

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286036

研究課題名(和文) 半導体チャネルを介した磁気抵抗比の増大に関する研究

研究課題名(英文) Investigation for inceasement of magnetoresistance through semiconductore chanel

研究代表者

手束 展規 (Tezuka, Nobuki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40323076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)： Si/MgO/強磁性体素子において、スピン信号とソース・ドレイン端子間距離依存性について、実験を行った。微細素子作製条件(ミリング条件)の最適化をおこなうことで、Siチャネル上の金属再付着物を減らせることが分かった。また、電極にCo₂FeSiヘイスラー合金を用いて、素子を作製した結果、室温でスピン注入効率40%を達成した。この場合、局所測定配置での磁気抵抗比約1%を得た。

次に、Si半導体上に強磁性トンネル接合(絶縁体：MgO、電極：CoFeBとWの反平行結合膜)を作製した結果、比抵抗約10 μm²、磁気抵抗比約250%の特性を得た。

研究成果の概要(英文)： The relationship between gap length and spin signal in Si/MgO/ferromagnet devices was investigated. It was found that the amount of re-deposition metal in microfabrication process reduced by the optimaization of milling process. For the devices with Co₂FeSi Heusler material electrode, spin injection efficiency of about 40% by four terminal Hanle method, and magnetoresistance ratio of about 1% by two terminal method were obtained at room temperature. The tunnel magnetoresistance was investigated for magnetic tunnel junctions on Si with MgO tunnel barrier and antiferromagnetic coupling layer using CoFeB and W. The resistivity of about 10 μm² and magnetoresistance ratio of about 250% were obtained.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スピン注入 磁気抵抗効果 半導体 スピントランジスタ

1. 研究開始当初の背景

ビッグデータやクラウドコンピューティングなど超高度情報化社会実現に向けた開発が進んでいる。2011年に世界で生成されたデータ量は1.8 ZB(1ゼタバイトは10億テラバイト)であり、今後年率60%以上で増加すると予測されている。そのため、基盤となるハードファシリティとしてのセンサーネットワーク、サーバシステムの高速大容量化・低消費電力化が希求されている。

新メモリと呼ばれる素子・材料は世界中で数多く研究開発されているが、高速でかつ高信頼性を有する不揮発素子は、「スピントロニクス」素子のみであることから、「スピ機能」を付加することで新機能電子デバイスを創製する「スピントロニクス」が注目を集めている。スピンMOSFETは、再構成可能論理回路の実現も期待される夢の不揮発メモリ搭載型トランジスタ素子として大きな期待が寄せられている。しかし、強磁性体で形成したソース電極からショットキー障壁を介してSiやGaAsなどの半導体チャンネルにスピンを注入することは極めて困難であった。つまり、半導体チャンネルに高効率でスピンを注入すること、もしくは、半導体チャンネルを介したスピン依存伝導の出力(磁気抵抗効果)を増大させることが求められている。

2. 研究の目的

半導体への高いスピン注入・検出効率、半導体を介した高い磁気抵抗効果(スピン依存伝導)を実現することを目的とする。具体的には、[1]極短チャンネル長を有する微細素子でスピン依存伝導を調べ、界面抵抗やチャンネル長を制御することで注入効率や磁気抵抗比を増大する。[2]ソース・ドレインにホイスラー合金材料を有する強磁性トンネル接合とすることで、スピンMOSFETの特性向上につなげるとともに、半導体上の強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果の特性を明らかにする。

3. 研究の方法

微細加工により、Hanle効果測定・非局所測定・局所測定配置の素子を作製する。この際、ソースとドレインに相当する端子間距離の異なる種々の試料を作製する。端子間距離は100~1000nmとする。また、Si半導体のドーパ量の異なる基板を用いる。Si//Co₂Fe(Al,Si)およびGaAs//Co₂Fe(Al,Si)を用いる。スピン注入効率や半導体中のスピン拡散(緩和)などに関する情報を収集する。これらの結果と断面TEM観察などを行う。ソース・ドレインと半導体の界面がスピン注入効率に与える影響について明らかにするとともに、室温での半導体チャンネルを介した磁気抵抗効果の増大に向けて実験を行う。

次に、半導体Si基板上に強磁性トンネル接合を作製し、その磁気抵抗効果の観測、また、半導体チャンネルを介した磁気抵抗効果の

観測を行う。強磁性トンネル接合の絶縁体にMgOを、電極としてCoFeB強磁性体、もしくは、Co₂Fe(Al,Si)ホイスラー合金を用いる。測定は、直流4端子法、2端子法で行う。

4. 研究成果

局所測定配置においてソースとドレインに相当する電極間距離依存性について、実験を行った。電極間距離が数μm~1μmくらいまで、電極間距離の減少に伴い、スピン信号は増加し、1μm以下の端子間距離では、スピン信号が減少した。この原因を明らかにするため、端子間部の構造解析を行った。

図1端子部の断面TEM像を示す。ソースとドレインに相当する電極間のSiチャンネルにおいて、その上部に金属が付着していることが分かった。この金属は電極を形成する際にミリングしたFe、Co、Ruの再付着物と思われる。この結果より、端子間距離が短くなるとこの金属が連続的につながっていると予想される。つまり、端子間距離が短い素子において、端子間距離の減少によりスピン信号も減少する異常なふるまいは、このSiチャンネル上の連続金属膜が原因であると考えられる。

次に、金属再付着物がない試料の作製を目

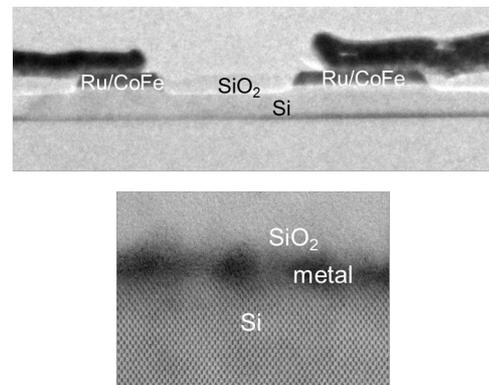


図1 ソース・ドレイン端子間の断面TEM観察像。(上部：低倍率、下部高倍率)

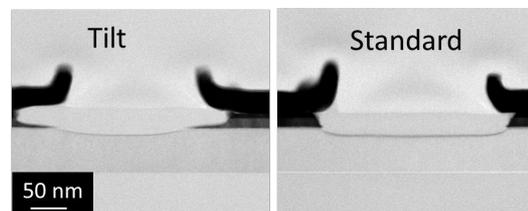


図2 ソース・ドレイン端子間の断面TEM観察像。ミリング時にArイオンビームと試料に角度をつけた場合(左:Tilt)とつかなかった場合(右:Standard)を示す。

指し、ミリング条件の検討を行った。ミリング角をつけた場合 (Tilt) とつけない場合 (Standard) の断面 TEM 観察結果を図 2 に示す。Standard 試料の方が Tilt 試料に比べ、Si チャンネル上の再付着金属が多いことが分かる。しかしながら、電極の脇では、Tilt 試料の再付着金属が多い。この結果より、ミリングの際のチルト角の最適化を行うことにより、Si チャンネル上全域において再付着金属を減らすことが可能となった。

ミリング条件の最適化により、端子間距離が 200 nm までスピン信号強度が単調増加する振る舞いが観測された。また、ソース/ドレイン部の界面平坦性向上と、Si (2×1) 清浄表面出しの最適条件出し、および、ハーフメタル・ホイストラ合金材料 Co₂FeSi 強磁性電極成膜条件を最適化することにより、スピン緩和法 (4 端子 Hanle 評価) において、室温で 40% を超える半導体 Si へのスピン注入効率の実現を実証した。(図 3 に 300 K における四端子ハンル信号を示す。) また、局所測定配置において、約 1% の磁気抵抗比の観測に成功した。(図 4 に 300 K における 2 端子磁気抵抗効果を示す。)

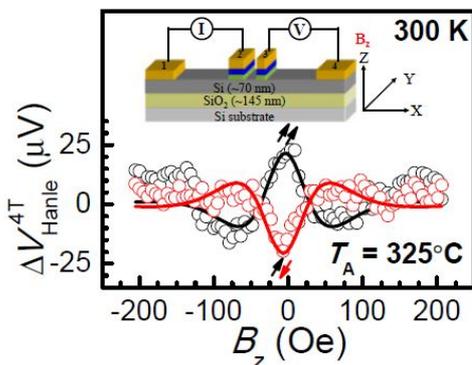


図 3 Si/MgO/CoFeSi における 300 K での四端子ハンル測定。試料アニール温度は 325 である。

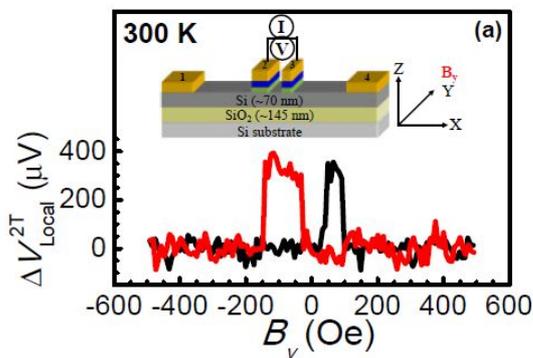


図 4 Si/MgO/CoFeSi における 300 K での 2 端子磁気抵抗効果測定。

以上の結果より、ミリング条件等の素子作製条件の最適化とハーフメタル・ホイストラ合金材料を用いることで、スピン注入効率の向上と Si 半導体チャンネルを介した磁気抵抗比の向上を実現した。

次に半導体 Si 上に、低抵抗高磁気抵抗比を有する強磁性トンネル接合の作製を試みた。絶縁層 MgO 膜厚を 0.9 nm とし、電極を CoFeB 強磁性と W を用いた反平行結合膜とすることで、比抵抗約 10 Ωμm²、磁気抵抗比約 250% の特性を得た。(図 5) 比抵抗と磁気抵抗比の絶縁層膜厚を調べた結果、絶縁層膜厚の増加に伴い比抵抗は増加するが、磁気抵抗比はほとんど変化しないことが明らかとなった。つまり、絶縁層 MgO を膜厚を変化することで比抵抗を変化することができ、Si チャンネルと同程度の抵抗値にできる可能性があることが分かった。しかしながら、絶縁層膜厚が 0.9 nm 以下に膜厚を減少させた場合、比抵抗は減少したが、磁気抵抗比も減少した。

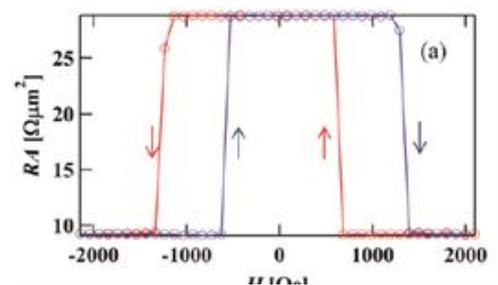


図 5 Si 半導体上の強磁性トンネル接合における磁気抵抗曲線。絶縁層: MgO、電極: CoFeB 強磁性体と W の反平行結合膜。

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 7 件)

A. Tiwari, T. Inokuchi, M. Ishikawa, H. Sugiyama, N. Tezuka and Y. Saito, "Room temperature observation of high spin polarization in post annealed Co₂FeSi/MgO/n+-Si on insulator devices", Jpn. J. Appl. Phys., 56, 04CD05/1-5 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.04CD05 (査読有)

Y. Saito, T. Inokuchi, M. Ishikawa, A. Tiwari, H. Sugiyama, "Spin accumulation and transport signals in CoFe/MgO/Si devices with confined structure of n+-Si layer", AIP Advances 7, 055937/1-6 (2017). DOI: 10.1063/1.4978583 (査読有)

A. Tiwari, T. Inokuchi, M. Ishikawa, H. Sugiyama, N. Tezuka and Y. Saito, "Effect of post annealing on spin accumulation and transport signals in $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{MgO}/\text{n}^+\text{-Si}$ on insulator devices", AIP Advances 6, 075119/1-9 (2016).

DOI:10.1063/1.4960210 (査読有)

N. Tezuka, S. Oikawa, I. Abe, M. Matsuura, S. Sugimoto, K. Nishimura, T. Seino, "Perpendicular Magnetic Tunnel Junctions With Low Resistance-Area Product: High Output Voltage and Bias Dependence of Magnetoresistance", IEEE Magnetics Letters, 7, 310420.1-4 (2016).

DOI: 10.1109/LMAG.2016.2584582 (査読有)

N. Tezuka, Y. Saito, Spin injection, transport, and detection in a lateral spin transport devices with $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{n-GaAs}$, $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{MgO}/\text{n-Si}$, and $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n-Si}$ junctions", Materila Transactions, 57,06 pp.767-772 (2016)

DOI:10.2320/matertrans.ME201502 (査読有)

Y. Saito, M. Ishikawa, H. Sugiyama, T. Inokuchi, K. Hamaya, and N. Tezuka, "Correlation between amplitude of spin accumulation signals investigated by Hanle effect measurement and effective junction barrier height in $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n}^+\text{-Si}$ junctions", J. Appl. Phys., 117, 17C707-1-4 (2015)

DOI:

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4907242> (査読有)

N. Tezuka, T. Saito, M. Matsuura, S. Sugimoto, "Comparison of Spin Signals Between 3T Hanle and 4T Non-Local Methods for $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al},\text{Si})/\text{n-GaAs}$ Junctions", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 50, 2600204-2600204 (2015)

DOI:10.1109/TMAG.2014.2325942 (査読有)

[学会発表](計 20 件)

A. Tiwari, T. Inokuchi, M. Ishikawa, H. Sugiyama, N. Tezuka and Y. Saito, "Large Spin Polarization in Si and the Spin Diffusion term observed in $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{MgO}/\text{n}^+\text{-Si}$ on insulator

devices", 第 42 回応用物理学会学術講演会, 16a-501-4, 2017-3-16, 横浜、神奈川.

Y. Saito, T. Inokuchi, M. Ishikawa, A. Tiwari, H. Sugiyama, Proceedings of 61th annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM2016), October 31th - November 4th, 2016, New Orleans, USA.

A. Tiwari, T. Inokuchi, M. Ishikawa, H. Sugiyama, N. Tezuka and Y. Saito, Proceedings of 2016 International conference on solid state devices and materials (SSDM 2016), September 26-29, 2016, Tskuba, Japan .

Y. Saito, M. Ishikawa, T. Ajay, H. Sugiyama, T. Inokuchi, "Spin injection, transport and detection technology in ferromagnet/MgO/Si devices", 第 40 回日本磁気学会学術講演会, シンポジウム, 2016-9-7, 金沢, 石川. [招待講演]

Yoshiaki Saito, Mizue Ishikawa, Tomoaki Inokuchi, Hideyuki Sugiyama, Kohei Hamaya, Nobuki Tezuka, "Spin accumulation signals in $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n}^+\text{-Si}$ devices deposited on Si (1×1) and Si (2×1) surfaces", Joint MMM/Intermag Conference, 2016-01-11 - 2016-01-15, San Diego, USA

Nobuki Tezuka, Tatsuya Saito, Masashi Matsuura and Satoshi Sugimoto, "Local Spin Signals in a Lateral Spin Transport Device With $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al},\text{Si})/\text{n-GaAs}$ Schottky Tunnel Junctions", Joint MMM/Intermag Conference, 2016-01-11 - 2016-01-15, San Diego, USA

Mizue Ishikawa, Tomoaki Inokuchi, Hideyuki Sugiyama, Nobuki Tezuka, Kohei Hamaya, Yoshiaki Saito, "Influence of Si surface on spin accumulation and transport signals in $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n}^+\text{-Si}$ junctions", 2015 International conference on solid state devices and materials, 2015-09-27 - 2015-09-30, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan

Hideyuki Sugiyama, Mizue Ishikawa, Tomoaki Inokuchi, Yoshiaki Saito, Nobuki Tezuka, "Influence of miniaturization of the $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n}^+\text{-Si}$

devices on magnitude of magnetoresistance”, International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces 2015, 2015-07-12 - 2015-07-1, Cracow, Poland

Y. Saito, M. Ishikawa, T. Inokuchi, H. Sugiyama, “ Ferromagnet/tunnel barrier/n+-Si junction technology for spin-FETs, International Workshop on Junction Technology 2015, 2015-07-11 - 2015-07-12, Kyoto Univ. Uji Campus, Kyoto, Japan

Yoshiaki Saito, Mizue Ishikawa, Tomoaki Inokuchi, Hideyuki Sugiyama, Kohei Hamaya, Nobuki Tezuka, “ Spin accumulation and transport signals in Heusler $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{MgO}/\text{n+-Si}$ on insulator devices ” , 20th International conference on Magnetism, 2015-07-05 - 2015-07-10, Barcelona, Spain

Nobuki Tezuka, Tatsuya Saito, Masashi Matsuura and Satoshi Sugimoto, “ Temperature dependence of four terminal nonlocal spin signals with $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{n-GaAs}$ Shottoky tunnel junctions ” , 20th International conference on Magnetism, 2015-07-05 - 2015-07-10, Barcelona, Spain

Yoshiaki Saito, Mizue Ishikawa, Tetsufumi Tanamoto, Tomoaki Inokuchi, Hideyuki Sugiyama, Kohei Hamaya, Nobuki Tezuka , “ Correlation between amplitude of spin accumulation signals investigated by Hanle effect measurement and effective junction barrier height in $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n+-Si}$ junctions ” , 59th annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM2014), 2014-11-03 - 2014-11-07, Hilton Hawaiian Village Conference Center, Honolulu, Hawaii, USA

Mizue Ishikawa, Hideyuki Sugiyama, Tomoaki Inokuchi, Tetsufumi Tanamoto, Kohei Hamaya, Nobuki Tezuka and Yoshiaki Saito, “ Influence of interface roughness in $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{n+-Si}$ junctions on spin accumulation and spin transport signals ” , 59th annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM2014), 2014-11-03 - 2014-11-07, Hilton Hawaiian Village Conference Center, Honolulu, Hawaii, USA

N. Tezuka, T. Saito, M. Matsuura, S. Sugimoto, “ Atomic and Electronic Structures of Interfaces for $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{n-GaAs}$ Junctions ” , 59th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2014-11-03 - 2014-11-07, Hilton Hawaiian Village Conference Center, Honolulu, USA

手束展規, 齋藤達哉, 及川楓吾, 松浦昌志, 杉本諭, “ $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al},\text{Si})/\text{n-GaAs}$ 接合における非局所スピニングナル, 第75回 応用物理学会秋季学術講演会, 2014-09-17 - 2014-09-20, 北海道大学、札幌

N. Tezuka, T. Saito, M. Matsuura, S. Sugimoto, “ Temperature dependence of spin signals for $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{n-GaAs}$ junctions by four terminal nonlocal measurements ” , International Union of Materials Research Societies-The IUMRS International Conference in Asia 2014, 2014-08-24 - 2014-08-30, Fukuoka University, Fukuoka, Japan

Y. Saito, M. Ishikawa, T. Inokuchi, H. Sugiyama, T. Tanamoto, N. Tezuka, K. Hamaya, “ Spin injection, detection and local magnetoresistance through Si at room temperature in ferrimagnet/ MgO/Si lateral spin valves ” , IEEE International nanoelectronics conference 2014 (IEEE INEC 2014), 2014-07-28 - 2014-07-31, Hokkaido univ., Sapporo, Japan

N. Tezuka, T. Saito, M. Matsuura and S. Sugimoto, “ STRUCTURAL, MAGNETIC AND ELECTRIC TRANSPORT PROPERTIES FOR $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{n-GaAs}$ JUNCTIONS ” , Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2014, 2014-06-29 - 2014-07-03, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

齋藤 好昭, 石川瑞恵, 井口智明, 杉山英行, 棚本哲史, 手束展規, 浜屋宏平, “ Si へのスピン注入とスピン伝導 スピンMOSトランジスタの実現を目指して ” , 第49回日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門委員会, 2014-05-26, 京都大学、京都

N. Tezuka, T. Saito, M. Matsuura, S. Sugimoto, “ Comparison of Spin Signals Between 3T Hanle and 4T Non-Local Methods for $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al},\text{Si})/\text{n-GaAs}$ Junctions ” , IEEE International Magnetism Conference,

INTERMAG Europe 2014, 2014-05-04 -
2014-05-08, International Congress
Center Dresden, Dresden, Germany

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

手束 展規 (TEZUKA, NOBUKI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40323076

(2) 研究分担者

斉藤 好昭 (SAITO, YOSHIAKI)
株式会社東芝・研究開発センター・研究主
幹
研究者番号：80393859

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()