

平成 22 年 3 月 25 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間： 2007 ~ 2009

課題番号：19681016

研究課題名 (和文) 単電子トランジスタを用いた単一光子発生素子

研究課題名 (英文) Single photon emitter using single electron transistor

研究代表者

中岡 俊裕 ( NAKAOKA TOSHIHIRO )

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：20345143

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、自己形成量子ドットを用い、単電子トランジスタと単一光子素子を融合させた素子の開発を行った。単電子トランジスタの機能により電子数を制御した上で光子を発生させることが目的である。キャップ層を持つ量子ドットを用いた単電子トランジスタ構造の作製に成功し、良好な電子輸送特性 (クーロンダイヤモンドの観測) に成功し、かつ、同構造に埋め込まれた量子ドットからの発光、光電流をゲート電圧により制御することに成功した。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, we have developed a single photon emitter with single electron transistor. The aim is to control number of electrons in a dot before emitting single photons. We have succeeded in fabricating a single electron device based on a quantum dot with a capping layer. We have shown a gate controlled photoluminescence and photocurrent from the dots embedded in the device structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：単電子トランジスタ、単一光子素子、量子ドット

## 1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドットは究極の零次元構造であり、多方面への応用が期待されている。特に、近年、量子情報素子へ向けた試みは、実現さ

れた時の産業界へのインパクトも大きく、注目を集めている。量子ドットには電子、正孔を一つずつ閉じ込めることができ、この電子-正孔の数によって、発生する光の波長、各励起パルスあたりの光子の数を変えること

できる。発生する光子を波長フィルターで選択的に取り出すことにより、各励起パルス当り、必ず光子1個以下を取り出すことができ、単一光子素子として動作させることができる。この単一光子素子は量子情報通信において主要な役割を果たすと考えられており、活発に研究されている。一方、量子ドットに微小電極をつけることにより、1個1個の電子の伝導特性をコントロールする単電子トランジスタを作製することができる。このトランジスタは単電子輸送、電子スピン、核スピンの操作という物理、量子情報処理技術の基礎としての興味と共に、低消費電力・超高密度集積化の可能性を秘めており、将来のエレクトロニクス・情報通信技術を支える素子として期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、自己形成量子ドットを用い、単電子トランジスタと単一光子素子を融合させた素子の開発を行う。つまり、単電子トランジスタの機能により電子数を制御し、そこに正孔を一つずつ注入することにより、単一光子を発生させる素子である。通常の単一光子素子では、電子（正孔）の数が不定であるために、単一光子を取り出すため波長選択に困っているのに対し、本研究で提案する素子では、電子（正孔）数を完全に制御した上で光子を発生させるので、真に定まった光子を発生させることができる。また、電子と正孔の数が異なる状態に制御し光子を発生させると、光子発生後にキャリアが残されるが、この残されたキャリアのスピンの状態と光子の偏光状態には相関があるので、電子・光子エンタングルメント状態生成など、さらにすすんだ量子情報処理技術に用いることもできる。

## 3. 研究の方法

研究の第一歩として、単一光子発生可能な単電子トランジスタ構造を作製する。単一光子発生への担い手として極めて高い発光効率をもつ自己形成量子ドットを用いた。まず、この自己形成量子ドットを用いた単電子トランジスタの作製に取り組んだ。キャップ層を持たないむき出しの量子ドットにナノギャップを持つソース、ドレイン電極を蒸着し、n-dopeの層をバックゲートとして用いることで単電子トランジスタとして動作することを確認した。本素子ではキャップ層を持たないために発光効率が低かったため、次にキャップ層をもち発光効率の高い状態での本トランジスタ素子を開発した。薄いキャップ層をもつ量子ドットを作成し、そのキャップ層上部にナノギャップ電極を作成する。電気的なコンタクトは熱アニールによる金属の拡散による。精緻にアニール条件を見出すこ

とで、このような薄いキャップ層をもつ構造においても埋め込まれた量子ドットに電氣的にコンタクトでき、単電子トランジスタとして堂々することを確認する。そしてゲート電圧印加により量子ドットからの発光を制御する。

## 4. 研究成果

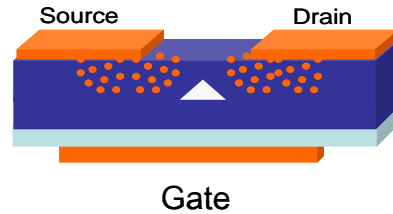


図1：素子構造

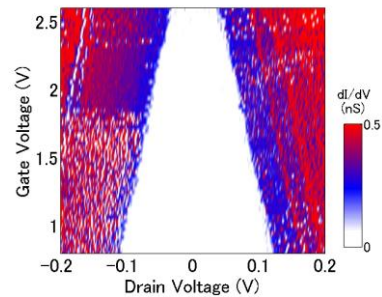


図2：Ti/Au電極を用いた場合の stability diagram

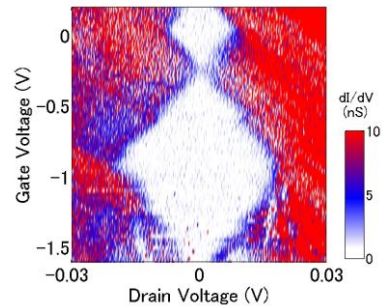


図3：AuGe/Au電極を用いた場合の stability diagram

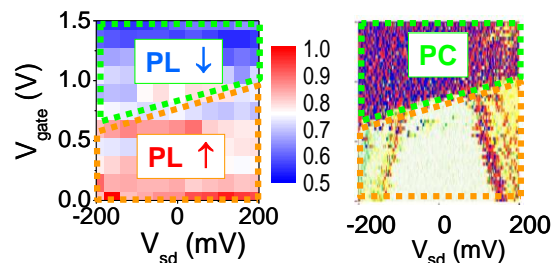


図4：ゲートによる発光の制御（左）と光電流の制御（右）

3で述べたようなキャップ層をもつ自己形成量子ドット単電子トランジスタ(図1)の作製に成功した。4Kにおいてクーロンブロッケードを観測した(図2, 3)。荷電エネルギーは約10meVであった。電極材料を変えることにより量子ドットのエネルギー準位と電極のフェルミエネルギーとのエネルギー差を制御できることを見出した。Ti/Au電極を用いることで空乏領域、AuGe/Au電極を用いることで量子ドットの準位と共鳴させることができ、共鳴トンネルにより電子をひとつずつ注入することができる。

次に、同素子において発光測定を行い、その発光強度をゲート電圧により制御出来ることを示した。さらに励起されたキャリアーが光電流となり電極へトンネルするか、発光して光子を発生するかをゲート電圧によって制御することに成功した(図4)。

## 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 T. Miyazawa, T. Nakaoka, K. Takemoto, S. Hirose, S. Okumura, M. Takatsu, T. Usuki, N. Yokoyama, Y. Arakawa, Tunneling-Injection Single-Photon Emitter Using Charged Exciton State, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有、48、2009、06FF01-1-4
- ② T. Miyazawa, T. Nakaoka, T. Usuki, Y. Arakawa, K. Takemoto, S. Hirose, S. Okumura, M. Takatsu, N. Yokoyama, Exciton dynamics in current-injected single quantum dot at 1.55  $\mu\text{m}$ , Appl. Phys. Lett., 査読有、92、2008、161104-7
- ③ T. Miyazawa, T. Nakaoka, T. Usuki, J. Tatebayashi, Y. Arakawa, S. Hirose, K. Takemoto, M. Takatsu, and N. Yokoyama, Electric field modulation of exciton recombination in InAs/GaAs quantum dots emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ , J. Appl. Phys., 査読有 104, 2008、013504-11
- ④ H. Takagi, T. Nakaoka, K. Watanabe, N. Kumagai, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, Observation of very narrow fine-structure splittings in self-assembled quantum dots by photocurrent spectroscopy, Physica E, 査読有, 40, 2008, 2192-2194.
- ⑤ T. Nakaoka, S. Tarucha and Y. Arakawa, Electrical tuning of g-factor in single self-assembled quantum dots, Phys. Rev. B 査読有 76, 2007, 041301(R)/1-4

- ⑥ T. Nakaoka, S. Kako, S. Tarucha and Y. Arakawa, Coulomb blockade in a self-assembled GaN quantum dot, 査読有、90、2007、162109/1-3

[学会発表] (計 8件)

- ① T. Nakaoka, K. Watanabe, N. Kumagai, Y. Arakawa, Lateral single electron transport in capped self-assembled quantum dots, The 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS14)、2009年7月21日 神戸、日本
- ② 中岡俊裕、渡邊克之、熊谷直人、荒川泰彦、自己形成量子ドットを用いた単電子トランジスタ構造における光電流、発光の制御、日本物理学会2008年秋季大会、査読有、2008年9月20日、盛岡、日本
- ③ T. Nakaoka, H. Takagi, T. Kodera, N. Kumagai, K. Watanabe, and Y. Arakawa, Observation of exciton Rabi oscillations at a telecommunication wavelength by photocurrent spectroscopy, the 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots、査読有、2008年5月13日、Gyeongju, Korea
- ④ T. Nakaoka, K. Watanabe, N. Kumagai and Y. Arakawa, Gate-Controlled Electron Tunneling, Photocurrent and Photoemission in Self-assembled Quantum Dots, 8th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures、査読有、2008年4月8日、Tokyo, Japan
- ⑤ H. Takagi, T. Nakaoka, K. Watanabe, N. Kumagai, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, Spin Fine Structures of a Single Quantum Dot Studied by Photocurrent Spectroscopy, Frontiers in Nanoscale Science and Technology, 査読有、2007年3月30日、Tokyo
- ⑥ T. Nakaoka, S. Tarucha, Y. Arakawa, Electrical tuning of g-factor in single self-assembled quantum dot, Frontiers in Nanoscale Science and Technology, 査読有、2007年3月30日、Tokyo
- ⑦ 中岡俊裕、佐藤俊彦、樽茶清悟、荒川泰彦、自己形成量子ドットにおける励起子ゼーマン分裂の電氣的制御、2007年春季第54回応用物理学関係連合講演会29aT7、査読有、2007年3月29日、青山学院大学相模原キャンパス、神奈川
- ⑧ 都木宏之、中岡俊裕、渡邊克之、熊谷直人、岩本敏、荒川泰彦 1.3 $\mu\text{m}$ 通信波長帯における単一量子ドットの光電流分光

測定 ～コヒーレント制御を目指して～、  
2007 年秋季第 68 回応用物理学学術講演  
会 6a-N-6、査読有、2007 年 3 月 28 日、  
北海道工業大学、北海道 (2007)

[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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中岡 俊裕 (NAKAOKA TOSHIHIRO)  
東京大学・生産技術研究所・特任准教授  
研究者番号：20345143

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし