

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 22 日現在

機関番号：31303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600013

研究課題名(和文)テラヘルツ電磁波による単一電荷・スピン制御と機能性素子への展開

研究課題名(英文)Control of single charge/spin states by terahertz radiation

研究代表者

柴田 憲治 (Shibata, Kenji)

東北工業大学・工学部・講師

研究者番号：00436578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000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単一電子トランジスタ、単一光子発生器などの量子情報処理デバイスは、1つの電子やスピン、光子に情報機能を持たせるため、超低消費電力エレクトロニクスの有望な技術と言われている。自己組織化量子ドットでは、そ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光子を用いた単一電子/スピン操作の実現が期待される。本研究では、未開拓の周波数帯として知られるTHz電磁波を用いて、単一電荷・スピン制御が可能な機能性素子を作製し、THz電磁波の量子情報処理への応用に新たな道を開くための研究を推進した。

研究成果の概要(英文)：Electrical manipulation and read-out of quantum mechanical states of electrons in zero-dimensional (0D) nanostructures is a key to great innovation in quantum information processing. In self-assembled InAs quantum dots (QDs), charging/orbital quantization energies are typically 10-40 meV, which corresponds to the THz range. Moreover, electrons in InAs QDs have very large g-factors and also experience strong spin-orbit interaction. InAs QDs are therefore a good candidate for their applications to spintronic and quantum information devices which work in THz range. In this work, we have investigated the electron transport through a single self-assembled InAs QD under THz wave irradiation in order to open new possibilities of controlling carrier dynamics in quantum nanostructures by THz radiation.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：量子ドット テラヘルツ トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

単一の自己組織化 InAs 量子ドットを用いた単一電子トランジスタ、量子コンピューターの論理素子などの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ている。これらの素子においては、量子ドットへの高周波電界の印加による単一電荷やスピン状態の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) 帯の電磁波を用いた研究に限られ、かつ、0.1 K 程度の極低温環境でしか実現していない状況にある [Koppens Nature2006 など]。

最近、我々は自己組織化 InAs 量子ドットを用いたトランジスタ構造に、THz 帯域用のアンテナと Si レンズを実装させることで (図 1 (a))、THz 電磁波と単一 InAs 量子ドット中の電子との相互作用を、従来にないほど強くすることに成功した。更に THz 光照射中における伝導特性において、THz 光子による InAs 量子ドット中の単一電子の励起と、それに伴うトンネル伝導 (THz 光アシストトンネル伝導)、THz 光子の多光子吸収を 4 K 以上の温度域で明瞭に観測することにも成功した [図 1(b)、Shibata PRL 2012]。

2. 研究の目的

現在、我々は 10 nm 級の極めて小さな自己組織化 InAs 量子ドットを活性層とする単一電子トランジスタの形成と、その THz 電磁波を用いた伝導特性制御において、世界をリードする状況にある。本研究では、以下の2点を目標として研究を遂行し、未開の周波数帯として知られる THz 電磁波を用いた、単一の電荷やスピン状態の制御と新規物性の開拓・応用に挑戦する。

(1) THz 光子を用いた単一電子、スピン状態の操作

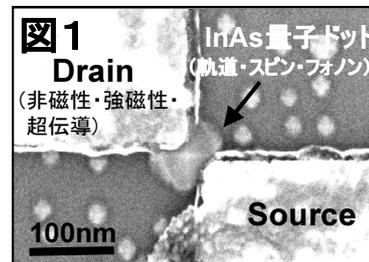
THz 電磁波による単一電荷・スピン励起と、そのダイナミクスの制御に関する研究をおこなう。特に、量子ドット分子構造における THz 電磁波を用いた電子のコヒーレント制御による量子ビットの実現や、強磁性電極と結合した単一量子ドットを用いた選択的なスピン励起とその検出を試みる。

(2) THz 帯域での量子ドットターンスタイルの実現と、電流標準への応用の探索

THz 周波数帯で動作する量子ドットターンスタイル素子の作製を目指す。これが実現すれば、THz 電磁波照射下で観測された直流電流値を、直接に素電荷と THz 周波数との積に結び付ける高精度の電流標準として機能することが期待され、画期的な THz 帯域での応用素子となる。

3. 研究の方法

(1) 10 nm 級単一 InAs 量子ドットトランジスタの作製と伝導特性制御： 10 nm 級の InAs 量子ドット構造に対して、極微細金属電極によって電氣的にアクセスし、単一電子トランジスタ素子を形成する。更に、THz 光照射による電荷・スピン伝導の観測を容易にするために、素子の電子状態、伝導特性をゲート電界によって広範囲に制御する手法を確立する。(平成 25 年度)



(2) THz 電磁波を用いた単一電荷・スピン伝導の制御： 量子準位間隔や伝導度が制御された InAs 量子ドットトランジスタ素子に THz 光を照射することで、単一電荷・スピンを励起し、電子のトンネル伝導を誘起する。その際のトンネル電流や、隣接する量子ポイントコンタクトの電流変化を検出することで、単一スピンの THz 光ポンピングや、THz 光による電荷のコヒーレント制御と量子ビット操作、電流標準などを実現・実証し、THz 光の量子情報エレクトロニクスへの応用に道を拓く。(平成 25-26 年度)

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) 単一量子ドットトランジスタへの単色テラヘルツ電磁波照射による電気伝導制御

単一量子ドットを活性層として用いたトランジスタにおいては、素子の量子準位間隔がテラヘルツ帯のエネルギーに相当することから、テラヘルツ電磁波照射による、電子の高速なダイナミクスの制御と、それによる電気伝導特性の制御が期待される。このため、テラヘルツ電磁波を用いた、電子・スピン状態の制御技術の開拓と向上に関する研究を推進した。100um 程度の波長を有するテラヘルツ電磁波と数十 nm 程度の量子ドット中の電子との相互作用を強くするために、実験系の最適化をおこなった結果、以前に比べて格段に強くテラヘルツ波と量子ドット中の電子とを相互作用させることに成功した。テラヘルツ電磁波照射下において、量子ドット中の電子によるテラヘルツ光子の吸収による明瞭な電流ピークが新たに観測され、テラヘルツ帯での光支援トンネル伝導が起きているとの結論を得た。この結果は、テラヘルツ電磁波による単一電子・スピン状態の制御に道を拓く

ものである。(K. Shibata and K. Hirakawa, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 35, (2014) pp. 101-109, (招待論文))

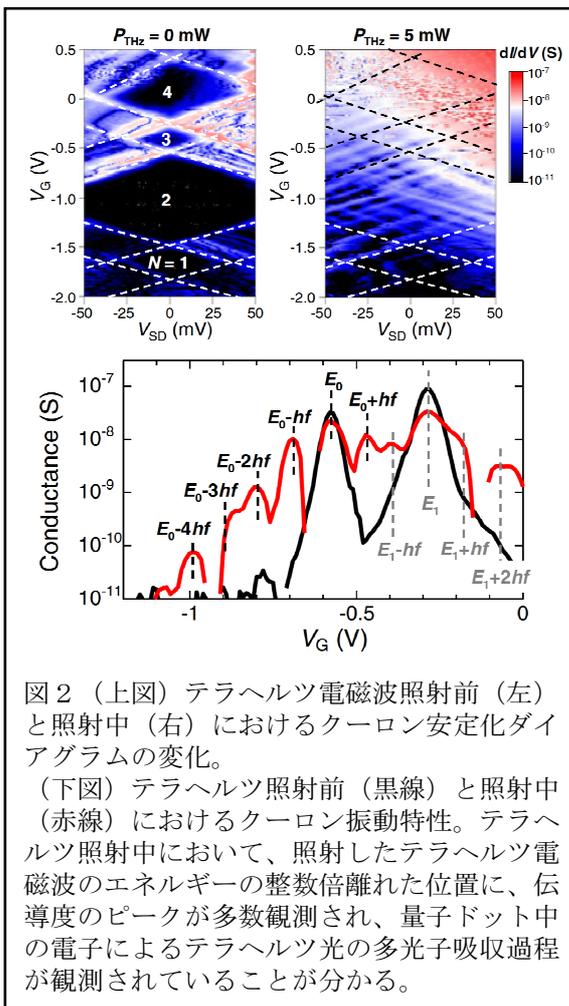


図2 (上図) テラヘルツ電磁波照射前 (左) と照射中 (右) におけるクーロン安定化ダイアグラムの変化。

(下図) テラヘルツ照射前 (黒線) と照射中 (赤線) におけるクーロン振動特性。テラヘルツ照射中において、照射したテラヘルツ電磁波のエネルギーの整数倍離れた位置に、伝導度のピークが多数観測され、量子ドット中の電子によるテラヘルツ光の多光子吸収過程が観測されていることが分かる。

(2) 量子ドットトランジスタへの広帯域テラヘルツ波照射による単一量子ドットの分光手法の開拓

単一 InAs 量子ドットを用いたトランジスタ素子に対して、広帯域テラヘルツ電磁波を照射することで、量子ドット中の電子のサブバンド間遷移を誘起し、それに伴うフォトカレントを観測した。その結果、世界で初めてトランジスタ構造を用いた単一量子ドットのテラヘルツ分光に成功した。本成果の特筆すべき点は、本プロジェクトにおいて、これまでに開拓した量子ドットとテラヘルツ波の強い結合に関する技術を極限まで向上させることで、マイクロワット程度の微弱な光源しか存在しない広帯域テラヘルツ波による単一量子ドットの分光に成功した点が挙げられる。本実験においては、100 μm 程度の波長を有する広帯域テラヘルツ波によって回折限界を大きく超える 10 nm 級の単一量子ドットの分光が初めて実現されたことから、この点においても、学術的価値が大きいと考えられる。(Y. Zhang, K. Shibata et al., Nano Letters, vol. 15, (2015) pp. 1166-1170.)

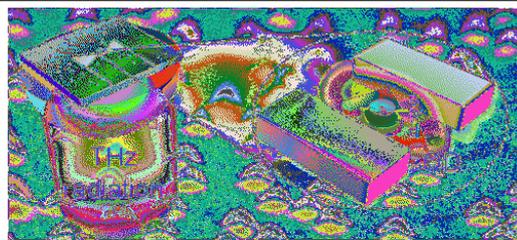


図3 広帯域テラヘルツ波を用いた単一量子ドットの分光手法を示す模式図

(3) イオン液体をゲート絶縁膜とする新たな電界印加方法の適用による量子ドットトランジスタの制御性の飛躍的な向上

イオン液体をゲート絶縁膜とする新しいゲート電圧の印加手法を世界に先駆けて量子ドット構造に適用することで、量子ドットトランジスタの電子状態を従来の 100 倍の効率で電界制御することに成功した (図2、K. Shibata et al., Nature Communications, vol. 4, (2013) pp. 2664)。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の制御性が飛躍的に向上し、その次世代素子応用に新たな展開が開かれると期待される。更に、本成果は量子ドットへのテラヘルツ電磁波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) することを可能にするものであり、テラヘルツ波による単一の電子・スピン状態の動的制御に基づく情報機能の実現に大きく寄与することが期待される。本研究成果は、プレスリリースされ、日本経済新聞や日刊工業新聞、化学工業日報などのメディアで報道された。

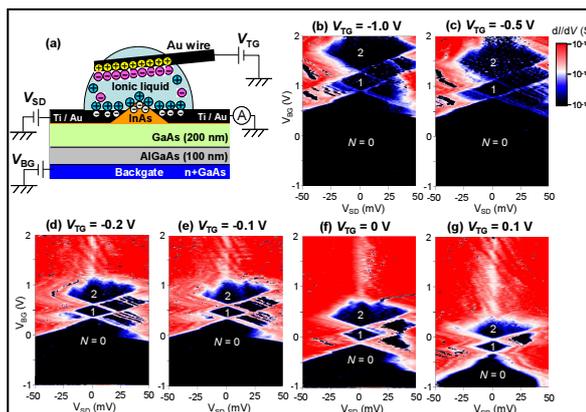


図4 (a)イオン液体を用いた電気二重層ゲートトランジスタ構造、(b)-(g)電気二重層トップゲートに様々な電圧を印加したときのバックゲートによるクーロン安定化ダイアグラム。

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 6 件)

(1) 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 Vol. 15, (2015) pp. 1166-1170.

査読有 DOI: 10.1021/nl5042319

(2) 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. Vol. 53, (2014) pp. 045202.

査読有 DOI: 10.7567/JJAP.53.045202

(3) K. Shibata, N. Pascher, P. J. J. Luukko, E. Rasanen, S. Schnez, T. Ihn, K. Ensslin, and K. Hirakawa “Electron magneto-tunneling through single self-assembled InAs quantum dashes”

Appl. Phys. Express vol. 7, (2014) pp. 045001

査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.7567/APEX.7.045001>

(4) K. Shibata and K. Hirakawa “Terahertz photon-assisted tunneling in InAs quantum dots”
Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 35, (2014) pp. 101-109, (Invited paper)

査読有 DOI: 10.1007/s10762-013-0039-7.

(5) K. Shibata, H. T. Yuan, Y. Iwasa, and K. Hirakawa “Large modulation of zero-dimensional electronic states in quantum dots by electric-double-layer gating”

Nature Communications vol. 4, (2013) pp. 2664.

査読有 DOI: 10.1038/ncomms3664.

(6) S. Takahashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha “Electrically tunable three-dimensional g-factor anisotropy in single InAs self-assembled quantum dots”

Phys Rev. B vol. 87, (2013) pp. 161302.

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.87.161302.

[学会発表] (計 11 件)

(1) 南谷俊樹, 佐藤一貴, 佐藤諒一, 今康幸, 小野寺拓也, 柴田憲治 「原子スケールナノギャップ電極の作製と評価」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

平成 27 年 2 月 28 日 (口頭発表)

(2) 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 平成 27 年 2 月 28 日 (口頭発表)

(3) 小野寺拓也, 今康幸, 柴田憲治 「FPGA を用いたナノギャップ金属電極の超高速作製」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 平成 27 年 2 月 28 日 (ポスター発表)

(4) 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)

(5) Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, and K. Hirakawa “Terahertz inter-sublevel transitions in single self-assembled InAs quantum dots”

International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2013), Kauai, USA, December 12, 2013

(Oral presentation)

(6) 柴田憲治, Hongtao Yuan, 岩佐義宏, 平川一彦 「電気二重層ゲートを用いた単一 InAs 量子ドットの電子状態の変調」

日本物理学会、徳島大学、2013 年 9 月 27 日 (口頭発表)

(7) 柴田憲治, Hongtao Yuan, 岩佐義宏, 平川一彦 「電気二重層ゲートによる単一量子ドットトランジスタの伝導特性の変調」

応用物理学会 同志社大学京田辺キャンパス 2013 年 9 月 17 日 (口頭発表)

(8) K. Shibata and K. Hirakawa “Photon-assisted tunneling through InAs quantum dots in the terahertz frequency range”

The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON18), July 22, 2013, Matsue, Japan (Invited presentation)

(9) K. Shibata, H.T. Yuan, Y. Iwasa and K. Hirakawa “Very large modulation of electron tunneling through InAs quantum dots by electric-double-layer gating”

The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON18), July 25, 2013, Matsue, Japan (Oral presentation)

(10) K. Shibata, H.T. Yuan, Y. Iwasa and K. Hirakawa

“Large modulation of electronic states in InAs

quantum dots by electric-double-layer gating”
16th International Conference on Modulated
Semiconductor Structures (MSS-16) July 1-5,
2013, Wroclaw, Poland (Poster presentation)

(11) K. Shibata and K. Hirakawa
“Photon-assisted tunneling through
self-assembled InAs quantum dots in the
Terahertz frequency range”
The 40th International Symposium on Compound
Semiconductors (ISCS2013), May 23, 2013,
Kobe, Japan (Oral presentation)

〔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://thz.iis.u-tokyo.ac.jp/>

[http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp/shibata/public_html/pr
ofile-j.htm](http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp/shibata/public_html/profile-j.htm)

[http://www.eis.tohtech.ac.jp/study/labs/shibata.ht
ml](http://www.eis.tohtech.ac.jp/study/labs/shibata.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

柴田 憲治 (SHIBATA KENJI)

東北工業大学・工学部知能エレクトロニク
ス学科・准教授

研究者番号：00436578