

令和 3 年 4 月 7 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02732

研究課題名（和文）テラヘルツ帯における単一電荷・スピン・フォノンの動力学制御による機能性の探索

研究課題名（英文）Control of single electron charge-spin-phonon dynamics in the terahertz frequency range

研究代表者

柴田 憲治（Shibata, Kenji）

東北工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00436578

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：単一の自己組織化量子ドットを用いた量子情報処理デバイスにおいて、1つの電子やスピン、光子に情報機能を持たせるための研究をおこなった。特に本研究では、テラヘルツ電磁波を用いた単一電荷やスピン状態の動的な制御による新規物性の開拓と情報機能の実現に関する研究を推進するための研究を実施した。テラヘルツ電磁波による単一スピンの高速回転を実現するために、強いスピン軌道相互作用を有するInAsやInSb、GaSbなどのIII-V族化合物半導体を用いた単一量子ドットトランジスタの作製に関する研究を行うと同時に、その量子状態の検出のために用いる高感度電荷検出器の実現に関する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一の自己組織化量子ドットを用いた量子情報処理デバイスにおいて、1つの電子やスピン、光子に情報機能を持たせるための研究をおこなった。特に、テラヘルツ光による単一スピンの高速回転を実現するために、強いスピン軌道相互作用を有するInAsやInSb、GaSbなどの半導体を用いた単一量子ドットトランジスタの作製に関する研究を行うと同時に、その量子状態の検出のために用いる高感度電荷検出器の実現に関する研究を行った。本研究の成果は、テラヘルツ光による高速な単一電荷・スピン・フォノンの制御とそれによる情報機能の創製を行う試みであり、未開拓の周波数帯であるテラヘルツ帯での量子情報処理への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Electrical manipulation and read-out of quantum states in zero-dimensional quantum dots (QDs) by nanogap metal electrodes is expected to bring about innovation in quantum information processing. In this study, we fabricated single QD transistors for the manipulation of single spin states in the terahertz frequency range. Narrow gap III-V compound semiconductors, such as InAs, InSb, and GaSb are used as the QD material in order to utilize the strong spin-orbit interaction in them. We also demonstrated the electrical modulation of conductance in the metal quantum point contacts for the electrical readout of the quantum states in the fabricated QD transistors. These works are opening a way for novel quantum information applications on QD systems.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：量子ドット トランジスタ テラヘルツ

### 1. 研究開始当初の背景

「人工原子」とも呼ぶべき自己組織化量子ドット (QD) は、これまで QD レーザ、光増幅器など、QD アンサンブルとしての応用が重点的に研究されてきたが、近年、量子情報処理技術への関心の高まりとともに、単一 QD 内の電子状態や物性を巧みに利用した単一電子素子や、単一光子発生素子、単一光子検出素子、量子ビットなどが注目を集めている。これら量子情報処理デバイスは、1つの電子や光子に情報機能を持たせるため、高機能であるだけでなく、超低消費電力エレクトロニクスという観点から、グリーンテクノロジーの有望な技術と言われ、近年盛んに研究が行われるようになった。

本研究で用いる単一の 10 nm 級自己組織化 QD を活性層とするトランジスタでは、QD の小さなサイズを反映して、系のエネルギースケールが数十 meV となり、テラヘルツ (THz) 帯の光子のエネルギーに相当することから、THz 帯での単一電子・スピン状態の動的制御による機能性素子の実現が期待される。更に、この系では s-p 軌道間の軌道量子化エネルギー間隔が縦光学 (LO) フォノンのエネルギーと同程度となるため、単一電子はフォノンとも強く相互作用し、両者が複合化したポーラロン状態を形成することも理論的に予言されており【Inoshita, PRB (1997)など】、そのダイナミクスの解明は応用のみならず、新規物性の開拓の観点からも重要である。

これまで研究代表者は、極微ギャップを有する金属電極により単一自己組織化 QD にアクセスし (図 1)、その電子状態の制御と読み出しを電気的に行う技術の開拓と新規物性の解明に従事してきた。その結果、本研究の基礎となる以下の 2 点の技術的なブレイクスルーを実現した。

- (1) イオン液体をゲート絶縁膜とする新しいゲート変調手法を開発し、素子の伝導特性や電子状態を大幅に電界変調(最大で従来の 100 倍)することを可能にした【Shibata, Nature Communications 2013】。
- (2) 素子に THz 帯域用のアンテナと Si レンズを実装させることで、THz 波と単一 QD 中の電子との相互作用を、従来にないほど強くする手法を開発し、THz 光による単一 QD トランジスタ素子の伝導特性の制御【Shibata, PRL2012】や、世界初の単一 QD の THz 分光【Zhang, Shibata, Nano Lett. 2015, PRB 2016 など】に成功した。

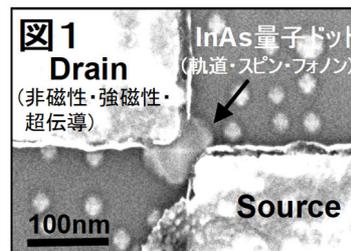
### 2. 研究の目的

本研究では、これまでに培った 10 nm 級 QD のトランジスタへの応用技術に基礎を置き、単一電子・スピン状態とそのダイナミクスがクーロン相互作用や電子スピン相互作用、THz 電磁波、フォノンなどを用いて多彩に制御できることを実証するとともに、新しい素子への応用を探索することを目的としている。特に本応募課題では、テラヘルツ帯で誘起される現象に焦点を絞り、THz 電磁波や LO フォノン (InAs 量子ドットでは~30 meV, 7.5 THz に存在) を単一の電子と強く相互作用させることで単一電子系のダイナミクスをコヒーレントに制御し、それによる機能性の付与を実現するための要素技術を開拓した。具体的には、以下の 2 点に関する研究を遂行した。

- (1) テラヘルツ光を用いた単一電子・スピン状態の動的制御による機能性の実現
- (2) 単一電子-LO フォノン間の強い相互作用の誘起による電子の伝導ダイナミクスの制御

### 3. 研究の方法

研究は、以下のような実験的手法によって行われた。まず、分子線エピタキシーを用いて、GaAs 基板表面に InAs や InSb 量子ドットの結晶成長を行った。それらの量子ドット 1 個に対して、電子ビームリソグラフィを駆使して、ナノギャップを有する極微細金属電極を形成し、図 1 のような構造を作製した。更に、半導体基板をゲートとして用いることで、素子はトランジスタ構造を有する。この試料に対して、低温・強磁場環境下での伝導特性評価を行うことで、その電子状態を反映した特性を観測し、議論を行った。特に本研究では、量子ドットの材料として、これまで用いてきて電子状態の制御性に限界を感じていた InAs に代わり、InSb や GaSb を活性層として用いる研究を行うことで、目的の達成に向けた技術の底上げを図る取り組みを行った。InAs と同等かそれ以上に強いスピン軌道相互作用を示す InSb や GaSb を用いることで、THz 光によるスピンの高速制御が可能となると考えられる。また、InSb では電子の g 因子が軌道に依存して非常に大きな値を取ることが知られていることから、量子準位間隔を磁場によって制御し易い利点がある。同様の理由から、これまで先行研究がほとんど無い GaSb ナノ構造についても、その電子、スピン物性を評価する研究も実施した。



### 4. 研究成果

本研究では、自己組織化 QD の電子状態の制御に関する研究と、新規材料による QD 構造の作製に向けた研究、ナノ構造における電子状態の読み取りに関する実験研究に取り組み、以下の

ような成果を上げた。

(1) GaAs 基板表面に分子線エピタキシーにより自己組織化 InSb QD を結晶成長し、この QD 1 個を活性層とするトランジスタ構造を作製した。4 K の低温環境における伝導特性評価においては、クーロンブロッケードと量子準位を介した電気伝導を示す階段状の電流電圧特性が観測され、QD を介した単一電子伝導が観測されていることが分かった。サイドゲートからの電界により、僅かに伝導特性が変化し、クーロンダイヤモンドの一部を観測することに成功した。その結果、QD の軌道量子化エネルギー間隔は 20 meV と THz 帯のエネルギーに相当することが確認できた。更に、観測された励起準位の磁場依存性の測定から、電子の g 因子が 20 程度と非常に大きな値を示すことが示唆された (図 2)。本研究により、10nm 級の自己組織化 InSb QD を介した単一電子伝導を初めて観測することに成功した。サイドゲートでは電子状態のゲート変調が十分ではないことから、現在、バックゲートやトップゲートを用いて、より大きく電子状態を変調する手法を開発中である。

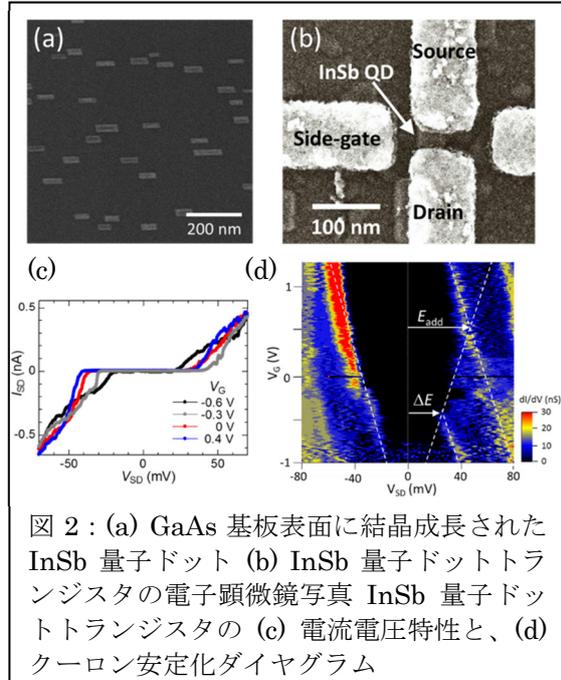


図 2 : (a) GaAs 基板表面に結晶成長された InSb 量子ドット (b) InSb 量子ドットトランジスタの電子顕微鏡写真 (c) InSb 量子ドットトランジスタの (c) 電流電圧特性と、(d) クーロン安定化ダイアグラム

(2) III-V 族化合物半導体の中でも最もスピン軌道相互作用が強い材料の一つとして知られる GaSb を対象として、将来的な量子ドットの形成とその量子情報処理デバイスへの応用を目指して、GaSb 量子井戸における二次元ホール伝導の評価に関する研究を行った。GaSb では、これまで結晶中の不純物量の制御が難しく、高品質結晶の成長が困難だったために、低次元構造における伝導特性の評価がほとんど行われていなかった。本研究では、分子線エピタキシーによって不純物量が非常に少ないノンドープの GaSb 量子井戸を結晶成長し、電界効果によってホールを誘起する手法で、ノンドープ GaSb 量子井戸における二次元ホール系の伝導特性を世界で初めて評価した。不純物の導入を行わないことで高い移動度が実現し、この系で初めて量子ホール効果を観測した。さらに、シュブニコフ振動の温度依存性からホールの有効質量を評価した。最後に、ゼロ磁場付近の磁気抵抗の振る舞いに弱反局在効果を観測し、そこからホールのコヒーレンス長とスピン軌道相互作用長を評価した (図 3、K. Shibata Phys. Rev. Research (2020) など)。

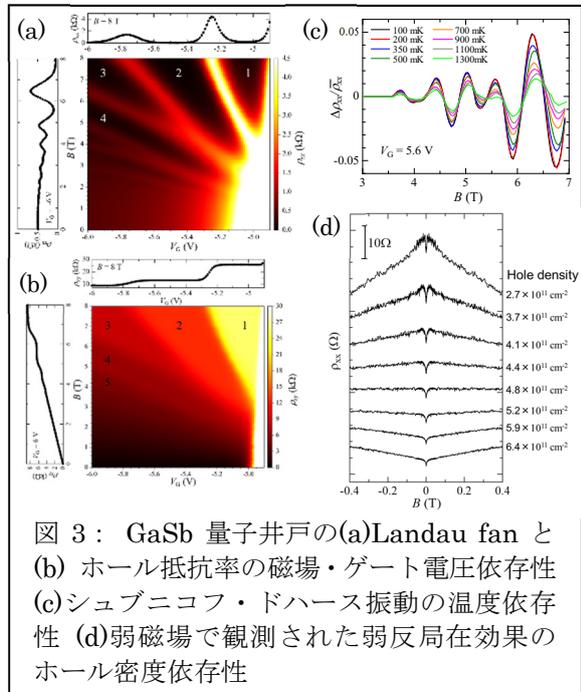


図 3 : GaSb 量子井戸の (a) Landau fan と (b) ホール抵抗率の磁場・ゲート電圧依存性 (c) シュブニコフ・ドハース振動の温度依存性 (d) 弱磁場で観測された弱反局在効果のホール密度依存性

(3) 量子ドットトランジスタにおける電子状態の読み取りのための電荷検出器の開発に関する研究を行った。具体的には、金属をチャネル材料として用いた量子ポイントコンタクトを作製し、その伝導度のゲート電界による変調を可能とすることで、(従来の半導体量子ポイントコンタクトを用いた電荷検出器が 4K 程度の極低温環境でしか動作しなかったのに対して、) 室温動作可能な高感度電荷検出器の作製を目指した。金属ではキャリア数が多く、電界が表面で遮蔽されてしまうことから、チャネルサイズを 1nm 程度まで微細化し、そこに非常に強い電界を加えることで金属量子ポイントコンタクトの電界変調に成功した。(図 4、K. Shibata et al., Appl. Phys. Lett. (2017) など)

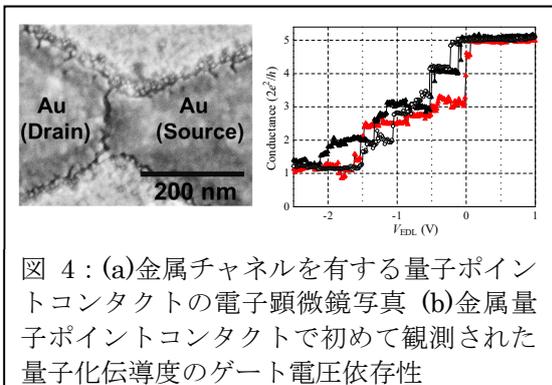


図 4 : (a) 金属チャネルを有する量子ポイントコンタクトの電子顕微鏡写真 (b) 金属量子ポイントコンタクトで初めて観測された量子化伝導度のゲート電圧依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shibata Kenji, Karalic Matija, Mittag Christopher, Tschirky Thomas, Reichl Christian, Ito Hiromu, Hashimoto Katsushi, Tomimatsu Toru, Hirayama Yoshiro, Wegscheider Werner, Ihn Thomas, Ensslin Klaus	4. 巻 2
2. 論文標題 Magnetotransport of electrically induced two-dimensional hole gases in undoped GaSb quantum wells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033383-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin	4. 巻 114
2. 論文標題 Electric-field-induced two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum wells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 232102-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5093133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Karalic Matija, Mittag Christopher, Hug Michael, Tschirky Thomas, Wegscheider Werner, Ensslin Klaus, Ihn Thomas, Shibata Kenji, Winkler R.	4. 巻 99
2. 論文標題 Gate-tunable electronic transport in p-type GaSb quantum wells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115435-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.115435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shibata K., Yoshida K., Daiguji K., Sato H., Ii T., Hirakawa K.	4. 巻 111
2. 論文標題 Electric-field control of conductance in metal quantum point contacts by electric-double-layer gating	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 153104 ~ 153104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4995318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計20件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2. 発表標題 Electric-field-induced two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum wells
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺碧、夏目大成、柴田憲治
2. 発表標題 トップゲート構造を有する単一InSb量子ドットトランジスタの作製と評価
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木尚人、斎藤大我、柴田憲治
2. 発表標題 金属ナノ接合の微細化と伝導度のゲート変調
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木和希、細川玲央、柴田憲治
2. 発表標題 C60フラレンを用いた単一分子トランジスタの作製
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田憲治、佐々木尚人、斉藤大我、大塚朋廣、平川一彦
2. 発表標題 電荷検出器への応用に向けた金属ナノ接合の微細化と伝導特性制御
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2. 発表標題 Electric-field-induced two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum wells
3. 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (Edison 21) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田憲治, M. Karalic, C. Mittag, M. Hug, T. Tschirky, C. Reichl, 伊藤熙, 橋本克之, 富松透, 平山祥郎, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2. 発表標題 ノンドーパGaSb量子井戸における2次元ホール系の磁場中輸送特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, H. Ito, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2. 発表標題 Two-dimensional hole transport in undoped GaSb quantum well
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (HQS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野拓夢、小川善嵩、柴田憲治
2. 発表標題 単一InSb量子ドットトランジスタの作製と伝導特性評価
3. 学会等名 令和2年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗村滉、木村冬威、柴田憲治
2. 発表標題 強磁性Niナノ接合の微細化とトンネル磁気抵抗の観測
3. 学会等名 令和2年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 門脇智也、佐々木聖哉、柴田憲治
2. 発表標題 高感度電荷検出器への応用に向けた金属ナノ接合の微細化と伝導特性制御
3. 学会等名 令和2年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木聖哉、小野拓夢、小川善嵩、柴田憲治
2. 発表標題 通電断線によるPtナノ接合の作製とその伝導度の電界変調
3. 学会等名 令和2年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Shibata, M. Karalic, C. Mittag, Z. Lei, T. Tschirky, C. Reichl, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2. 発表標題 Magnetotransport of two-dimensional hole gas in undoped GaSb quantum well
3. 学会等名 20th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Karalic, M. Hug, C. Mittag, Z. Lei, K. Shibata, T. Tschirky, W. Wegscheider, T. Ihn, K. Ensslin
2. 発表標題 Hole transport in p-type GaSb quantum wells
3. 学会等名 34th International conference on the physics of semiconductors (ICPS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤熙, 柴田憲治, M. Karalic, C. Mittag, T. Tschirky, C. Reichl, W. Wegscheider, T. Ihn, and K. Ensslin
2. 発表標題 ノンドーパGaSb量子井戸における2次元ホール系の輸送特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田憲治, M. Karalic, C. Mittag, 伊藤熙, Z. Lei, T. Tschirky, C. Reichl, 橋本克之, 富松透, 平山祥郎, W. Wegscheider, T. Ihn, K. Ensslin
2. 発表標題 GaSb量子井戸における二次元ホール系の磁場中輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊地竜太郎、斎藤康平、柴田憲治
2. 発表標題 単一InAs量子ドットトランジスタの磁場中電気伝導
3. 学会等名 平成31年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 箱崎涼、佐々木聡、柴田憲治
2. 発表標題 電気化学反応を用いた金属ナノ接合の微細化と伝導度の電界変調
3. 学会等名 平成31年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤春樹、伊藤熙、柴田憲治
2. 発表標題 ノンドープGaSb量子井戸における低温磁場中ホール伝導
3. 学会等名 平成31年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shibata, M. Ohmori, K. Nagase, H. Sakaki, Y. Hirayama, and K. Hirakawa
2. 発表標題 Electron transport through single self-assembled InSb quantum dots coupled to nanogap metal electrodes
3. 学会等名 The 44th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北工業大学 工学部 電気電子工学科 柴田研究室ホームページ  
<http://www.eis.tohtech.ac.jp/study/labs/shibata/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スイス	ETH Zurich			
米国	Northern Illinois University			