

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17681

研究課題名(和文) InAs量子ドットにおけるスピン検出と電子スピン緩和過程の制御

研究課題名(英文) Spin detection and control of spin relaxation process in InAs quantum dots

研究代表者

木山 治樹 (Kiyama, Haruki)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：80749515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、InAs自己形成量子ドットにおける電荷・スピン検出に取り組んだ。まず電荷検出に関しては、検出対象の量子ドット近傍の別の量子ドットを検出器とすることで電荷検出を示唆する結果が得られた。また、量子ドットの静電環境感度向上のために電極形状を改良し、感度を2.5倍以上改善した。また優れたスピンコヒーレンスが期待されるSiGe量子ドットにも着目した。単一正孔トランジスタを作製し、近藤効果を観測した。

研究成果の概要(英文)：We worked on the detection of electron charge and spin in InAs self-assembled quantum dots. We used a quantum dot as a charge sensor to detect single-electron charging events in another adjacent dot. In addition, we improved the sensitivity of the quantum dot to electrostatic environment by narrowing the electrodes. We also worked on SiGe self-assembled quantum dots, which may exhibit excellent hole-spin coherence. We fabricated single-hole transistor devices, and observed signatures of Kondo effect.

研究分野：半導体低次元物性

キーワード：量子ドット 電荷検出 スピン検出

1. 研究開始当初の背景

1990年代以降、将来の情報処理技術である量子情報処理の実現に向けて、様々な物理系が量子ビットの候補として研究されている。半導体量子ドット中の電子スピン量子ビットは、特に GaAs/AlGaAs ヘテロ界面の二次元電子面に作られる横型量子ドットにおいてその制御性や集積性が注目され、すでに一ビット量子ゲートや単一電子スピン状態の検出などの要素技術が実現されている。

一方、InAs は GaAs に比べ大きなスピン軌道相互作用を示し、それを利用した高速量子ゲートの実現が期待されている。しかし、InAs をベースとした高品質二次元電子面の作製は未だ技術的に困難であり、主に GaAs ナノワイヤを用いた量子ドットについて研究が行われてきた。自己形成量子ドットは電極との結合などの制御性は横型量子ドットに劣るものの、電気伝導特性と光学特性両方の面で研究が進んでおり、量子計算だけでなく量子通信や光子・電子スピン複合系への応用も期待される。また、超伝導体や強磁性体など種々の物質との接合が可能であり、基礎科学的な関心も高い。

2. 研究の目的

本研究では、InAs 自己形成量子ドットを用いた電子スピン量子ビット基盤技術として、電荷検出およびスピン検出を行う。従来の自己形成量子ドットだけでなく、InAs 薄膜を微細加工して量子ドットを作製し、電荷・スピン検出を行う。

InAs の特徴である強いスピン軌道相互作用は、スピン状態間を強く混成するため、スピン緩和時間は GaAs に比べて短くなることが予想される。しかし、InAs 量子ドットのスピン緩和時間についての詳細な研究報告例は無い。そこで本研究では、InAs 量子ドットのスピン緩和時間の評価を第二の目的とする。

また、InAs 自己形成量子ドットでは、磁場方向やサイドゲート電圧によるスピン軌道相互作用の制御が報告されており [S. Takahashi *et al.*, PRL (2010); Y. Kanai *et al.*, Nat. Nanotech. (2011)], それによるスピン緩和時間の制御が期待される。特に、長いスピン緩和時間が期待される弱いスピン軌道相互作用と、高速スピン操作が期待される強いスピン軌道相互作用の電気的な切り替えはスピン量子ビットへの応用上重要である。本研究では、スピン緩和時間の磁場方向異方性やゲート電圧制御を第三の目的とする。

3. 研究の方法

(1) ソースドレイン電極細線化による静電遮蔽効果の低減

研究開始当初はすぐに電荷検出に取り組む予定であったが、InAs 自己形成量子ドット

の電荷検出においては、ソースドレイン電極による静電遮蔽が電荷検出信号を著しく低減させることが予想される。そこで本研究ではソースドレイン電極幅を細くすることによる、量子ドット電気伝導度の周囲静電環境に対する感度向上を着想した。これはサイドゲートによるスピン軌道相互作用やトンネル結合の制御に関しても有用な技術である。

量子ドット電気伝導度の静電環境応答に対するソースドレイン電極幅の影響を調べるために、電極幅が従来のものと同程度の 200nm と、40nm と細くした 2 種類の試料を作製した (図 1)。作製方法には、電子線リソグラフィや真空蒸着等の従来の半導体微細加工技術を用いた。電極幅 40 nm の試料[図 1(b)]では電荷検出のために 2 つの量子ドットに電極を作製しているが、一方のドットのみを使用した。また、サイドゲートと独立に電気化学ポテンシャルを制御するために、基板表面から 400 nm の深さに位置する Si:GaAs 層をバックゲートとして用いた。

測定はヘリウム 4 冷凍機を用いて温度 1.5 ~ 2 K で行った。量子ドットの静電環境に対する感度として、サイドゲートによる電気化学ポテンシャル変調効率を評価した。また、異なるサイドゲート電圧において、バックゲート掃引によるクーロンピーク幅からトンネル結合を評価し、サイドゲートによるトンネル結合制御を行った。

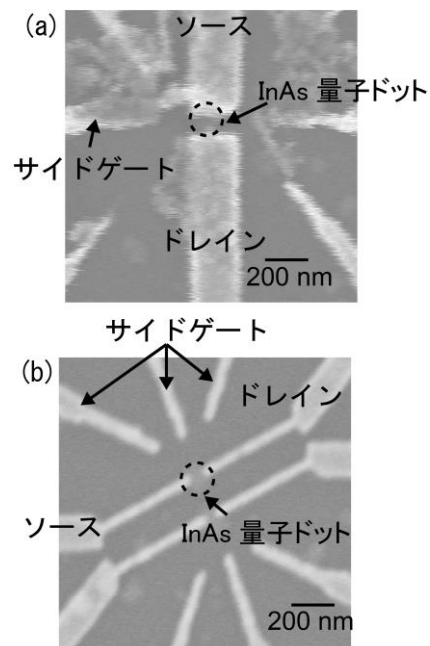


図 1 ソースドレイン電極幅が(a)200 nm と (b)40 nm の InAs 自己形成量子ドット単一電子トランジスタの電子顕微鏡写真。

(2) 並列二重 InAs 自己形成量子ドットトランジスタにおける電荷検出

試料は並列二重 InAs 自己形成量子ドットトランジスタを作製した。直径が 80-100 nm、

ドット中心間距離が 150 nm 程度の量子ドット対を電子顕微鏡観測で選び出し、方法(1)と同様に従来の半導体微細加工技術を用いて電極を作製した。

測定はヘリウム4冷凍機を用いて温度 1.5 ~ 2 K で行った。各ドット電流を同時に測定し、一方のドットにおける電子数変化時の他方のドット電流変化の検出を試みた。

(3) SiGe 自己形成量子ドット単一正孔トランジスタの作製と近藤効果の観測

当初の計画には無かったが、平成28年度より SiGe 自己形成量子ドットを用いた単一正孔トランジスタの作製とスピン物性測定に取り組んだ。この系はキャリアが正孔であるため、InAs 中の電子同様に強いスピン軌道相互作用が期待され、また波動関数の対称性より超微細相互作用が抑制され、長いコヒーレンス時間が期待される。

InAs 量子ドットと同様に単一正孔トランジスタを作製した(図2)。電極の材料には、先行研究[G. Katsaros *et al.*, Nat. Nanotech. (2010)]と同様にアルミニウムを用いた。また、P ドープバンド層をバックゲートとして用いた。測定はヘリウム3冷凍機を用いて温度 0.3K で行った。

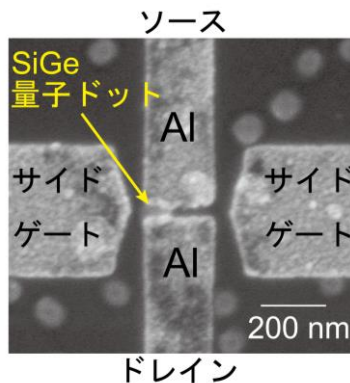


図2 SiGe 自己形成量子ドット単一正孔トランジスタの電子顕微鏡写真。

4. 研究成果

(1) ソースドレイン電極細線化による静電遮蔽効果の低減

ソースドレイン電極幅の異なる2種類の試料において、量子ドット伝導度のサイドゲート電圧およびソースドレイン電圧依存性を測定し(図3)、クーロンダイヤモンドの大きさからサイドゲートによる電気化学ポテンシャル変調効率を求めた。その結果、電極幅 40 nm の試料では、電極幅 200 nm の試料に比べて4~8倍高い変調効率を得られた。

しかし異なる試料においては、量子ドットのサイズや電子数が異なるため、上記の効率向上には電極幅以外の個体差の影響が含まれると考えられる。実際に、同一の電極幅の

試料においてもサイドゲート効率およびバックゲート効率に最大で2倍程度のばらつきが見られた。

そこで、電極細線化の効果のみを検討するためにサイドゲート効率をバックゲート効率で規格化し比較した。電極細線化はバックゲート効率もある程度向上させることが予想されるため、この規格化によりサイドゲート効率上昇率の下限が得られる。その結果、電極細線化によりサイドゲート効率が約2倍向上していることが分かった。遮蔽効果を考慮した数値シミュレーションによると、電極細線化よりサイドゲート効率が約4倍、バックゲート効率が約2倍の向上が期待され、整合性のある実験結果が得られたといえる。

次に、高いサイドゲート効率の応用として、トンネル結合の制御を行った。トンネル結合はクーロンピークの幅を理論曲線でフィッティングを行うことにより見積もった。図4にトンネル結合のサイドゲート電圧依存性を示す。トンネル結合は特定のサイドゲート電圧で最大値を示し、2倍程度の変調に成功した。トンネル結合変調の原理は、ドット内で波動関数位置がシフトし、電極との重なりが変化するためであり、トンネル結合最大のゲート電圧で重なりが最大となったと考えられる。

今後、スピン軌道相互作用の変調効率の評価や、更なる効率向上に向けた高誘電率絶縁膜の作製などの進展が期待される。

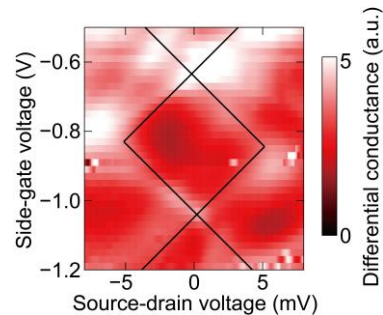


図3 InAs 自己形成量子ドット微分電気伝導度のソースドレイン電圧およびサイドゲート電圧依存性。

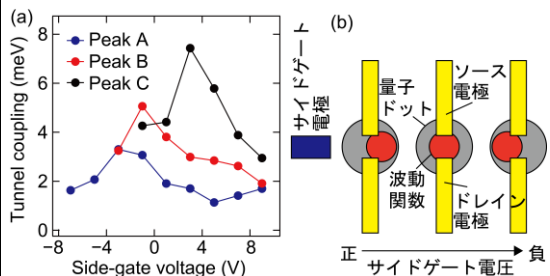


図4 (a) 電極幅 40nm の試料におけるトンネル結合のサイドゲート電圧依存性。(b) トンネル結合変調メカニズムの模式図。

(2) 並列二重 InAs 自己形成量子ドットトランジスタにおける電荷検出

隣接した二つの量子ドット(ドット1、ドット2)について、ドット電流のサイドゲート電圧依存性を図5に示す。薄青色の領域ではドット2の電流がピークを示し、同時にドット1の電流に小さなdipが現れている。これはドット1を検出計としたドット2の電荷検出を示唆している。しかし、電荷ノイズのためにドットの動作が不安定であり、また信号強度が小さいため、高誘電率絶縁膜の作製などによる改善が必要である。

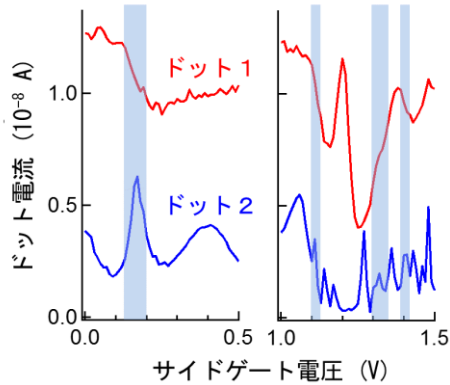


図5 並列量子ドット試料におけるドット電流のサイドゲート電圧依存性。

(3) SiGe 自己形成量子ドット単一正孔トランジスタの作製と近藤効果の観測

温度 2 K、磁場 2 T における SiGe 自己形成量子ドット微分電気伝導度のバックゲート電圧依存性を図 6(a)に、バックゲート電圧とソースドレイン電圧両方に対する依存性を図 6(b)に示す。図 6(a)ではクーロン振動、図 6 (b)ではクーロンダイヤモンドと呼ばれ

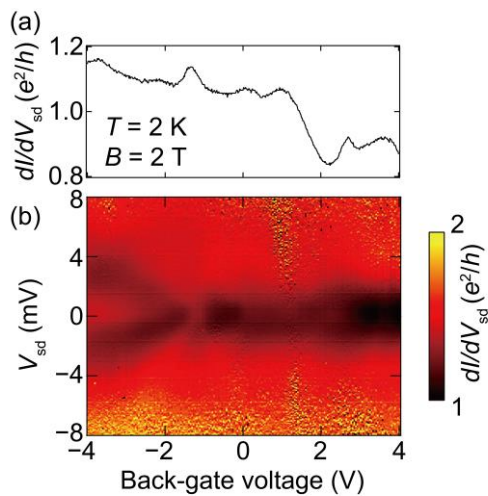


図6 (a) 温度 2 K、磁場 2 T における SiGe 自己形成量子ドット微分電気伝導度のバックゲート電圧依存性。(b) ドット微分電気伝導度のバックゲート電圧-ソースドレイン電圧依存性。

る量子ドットに特徴的な電気伝導を観測し、単一正孔トランジスタとしての動作を確認した。

またバックゲート電圧が $-4 \sim -2$ V の領域で、ソースドレイン電圧 0 mV に微分伝導度のピーク(ゼロバイアスピーク)が観測された。これは量子ドットの近藤効果の特徴の一つである。図 7(a)は温度 $0.4 \sim 2.8$ K における微分伝導度のソースドレイン電圧依存性であり、温度が上昇するにつれてゼロバイアスピークの抑制されている。図 7(b)はゼロバイアスピーク伝導度の温度依存性を示しており、高温側で近藤効果に特徴的な対数関数的減衰が観測された。また、図 7(c)は磁場 $2 \sim 6$ T における微分伝導度のソースドレイン電圧依存性であり、高磁場になるにつれ、ゼロバイアスピークが分裂している。この分裂ピークは非弾性コトンネリングによるものであり、量子ドット中の単一正孔スピンのゼーマン分裂を反映している。分裂幅から見積もられた正孔 g 因子は $g = 2.03$ であり、先行研究 [G. Katsaros *et al.*, Nat. Nanotech. (2010)] と比べて妥当な値が得られた。今後、正孔の近藤効果についてより詳細な理論的考察を進める予定である。

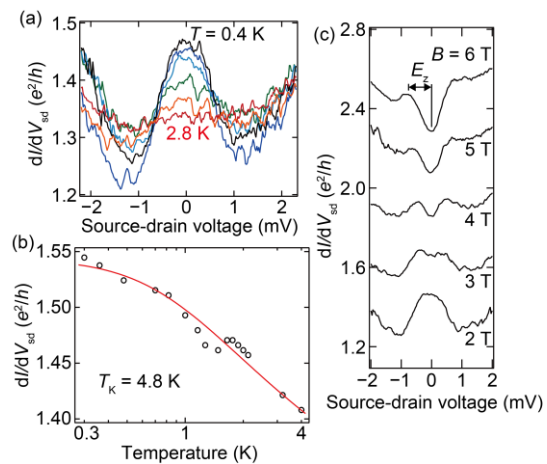


図7 (a)磁場 2 T、バックゲート電圧 -4 V、における量子ドット微分電気伝導度のソースドレイン電圧依存性。緑色は温度 0.4 K、0.5 K、1.0 K、1.6 K、2.8 K を表す。(b)ソースドレイン電圧 0 V における量子ドット微分電気伝導度の温度依存性。(c)温度 0.4 K、磁場 $2 \sim 6$ T における量子ドット微分電気伝導度のソースドレイン電圧依存性。

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 Haruki Kiyama, Takashi Nakajima, Soichiro Teraoka, Akira Oiwa, and Seigo Tarucha, "Single-Shot Ternary Readout of

Two-Electron Spin States in a Quantum Dot Using Spin Filtering by Quantum Hall Edge States”,
Physical Review Letters **117**, 236802 (2016).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.236802
査読有り

- ② Haruki Kiyama, Takashi Nakajima, Soichiro Teraoka, Akira Oiwa, and Seigo Tarucha,
“Spin-dependent current through a quantum dot from spin-polarized nonequilibrium quantum Hall edge channels”,
Physical Review B **91**, 155302 (2015).
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.155302
査読有り

[学会発表] (計 19 件)

- ① 木山治樹、中島峻、寺岡総一郎、大岩頭、樽茶清悟、
「量子ホールエッジ状態と結合した量子ドットにおける二電子スピン単発三値読み出し」、
日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)、2017 年 3 月 17 日

- ② Haruki Kiyama, Takashi Hirayama, Ryoki Shikishima, Sadashige Matsuo, Shoji Baba, Naomi Nagai, Kazuhiko Hirakawa, Seigo Tarucha, and Akira Oiwa,
“Single-electron charge sensing in InAs self-assembled quantum dots”,
9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, 神戸コンベンションセンター (兵庫県神戸市)、2016 年 8 月 8 日

- ③ Haruki Kiyama, Takashi Nakajima, Soichiro Teraoka, Akira Oiwa, and Seigo Tarucha,
“Single-shot ternary of electron spin states in a quantum dot coupled to quantum Hall edge states”,
31th International Conference on Physics of Semiconductors、北京 (中国)、2016 年 8 月 2 日

- ④ Haruki Kiyama, Ryoki Shikishima, Shoji Baba, Takashi Hirayama, Naomi Nagai, Kazuhiko Hirakawa, Seigo Tarucha, and Akira Oiwa,
“Effect of electrode-geometries on the transport properties of InAs self-assembled quantum dots”,
International Symposium on Nanoscale

Transport and Nanotechnology、NTT 物性科学基礎研究所 (神奈川県厚木市)、
2015 年 11 月 17 日

- ⑤ Ryoki Shikishima, Haruki Kiyama, Shoji Baba, Takashi Hirayama, Naomi Nagai, Kazuhiko Hirakawa, Seigo Tarucha, and Akira Oiwa,
“Transport properties of InAs self-assembled quantum dots with different electrode geometries”,
17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures、仙台国際センター (宮城県仙台市)、2015 年 7 月 28 日

[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

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qs/e/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木山 治樹 (KIYAMA Haruki)
大阪大学・産業科学研究所・助教
研究者番号：80749515