

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21246048

研究課題名（和文） 金属微小光共振器埋め込み量子ドットにおける電子-光子状態変換に関する研究

研究課題名（英文） Study on Electron-photon Quantum-state Conversion in Quantum Dots Embedded in Meta Microcavities

研究代表者

末宗 幾夫 (SUEMUNE IKUO)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：00112178

研究成果の概要（和文）：**InAs** 量子ドットを内部に含んだ **GaAs** 円柱構造を金属に埋め込み、当初チタンに埋め込み、外部の $NA=0.4$ のレンズに光子を取り出す効率として **8%** を得た。さらに金属を銀に変えることによって取り出し効率 **18%** を観測した。また単一光子発生純度を表す 2 次光子相関関数の零遅延での値、 $g^{(2)}(0)$ として、非共鳴励起で **0.02** と世界で報告されている最も低い値と同程度の特性を得、さらに準共鳴励起により **0.007** の低い良好な特性を得た。

研究成果の概要（英文）：We have proposed and fabricated metal-embedded GaAs pillars with InAs quantum dots inside. Initially titanium was used for the fabrication of the metal-embedded structure and the photon extraction efficiency to couple to lens ($NA=0.4$) of 8% was observed. Later metal was changed to silver and the much higher efficiency of 18% was achieved. The single photon generation purity can be examined with the second-order photon correlation function $g^{(2)}(0)$, and the world-record level 0.02 was observed under non-resonant excitation and the lower value of 0.007 was observed under quasi-resonant excitation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2010 年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2011 年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
年度			
年度			
総計	33,800,000	10,140,000	43,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・薄膜・量子構造

キーワード：量子ドット、金属埋め込み、単一光子、光子相関測定

1. 研究開始当初の背景

超高速量子コンピュータや安心安全の量子暗号通信など、量子情報分野への期待から関連の研究が世界的に活発化しており、すでに単一光子を用いた量子暗号通信の実証実験も、世界各地の研究グループで実施されつつあった。しかしこうした実験に用いられて

いる光源は、通常の光通信に用いるレーザー光を減衰させたものであり、レーザーのコヒーレンスの良さ故に、(位相)・(光子数)の不確定性から光子数が揺らぐポアソン光となっている。それ故クロックごとに確実に単一光子を供給するオンデマンド単一光子源の開発が課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、半導体量子ドットを金属導体に埋め込む構造を作製する。これまでの予備実験で観測している40倍程度の発光増強から、光子外部取り出し効率を定量的に確定する精密な実験を行う。同時に、FDTD(Finite Difference Time Domain)法による金属微小光共振器内の電磁界解析を用いた構造最適化を進め、光子取り出し効率100%の理想構造実現を目指す。このようにして作製した、高い光子取り出し効率を持つ金属微小光共振器中に埋め込んだ単一量子ドットを用いて、オンデマンド単一光子源の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では以下の項目の実現を目指した。

- ・金属埋め込み構造における光子取り出し効率を実験的に確定する。
- ・FDTD法による電磁界解析を用いた金属微小光共振器の構造最適化を進め、光子取り出し効率100%の理想構造を目指す。
- ・この金属中に埋め込んだ単一量子ドットから、単一光子発生を確認する。これに基づき、トリガーごとに単一光子を供給できる、オンデマンド単一光子源の実現を目指す。

4. 研究成果

InAs量子ドットを埋め込んだGaAsを円柱状に掘り込み、ニオブウム金属中に埋め込んだ状態で、単一InAs量子ドットから、シャープな励起子発光線を観測し、さらにその強度が、埋め込まれていない場合に比べて、40倍程度増大することを確認しているが、この発光強度の増大を明確にするために、光パルス励起で一度に単一光子を発生する条件で量子ドットを駆動し、光子相関測定を行った。その結果、荷電励起子発光について、単一光子発生を示すアンチバンチング特性を観測した。さらにその特性を示す2次相関関数 $g^{(2)}(0)$ として0.02というこれまで世界で報告されている最も低い値と同程度の良好な特性を確認した。特にこれまで世界で報告されている例は「準共鳴励起」という雑音光子を出しにくい励起方法を用いた結果であるが、この場合の得られた結果は「非共鳴励起」によるもので、翌年「準共鳴励起」により、さらに特性の向上を検討した。

金属導体に埋め込んだ単一InAs量子ドットから単一光子を発生していることを光子相関測定で確認し、このパルス励起毎に単一光子を発生する条件を用いて、光子検出器で検出される光子数との比較から、(光子の発生効率)*(光子の取り出し効率)の絶対値を見積もる方法を確立し、量子効率8.0%を見積もった。また

FDTD計算を用い、GaAs円柱内のInAsドットの位置と励起効率、光子取り出し効率の最適化を進め、特に円柱内部の電磁界定在波分布の「腹」の位置にドットを配置することが重要であることがわかった。

この場合には量子ドットを含む半導体ピラー構造をチタン金属に埋め込み、量子効率8%を見積もったが、最終年度ではより反射率の高い銀に埋め込む方法を開発し、光子取り出し効率として18%を観測した。同時に研究を進めたFDTD法による金属微小光共振器内の電磁界シミュレーションでは、埋め込む半導体を円錐に近い構造にし、集光するレンズの開口数(NA)を0.8程度とすることによって、光子取り出し効率80%が見込めることが示された。今年度の実験ではNAが0.4のレンズを用いており、NAの高いレンズによる光子取り出しも含めてさらに検討を継続中である。

発光波長950nm帯のGaAs上に成長した量子ドットに加え、光ファイバー通信に用いる1300nm、1550nm波長帯のInAs量子ドットを検討したが、密度が $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 程度と高く、単一量子ドットを引き出すため100nmと細い円柱構造を作製した。これにより、従来のGaAs系による波長950nm帯に加え、ファイバー結合を目指して、InP系による波長1300nm、1550nmで発光する単一量子ドットも実現した。一方量子ドットから発生する光子は、量子準位に関するパウリの排他律により原理的には一つの電子状態から一つの光子が発生する。しかし現実には欠陥準位からの発光や、発光後にすぐ準位を埋めるRe-fillingの効果により、背景光子が発生してしまう。このような単一光子発生の純度は、発生光子の2次相関関数 $g^{(2)}(\tau=0)$ によって評価できる。2年次に $g^{(2)}(\tau=0)$ として、0.02の低い値を観測したが、本年は量子ドットの準位より1光学フォノン

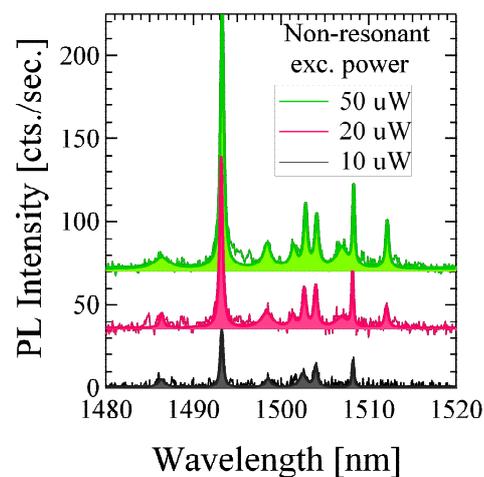


図1.15 ミクロン帯単一量子ドットの発光スペクトル

エネルギーだけ高いエネルギー位置を準

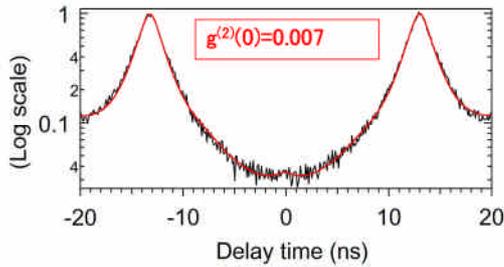


図2. 銀埋め込み InAs/GaAs 量子ドットの準共鳴励起における2次光子相関関数の測定結果。

共鳴励起することにより、パルス励起ごとに光子が発生する飽和励起条件で0.007、低い励起レベルでは0.0035と世界最小値を観測した。

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13件)

- [1] Jae-Hoon HUH, Claus HERMANNSTÄDTER, Kouichi AKAHANE, Nahid A. JAHAN, Masahide SASAKI, and Ikuo SUEMUNE: "Silver Embedded Nano-Mesas for 1.55 μm Single Quantum Dot Emitters" Jpn. J. Appl. Phys. [印刷中] 査読有
- [2] C. Hermannstädtler, N. A. Jahan, J.-H. Huh, H. Sasakura, K. Akahane, M. Sasaki and I. Suemune: "Inter-dot Coupling and Excitation Transfer Mechanisms of Telecommunication Band InAs Quantum Dots at Elevated Temperatures" New J. Phys. Vol. 14 (2012) 023037. 査読有
- [3] H. Sasakura, C. Hermannstädtler, S. N. Dorenbos, N. Akopian, M. P. van Kouwen, J. Motohisa, Y. Kobayashi, H. Kumano, K. Kondo, K. Tomioka, T. Fukui, I. Suemune, and V. Zwiller: "Longitudinal and Transverse Exciton Spin Relaxation in Single InP/InAsP/InP Nanowire Quantum Dots" Phys. Rev. B, Vol. 85 (2012) 075324. 査読有
- [4] J.-H. Huh, C. Hermannstädtler, K. Akahane, H. Sasakura, N. A. Jahan, M. Sasaki, and I. Suemune: "Fabrication of Metal Embedded Nano-cones for Single Quantum Dot Emission" Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 06GG02. 査読有
- [5] H. Kumano, K. Matsuda, S. Ekuni, H. Sasakura, and I. Suemune: "Characterization of Two-photon Polarization Mixed States Generated from Entangled-classical Hybrid Photon Source" Opt. Express 19 (2011) 14249-14259. 査読有
- [6] H. Nakajima, S. Ekuni, H. Kumano, Y. Idutsu, S. Miyamura, D. Kato, S. Ida, H. Sasakura, and I. Suemune: "Strongly Suppressed Multi-photon Generation from a Single Quantum Dot in Metal-embedded Structure" Phys. Stat. Solidi C 8, (2011) 337-339. 査読有
- [7] H. Kumano, H. Nakajima, S. Ekuni, Y. Idutsu, H. Sasakura, and I. Suemune: "Quantum-dot-based Photon Emission and Media Conversion for Quantum Information Applications" Advances in Mathematical Physics Vol. 2010, No. 391607 (2010) 1-13 (Review Paper). 査読有
- [8] S. Ekuni, H. Nakajima, H. Sasakura, I. Suemune, and H. Kumano: "First-order Photon Interference of a Single Photon from a Single Quantum Dot" Physica E Vol. 42 (2010) 2536-2539. 査読有
- [9] S. N. Dorenbos, H. Sasakura, M. P. van Kouwen, N. Akopian, S. Adachi, N. Namekata, M. Jo, J. Motohisa, Y. Kobayashi, K. Tomioka, T. Fukui, S. Inoue, H. Kumano, C. M. Natarajan, R. H. Hadfield, T. Zijlstra, T. M. Klapwijk, V. Zwiller, and I. Suemune: "Position-controlled Nanowires for Infrared Single-photon Emission" Appl. Phys. Lett. Vol. 97, No. 17 (2010) 171106. 査読有
- [10] H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, J. Motohisa, Y. Kobayashi, M. van Kouwen, K. Tomioka, T. Fukui, N. Akopian, and V. Zwiller: "Exciton Coherence in Clean Single InP/InAsP/InP Nanowire Quantum Dots Emitting in Infra-red Measured by Fourier Spectroscopy" J. Phys. 193 (2009) 01232. 査読有
- [11] Y. Idutsu, M. Takada, Y. Hayashi, T. Akazaki, H. Sasakura, H. Kumano, and I. Suemune: "Observation of Enhanced Luminescence Emitted from InAs Quantum Dots with Direct Contact to Superconducting Niobium Stripe" phys. stat. sol. C 6 (2009) pp. 849-852. 査読有
- [12] Y. Idutsu, S. Miyamura, and I. Suemune: "Improved Luminescence Efficiency of InAs Quantum Dots Grown on Atomic Terraced GaAs Surface Prepared with In-situ Chemical Etching" phys. stat. sol. C 6 (2009) pp. 868-871. 査読有
- [13] H. Kumano, S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Muto: "Spin-flip Quenching in Trion State Mediated by Optical Phonons in a Single Quantum Dot" phys. stat. sol. B 246 (2009) pp. 775-778. 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- [1] I. Suemune: “Spontaneous Two-photon Emission from Semiconductors and Its Prospect” Photonic West, 21-26 January, 2012, San Francisco, USA.
- [2] I. Suemune: “Photon Generation and Absorption Processes in Semiconductor Nanostructures”, 12th RIES-Hokudai International Symposium, November 21-22, 2011, 札幌・シャトラーゼガトールキングダム (**Invited**).
- [3] H. Iijima, S. Odashima, and I. Suemune: “n-ZnO/InAs QDs/p-GaAs Pillar Structure Prepared as a Single Photon Emitter” 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2011), October 24-27, 2011, 京都・全日空ホテル, 27P-11-44.
- [4] J.-H. Huh, C. Hermannstädter, K. Akahane, N.A. Jahan, H. Sasakura, M. Sasaki, and I. Suemune: “Size Control of Tapered Cones for High Density Quantum Dots as 1.55 μm Emitters” 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2011), October 24-27, 2011, 京都・全日空ホテル, 27C-9-2.
- [5] S. Sakurai, S. Odashima, H. Iijima, and I. Suemune: “Transformation from InAs Quantum Dots to Disks for Reduced Exciton-State Splitting” 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2011), October 24-27, 2011, 京都・全日空ホテル, 27C-10-3.
- [6] K. Matsuda, H. Kumano, S. Ekuni, H. Sasakura, and I. Suemune: “Characterization of Two-photon Mixed States Employed with Polarization Entangled-classical Hybrid Photon Source” International Conference on Quantum Information Processing and Communication (QIPC 2011), September 5-9, 2011, Zurich, Switzerland, Ph-10.
- [7] H. Sasakura, S. N. Dorenbos, M. P. van Kouwen, N. Akopian, V. Zwiller, J. Motohisa, T. Fukui, C. Hermannstädter, H. Kumano, and I. Suemune: “Exciton Polarization in A Single Nanowire Quantum Dot” 12th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (OECS12), September 12-16, 2011, Paris, France, Mo2-C-1.
- [8] I. Suemune, H. Sasakura, C. Hermannstädter, J.-H. Huh, Y. Asano, K. Tanaka, T. Akazaki, and H. Kumano: “Drastic Enhancement of Interband Optical Transition Probability with Electron Pairing in Semiconductors” IQEC/CLEO Pacific Rim 2011, August 28-September 1, 2011, Sydney, Australia, 5630-CT-3.
- [9] H. Nakajima, H. Kumano, H. Iijima, and I. Suemune: “Highly Pure Single-Photon Emission from a Metal-embedded Single Quantum Dot under Quasi-resonant Excitation” The 15th Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS15), July 25-29, 2011, Tallahassee, Florida, USA, Tu-P-124.
- [10] H. Iijima, M. Wada, H. Nakajima, S. Odashima, T. Nishio, Y. Matsuo, K. Ijiro, H. Kumano and I. Suemune: “High extraction efficiency of photons emitted from a single quantum dot in a pillar structure embedded in Silver” The 15th Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS15), July 25-29, 2011, Tallahassee, Florida, USA, Tu-P-118.
- [11] I. Suemune, H. Sasakura, C. Hermannstädter, J.-H. Huh, Y. Asano, K. Tanaka, T. Akazaki, and H. Kumano: “Radiative Recombination Processes based on Electron Cooper Pairs in Doped Semiconductors: Quantitative Evaluation of Roles of Cooper Pairs and Normal Electrons” The 15th Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS15), July 25-29, 2011, Tallahassee, Florida, USA, Th-3-5.
- [12] N. A. Jahan, C. Hermannstädter, J.-H. Huh, H. Sasakura, K. Akahane, M. Sasaki, P. Ahirwar, T. J. Rotter, G. Balakrishnan, H. Kumano, and I. Suemune: “Temperature Dependent Photoluminescence of Ensemble and Single InAs/InGaAlAs Quantum Dots” Electronic Materials Conference 2011, June 22-24, Univ. of California, Santa Barbara, CA, USA, AA4.
- [13] N. A. Jahan, H. Iijima, C. Hermannstädter, P. Ahirwar, T. J. Rotter, G. Balakrishnan, H. Kumano, and I. Suemune: “Band Structure and Thermal Escape Processes of Strained InGaSb/AlGaSb Quantum Wells” Electronic Materials Conference 2011, June 22-24, Univ. of California, Santa Barbara, CA, USA, BB3.
- [14] C. Hermannstädter, J.-H. Huh, N. A. Jahan, H. Sasakura, and I. Suemune: “Long Wavelength Emission from Nano-cone Structures with Embedded Single InAs/InGaAlAs Quantum Dots Grown on InP Substrates” 23rd International Conference on InP and Related Materials (IPRM2011) May 22—26, 2011, Berlin Germany, Th-9.1.2.
- [15] I. Suemune: “Control of Photon Emission Processes in Semiconductor Nanostructures” Villa Conference on

Interactions Among Nanostructures,
April 21-25, 2011 Las Vegas, Nevada,
USA (Invited).

[図書] (計2件)

[1] 末宗幾夫:「量子ドットエレクトロニクスの最前線」エヌ・ティー・エス出版
2011年3月25日(分担執筆)426ページ
第1編 基礎編
第2章 物性制御
第3節 微小共振器-量子ドットとの結合
による励起子状態の制御 pp. 95-109.

[2] 末宗幾夫:「自己組織化ハンドブック」
エヌ・ティー・エス出版、国武豊喜監修、
2009年11月13日(分担執筆)937ページ
第3編 システム・デバイス編
第1章 電子デバイス
第1節 ドライ薄膜形成
1. MOCVD
1.2 量子ドットレーザ pp. 704-706.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)
名称:量子もつれ光子対発生素子
発明者:末宗幾夫、赤崎達志
権利者:北海道大学・NTT
番号:特願2012-089900
出願年月日:H24.4.11
国内外の別:国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等
<http://nanophoto.es.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末宗 幾夫 (SUEMUNE IKUO)
北海道大学・電子科学研究所・教授
研究者番号:00112178

(2) 研究分担者

熊野 英和 (KUMANO HIDEKAZU)
北海道大学・電子科学研究所・准教授
研究者番号:70292042

笹倉 弘理 (SASAKURA HIROTAKA)
北海道大学・電子科学研究所・助教
研究者番号:90374595

植杉 克弘 (UESUGI KATSUHIRO)
室蘭工業大学・工学部・准教授
研究者番号:70261352
(H21-H22)

(3) 連携研究者
該当無し