膜における強磁性共鳴モードとスピン流の結合, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 20 年度, 2009/01/07, 東北大学
- 36 村本和也, Negative bias voltage dependence of a spin-induced non-local voltage in a graphene thin film, 応用物理学会 2008 秋, 2008/9/4, 中部大学
- 37 和田朋之, 強磁性トンネル接合素子におけるスピントルク発振の地場角度依存性, 応用物理学会 2008 秋, 2008/9/4, 中部大学
- 38 丸山拓人, 超薄膜 Fe における電圧による磁気異方性変化, 応用物理学会 2008 秋, 2008/9/2, 中部大学
- 39 白石誠司, グラフェン系スピバルブにおけるスピン輸送特性, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 20 年度, 2008/7/24, 京都大学・芝蘭会館
- 40 関 剛斎, 反平行結合膜における強磁性共鳴スペクトル, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 20 年度, 2008/07/23, 京都大学・芝蘭会館
- 41 三苦伸彦, グラフェン薄膜へのスピン注入現象とそのバイアス依存性, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 20 年度, 2008/07/23, 京都大学・芝蘭会館
- 42 小西克典, コプレーナウェーブガイドを用いた FMR 測定の高感度化, 応用物理学会, 2008/3/29, 日本大学理工学部船橋キャンパス
- 43 白石誠司, グラフェン薄膜におけるスピン輸送特性, 応用物理学会, 2008/3/28, 日本大学理工学部船橋キャンパス
- 44 畑中大樹, Rubrene-Co ナノコンポジットにおける巨大磁気抵抗効果の起源 (I) - 帯電効果による寄与の検討 -, 応用物理学会, 2008/3/28, 日本大学理工学部船橋キャンパス
- 45 鈴木義茂, MgO バリヤトンネル磁気抵抗素子の熱ノイズ測定, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 19 年度, 2008/2/28, 東京大学
- 46 畑中大樹, Rubrene-Co ナノコンポジットにおける巨大磁気抵抗効果と帯電効果, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 19 年度, 2008/2/27, 東京大学
- 47 白石誠司, グラフェン薄膜におけるスピン伝導特性, 特定研成果報告会 (スピン流の創出と制御 研究会) 19 年度, 2008/2/27, 東京大学
- 48 山根健量, Precise measurements of Magnetic Noise in TMR heads with an MgO barrier, MMM2007, 2007/11/8, Tampa (USA)
- 49 前川裕昭, Magnetic domain wall depinning and deformations induced by short current pulse down to 5 nsec, MMM2007, 2007/11/7, Tampa (USA)
- 50 太田健太, Au and Fe thickness dependence of exchange coupling in ultrathin Fe/Au/Fe grown on GaAs(100), MML2007, 2007/10/17, 西オーストラリア大学
- 51 富田博之, Measurements of nonlinear ferromagnetic resonance of a single permalloy dot using a narrow coplanar waveguide, MML2007, 2007/10/17, 西オーストラリア大学
- 52 太田健太, Control of magnetic anisotropy and exchange coupling in Fe

- and Fe/Au/Fe grown on GaAs(100), 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007/9/21, 北海道大学
- 53 富田博之, コプレーナー型ウェーブガイドを用いた強磁性共鳴非線形効果、応用磁気学会, 2007/9/14、学習院大学
- 54 西岡真吾、トンネル磁気抵抗素子の微分コンダクタンス測定、第 68 回応用物理学学会学術講演会, 2007/9/7、北海道工業大学
- 55 前川裕昭、異方性磁気抵抗効果を用いた直流電流パルスによる磁壁駆動/変形の検出、第 68 回応用物理学学会学術講演会, 2007/9/6、北海道工業大学
- 56 和田 朋之、グラニューラ細線におけるスピントルクダイオード効果の測定、第 68 回応用物理学学会学術講演会, 2007/9/5、北海道工業大学

[図書] (計 1 件)

- ① 鈴木義茂, CMC出版, 「スピントロニクス
の基礎と材料・応用技術の最前線 第 4
章 スピン注入磁化反転と自励発振」
(2009), pp42-59

[その他]

ホームページ等

http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/tokutei/public_html/

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・教授
研究者番号：30397682

野崎 隆行 (NOZAKI TAKAYUKI)
大阪大学大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号：60452405

(H22 年 6 月 22 日まで分担者として参画)