

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709027

研究課題名(和文)シリコン中に生成したスピン流の3次元情報制御

研究課題名(英文)Three dimensional manipulation of spin current in silicon

研究代表者

安藤 裕一郎(Ando, Yuichiro)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50618361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では電子が有する内部自由度の一つであるスピンに注目している。最終目標はスピンの流れであるスピン流の高度制御技術を確立である。特にシリコンは既存技術との整合性も高いためスピン情報を利用する"スピントロニクス"においても重要な半導体である。そこで、シリコン中のスピン流の高度制御技術の確立を目指して研究を行った。本研究により、磁界を用いたスピンの回転操作の高度化や長距離スピン輸送、スピンのゲート操作など多岐に渡る高度なスピン操作を室温で実証することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Silicon (Si) spintronics is becoming a pivotal field in semiconductor spintronics. Si is a light element and its crystal structure possesses a spatial inversion symmetry, which enable good spin coherence. Furthermore, Si spintronics devices have good compatibility with existing Si-LSI (large scale integration) technologies. In this study, we investigated manipulation of a spin current in Si at room temperature. By applying perpendicular magnetic field spin precession more than 4 was realized. Furthermore, long spin transport more than 21 micro meter and gate modulation of the spin transport signals were achieved at room temperature.

研究分野：半導体スピントロニクス

キーワード：スピン流 シリコン スピン操作

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの高速・高集積・省電力化を志向し、電子の有する「電荷」情報以外に「スピン」情報をも駆使する「スピントロニクスデバイス(スピンドバイス)」の実現が望まれている。特にシリコン(Si)を用いたスピンドバイスは既存の大規模集積回路(LSI)技術との整合性が高い。スピン情報を散逸する要因(スピン軌道相互作用等)が少なく、高効率なスピン輸送が可能等の利点により、熱心な研究が続いている。これらのデバイスの実現にはSi中にスピン情報を有する電流(スピン流)を注入・輸送し、検出する技術が必須となる。研究開始当初、研究代表者の研究グループでは、強磁性体/Siの直接接合を用いてのスピン注入の実証、及び生成したスピン流の多寡をゲートにより変調することに室温で成功していた。

スピン軌道相互作用が小さいSiでは、スピン情報の長距離輸送が期待できるという利点がある。しかし、スピンの操作にはスピン軌道相互作用を利用することが一つの常套手段である。即ち、スピン操作の観点で言えばSiは大きな欠点を有しているとも言える。これまでにSi中におけるスピン操作に関する有効な手法は確立されていない。

2. 研究の目的

本研究ではSi中におけるスピン操作の有効な手法を確立することを目的としている。Si中ではスピン軌道相互作用が小さいため、当該作用を用いたスピン操作では、スピンの反転に非常に長い距離を必要とするため、効果的な手法とは言えない。これに代わる新しい手法を確立する必要がある。

また、これまでのスピン流では1ビット情報しか輸送できなかった。即ちスピン偏極電流の多数スピンのアップスピンなのかダウンスピンなのかという情報のみを利用しており、その量子化軸に関する情報は未検討であった。本研究ではSi中へのスピン注入・輸送・操作技術を高度化し、スピン流で輸送できる情報を多ビット化する。具体的にはスピンの量子化軸を3次元的に制御して輸送し、検出電極で3次元情報に復元する技術の確立を図る。本技術によってスピン流で輸送できる情報量は飛躍的に増加し、従来のスピントロニクスを遥かに凌駕する高機能デバイスの実現が期待できる。スピンは外部磁界が印加されるとその方向を回転軸とする歳差運動を起こす(ハル効果:スピンのベクトルと外部磁界のベクトルの外積方向に運動する。ラーモア歳差運動)。本研究ではこのハル効果をデバイスに応用する。主に検討する項目は下記の(A)、(B)である。

(A) スピン方向を3次元的に検出する技術:スピンの向きを3次元的に検出する技術を確立する。

(B) 強磁性体を用いてスピン流の方向制御を行う技術: 強磁性体からの磁界を用いて

スピンの方向制御を行う。スピンの回転は(i)実効的に働く外部磁界の強さ、及び(ii)外部磁界が影響を与える時間に依存する。従って、(i)、(ii)を精密に制御することが本技術確立の鍵となる。また空間的に異なる領域に異なる量子化軸をもつスピン蓄積状態を形成した場合に、どのようなスピン輸送形態が効率よくスピン情報を輸送できるかを検討する必要がある。

3. 研究の方法

3次元スピン流の制御技術の確立に関する研究開始当初の研究内容を以下に示す。

スピン流の3次元情報検出技術の確立: スピン流の3次元情報を検出する技術を確立する。面内方向のスピンを検出するX、Y端子には面内磁化膜(Fe、Py、CoFe等)を用い、形状磁気異方性により磁化方向の制御を行う。Z端子には垂直磁化膜(FePt、CoPt等)を用いる。申請者のシーズ技術はX端子検出であり、残りのY、Z端子検出の技術を確立する必要がある。先ず、スピン注入・検出端子ともにYもしくはZ端子としたデバイスを作製し、スピン注入・輸送の実証を行う。その後、スピン注入にX端子、スピン検出にY、Z端子を用いたデバイスへと展開する。後者の測定ではY、Z方向に弱い外部磁界を印加することによりスピンの歳差運動を誘起し(ハル効果)、検出電極に到達するスピンのY、Z軸射影成分を連続的に変化させることにより、信号を検出する。これまでに強磁性体(FMと表記)/Si直接接合、FM/トンネル絶縁膜(ISと表記)/Si構造の両者でスピン注入を実現している。前者は強磁性体の種類により結晶成長方法を変化させる必要がある為、本研究には適していない。従って後者の技術を採用する。FM膜、IS膜の作製には分子線エピタキシー(MBE)法もしくはスパッタ法を用いる。本技術を用いて実時間測定を行えば、スピン流の3次元情報を復元することが可能になる。

スピン流の方向制御技術の確立:

の技術が確立した暁には輸送チャネル中に制御用強磁性体を配置し、検出される電圧の変化を測定する。制御用強磁性体とチャネル間に電気的コンタクトがあるとスピン輸送の妨げになることが懸念される。従って、10nm程度の絶縁膜(Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2)を挿入する。スピン流の精密変調には“実効的な外部磁界の強さ”や“影響を与える時間”が鍵となる。強磁性体の組成制御によって飽和磁化を変調したり、絶縁膜の膜厚の制御することによって、実効的な外部磁界の強さを変調する。外部磁界が影響を与える時間の制御には制御用強磁性体の電極幅の制御やドリフト速度をバイアスにより変調することにより実現する。これらのパラメータに対し、検出電圧が振動的な振る舞いを示すことを

観測する。これらの実験を X, Y, Z 端子について検討し、最も精密に制御できる手法を探索する。

3次元スピンの実時間測定技術の確立：

3次元に制御したスピン流を測定する際、最終的には実時間測定により高速に変化するスピン信号を検出する必要がある。その為の要素技術を確認する。測定には GHz オシロスコープを用いる。当該研究は非常に高度な技術を必要とする為、研究開始直後から技術確立を図る。Si チャンネル中のスピン流に対し、パルス磁界により歳差運動を誘起し、それを検出する実験から開始する。本実験は申請者のシーズ技術だけで十分に実現可能である。パルス磁界にはパルスジェネレータを用いる。

複数のスピンを用いたスピン流制御技術の確立：

複数の制御用強磁性体を用いた素子を作製し、個々の強磁性体の磁化配置により検出される電圧が制御できることを実証する。本技術は、の技術が確立されればさほど困難ではないと予想される。X, Y, Z 端子に検出される電圧が、複数配置した強磁性体の磁化配置に依存して変化することを実証する。

電圧によるスピンの3次元方向制御技術の確立：

電圧印加磁化方向制御技術を用いることにより、制御用強磁性体の磁化方向の高速に制御し、スピン流の高速変調を目指す。実際の素子には、の要素技術を用いる。制御用強磁性体に電圧印加磁化方向制御用の電極を作製する。パルスジェネレータを用いて瞬間的に電圧を印加し、それによる検出信号の変化を GHz オシロスコープで測定する。

4. 研究成果

得られた研究成果を以下に示す。

(1) 本研究のような高度なスピン流制御を実現するには信号強度の増大が不可欠である。一般的にスピン蓄積信号強度とキャリア濃度には反比例の関係がある。即ち、これまでのスピン輸送研究で用いてきた縮退 Si ではなく、非縮退 Si を用いたスピン輸送が非常に重要となる。非縮退 Si では界面抵抗の精密制御が必要であるが、これまでは界面抵抗の精密制御の難しさから、非縮退 Si 中のスピン輸送の実証には至っていなかった。本研究では局所3端子磁気抵抗測定という新しい測定手法を開発した。本手法はノイズレベルを数桁も低減することができるほか、幅広い界面抵抗の試料でスピン輸送の実証を可能にするというメリットがある。その結果、非縮退 Si (リンドーブ: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 中での室温スピン輸送の実証に成功した。

(2) スピンの方向制御技術の向上を目指し、Si チャンネルで4以上のスピンの回転を検出することを試みた。4以上の回転を検出するためには Si の長距離輸送が不可欠である。スピンの長距離輸送の実現には Si チャンネルを低ドーブにすることが有効であると期待される。そこで(1)の技術を利用し、非縮退の Si チャンネルベースのデバイスを作製した。また複数回の回転を観測するにはスピン注入電極からスピン検出電極までのスピン流の到達時間を厳密に制御する必要がある。その為、過去の我々の研究でその有用性が明らかになった、スピンドリフトの効果を用いた測定手法を開発した。その結果、21マイクロメートルと非常に輸送距離の長い試料を用いてスピン輸送信号の室温検出に成功し、更に4以上の回転を観測することに成功した。(図1)この結果はスピン方向の3次元制御において2回転に相当する制御までは十分にスピン情報を保持することを意味しており、複数回のスピン回転操作が可能であることが証明された結果と言える。

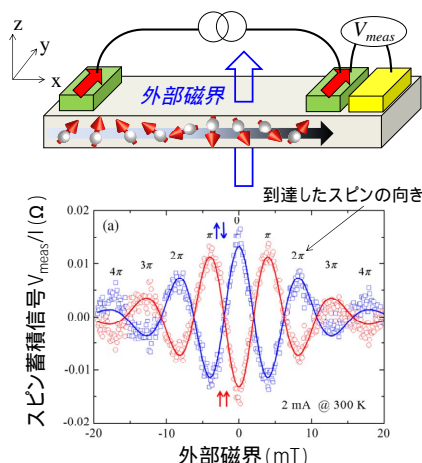


図1 面直磁界を用いたスピン操作に用いた素子構造と室温測定の結果。

(3) 本研究目的とは少し逸脱するが、非縮退 Si 中のスピン輸送に成功したということは、キャリア濃度をゲートによって変調可能であることを意味する。これは Si ベーススピントロニクスのための代表的なデバイスであるスピン MOSFET (スピン metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) の動作実証が可能であることを意味する。実際にバックゲートを用いて、スピン MOSFET 動作の実験を行った。その結果、磁化配置によるトランスコンダクタンスの制御に成功した。これまでは、定電流印加、電圧測定を行っていたが、本実験では定電圧印加、電流測定で実証した。即ち、実際の MOSFET の動作と同様のスキームによる実証と言える。また現在の磁気抵抗比は 0.03% 程度であり、実用化の目安となる 100%には磁気抵抗比の4桁程度の向上が必要であることが判明した。4桁の向上と言うのは容易で

はないが、現在の界面抵抗は極めて高いため、2桁程度の界面抵抗の低減は望める。またスピン偏極率の向上およびデバイスの微細化により、2桁以上のスピン蓄積信号の増強は望めるため、今後の設計指針が得られたともいえる。

(4) (1)で示した結果はスピン流の3次元制御の一つの実証であるが、実用化にはより高精度なスピン情報のスピン操作が必要であると言える。特に空間的に異なる位置に存在する、異なる量子化軸を有するスピンを混ぜることなく独立した状態で輸送する手段が必要となる。その為にドリフト輸送をもちいたスピンドリフト効果について詳細に検討した。まず、非縮退Si中ではスピンドリフト効果によるスピン輸送が支配的であり、それにより、スピン蓄積の信号強度を何桁も変調可能であることを示した。また、スピンドリフト効果は上記のような異なった空間に存在する異なった量子化軸を有するスピン蓄積状態の精密制御ひ非常に有効であることを示した。今後はスピン拡散現象を抑制し、スピンドリフト効果を増強した素子を作製し、より高精度なスピン情報処理技術の確立を図っていく予定である。

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)

Y. Ando, K. Ichiba, S. Yamada, E. Shikoh, T. Shinjo, K. Hamaya, and M. Shiraishi
“Giant enhancement of spin pumping efficiency from Fe₃Si ferromagnet”
Physical Review B **88**, 140406(R), pages 1-6, (2013).
<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.88.140406>

Tomoyuki Sasaki, Toshio Suzuki, Yuichiro Ando, Hayato Koike, Tohru Oikawa, Yoshishige Suzuki, and Masashi Shiraishi,
“Local magnetoresistance in Fe/MgO/Si lateral spin valve at room temperature”
Applied Physics Letters **104**, 052404, pages 1-4, (2014).
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/104/5/10.1063/1.4863818>

Makoto Kameno, Yuichiro Ando, Teruya Shinjo, Hayato Koike, Tomoyuki Sasaki, Tohru Oikawa, Toshio Suzuki and Masashi Shiraishi
“Spin Drift in Highly-doped n-type Si”
Applied Physics Letters **104**, 092409 (2014).
<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/104/9/10.1063/1.4867650>

Tomoyuki Sasaki, Yuichiro Ando, Makoto

Kameno, Hayato Koike, Tohru Oikawa, Toshio Suzuki and Masashi Shiraishi

“Spin Transport in Nondegenerate Si with a Spin MOSFET Structure at Room Temperature”
Physical Review Applied **2**, 034005 (2014).
<http://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.2.034005>

Takayuki Tahara, Makoto Kameno, Yuichiro Ando, Shinji Miwa, Yoshishige Suzuki, Hayato Koike and Masashi Shiraishi

“Room-temperature operation of spin MOSFET with high on/off spin signal ratio”
Applied Physics Express **8**, 113004 (2015).
<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.8.113004>

Sergey Dushenko, Mariko Koike, Yuichiro Ando, Maksym Myronov and Masashi Shiraishi

“Experimental demonstration of room-temperature spin transport in n-type Germanium”
Physical Review Letters **114**, 196602 (2015).
<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.114.196602>

Takayuki Tahara, Yuichiro Ando, Makoto Kameno, Hayato Koike, Kazuhito Tanaka, Shinji Miwa, Yoshishige Suzuki, Tomoyuki Sasaki, Tohru Oikawa, Masashi Shiraishi

“Observation of large spin accumulation voltages in non-degenerate Si spin devices due to spin drift effect”
Physical Review B **93**, 214406 (2016).
<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.93.214406>

[学会発表](計22件)

“Generation of spin current using ferromagnetic silicide”
Y. Ando, E. Shikoh, K. Hamaya and M. Shiraishi
Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials, Japan, Ibaraki, (July 27-29, 2013), 29-AM-VI-5

“Quantitative Investigation of Spin-drift Velocity in Highlydoped n-type Si”
M. Kameno, Y. Ando, T. Shinjo, H. Koike, T. Sasaki, T. Oikawa, T. Suzuki and M. Shiraishi
58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Denver, Colorado Nov. 4 ~ 8, 2013, HB-02

“Room temperature spin transport in condensed matters induced by spin pumping”
Y. Ando and M. Shiraishi
SPIE2014, San Diego, U.S.A., (Aug. 9-13, 2014)

“Demonstration of spin transport in n-type

Germanium epilayers at room temperature”
S. Dushenko, M. Koike, Y. Ando, M. Myronov
and M. Shiraishi
59th Annual Conference on Magnetism and
Magnetic Materials, Honolulu, Hawaii, Nov. 3 ~
7, 2014, FB-05

“Demonstration of long-range spin transport
in n-type Si at room temperature”
M. Kameno, Y. Ando, T. Shinjo, M. Shiraishi, H.
Koike, T. Sasaki, T. Oikawa and T. Suzuki
59th Annual Conference on Magnetism and
Magnetic Materials, Honolulu, Hawaii, Nov. 3 ~
7, 2014, DB-05

“Investigation of spin drift velocity and the
modulation of spin signals under spin drift in
highly-doped n-type Si”
M. Kameno, Y. Ando, T. Shinjo, M. Shiraishi, H.
Koike, T. Sasaki, T. Oikawa and T. Suzuki
American Physical Society March Meeting 2015,
San Antonio, Texas, March 2-6, 2015,
Q31.00003

"Spin Transport Properties in Nondegenerate
Si at Room Temperature"
T. Tahara, H. Koike, T. Sasaki, Y. Ando, M.
Kameno, Y. Suzuki and M. Shiraishi
American Physical Society March Meeting 2015,
San Antonio, Texas, March 2-6, 2015,
Q31.00002

“Significant enhancement of spin pumping
efficiency from a high quality single crystalline
Fe₃Si film into a silicon channel”
Y. Ando, K. Ichiba, S. Yamada, T. Shinjo, K.
Hamaya, and M. Shiraishi
The 22nd International Colloquium on Magnetic
Films and Surfaces, Cracow, Poland (July 12-17,
2015)

“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”
亀野誠, 安藤裕一郎, 新庄輝也, 白石誠司,
佐々木智生, 及川亨, 鈴木淑男
第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 京都,
2013 年 9 月 16 ~ 20 日, 20a-C15-1

“単結晶 Fe₃Si 薄膜を用いた動力的スピン
注入における巨大信号の検出”
安藤裕一郎, 市場昂基, 山田晋也, 仕幸英治,
浜屋宏平, 新庄輝也, 白石誠司
日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学,
2013 年 9 月 25 ~ 28 日, 26pKF-14

“強磁性 非磁性電極を用いた 2 端子法に
おける高ドーピング n 型 Si 中のスピンドリフト
速度の定量的評価”
亀野誠, 安藤裕一郎, 新庄輝也, 白石誠司,

佐々木智生, 及川亨, 鈴木淑男
日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学,
26aKF-11

Spin injection efficiency from epitaxial Fe₃Si
into Pd
K. Ichiba, Y. Ando, E. Shikoh, T. Shinjo, K.
Hamaya, M. Shiraishi
PASPS18, P21, 大阪大学, 2013 年 12 月 9, 10
日

“IV 族半導体におけるスピン輸送物性”
安藤 裕一郎
第 49 回スピントロニクス専門研究会, 京都
大学, 2014 年 5 月 26 日

“Spin transport in n-type Germanium
epilayers at room temperature”
Sergey Dushenko, Mariko Koike, Yuichiro Ando,
Maksym Myronov, Masashi Shiraishi
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海
道大学, 2014 年 9 月 17 ~ 20 日, 20p-S2-8

“Quantitative investigation of long-range spin
transport in n-type Si at room temperature”
亀野誠, 安藤裕一郎, 新庄輝也, 白石誠司,
小池勇人, 佐々木智生, 及川亨, 鈴木淑男
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海
道大学, 2014 年 9 月 17 ~ 20 日, 17p-S2-13

“Fe₃Si エピタキシャル薄膜から n-Si へ
のスピンポンピング”
安藤 裕一郎, 市場 昂基, 山田 晋也, 新庄 輝
也, 浜屋 宏平, 白石 誠司 平成 26 年度スピ
ン変換年次報告会, No.16, 京都大学, 2015
年 3 月 3, 4 日

“Observation of Joule-heating-induced spin
injection and transport in highly-doped n-type Si”
Makoto Kameno, Hayato Koike, Yuichiro Ando,
Teruya Shinjo, Tomoyuki Sasaki, Yoshishige
Suzuki, Masashi Shiraishi
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海
大学, 12p-D11-15, 2015 年 3 月 12 日

“単結晶 Fe₃Si 薄膜から Si チャネル中への
高効率スピンポンピング”
安藤裕一郎, 市場昂基, 山田晋也, 新庄輝也,
浜屋宏平, 白石誠司
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海
大学, 12p-D11-14, 2015 年 3 月 12 日

“非縮退 Si チャネル中における巨大スピン
蓄積信号の検出”
安藤裕一郎, 小池勇人, 田原貴之, 亀野誠,
佐々木智生, 鈴木義茂, 白石誠司
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海
大学, 12p-D11-13, 2015 年 3 月 12 日

“外部電場によるシリコンスピン

MOSFET 中のスピン輸送の制御”
白石 誠司, 安藤 裕一郎
第 53 回スピントロニクス専門研究会, 中央
大学, 2015 年 3 月 27 日

⑳ “半導体デバイスにおけるスピン輸送”
安藤 裕一郎
第 14 回光科学若手研究会, 京都大学, 2015
年 4 月 18 日

㉑ “シリコンベース・スピントロニクスデ
バイスの将来展望”
安藤 裕一郎, 小池 勇人, 佐々木 智生, 鈴
木 義茂, 白石 誠司
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 シン
ポジウム 10.スピントロニクス・マグネティ
クス
「新規スピントロニクス現象と応用の可能
性」, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 15 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

該当なし

取得状況 (計 0 件)

該当なし

〔その他〕
ホ ム ペ ー ジ URL :
<http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織
(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし