

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25日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360140

研究課題名（和文） ハーフメタル強磁性体／半導体ハイブリッド構造を用いたスピン機能デバイスの基盤構築

研究課題名（英文） Fundamental research on spin-dependent functional devices based on half-metallic ferromagnet/semiconductor hybrid structures

研究代表者

植村 哲也 (UEMURA TETSUYA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20344476

研究成果の概要（和文）：

半導体中の伝導電子のスピンを操作し、これまでにない新しい機能を有する電子/光デバイスを創出するための基盤技術を確立することを目的に、スピン偏極率の高いハーフメタル材料として知られている Co 系ホイスラー合金をスピン注入源とし、GaAs や Si など種々の半導体への高効率スピン注入を実証した。さらに、注入した電子の半導体中におけるスピン緩和時間の見積もりや核スピンとの相互作用を解明し、スピン依存伝導特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research project was to develop fundamental technologies for creation of viable spintronic devices, in which electron spins are utilized as an additional degree of freedom for information and storage. For that purpose we demonstrated highly-efficient spin injection from halfmetallic ferromagnet of Co-based Heusler alloy into GaAs and Si. Furthermore we clarified spin-dependent transport properties through the investigation of spin lifetime and interplay between electron spins and nuclear spins in the semiconductor channels.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：スピントロニクス、スピン注入、ホイスラー合金、半導体、スピントランジスタ、スピン発光ダイオード

1. 研究開始当初の背景

半導体中の伝導電子のスピンを操作し、これまでにない新しい機能を有する電子/光デバイスを創出する半導体スピントロニクスの研究が盛んに行われている。その実現の第一歩は、スピン偏極した電子を半導体内に発生させることであり、強磁性電極から半導体

にスピン偏極した電子を電氣的に注入する方法（スピン注入）が有効である。高いスピン注入効率を得るには、スピン偏極率の高い強磁性体電極を用いることが必須である。Co系ホイスラー合金は、スピン偏極率が100%となるハーフメタル材料であることが理論的に指摘されており、さらにその強磁性転移

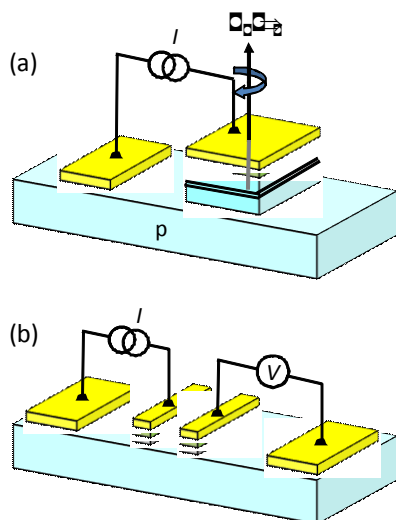


図1 本研究で作製したスピン注入素子:
(a) 光学評価用 (b) 電氣的評価用

温度は室温より十分高いため、室温でも高いスピン偏極率が期待できる材料である。しかしながら、これまで GaAs や Si などの半導体基板に良質なホイスラー合金薄膜を形成する手法は十分確立されておらず、高効率なスピン注入の実現には至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スピン偏極率の高いハーフメタル材料として知られている Co 系ホイスラー合金をスピン注入源とし、GaAs や Si など種々の半導体への高効率スピン注入を実現する技術を開発するとともに、注入した電子の半導体中でのスピン依存伝導特性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

上記研究の目的を達成するため、図 1 (a), (b) に示す強磁性体/半導体接合を有する素子を作製し、スピン注入効率ならびに半導体中のスピン輸送特性を電氣的・光学的に評価した。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を以下に項目ごとに示す。

(1) 強磁性体/半導体接合を有するスピン注入素子の作製と評価

スピントランジスタやスピン発光ダイオード(LED)・レーザの実現に向け、CoFeやホイスラー合金のCo₂MnSiなどの強磁性電極から、n-GaAsチャンネルやn-Siチャンネル、さらには、AlGaAs/GaAs量子井戸を有するLED構造へのスピン注入特性を電氣的・光学的に評価し、明瞭なスピン注入を実証した。

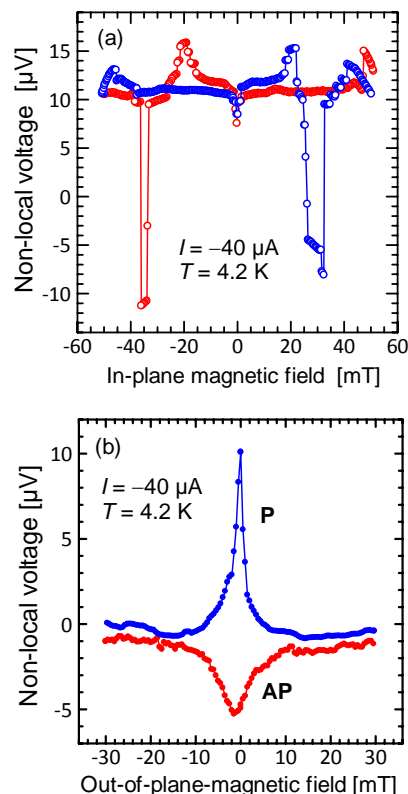


図2 Co₂MnSiを用いたスピン注入素子の非局所測定結果:(a)スピンバルブ特性 (b) ハンル効果測定

(a) GaAsへのスピン注入

図 2 (a),(b)にホイスラー合金のCo₂MnSiを電極としたスピン注入素子(図 1 (b))における4端子非局所測定結果を示す。同図(a)は面内磁場に対する非局所電圧(V_{NL})の変化(sp_{in}-valve信号)であり、同図(b)は面直磁場に対する V_{NL} の変化(Hanle信号)である。sp_{in}-valve効果は、面内に印加した磁場により、注入用と検出用の二つの強磁性体間の磁化方向が平行の場合と反平行の場合で V_{NL} が変化する効果であり、その変化量から、半導体中のスピン偏極率がわかる。一方、Hanle効果は、半導体に注入された電子スピンの面直方向に印加した磁場の周りの歳差運動により緩和する効果であり、電子スピンの半導体中での緩和時間が評価できる。両信号の検出は、強磁性体から注入された電子がそのスピン偏極状態を維持したまま半導体チャンネル中を伝導したことを示す直接的な証拠であり、本研究において、ホイスラー合金を用いたスピン注入の実証に初めて成功した。この結果はスピントランジスタの創出につながる重要な成果である。

(b) AlGaAs/GaAs 量子井戸へのスピン注入

図 3 にCo₂MnSiFeを電極としたスピンLED

構造（図1(a)）の素子に対する発光特性を示す。LEDからの発光の左右円偏光強度の違いを観測し、ホイスラー合金からGaAs量子井戸へのスピン注入を確認した。この結果は、スピンLED・レーザへの応用につながる成果である。

(c) Siへのスピン注入

図4に3端子非局所法により評価したSiへのスピン注入の結果を示す。本手法では、スピン注入電極直下の半導体部分のスピン注入信号を評価するため、注入電極と検出電極を同一とした。同構造においても室温にて明瞭なハンル信号を観測し、Siを用いたスピン機能素子の実現につながる成果を得た。

(2) ホイスラー合金を用いた高効率スピン注入の実証

ホイスラー合金をスピン注入源に用いることにより、従来のFeやCoFe電極の場合に比べ、スピン注入効率が2倍以上増大することを実証し、本研究で採用した高効率スピン注入に向けたアプローチの有用性を示した。

(3) 半導体内のスピン輸送特性の評価

GaAsやSi中のスピン輸送特性の評価において、スピン緩和時間を解析するとともに、注入された電子スピンとチャンネル中の核スピ間に働く相互作用を明かにした。ハンル効果の解析から、半導体中のスピン緩和時間を算出し、その半導体種依存性、チャンネル濃度依存性、温度依存性を系統的に評価した。その結果、ドーピング濃度が 10^{16} cm^{-3} 程度のGaAsチャンネルにおいて約40 nsecの比較的大きなスピン緩和時間が得られることを実証し、デバイス応用に向けて有用な結果を得た。

また、GaAsへのスピン注入において、注入された電子スピンとGaAsを構成する原子の核スピンの間に働く超微細相互作用により、核スピンを効率的に偏極させることができることを実証した。超微細相互作用の大きさを評価するため、偏極した核スピンからの核磁場の大きさを斜め磁場ハンル効果測定により電気的に検出した。本手法は、試料面から少し傾けた方向に外部磁場を印加することで、核磁場による電子スピンの歳差運動を検出する方法である。図5に、 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}$ スピン注入素子における斜め磁場ハンル効果測定の結果を示す。 $+10 \text{ mT}$ 付近に見られるピークは核磁場と外部磁場が打ち消しあったときに特徴的に現れるものであり、この結果は、核磁場の存在を明瞭に示している。

以上の成果により、スピントランジスタや

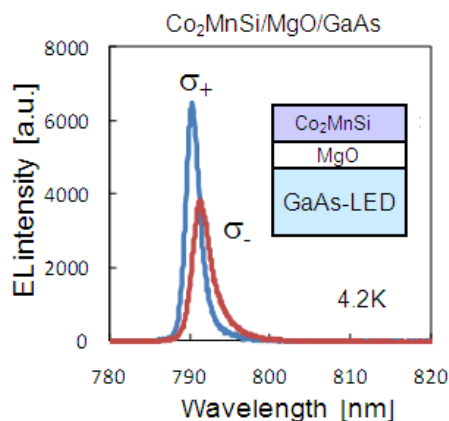


図3 ホイスラー合金を電極としたスピンLEDの発光特性

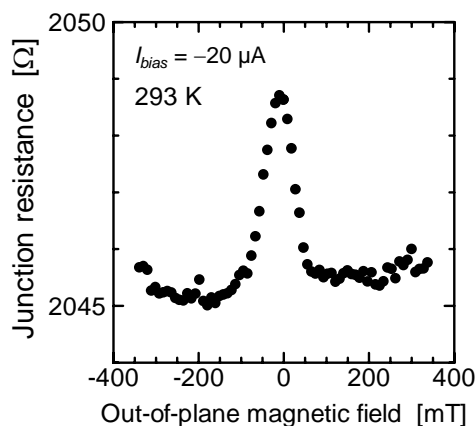


図4 Si スピン注入素子の測定結果

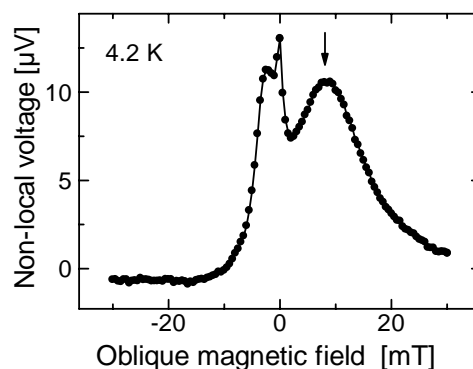


図5 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{GaAs}$ スピン注入素子における斜め磁場ハンル効果測定結果

スピンLED・レーザなど、従来の半導体デバイスにスピンの機能を付加したスピン機能デバイスの創出に向けた重要な基盤技術を確立し、本研究課題の最終目標を達成した。

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 16 件)

- ① T. Akiho, T. Uemura, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Effect of MgO Barrier Insertion on Spin-Dependent Transport Properties of CoFe/n-GaAs Heterojunctions”, Jpn. J. Appl. Phys. vol. 51, 02BM01 (5 pp), February 2012. 査読有
- ② T. Uemura, T. Akiho, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Non-local detection of spin-polarized electrons at room temperature in $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{GaAs}$ Schottky tunnel junctions”, Appl. Phys. Lett., vol. 99, 082108 (3pp), Aug. 2011. 査読有
- ③ T. Akiho, T. Uemura, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Suppression of in-plane tunneling anisotropic magnetoresistance effect in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{n-GaAs}$ and $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n-GaAs}$ junctions by inserting a MgO barrier”, Appl. Phys. Lett., vol. 98, 232109 (3pp), June 2011. 査読有
- ④ T. Uemura, M. Harada, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Influence of GaAs surface structure on tunneling anisotropic magnetoresistance and magnetocrystalline anisotropy in epitaxial $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{n-GaAs}$ junctions”, Appl. Phys. Lett., vol. 98, 102503 (3pp), March 2011. 査読有
- ⑤ T. Uemura, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Internal electric field influence on tunneling anisotropic magnetoresistance in epitaxial ferromagnet/n-GaAs junctions”, Appl. Phys. Lett., vol. 96, 252106 (3pp), June 2010. 査読有
- ⑥ T. Uemura and M. Yamamoto, “Creation and control of spin current using Co-based Heusler alloy”, (in Japanese) Materia Japan, vol. 49, pp. 566-569, Dec. 2010. 査読有
- ⑦ K. Sawada, T. Uemura, M. Masuda, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling Magnetoresistance Simulation Used to Detect Domain-wall Structures and Their Motion in a Ferromagnetic Wire”, IEEE Trans. on Magnetism, vol. 45, no. 10, pp. 3780 – 3783, Oct. 2009. 査読有
- ⑧ T. Uemura, K. Sawada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Double magnetic tunnel junctions with cross-magnetization configurations for electrical detection of domain-wall structures”, Appl. Phys. Lett.,

vol. 95, 012502 (3pp), July 2009. 査読有

- ⑨ T. Uemura, Y. Imai, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling anisotropic magnetoresistance in epitaxial $\text{CoFe}/\text{n-GaAs}$ junctions”, Appl. Phys. Lett., vol. 94, 182502 (3pp), May 2009. 査読有

[学会発表] (計 91 件)

- ① T. Akiho, T. Uemura, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Electrical spin injection from Co_2MnSi Heusler alloy into GaAs and electrical detection of dynamic nuclear polarization”, Int’l Magnetism Conf. 2011 (INTERMAG 2011), BD-03, Vancouver, Canada, May7-11, 2011.(Presented on May 8, 2011) 査読有
- ② T. Uemura, J. Fujisawa, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “MgO thickness dependence of spin accumulation signal in $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{MgO}/\text{Si}$ ”, Int’l Magnetism Conf. 2011 (INTERMAG 2011), BD-06, Vancouver, Canada, May7-11, 2011.(Presented on May 8, 2011) 査読有
- ③ T. Akiho, T. Uemura, H. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Non-local electrical detection of Hanle signals in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{n-GaAs}$ Schottky tunnel junctions”, 56th Annual Conf. on Magnetism & Magnetic Materials, GB-12, Scottsdale, Arizona, USA, October 30- November 3. (Presented on November 3, 2011) 査読有
- ④ T. Uemura, T. Akiho, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Effect of GaAs Surface Structure on Tunneling Anisotropic Magnetoresistance in Epitaxial $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{n-GaAs}$ Junctions”, 2011 Int’l Conf. on Solid State Devices and Materials, P-12-9, Nagoya, Japan, September 28-30, 2011. (Presented on September 29, 2011) 査読有
- ⑤ T. Akiho, M. Harada, T. Uemura, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Effect of MgO Barrier Insertion on Spin-dependent Transport Properties of $\text{CoFe}/\text{n-GaAs}$ ”, 2011 Int’l Conf. on Solid State Devices and Materials, N-7-4, Nagoya, Japan, September 28-30, 2011. (Presented on September 30, 2011) 査読有
- ⑥ T. Akiho, M. Harada, T. Uemura, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Spin injection from $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ into GaAs at room temperature”, 5th Int’l Workshop on Spin Currents, P2-22, Sendai, Japan, July 25-28, 2011.(Presented on July 27, 2011) 査読有
- ⑦ T. Uemura, M. Harada, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Electrical detection of spin injection from $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ into GaAs at room temperature”, 15th Int’l Conf.

- on Modulated Semiconductor Structures (MSS 15), Tu-P-87, Tallahassee, FL, USA, July 25-29, 2011.(Presented on July 26, 2011) 査読有
- ⑧ T. Akiho, M. Harada, T. Uemura, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Spin-dependent transport properties of Co₂MnSi/MgO/n-GaAs tunnel junctions”, Int’l Magnetism Conf.2011 (INTERMAG 2011), BP-03, Taipei, Taiwan, April 25-29, 2011.(Presented on April 26, 2011) 査読有
- ⑨ T. Uemura, M. Harada, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Electrical injection and detection of spin-polarized electrons in an epitaxial Co₅₀Fe₅₀/n-GaAs junction”, Int’l Magnetism Conf.2011 (INTERMAG 2011), BP-08, Taipei, Taiwan, April 25-29, 2011.(Presented on April 26, 2011) 査読有
- ⑩ M. Harada, T. Uemura, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Electrical detection of a non-local signal in Co₂MnSi/MgO/n-GaAs tunnel junctions”, 6th Int’l Conf. on the Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI), P2-46, Tokyo, Japan, August 1-4, 2010. (Presented on August 3, 2010) 査読有
- ⑪ T. Uemura, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Strong bias-voltage dependence of tunneling anisotropic magneto-resistance in epitaxial ferromagnet/n-GaAs junctions”, 11th Joint MMM-IntermagConf., EU-17, Washington DC, USA, January 18 - 22, 2010.(Presented on January 21, 2010) 査読有
- ⑫ M. Harada, T. Uemura, Y. Imai, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling anisotropic magneto-resistance in an epitaxial Co₂MnSi/n-GaAs junction”, The 14th Int’l Conf. on Modulated Semiconductor Structures (MSS-14), M5e, Kobe, July 19 – 24, 2009. (Presented on July 22, 2009) 査読有
- ⑬ T. Uemura, Y. Imai, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling Anisotropic Magneto-resistance in an Epitaxial CoFe/n-GaAs Junction”, IEEE Int’l Magnetism Conf. 2009, Digests (CD-ROM), BQ-13, Sacramento, CA, USA, May 4 – 8, 2009. (Presented on May 5, 2009) 査読有
- ⑭ K. Sawada, T. Uemura, M. Masuda, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Simulation of tunneling magnetoresistance used to detect domain-wall structure and motion in a ferromagnetic wire”, IEEE Int’l Magnetism Conf. 2009, BD-07, Sacramento, CA, USA,

May 4 – 8, 2009. (Presented on May 5, 2009). 査読有

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://nsed.ist.hokudai.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植村 哲也 (UEMURA TETSUYA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20344476

(2) 研究分担者

山本 眞史 (YAMAMOTO MASAFUMI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：10322835

(3) 連携研究者

松田 健一 (MATSUDA KEN-ICHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：80360931