

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2009

課題番号：20760009

研究課題名 (和文) シリコン低次元系を用いた横型スピン伝導デバイスの開発

研究課題名 (英文) Lateral spin transport in silicon-based low-dimensional systems

研究代表者

浜屋 宏平 (HAMAYA KOHEI)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・准教授

研究者番号：90401281

研究成果の概要 (和文)：

今日の半導体エレクトロニクスを支えるシリコンテクノロジーに、電子の持つスピン自由度を導入するために、半導体横型スピン伝導素子を作製するための基礎となる要素技術を検討した。その結果、Si/SiGe 二次元電子系からなる量子ホール素子において、バルク伝導チャンネルにおける特異なスピン依存散乱現象を発見した。また、量子ドットへのスピン注入を念頭に、外部強磁性電極を接合した InAs 量子ドットのスピン伝導現象を調査した。量子ドット中のスピン状態と強磁性電極のスピン状態の競合から、スピンプロケイドと思われる現象を観測する事に成功した。今後、新しい機能を有するエレクトロニクス素子の開発へとつながる物理現象の発見である。

研究成果の概要 (英文)：

I explored basic technologies to combine spintronics with semiconductor low-dimensional lateral devices. For Si/SiGe two-dimensional systems, I found that significant spin-dependent tunneling of electrons between quantum-Hall states at low temperatures.

For spin injection into a semiconductor quantum dot, I fabricate InAs quantum dot/ferromagnet lateral devices. As a result, I observed anomalous current suppression for the two-electron tunneling regime.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：半導体スピントロニクス

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：スピン注入, 量子ホール系, 量子ドット

## 1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスを用いて電子のもつ電荷自由度に加えてスピン自由度を制御する

ことによりこれまでになかった新しい電子デバイスを創製しようという『半導体スピントロニクス』が注目を集めている。特に当該分野

では強磁性半導体の創製やその物性研究と並び、非磁性半導体ヘテロ構造や量子ドットといったナノ構造中のスピンを制御するための要素技術が多数報告されている。次世代のスピントロニクスデバイスの代表例であるスピン電界効果トランジスタ(スピン FET)を実現するためには、少なくとも①強磁性体から非磁性半導体へのスピン注入、②注入されたスピンの電界操作、③操作されたスピン情報の読み出し、という3つの要素技術を全電氣的に単一の素子で実現する必要がある。また、ゲート電圧を印加する関係で、スピン伝導(輸送)は基板やヘテロ接合界面に対して横(平行)方向に実現したい。つまり、素子構造は横型素子が望ましい。ごく最近、ミネソタ大学の P. Crowell 教授らの研究グループは、強磁性金属(Fe)と GaAs との接合からなる横型素子において、半導体へのスピン注入を非局所抵抗測定法によって電氣的に検出することに成功し、マイクロメートルオーダーのマクロな横型半導体素子であっても、スピン蓄積やそのスピン緩和の影響を詳細に調べることが可能になった[Nature Phys. 3, 197 (2007).]。彼らの手法では、スピン注入および検出の効率を向上させるために、Fe/GaAs 界面において GaAs 中の不純物ドーピング濃度を高濃度化し、急峻なショットキー障壁を形成するという工夫が施されているが、スピン伝導の電界制御は未だに達成されていない。ほぼ同時期に申請者らは、単一の自己形成半導体量子ドットを伝導チャンネルとする『強磁性金属(FM)/自己形成半導体[InAs]量子ドット(QD)/FM』横型微小二重トンネル接合を作製することで、明瞭なトンネル磁気抵抗効果の観測[Appl. Phys. Lett. 90, 053108 (2007).]とその明瞭な電界制御[Appl. Phys. Lett. 91, 022107 (2007).]に成功した。これは、上述の Crowell 教授らのバルク半導体へのスピン注入研究とは異なり、半導体量子ドット特有の単電子トランジスタ特性を利用しているが、上記の3つの要素技術を全電氣的に単一の素子で実現したことに相当している。しかし、この自己形成半導体量子ドットを利用した単電子トランジスタでは、試料作製の歩留まりが悪く、試料パラメータ(量子ドットサイズや FM/QD 接合抵抗等)とスピン伝導特性の関連性を議論することが困難であるため、新奇スピンドバイスの動作原理の創製に対して障害となっている。また、今後の高温動作の実現に向けた課題も山積していることから、これまでの量子ドットにおけるスピン伝導に関する蓄積技術をフィードバックした新しい材料系における実現が望まれている。

そこで本研究では、Si や Ge といった IV 族系の半導体に注目する。これらの材料系は、スピン軌道相互作用や超微細相互作用の影響

が小さく、結晶構造の反転対称性が良いため、III-V 族系に比べてスピン緩和の要因が抑制されており、スピン伝導デバイスの高温動作の可能性を秘めている。最近、85~150 K という高温において、Si 中のスピンの長さが 10~350  $\mu\text{m}$  というオーダーでコヒーレントに輸送するという可能性が示されている[Nature 447, 295 (2007); Phys. Rev. Lett. 99, 177209 (2007).]。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、Si や Ge といった IV 族系の半導体をスピン伝導チャンネルとした新しい横型量子スピンドバイス構造を構築し、高温動作可能なスピン制御素子を開発することを目的としている。そのためにまず、シリコン系伝導チャンネルにおけるスピン伝導を探索する。具体的には、(1)シリコン二次元電子系を利用して、量子ホール伝導チャンネル中のスピン伝導特性を理解する。次に、(2)シリコンチャンネルへのスピン注入を実証する。最後に、(3)シリコン量子ドットへのスピン注入を実証する。以上により、シリコン LSI 技術と整合する低次元電子系スピンドバイスの基礎を構築する。

## 3. 研究の方法

(1) Si/SiGe 量子ホール系におけるバルクチャンネル伝導のスピン依存性を調査する為に、トップゲートを有するコルビノ素子を作製した。素子作製プロセスは非常に複雑であるが、概略を述べると、①フォトリソグラフィを用いたチャンネル構造微細加工、②イオン注入を用いたオーミックコンタクト作製、③トップゲート電極の作製、となっている。電気伝導測定は、低温 50 mK および強磁場(9T マグネット利用)中で行った。

(2) シリコンチャンネルへのスピン注入を目指し、シリコン上に強磁性シリサイドを作製し、非局所電圧測定法を利用してスピン蓄積効果の検出を試みた。(1)同様に試料作製プロセスの最適化を行いながら、数百マイクロメートルの4端子横型伝導素子を作製した。伝導測定は、低温 4~200 K の温度領域で DC 測定を行った。

(3) 研究機関の異動のため、シリコン量子ドット構造の作製が研究設備の問題で困難である事が判明したため、これまで同様に自己形成型 InAs 量子ドットを利用することで、横型構造における量子ドットへのスピン注入効果を検討した。電気伝導測定は、低温 50 mK および強磁場(9T マグネット利用)中で行った。

#### 4. 研究成果

(1) トップゲート構造を有する Si/SiGe 量子ホール系バルクバルク素子に対して、ゲート電圧と外部印加磁場を制御する事で、量子ホールバルク-バルクチャンネル間伝導のスピ状態を  $(\uparrow, \downarrow) \leftrightarrow (\uparrow, \uparrow)$  と制御することのできる素子を作製することに成功した。つまり、Si/SiGe 量子ホール系では、ランダウ準位交差を利用することで、チャンネルのスピ状態を  $(\uparrow, \downarrow)$  から  $(\uparrow, \uparrow)$  へと遷移することができる。  $(\uparrow, \downarrow)$  でバルクチャンネル間伝導を測定すると、I-V 特性はバイアス極性に対して明瞭な非対称性を示した(ダイオードライクな形状)。これに対して、  $(\uparrow, \uparrow)$  状態でもバルクチャンネル間伝導を測定すると、I-V 特性はバイアス極性に対して対称性の良い形状を示した。これは、量子ホール系バルク-バルク間伝導において、チャンネル間トンネル確率に明瞭なスピ依存性がある事を示唆している。これらの結果は、これまで我々が明らかにしてきた、量子ホール系エッジ-エッジ間散乱、およびエッジ-バルク間散乱において観測されるスピ依存性に類似したものである。本研究成果は、日本物理学会で発表され、現在、投稿論文を執筆中である。

(2) MBE 法を用いて、シリコン基板上に強磁性シリサイドを形成し、良好なショットキー接合界面を形成した。この界面を含むショットキーダイオードを作製し、界面付近に高濃度ドーピングを行った場合と行っていない場合の界面伝導特性を評価した。接合界面の I-V 特性にはドーピング前後で明瞭な差異がみられ、その温度依存性を詳細に評価したところ、ドーピング前の界面では熱電子放出的な伝導が支配的であるのに対し、ドーピング後の界面ではトンネル伝導が支配的であることが示唆された。よって、シリコンに対して高効率なスピ注入が期待される。

非局所伝導測定のための 4 端子素子を作製し、低温 ( $\sim 150\text{K}$  以下) で磁場依存性を測定した。シリコン中のスピ蓄積効果を反映した明瞭なヒステリシス曲線を観測し、シリコンチャンネルにおけるスピ伝導を検出する事に成功したといえる。本研究成果は、日本磁気学会で発表され、米国科学誌 Applied Physics Letters に掲載された。

(3) 自己形成 InAs 量子ドット構造を利用することで強磁性電極/量子ドット/非磁性電極からなるナノ接合を作製することに成功した[図 1(a)]。これは、これまで作製してきた『量子ドットスピバルブ』とは異なり、『量子ドットダイオード』と呼ばれる構造である。ゲート電圧を制御して量子ドット中の電子数を制御すると、ドット内を占有する電子のスピ状態を制御することができる。この効

果を利用して、量子ドット内の基底状態にあるスピ状態を電子数 2 の  $(\uparrow, \downarrow)$  状態に固定しながら、強磁性電極からスピ偏極した電子の注入を試みた。その結果、強磁性電極から量子ドットへの単電子伝導が妨げる効果が見出された。これは、結合型二重量子ドットで大野らが見出した『スピブロックド』に類似する効果であり、単一量子ドット系において世界で初めて観測した現象である[図 1(b), (c)]。用いた量子ドットが InAs という III-V 族半導体であったため、残念ながら、この現象は 1 K 以下の極低温で観測されるに留まったが、本研究の構想にあるシリコン量子ドット系を利用する事で、スピ緩和の影響を最小化し、より高温で動作する量子スピ伝導素子を実現するものと期待される。本研究成果は、日本物理学会で発表され、米国科学誌 Physical Review Letters に掲載された。

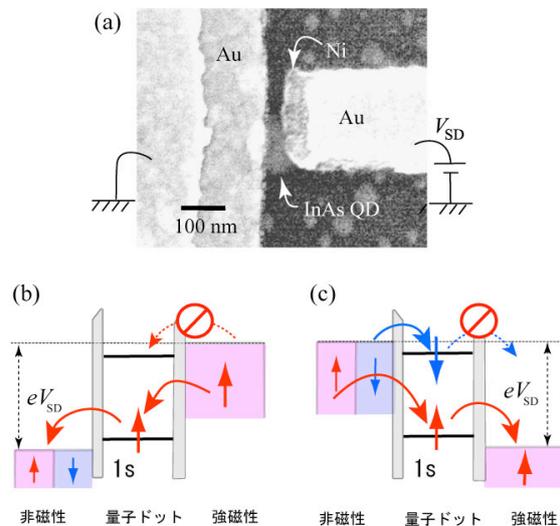


図 1. (a) 作製した非磁性電極/量子ドット/強磁性電極の電子顕微鏡写真。(b) (c) 観測されたスピブロックド現象のメカニズムの模式図。

#### 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 4 件)

- ① K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida, Spin-Related Current Suppression in a Semiconductor-Quantum-Dot Spin-Diode Structure, Physical Review Letters, 査読有, vol. 102, 2009, 182105-1-4.

- ②. Y. Ando, K. Hamaya, K. Kasahara, Y. Kishi, K. Ueda, K. Sawano, T. Sadoh and M. Miyao, Electrical injection and detection of spin-polarized electrons in silicon through an Fe<sub>3</sub>Si/Si Schottky tunnel barrier, Applied Physics Letters, 査読有, vol. 94, 2009, 182105-1~3.
- ③. K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida, “Tunneling magnetoresistance effect in a few-electron quantum-dot spin valve”, Applied Physics Letters, 査読有, vol. 93, 2008, 222107-1~3.
- ④. K. Sugihara, K. Hamaya, M. Kawamura, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Machida, Valley-splitting edge-channel transport in a Si/SiGe quantum Hall system, Physica E, 査読有, vol. 40, 2008, 1523~1525.

[学会発表] (計4件)

- ①. 浜屋宏平, 柴田憲治, 平川一彦, 石田悟己, 荒川泰彦, 町田友樹, 強磁性電極/半導体量子ドット/非磁性電極ナノ構造におけるスピンプロケイド効, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009年9月25日, 熊本大学.
- ②. 安藤裕一郎, 笠原健司, 榎本雄志, 浜屋宏平, 木村崇, 澤野憲太郎, 宮尾正信, Fe<sub>3</sub>Si/Si ショットキー障壁を介したスピン注入の電氣的検出, 第33回日本磁気学会学術講演会, 2009年9月15日, 長崎大学.
- ③. K. Hamaya, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, and T. Machida, Electron transport in a Semiconductor-Quantum-Dot Spin Diode, EP2DS-18/MSS-14, 27 July 2009, Kobe.
- ④. 杉原加織, 浜屋宏平, 澤野憲太郎, 白木靖寛, 川村稔, 町田友樹, Si/SiGe 量子ホールダイオードにおけるトンネル電流のスピン依存性, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 近畿大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浜屋 宏平 (HAMAYA KOHEI)

研究者番号 : 90401281