

平成 30 年 4 月 4 日現在

機関番号：31303

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26706002

研究課題名(和文)テラヘルツ電磁波による単一電子・スピン伝導ダイナミクスの制御と情報機能の創製

研究課題名(英文)Control of single charge/and spin states using terahertz wave

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) 17,400,000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、テラヘルツ光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重点的に推進した。その結果、単一量子ドットのテラヘルツ分光手法を開発することに成功した。その上で、得られたスペクトルから単一量子ドットにおけるテラヘルツ照射下でのサブレベル間遷移の観測と、電子系の相互作用の解明に世界で初めて成功した。その他、単一分子系やクーパー対を用いた電子やスピンの量子状態の制御に関する知見も得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Electrical manipulation and read-out of quantum states in zero-dimensional quantum dots by nanogap metal electrodes is expected to bring about innovation in quantum information processing. In this study, we established a method for performing terahertz spectroscopy on single 10nm scale quantum dots by using nanogap metal electrodes. Inter-sublevel transition spectra of single quantum dots are successfully measured for the first time and the electron-electron interaction are discussed for a single quantum dot. We also succeeded in demonstrating the THz spectroscopy for single molecular transistors. These works are opening a way for novel quantum information applications on self-assembled QD systems.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ 量子ドット トランジスタ

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 InAs 量子ドットは、これまで量子ドットレーザ、光増幅器など、量子ドット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、単一量子ドット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。

しかし、従来、自己組織化プロセスで成長される QD は、その位置、形状、量子力学的な結合などの制御が困難で、素子の作製や応用は原理実証の域を出ていない。また、量子情報処理では、QD への高周波電界の印加による単一電荷やスピン状態の動的制御が重要となるが、これまでそれらの研究は、扱いが容易なギガヘルツ (GHz) 帯の研究に限られ、かつ、極低温環境 (~0.1K) でしか実現していない【Koppens Nature2006 など】。

単一の 10 nm 級 QD を活性層とするトランジスタ (図 1) 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 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素子の実現が期待される。本研究プロジェクトの開始時において、応募者は単一の 10 nm 級自己組織化 InAs QD を活性層とするトランジスタ素子において、本研究の核となる以下の 2 点の技術的なブレークスルーを実現した。

(1) 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 電磁波と 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 光による素子の伝導制御に成功した【Shibata, Phys. Rev. Lett. 2012, 注目論文に選定】。

(2) 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、QD への THz 光によるアクセスを許しつつ、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, プレス発表を実施】。

2. 研究の目的

研究開始当初において、研究代表者は 10 nm 級の自己組織化 InAs QD を活性層とする単一電子トランジスタの形成とその伝導制御、THz 素子への応用において、世界をリードできる状況にあった。よって本研究では、以下の 2 点を目指として、THz 光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挑戦した。

(1) テラヘルツ帯での単一量子ドット構造の分光手法の開拓とキャリア動力学の観測・制御

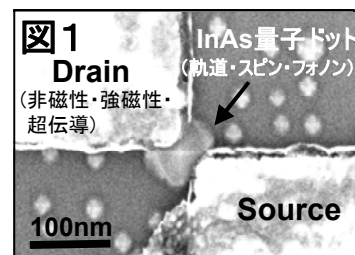
THz 光による、単一 QD や二重結合 QD (図 2、図 3 参照) 中の電荷・スピン状態の動力学の観測・制御に必要な基盤技術として、THz 帯での単一 QD 構造の分光手法の開拓を行う。特に、高抵抗で時間応答が遅い QD 素子の THz 分光を可能とするために、2 連の時間遅延 THz 光照射を行い、遅延時間の関数として光誘起電流を観測する新たな分光学的手法を確立し、世界に先駆けて単一 QD レベルでの THz キャリア動力学の観測と制御を可能とする。

(2) 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情報機能の実現

THz 光による単一電荷・スピン励起と、それに伴うトンネル伝導を制御することで、系の量子状態を動的に制御し、情報機能を付与する。特に、二重結合 QD 構造での THz 光による電子・スピン状態のコヒーレント制御と、量子ビット操作などのデモンストレーションを行う (図 2)。THz 光による単一電子やスピンのコヒーレント操作の実証により、THz 光を用いた量子情報処理という新しい技術分野を開拓する。

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による InAs ナノ構造の結晶成長を行い、位置・形状が制御された 10nm 級の InAs 量子ナノ構造を形成する。これに対して、電子ビームリソグラフィを駆使して、非磁性材料や超伝導材料からなるナノギャップを有する極微細金属電極を形成した図 1 のような構造を作製する。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。



4. 研究成果

本研究では、自己組織化 InAs 量子ドット構造を介したトンネル伝導についての実験的な研究を行い、以下のような成果を上げた。

(1) 単一の自己組織化 InAs 量子ドットを活性層とするトランジスタ構造に対して、広帯域の時間遅延テラヘルツ波を照射した際の、素子の光電流を測定することで、単一量子ドットのテラヘルツ分光に世界で初めて成功した。(図 2、Y. Zhang, K. Shibata et al., Nano

Let., vol. 15, pp. 1166 (2015)など)。本研究により、10nm 級の自己組織化量子ドット構造の電子状態をテラヘルツ分光により解明することが可能となった。

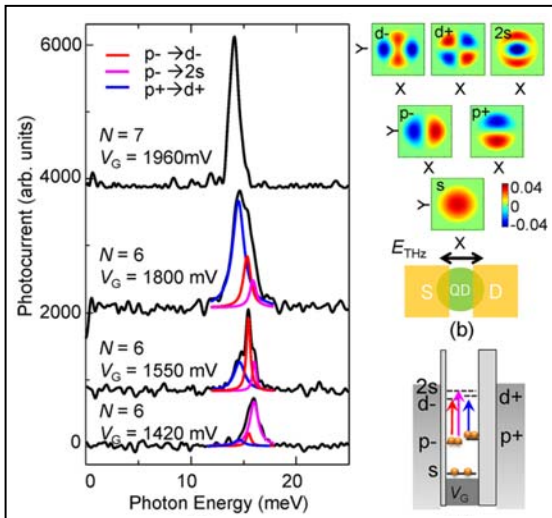


図2：量子ドットトランジスタへの THz 波照射によって得られたスペクトルのゲート電圧依存性。光励起の選択則に従ったスペクトルが観測された。

(2) 我々が開発した単一量子ドットトランジスタのテラヘルツ分光の手法を用いて、単一量子ドット中の多体電子効果による電子状態の変化を検出することに成功した。テラヘルツ分光により得られたスペクトルは、トンネル分光から得られるスペクトルと良い一致を示すことを明らかにした。(図3、Y. Zhang, K. Shibata et al., Phys. Rev. B, vol. 91, 241301R (2015)など)

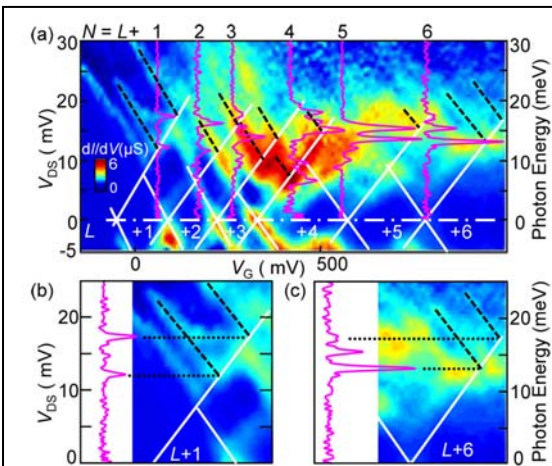


図3：単一量子ドットトランジスタに対して、各ゲート電圧において得られたテラヘルツ分光スペクトルと、素子の伝導特性に観測される励起準位を示す信号との関係。両者が良い一致を示すことがわかる。

(3) 超伝導電極と並列結合した2重量子ドット素子において、クーパ対がもつれ合いながら2つの量子ドットを分かれて伝導する現象を観測することに成功した。本成果は、クーパ対を用いた非局所スピン相関の形成とその読み取りを可能とする技術である。(図4、R. S. Deacon et al., Nature Communications, vol. 6, 7446 (2015)など)

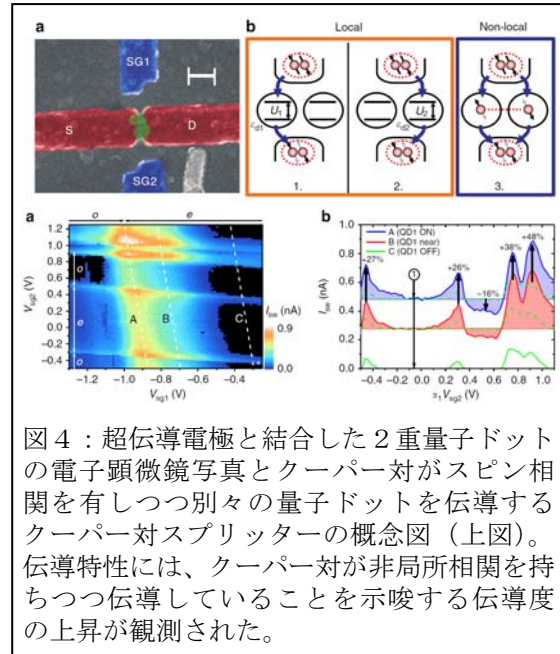


図4：超伝導電極と結合した2重量子ドットの電子顕微鏡写真とクーパ対がスピン相関を有しつつ別々の量子ドットを伝導するクーパ対スプリッターの概念図(上図)。伝導特性には、クーパ対が非局所相関を持ちつつ伝導していることを示唆する伝導度の上昇が観測された。

(4) 量子ドット材料として単一C60分子を用いた単一分子トランジスタ素子を作製し、これにTHz波を照射することで、単一分子を流れる電子の伝導を制御することに成功した。また、この系において観測された近藤効果が、THz波の照射によってどのような影響を受けるかを議論することにも成功した。本成果は、半導体量子ドットだけでなく、単一分子系においてもTHz波による単一電子の制御が可能であることを示している。(図5、K. Yoshida, K. Shibata and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. vol. 115, 138302 (2015)など)

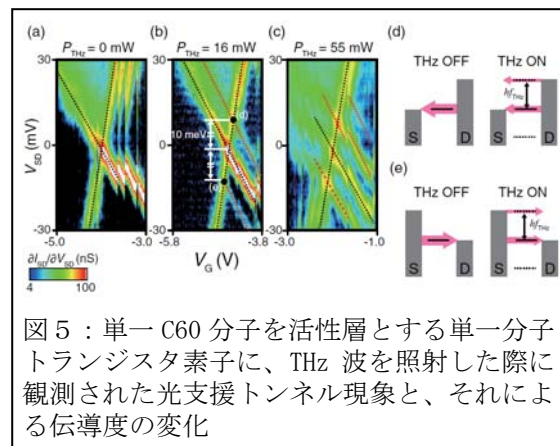


図5：単一C60分子を活性層とする単一分子トランジスタ素子に、THz波を照射した際に観測された光支援トンネル現象と、それによる伝導度の変化

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 9 件)

(1) R. Moriya, E. Ikenaga, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Masubuchi, and T. Machida “Cross-sectional transmission electron microscopy analysis of a single self-assembled quantum dot single electron transistor fabricated by atomic force microscope local oxidation”

Jpn. J. Appl. Phys. 53, (2014) 045202 (4 pages)

査読有 DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.53.045202>

(2) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa “Terahertz intersublevel transitions in single self-assembled InAs quantum dots with variable electron numbers”

Nano Letters 15, (2015) 1166-1170. 査読有

DOI: 10.1021/nl5042319

(3) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa “Probing many-body quantum states in single InAs quantum dots: Terahertz and tunneling spectroscopy”

Phys. Rev. B 91, (2015) 241301(R) (5 pages).

査読有 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.241301>

(4) R. Deacon, A. Oiwa, J. Sailer, S. Baba, Y. Kanai, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha “Cooper pair splitting in parallel quantum dot Josephson junctions” Nature Communications 6, (2015) 7446 (6 pages). 査読有

DOI: 10.1038/ncomms8446

(5) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa “Gate-controlled terahertz single electron photovoltaic effect in self-assembled InAs quantum dots”

Appl. Phys. Lett. 107, (2015) 103103 (4 pages).

査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4930023>

(6) K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa “Terahertz Field Enhancement and Photon-Assisted Tunneling in Single-Molecule Transistors”

Phys. Rev. Lett. 115, (2015) 138302 (5 pages).

査読有 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.138302>

(7) S. Baba, J. Sailer, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha “Superconducting transport in single and parallel double InAs quantum dot Josephson junctions

with Nb-based superconducting electrodes”

Appl. Phys. Lett. 107, (2015) 222602 (5 pages)

査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4936888>

(8) ラッセル スチュワート ディーコン, 大岩 颯, ユルゲン ザイラー, 馬場翔二, 金井康, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟 “並列二重量子ドットジョセフソン接合におけるクーパー対分離とスピンもつれ相関の検出”

固体物理 51, (2016) pp. 287-293 査読無

(9) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa “Excited-state charging energies in quantum dots investigated by terahertz photocurrent spectroscopy”

Phys. Rev. B 93, (2016) 235313 (5 pages) 査読有

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.235313>

[学会発表] (計 25 件)

(1) Y. Zhang, K. Shibata, C. Ndebeka-Bandou, N. Nagai, K. Hirakawa “Intersublevel transitions in single self-assembled InAs quantum dots” 41st International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2014), Montpellier, France 2014.05.11-15

(2) Y. Zhang, 柴田憲治, 長井奈緒美, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, 平川一彦 “Terahertz intersublevel transitions in single self-assembled InAs quantum dots with variable electron numbers” 第75回応用物理学会秋季学術講演会・北海道大学 2014.09.17-20

(3) 柴田憲治, 平川一彦 “ナノギャップ電極・単一量子ドット接合系におけるゲート変調効果” 応用物理学会 北海道大学札幌キャンパス 2014年9月19日 (ポスター発表)

(4) K. Hirakawa, Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard “Terahertz spectroscopy of sublevel structures in single self-assembled InAs quantum dots” The 7th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves (ISUPTW 2014), Shanghai, China 2014.10.13-14

(5) 柴田憲治 “単一 InAs 量子ドットトランジスタにおける物理現象の解明とデバイス応用” 第八回関東光科学若手研究会・明治大学 2014年11月8日

(6) K. Hirakawa, Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard “Terahertz spectroscopy of single InAs quantum dots” The Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano V), Martinique, France 2014.12.1-5

(7) 大石善彦, 小野寺毅, 日野翼, 小野寺拓也, 今康幸, 柴田憲治 “単一 InAs 量子ドットを用いたトランジスタの特性評価” 平成 27 年東北地区若手研究者研究発表会・日本大学工学部 2015 年 2 月 28 日

(8) Y. Zhang, K. Shibata, C. Ndebeka-Bandou, N. Nagai, K. Hirakawa “Terahertz spectroscopy of sublevel structures in single self-assembled InAs quantum dots” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会・東海大学 2015.03.11-14

(9) K. Shibata, K. Yoshida, T. Minamiya, K. Sato, and K. Hirakawa “Electric-field control of conductance in metal point contacts by electric-double-layer gating” The 19th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON18), July 2, 2015, Salamanca, Spain (Oral presentation)

(10) K. Shibata “Carrier dynamics in InAs QD transistors under THz radiation” Seminar presentation at Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zurich, Switzerland, July 3, 2015 (Invited presentation)

(11) K. Shibata, N. Pascher, S. Schnez, T. Ihn, K. Ensslin, and K. Hirakawa “Electron magneto-tunneling through single self-assembled InAs quantum dashes coupled to ferromagnetic leads” 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-17) July 28, 2015, Sendai, Japan(Poster presentation)

(12) 柴田憲治, 吉田健治, 南谷俊樹, 平川一彦 “金属量子ポイントコンタクトにおける伝導度の電界制御” 応用物理学会 名古屋国際会議場 2015 年 9 月 16 日 (口頭発表)

(13) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa “Terahertz single electron photovoltaic effect in self-assembled InAs quantum dots” International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2015), December 1, 2015, Waikoloa, Hawaii, USA (Oral presentation)

(14) K. Shibata, K. Yoshida, and K. Hirakawa “Electric-field control of quantum states in nanostructures by electric-double-layer gating” International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2015), December 1, 2015, Waikoloa, Hawaii, USA (Poster presentation)

(15) 早坂久輝, 柴田憲治 “強磁性電極と結合した単一 InAs 量子ドットトランジスタにおける磁気抵抗効果” 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会・日本大学工学部 2016

年 3 月 1 日 (ポスター発表)

(16) 横川智志, 渡辺達大, 柴田憲治 “量子ドットの付加による高移動度トランジスタの高機能化” 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会・日本大学工学部 2016 年 3 月 1 日 (口頭発表)

(17) 柴田憲治, 吉田健治, 平川一彦 “電気二重層ゲートを用いた金属量子ポイントコンタクトにおける伝導度の電界制御” 日本物理学会 東北学院大学 2016 年 3 月 21 日 (ポスター発表)

(18) 伊井貴彦, 佐藤寛史, 大宮司圭介, 柴田憲治 “イオン液体を用いた金属量子ポイントコンタクトの伝導度の電界変調” 平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会 東北工業大学 2016 年 8 月 31 日 (口頭発表)

(19) K. Shibata, K. Yoshida and K. Hirakawa “Electric-field tuning of conductance in metal quantum point contacts” International conference on superlattices, nanostructures and nanodevices (ICSNN2016), July 25-30, 2016, Hong Kong, China (Poster presentation)

(20) 柴田憲治, 大森雅登, 榊裕之, 平川一彦 “ナノギャップ電極と結合した単一自己組織化 InSb 量子ドットにおける電気伝導特性” 応用物理学会 朱鷺メッセ 2016 年 9 月 15 日 (口頭発表)

(21) 阿部千夏, 柴田憲治, 吉田健治, 平川一彦 “電気化学エッチングにより作製した金属量子ポイントコンタクトの電界変調” 応用物理学会 朱鷺メッセ 2016 年 9 月 15 日 (ポスター発表)

(22) K. Shibata, M. Ohmori, H. Sakaki and K. Hirakawa “Transport through InSb self-assembled quantum dots coupled to nanogap metal electrodes” 2016 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS16) December 4-9, 2016, Kohara Coast, Hawaii, USA (Oral presentation)

(23) 飯野裕貴, 荒井啓朗, 柴田憲治 “単一 InSb 量子ドットトランジスタの作製と伝導特性の評価” 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学工学部 2017 年 3 月 4 日 (ポスター発表)

(24) 佐藤悠宇, 伊井貴彦, 柴田憲治 “イオン液体を用いた金属量子ポイントコンタクトの電界変調” 平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会 東北学院大学工学部 2017 年 3 月 4 日 (ポスター発表)

(25) 佐々木秀隆、阿部千夏、柴田憲治
“イオン液体を用いた電気化学エッチングによる金属ナノ構造の微細化とその電界変調”
平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会
東北学院大学工学部 2017 年 3 月 4 日 (ポスター発表)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eis.tohtech.ac.jp/~kshibata/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 憲治 (SHIBATA KENJI)

東北工業大学・工学部電気電子工学科・准教授

研究者番号：00436578