

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25246019

研究課題名(和文)シリコン中の蓄積スピンと純スピン流物性の研究

研究課題名(英文)Study on physics of accumulated spins and pure spin currents in Si

研究代表者

白石 誠司 (Shiraishi, Masashi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30397682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：本提案の遂行により、現在のシリコンCMOSテクノロジーを置き換え可能なスピンMOSトランジスタを創成し、室温で動作させることに成功した。これはスピンMOSトランジスタのスピン輸送層である非縮退シリコン中でのスピンの挙動を詳細に解析し、正確・精密に理解できたことによる。さらに現在のシリコンCMOSテクノロジーが直面する膨大な廃熱の問題を解決するための1つの方策として、スピncaloritronics効果を用いたスピン輸送とスピン信号の取り出しにも室温で成功した。

研究成果の概要(英文)：Significant milestones achieved in this research project are: (1) creation of Si spin MOS transistors, which can replace conventional Si CMOS devices, and its room temperature operations, and (2) observation of spin caloritronic effects in Si, which allows solving a tremendous waste heat issue in Si CMOS devices.

研究分野：物性物理・スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス シリコン スピントランジスタ スピncaloritronics スピン流

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは beyond-CMOS の観点から現在盛んに研究されている研究領域であるが、中でも Si スピントロニクスは材料のコピキタス性と無毒性、さらに応用に際した既存の半導体インフラをほぼそのまま活用できる産業親和性の良さなどから近年世界中で活発に研究され激しい競争が繰り広げられている領域である。2007 年に Appelbaum らは hot-electron transistor 構造を用いて ballistic なスピン注入法を用いて Si へのスピン注入に成功したが信号が微弱であり応用に不向きであり、さらに hot-electron を注入するためのトンネル障壁が室温まで耐えられず 260 K までのスピン輸送にとどまっていた。米国海軍研究所は非局所 4 端子法(NL4T)によるスピン注入と純スピン流生成を目指したが極低温での実験に留まりさらにその結果の信頼性も低いという問題があった。2010 年には Jansen らは局所 3 端子法(L3T)という手法による室温スピン蓄積を報告したことを契機にこの手法が一気に Si スピントロニクス領域に広がった。しかしながら L3T ではスピン蓄積のみで純スピン流輸送は実現できないことから、詳細な純スピン流輸送物性の検討は不可能であるデメリットがあり、スピン蓄積の有無とスピンコヒーレンスの間接的評価のみが可能であるという課題が残った。

一方、申請者は TDK(株)・秋田県産業技術センターとの共同研究により 2009 年より一貫して NL4T を用いた n 型 Si への非局所スピン注入と純スピン流輸送を探求し、2009 年に低温での、2011 年には室温での世界初の純スピン流輸送を実現した。NL4T は L3T とは異なり純スピン流輸送を実現できるだけでなく、spurious な(スピン蓄積によらない偽の)効果を排除できるため、純スピン流物性を正確・精密に議論できる格好のステージを与えることができる。さらに上記の電気的手法とは本質的に異なる動力学的スピンポンピングを用いたスピン波スピン流ではない純スピン流生成による p 型 Si における室温純スピン流輸送にも成功した。即ち、申請者はシリコン中の純スピン流物性・純スピン流輸送の第一人者であり、その高い技術と独創性で世界をリードする存在であると言える。これら蓄積された技術と知見のすべてを結集しシリコンスピントロニクスの抱える重要な諸問題を解決することが本提案の骨子である。

2. 研究の目的

本提案では我々の技術と知見を結集し、①純スピン流輸送物性の更なる理解、②Si 中で生成した熱流が純スピン流輸送に与える影響と Si 中でのスピンゼーベック・スピンペルチェ効果の定量的評価、という現在の Si スピントロニクスが抱える重要問題の解決を目指し、それによって Si スピントロニクスの強固な基礎学理と応用展開の基盤を最終的に

整備することを目指した。

3. 研究の方法

①に関しては縮退半導体中での輸送を実現できただけの状況であったため、応用展開には非縮退半導体での純スピン流生成が望まれた。これを実現できれば応用上極めて重要なマイルストーンを達成できるだけでなくシリコン中のスピン散乱機構の詳細、更に動力学的手法における効率的純スピン流生成にむけた界面制御の重要性や好適な界面実現への指針を得ることが可能となるためである。そこで非縮退 Si へのスピン注入とスピン輸送を実現し、ドーピング濃度を変えながら上記の諸問題を実験的に解決することを、目指した。

②に関しては Si を加熱ないし冷却した場合、トンネル障壁層である MgO を介した強磁性体電極との温度差による熱流が純スピン流を誘起するというスピントネルゼーベック効果が実験的に報告されている。報告された効果は非常に大きく、数百 mK 以下の温度差で 0.1 mV 以上の起電力が観測できており、シリコントランジスタで発生する巨大な廃熱を有効利用した新たなシリコン熱電スピントデバイスの実現が期待されている。一方で、この実験は L3T を用いており、前述の理由から更に精密な熱電効果の評価が強く望まれている。そこで電氣的にスピン注入が実証されている素子を用いて Si 中のスピン関連熱電現象(スピントネルゼーベック効果やゼーベック・ペルチェ効果のスピン信号への寄与など)をすべて定量的に評価しなおし、熱流とスピン流の相関が生むこれらの新奇現象を統一的に記述する理論構築からその定量性の検討までを系統的に行うことを目指した。

4. 研究成果

平成 25 年度は以下の成果を挙げるに至った。

- (1)動力学的手法ように世界初の p 型シリコン中の純スピン流輸送の実現と、縮退 p 型シリコン中でのスピンコヒーレンスの測定。
- (2)同様の手法を用いた、非縮退 p 型シリコン中の純スピン流輸送の観測の成功
- (3)縮退 n 型シリコンにおけるスピンドリフト速度の定量的評価とモデル計算手法の確立。

(1)については従来より希求されていた効果を世界に先駆けて成功・発表できたということも多く国際会議から招待講演依頼を受けるなど反響も大きかった。(2)については、ドーピング濃度を $1 \times 10^{17}(\text{cm}^{-3})$ 台まで下げた試料においても室温で純スピン流輸送に起因する信号を観測しており、非縮退半導体における動力学的スピン輸送の実現、という意味で非常に意義深い成果である。(3)については半導体中のスピン輸送において従来から知

られていた拡散伝導に加え、電氣的スピン輸送手法では多くの局面で顔をだすスピンドリフト効果を実験的に観測できる実験手法を確立し、モデル計算手法の確立と合わせて定量的にスピンドリフト速度を求めることに成功した、という意義だけでなく、従来このような精密な議論なく汎用されていたいわゆる非局所3端子法で得られる実験結果の解析に大きな疑問を投げかけることが出来た、という意味でも意義深い成果である。この一連の成果は今後のシリコンスピンドバイス設計指針を与えるために非常に重要な知見を確立したことを意味しており、半導体エレクトロニクスの勃興期に行われたショックレー＝ハインズ実験のスピン版のデモンストレーションとしても重要な意味を持つ成果である。

平成 26 年度は電氣的的手法によるスピン注入実験において、従来の L3T が完全に誤った結果を与えるという知見を、米国物理学会 Focus Session において遂に世界的コンセンサスとしたことが重要な成果である。更に NL4T と相補的な新しい 3 端子 MR 法を共同研究者と開発し発表した。これは従来の L3T では決して確認できない磁気抵抗ヒステリシスを観測できる信頼性ある新手法であり、研究では NL4T の結果との対応がスピンドリフト効果を考慮することで完全に取れることも実験的に示した。これらの知見をベースに非縮退領域にある n 型シリコン中の世界初の室温スピン輸送に成功し、同時にゲート電圧による信号の変調にも成功した。これは世界初のシリコンスピンドバイス MOSFET の動作という意味で記念碑的成果である。更に非縮退半導体において顕著になるスピンドリフト効果によって、Hanle 型スピン歳差運動も変調されることを実験と理論の融合で実証し、スピン輸送が実現できている素子において起こるべき物理現象を正しく観測できていること、逆にスピン輸送が実現できていない素子ではこのような期待される効果が観測できないことを明らかにして、半導体中のスピン輸送の正しい証明方法を確立することができた。

平成 27 年度はスピンドバイス効果の 1 つであるスピン依存ゼーベック効果によって室温スピン流輸送を半導体中で初めて達成した。スピン流の生成手法としてこれまで用いられてきた電氣的、動力学的な手法など様々な手法が開発されてきたが、近年熱がスピン流を誘起できることが発見され、熱流とスピン流の相関を研究するスピンドバイスエレクトロニクスもまた近年のスピンドバイスエレクトロニクスにおける重要な研究領域である。現在の CMOS では集積化に伴う膨大なジュール熱が利用されることなく廃熱として捨てられることが深刻な問題であり、論理回路システムの低消費電力化を目指すに当たって障壁となっている。本成果の意義は半導体 Si デバイス中で現在廃熱として活用できていない

熱による情報伝播の可能性を開拓した点にあり、半導体スピンドバイスエレクトロニクスという新領域を創成できた点に意義がある。

具体的には縮退半導体領域にあるシリコンチャンネルと強磁性体である鉄との間の温度差による純スピン流生成と、それに伴う純スピン流伝搬に成功した。スピンドリフト拡散モデルにスピン依存ゼーベック効果による項を導入したモデルを構築し、強磁性体/シリコン/強磁性体の 3 層構造における境界条件を設定して方程式を解き、モデル計算を行うことで温度差の定量的な見積もりにも成功した。さらに非縮退領域にあるシリコンにおけるスピン依存ゼーベック効果の観測も成功裏に遂行されシリコンスピンドバイス MOSFET のスピンドバイスエレクトロニクス動作にも成功できたことも大きな成果である。本成果は応用物理学会にて発表を行ったほか、論文として投稿中である。

もう 1 つの重要な成果は前年度に達成したシリコンスピンドバイス MOSFET の室温動作をベースにした同素子の高性能化である。昨年度は on/off 比が 10 程度しかなかったが、素子構造の改良により 10^3 以上のスピン MOSFET の on/off 比を得、更に通常の MOSFET と同様に動作できることも確認した。

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 5 件)

- 1) T. Tahara, H. Koike, M. Kameno, T. Sasaki, Y. Ando, K. Tanaka, S. Miwa, Y. Suzuki and M. Shiraishi, “Room-temperature operation of Si spin MOSFET with high on/off spin signal ratio”, Appl. Phys. Express 8, 113004 (2015) [Selected as Spotlight Paper].
- 2) T. Sasaki, Y. Ando, M. Kameno, T. Tahara, H. Koike, T. Oikawa, T. Suzuki and M. Shiraishi, “Spin transport in non-degenerate Si with a spin MOSFET structure at room temperature”, Phys. Rev. Applied 2, 034005 (2014).
- 3) M. Kameno, Y. Ando, T. Shinjo, H. Koike, T. Sasaki, T. Oikawa, T. Suzuki and M. Shiraishi, “Spin drift in highly doped n-type Si”, Appl. Phys. Lett. 104, 092409 (2014).
- 4) T. Sasaki, T. Suzuki, Y. Ando, H. Koike, T. Oikawa, Y. Suzuki and M. Shiraishi, “Local magnetoresistance in Fe/MgO/Si lateral spin valve at room temperature”, Appl. Phys. Lett. 104, 052404 (2014).
- 5) E. Shikoh*, T. Shinjo, K. Ando, E. Saito and M. Shiraishi*, “Spin-pumping-induced spin transport in p-type Si at room temperature”, Phys. Rev. Lett. 110, 127201 (2013) [Editor’s Suggestion &

Spotlighting Exceptional Research in Physics of APSJ. * Equal contribution

[学会発表](計 28 件)

*招待講演(計 14 件)

[国内]

- 1)* 白石誠司, “ スピン依存伝導・純スピン流の基礎物性及び IV 族半導体スピントロニクス の現状 ”, CBI 学会第 5 回 FMO 研究会 (2013 年 9 月、神戸大)
- 2) 亀野誠”n 型シリコンスピナルブにおける 2 端子 Hanle 効果を用いたスピンドリフト速度の定量的評価”,第 74 回応用物理学会秋季学術講演会,(Kyoto,Japan,2013/9)
- 3) 亀野誠”強磁性 非磁性電極を用いた 2 端子法における高ドープ n 型 Si 中のスピンドリフト速度の定量的評価”, 日本物理学会 2013 年秋季大会,(Tokushima,Japan,2013/9)
- 4) *白石誠司, “ 半導体へのスピン注入・輸送・検出 ”, スピントロニクス国際連携研究会 (2013 年 10 月、蔵王)
- 5) *白石誠司, “IV 族半導体を用いたコピキタススピントロニクス ”, 日本磁気学会・応用物理学会共同研究会(2013 年 11 月、東北大)
- 6) *安藤 裕一郎,” IV 族半導体におけるスピン輸送物性”, 第 49 回スピントロニクス専門研究会,(京都、2014/5)
- 7) *白石誠司, “ IV 族半導体を用いたスピントロニクス ”, SSIS-NEDIA 合同シンポジウム「電子デバイスの新たな挑戦」(2014 年 8 月、阪大中之島センター)
- 8) *白石誠司, “ 外部電場による非縮退 Si 中の室温スピン輸送の変調 ”, PASPS-19 (2014 年 12 月、東大本郷)
- 9) *白石誠司, “外部電場によるシリコンスピン MOSFET 中のスピン輸送の変調 ”, 日本磁気学会第 201 回研究会/第 53 回スピンエレクトロニクス専門研究会 (2015 年 3 月 27 日・中央大学駿河台記念館)
- 10) 亀野 誠 ” Observation of Joule-heating-induced spin injection and transport in highly-doped n-type Si” 2015 年春季応用物理学会,(Kanagawa,Japan,2015/3)
- 11) 田原貴之, “ シリコンスピン MOSFET の室温動作の達成 ” 電子通信情報学会磁気記録・情報ストレージ研究会,(Osaka,Japan,2015/1)
- 12) 山下 尚人 ,” Observation of Joule-heating-induced spin magnetoresistance in non-degenerate n-type Si” 第 76 回 応用物理学会 秋季学術講演会,(Nagoya,Japan,2015/9)
- 13) 田原貴之,” Investigation of gate-voltage dependence of spin accumulation signal in nondegenerate Si”, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会,(Nagoya,Japan,2015/9)
- 14) 山下尚人,” シリコンスピン MOSFET における熱により生成されたスピン信号へのゲート電圧による効果”, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会,(Tokyo,Japan,2016

15) *安藤裕一郎, “シリコンベース・スピントロニクスデバイスの将来展望”, 応用物理学会,(名古屋、2015/9)

[国際学会]

- 1) *M. Shiraishi,” Group-IV Spintronics”,SSDM 2013(Hakata,Japan,2013/7)
- 2) *M.Shiraishi,” Dynamical spin injection and spin transport in Si and Ge at room temperature”,Spintronics SPIE(San Diego, USA,2013/8)
- 3) M.Kameno,” Quantitative Investigation of Spin-drift Velocity in Highlydoped n-type Si”, 58TH ANNUAL CONFERENCE ON MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, (Denver, Colorado,2013/11)
- 4) *M. Shiraishi, “Spin-pumping-induced spin transport in p-Si and graphene at room temperature”, MMM (Denver, USA, 2013/11).
- 5) *M. Shiraishi, “Spin-pumping-induced spin transport in p-Si and graphene at room temperature”, APS March Meeting (Denver, USA, 2014/03).
- 6) *Y. Ando,” Room temperature spin transport in condensed matters induced by spin pumping” ,SPIE2014, (San Diego, USA,2014/9)
- 7) M.Kameno,” Demonstration of long-range spin transport in n-type Si at room temperature”, 59th annual conference on magnetism and magnetic material (Honolulu,USA,2014/11)
- 8) *M. Shiraishi and Y. Ando, “Spin-pumping-induced spin transport in semiconductors and related phenomena”, SPIE Spintronics VIII (San Diego, USA, 2015/08).
- 9) M.Kameno,” Investigation of spin drift velocity and the modulation of spin signals under spin drift in highly-doped n-type Si”, APS March Meeting 2015,(San Antonio,USA,2015/3)
- 10) T.Tahara,” Spin Transport Properties in Nondegenerate Si at Room Temperature” APS March Meeting 2015(San Antonio,USA,2015/3)
- 11) M.Kameno,” Demonstration of spin-MOSFET using n-type Si at room temperature” 20th International Conference on Magnetism(Barcelona,Spain,2015/7)
- 12) N.Yamashita,” Thermal spin injection and transport in non-degenerate n-type Si”, MMM-Intermag joint conference 2016(San Diego,USA,2016/1)
- 13) Takayuki Tahara,” Quantitative investigation of the relationship between spin drift and spin signal in spin-MOSFET”, 13th Joint MMM-Intermag Conference, (San Diego,USA,2016/1)

〔図書〕(計2件)

- 1) 白石誠司「IV族半導体を用いたスピン輸送とスピン変換」(「固体物理」(アグネ技術センター)Vol.50(11), p.161-p.173 (2015).)
- 2) 白石誠司「シリコンへの室温スピン注入とスピン輸送」(日本磁気学会誌トピックス、2013年12月掲載).

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

○新聞報道1件

1. 「電力ほぼ使わぬトランジスタ」日本経済新聞(2014年9月9日)14面・日経産業新聞(同上)8面、「省電力トランジスタ」日刊工業新聞(同上)22面

○同様の内容で大学HPを通じた広報1件

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/140908_1.html

○受賞5件

1. 応用物理学会論文奨励賞(内定): T. Tahara et al., APEX 8, 113004 (2015).
2. 2015年秋季応用物理学会英語講演奨励賞: 田原貴之(白石研究室大学院学生)
3. 第7回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会論文賞(2015年度): 白石誠司・安藤裕一郎(T. Sasaki, M. Shiraishi, Y. Ando et al., Phys. Rev. Applied 2, 034005 (2014).)
4. 第5回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会論文賞(2013年度): 白石誠司(E. Shikoh, M. Shiraishi et al., Phys. Rev. Lett. 110, 127201 (2013).)
5. 2013年度日本磁気学会優秀研究賞: 白石誠司「IV族半導体への室温スピン注入と純スピン流輸送物性の研究」

6. 研究組織

(1)研究代表者

白石 誠司 (Shiraishi, Masashi)
京都大学大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30397682

(2)研究分担者

安藤 裕一郎(Ando, Yuichiro)
京都大学大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50618361

(3)連携研究者

なし