

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：57101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21594

研究課題名(和文) 強磁性金属Fe<sub>3</sub>Si/半導体FeSi<sub>2</sub>人工格子による新規スピン注入素子の創製研究課題名(英文) The fabrication of new spin injection device by ferromagnetic metal Fe<sub>3</sub>Si/semiconducting FeSi<sub>2</sub> artificial lattice

研究代表者

堺 研一郎 (Sakai, Ken-ichiro)

久留米工業高等専門学校・制御情報工学科・助教

研究者番号：00634495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、強磁性金属Fe<sub>3</sub>Si/半導体FeSi<sub>2</sub>人工格子を創製し、局所2端子型および非局所4端子型スピンバルブ効果を利用して、強磁性金属Fe<sub>3</sub>Siから半導体FeSi<sub>2</sub>への電气的スピン注入に取り組んだ。その結果、局所2端子型スピンバルブ素子では、強磁性金属Fe<sub>3</sub>Si層から半導体FeSi<sub>2</sub>層へとスピン偏極電流を生成することに成功した。また、このスピン偏極電流による半導体FeSi<sub>2</sub>中でのスピン拡散長(輸送長)が、100nm以上期待できることを実証した。さらに、非局所4端子型スピンバルブ素子では、強磁性金属Fe<sub>3</sub>Si層から半導体FeSi<sub>2</sub>層へと純スピン流を生成することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we fabricated ferromagnetic Fe<sub>3</sub>Si / semiconducting FeSi<sub>2</sub> artificial lattices, and electrical spin injection from the Fe<sub>3</sub>Si layer to the FeSi<sub>2</sub> layer was studied based on local 2-terminal and non-local 4-terminal type spin valve effects. For experiments with the local 2-terminal element, the generation of spin-polarized current from the Fe<sub>3</sub>Si layer to the FeSi<sub>2</sub> layer was confirmed. In addition, it was found that the spin diffusion length (transport length) in FeSi<sub>2</sub> is at least 100 nm. For experiments with the nonlocal 4-terminal element, it was demonstrated that pure spin current can be generated from the Fe<sub>3</sub>Si layer into the FeSi<sub>2</sub> layer.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：電气的スピン注入

### 1. 研究開始当初の背景

これまで電子工学(エレクトロニクス)の筆頭として、その発展を牽引してきた半導体工学の分野では、電子の持つ電荷のみが取り扱われてきた。一方、磁性体工学(マグネティクス)の分野では、磁化が主に取り扱われてきた。近年、電子工学の分野において、これまでの半導体工学の発展方法では限界(ムーアの法則、スケール則)が囁かれる中、革新的な次世代デバイスの研究開発が急務となっている。その有力な候補の一つとして、電子が持つ電荷のみならず、磁石としての性質まで利用したスピントロニクスと呼ばれる新しい学術分野が大きな注目を集めている。スピントロニクスの研究分野において、GMR 素子では非磁性層に非磁性金属、TMR 素子では非磁性層に絶縁体を用いられる。これらに対して、本研究は非磁性層に半導体 FeSi<sub>2</sub> を用いる半導体スピントロニクスの分野に属する。

### 2. 研究の目的

本研究は、これまでに強磁性金属 Fe<sub>3</sub>Si/半導体 FeSi<sub>2</sub> 人工格子によって、二端子受動デバイス(CPP-MR、電流注入磁化反転、温度変調磁化反転)に関する研究で成果を上げてきた。今後は、これらの経験を活かしつつ、次のステージとして、三端子能動デバイス(スピントランジスタ)の基礎研究に拡張したい。そのために、本研究では、その基盤技術となる強磁性金属 Fe<sub>3</sub>Si から半導体 FeSi<sub>2</sub> への電氣的スピン注入に取り組んだ。

### 3. 研究の方法

電氣的スピン注入の実験方法として、局所 2 端子型スピバルブ効果、非局所 4 端子型スピバルブ効果、および非局所 4 端子型ハンル効果の 3 種類が挙げられるが、本研究では、申請書で主な購入物品として記載した面内方向磁場印加装置で測定可能である

- ① 局所 2 端子型スピバルブ効果
- ② 非局所 4 端子型スピバルブ効果

に絞って研究に取り組んだ。

強磁性金属 Fe<sub>3</sub>Si/半導体 FeSi<sub>2</sub>/強磁性金属 Fe<sub>3</sub>Si/Si(111)素子の創製には、スパッタ法を用いた。局所 2 端子型および非局所 4 端子型スピバルブ素子の創製にはマスク法を採用した。結晶構造評価には、XRD を用いた。磁化曲線測定には、VSM を用いた。スピバルブ信号の測定には、本研究の予算にて製作した面内方向磁場印加装置を用いた。

### 4. 研究成果

(1) 局所 2 端子型スピバルブ効果による半導体 FeSi<sub>2</sub> 中へのスピン偏極電流の生成と検出

図 1 に示すのは、マスク法で作製した局所 2 端子型スピバルブ素子の XRD 測定結果である。Fe<sub>3</sub>Si が Si(111)基板上に部分エピタキシャル成長していることがわかる。上下の

Fe<sub>3</sub>Si 層間で保磁力差を持っていることが、電氣的スピン注入の実験的研究を成功させるポイントとなる。

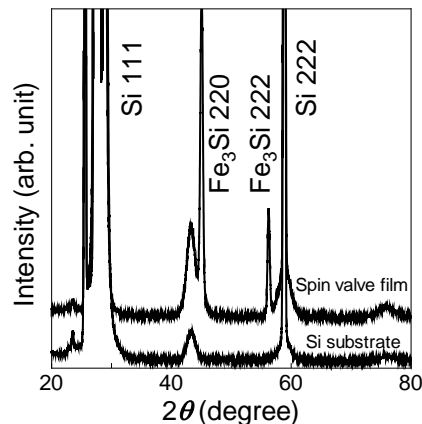


図 1 XRD 測定結果

Fe<sub>3</sub>Si 層間で保磁力差がついているか否かを確認する最も簡単な手法は、磁化曲線の測定である。本素子では、図 2 に示すように、保磁力差がついていることを表す特異なヒステリシスループが得られた。

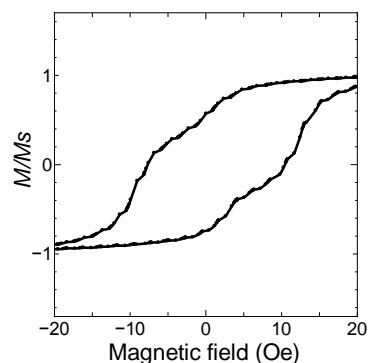


図 2 磁化曲線測定結果

図 3 に、局所 2 端子型スピバルブ信号の測定結果を示す。磁場掃引に伴う上向きスピバルブ信号が観測された。これより、局所 2 端子型スピバルブ素子では、強磁性金属 Fe<sub>3</sub>Si 層から半導体 FeSi<sub>2</sub> 層へとスピン偏極電流を生成することに成功した。

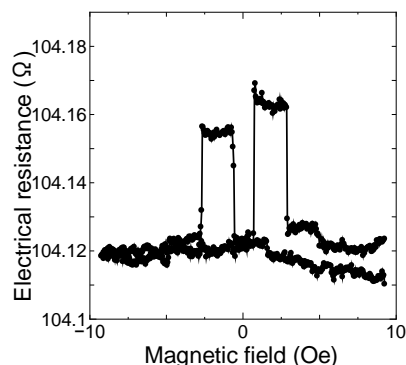


図 3 局所 2 端子型スピバルブ信号

(2) 局所 2 端子型スピバルブ効果による半導体 FeSi2 中のスピン拡散長 (輸送長) の探索

図 4 に, 局所 2 端子型スピバルブ効果による半導体 FeSi2 中のスピン拡散長 (輸送長) の探索結果を示す. この結果から, スピン偏極電流による半導体 FeSi2 中でのスピン拡散長 (輸送長) が, 100nm 以上期待できることを実証した.

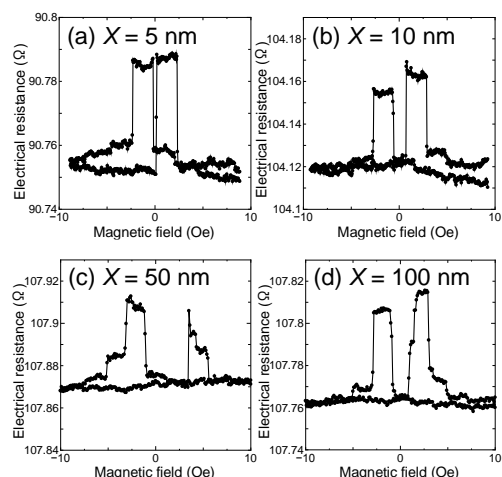


図 4 局所 2 端子型スピバルブ効果による半導体 FeSi2 中のスピン拡散長 (輸送長) の探索結果 ( $X$  は半導体 FeSi2 の膜厚)

(3) 非局所 4 端子型スピバルブ効果による半導体 FeSi2 中への純スピン流の生成と検出

図 5 に, 非局所 4 端子型スピバルブ信号の測定結果を示す. 磁場掃引に伴う下向きのスピンバルブ信号が観測された. 非局所 4 端子型スピバルブ素子では, 強磁性金属 Fe3Si 層から半導体 FeSi2 層へと純スピン流 (スピン蓄積) を生成することに成功した.

以上の結果から, 局所 2 端子型および非局所 4 端子型スピバルブ効果による電氣的スピン注入には成功したと考えている. 今後は, 電氣的スピン注入の最後の一つである非局所 4 端子型ハル効果へと研究を進め, 半導体 FeSi2 のスピン拡散長の究明に取り組む.

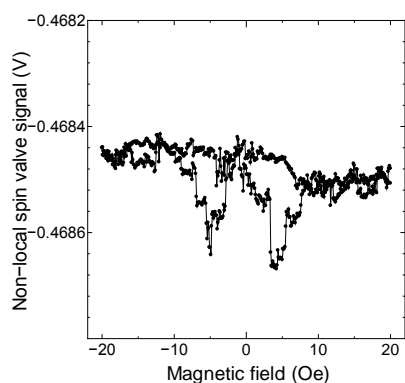


図 5 非局所 4 端子型スピバルブ信号

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Kazuki Kudo, Kazutoshi Nakashima, Satoshi Takeichi, Rezwan Ahmed, Seigi Mizuno, Ken-ichiro Sakai, Masahiko Nishijima, and Tsuyoshi Yoshitake  
Film Structures of Fe/B-doped Carbon/Fe3Si Spin Valve Junctions  
JJAP Conf. Proc. Vol. 5, 011502 (2017). (査読有り)  
doi: 10.7567/JJAPCP.5.011502
- (2) Kazuya Ishibashi, Kazuki Kudo, Kazutoshi Nakashima, Yuki Asai, Ken-ichiro Sakai, Hiroyuki Deguchi, and Tsuyoshi Yoshitake  
Temperature-dependent Magnetoresistance Effects in Fe3Si/FeSi2/Fe3Si Trilayered Spin Valve Junctions  
JJAP Conf. Proc. Vol. 5, 011501 (2017). (査読有り)  
doi:10.7567/JJAPCP.3.011501

[学会発表] (計 16 件)

- (1) 偏極中性子反射率測定による Fe3Si/FeSi2 人工格子膜の磁気構造解析  
花島隆泰, 竹市悟志, 宮田登, 堺研一郎, 出口博之, 吉武剛  
第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14 日~17 日, パシフィコ横浜, 横浜市, 神奈川県
- (2) Fabrication of Fe/B-doped UNCD/Fe3Si Spin Valve Junctions  
Kazuki Kudo, Kazutoshi Nakashima, Satoshi Takeichi, Ken-ichiro Sakai, and Tsuyoshi Yoshitake  
International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, 16-17th December, 2016, Hakozaki Campus, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- (3) Fe/nitrogen-doped carbon/Fe3Si trilayered spin valve junctions  
Kazutoshi Nakashima, Kazuki Kudo, Satoshi Takeichi, Ken-ichiro Sakai, and Tsuyoshi Yoshitake  
International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, 16-17th December, 2016, Hakozaki Campus, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- (4) Spin Valve Effects Comprising Fe-Si Materials  
Ken-ichiro Sakai, Yuki Asai,

- Kazuya Ishibashi, and Tsuyoshi Yoshitake  
International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, 16-17th December, 2016, Hakozaki Campus, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- (5) ナノダイヤモンド中間層からなるスピバルブ素子の創製とその評価  
工藤和樹, 中嶋一敬, 竹市悟志, 塚研一郎, 吉武剛  
平成28年応用物理学九州支部学術講演会, 平成28年12月3-4日, 対馬市交流センター, 対馬市, 長崎県
- (6) Fe/UNCD/Fe<sub>3</sub>Si スピバルブ素子における電気・磁気特性  
中嶋一敬, 工藤和樹, 竹市悟志, 塚研一郎, 吉武剛  
第8回半導体材料・デバイスフォーラム, 2016年11月5日, くまもと県民交流会館パレア, 熊本市, 熊本県
- (7) Spin valves comprising nitrogen-doped carbon interlayers  
Kazutoshi Nakashima, Kazuki Kudo, Satoshi Takeichi, Ken-ichiro Sakai, and Tsuyoshi Yoshitake  
The 18th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST), December 4-6, 2016, Shanghai, China.
- (8) Fabrication of spin valve junctions comprising Fe<sub>3</sub>Si/B-doped carbon/Fe trilayers  
Rezwan Ahmed, Kazuki Kudo, Satoshi Takeichi, Ken-ichiro Sakai, Masahiko Nishijima, Tsuyoshi Yoshitake, and Seigi Mizuno  
The 18th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST), December 4-6, 2016, Shanghai, China.
- (9) Temperature-Dependent Magnetoresistance Effects in Fe<sub>3</sub>Si/FeSi<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si Trilayered Spin Valve Junctions  
Kazuki Kudo, Kazuya Ishibashi, Kazutoshi Nakashima, Yuki Asai, Ken-ichiro Sakai, Hiroyuki Deguchi, and Tsuyoshi Yoshitake  
Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials Science and Technology Towards Sustainable Electronics (APAC-Silicide 2016), July 16-18, 2016, Nishijin Plaza, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- (10) Fe/boron-doped Ultrananocrystalline Diamond/Fe Trilayered Spin Valve Junctions  
Kazuki Kudo, Satoshi Takeichi, Hiroyuki Deguchi, Ken-ichiro Sakai, Hiroyuki Deguchi, and Tsuyoshi Yoshitake  
Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials Science and Technology Towards Sustainable Electronics (APAC-Silicide 2016), July 16-18, 2016, Nishijin Plaza, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- (11) Spin Valve Junctions Comprising Fe-Si Materials  
Tsuyoshi Yoshitake, Kazutoshi Nakashima, Kazuki Kudo, Kazuya Ishibashi, Yuki Asai, Ken-ichiro Sakai, and Hiroyuki Deguchi  
Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials Science and Technology Towards Sustainable Electronics (APAC-Silicide 2016), July 16-18, 2016, Nishijin Plaza, Kyushu University, Fukuoka, Japan.
- (12) Fe/FeSi<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si スピバルブ素子の作製と評価  
中嶋一敬, 石橋和也, 塚研一郎, 吉武剛  
第63回応用物理学会春季学術講演会, 平成28年3月19日~22日, 東京工業大学大岡山キャンパス, 目黒区, 東京都
- (13) Fabrication of spin valve junctions based on Fe/Fe<sub>3</sub>Si/FeSi<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si quadrilayered films by facing targets direct-current sputtering  
Kazuya Ishibashi, Kazutoshi Nakashima, Ken-ichiro Sakai, and Tsuyoshi Yoshitake  
68th Annual Gaseous Electronics Conference/9th International Conference on Reactive Plasmas/33rd Symposium on Plasma Processing, October 12-16, 2015, Honolulu, Hawaii.

(14) Magnetic properties of Fe/FeSi<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si trilayered films prepared by facing targets sputtering deposition  
Kazuya Ishibashi, Kazutoshi Nakashima, Ken-ichiro Sakai, and Tsuyoshi Yoshitake  
68th Annual Gaseous Electronics Conference/9th International Conference on Reactive Plasmas/33rd Symposium on Plasma Processing, October 12-16, 2015, Honolulu, Hawaii.

(15) Fe<sub>3</sub>Si/FeSi<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si スピンバルブ膜の作製  
石橋和也, 浅井勇輝, 中嶋一敬, 堺研一郎, 吉武剛  
第76回応用物理学会秋季学術講演会, 平成27年9月13日~16日, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 愛知県

(16) Fe-Si系スピンバルブ素子の作製とその電気・磁気特性  
石橋和也, 中嶋一敬, 堺研一郎, 吉武剛  
第16回シリサイド系半導体夏の学校, 平成27年7月25日~26日, 九大山の家・九重共同研修所, 玖珠郡, 大分県

[その他]

ホームページ等

[http://apollo.cc.kurume-nct.ac.jp/~k\\_sakai/](http://apollo.cc.kurume-nct.ac.jp/~k_sakai/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堺 研一郎 (SAKAI, Ken-ichiro)

久留米工業高等専門学校・制御情報工学科・助教

研究者番号：00634495