

令和元年6月18日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03816

研究課題名（和文）高秘匿通信のための量子ドット偏光相関2光子源：生成機構の解明と通信波長帯展開

研究課題名（英文）Polarization-correlated entangled photon pair generation for highly-secure communication

研究代表者

熊野 英和（Hidekazu, Kumano）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70292042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,800,000円

研究成果の概要（和文）：通信網の恒久的な安全性の確保を目指し、物理原理的に盗聴不可能な暗号通信を高度化するための基幹的デバイスである、量子ドットを用いた単一光子/量子もつれ光子対源の開発を行った。安全性と安定動作の両立のため、環境系と量子ドットとの相互作用のために生じる、発光の明滅現象および遷移エネルギーシフトのメカニズムを明らかにした。また温度変化や振動などの外乱に対し強固で長期間安定な光子（対）生成を実現するとともに、光源の並列化や光子の量子的性格を左右する励起子状態の物理モデルの構築により光源高度化の指針を得た。更に、光ファイバーとの親和性が最大限利用できる通信波長帯への展開等、光源の高次機能化を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会の持続的発展のため、セキュア通信網の確立が急務である。計算量的安全性ではなく、物理原理に則って安全性を担保可能な量子情報通信技術が注目されており、安全性と安定性を両立できるシステム開発が不可欠である。本研究では、そのための基幹デバイスである非古典光源の研究開発を実施した。現在の主たる光源であるレーザー光を半導体量子ドットに置き換えて固体化できれば、確率過程を本質的に含まない確定的な光子放出が実現して安全性が劇的に向上するとともに、デバイスサイズの小型化にも寄与する。電子-光子状態の接続、また安定動作に向けたデモンストレーションに成功する等、理論・実装両面から成果が得られたと考えている。

研究成果の概要（英文）：Towards the ultimately secure optical networks, quantum-dot-based non-classical light sources emitting single or entangled photon pairs have developed, which are prerequisites for the absolute security guaranteed by quantum-mechanical principles. To achieve the security and the stability of the photon sources, interaction between quantum-dots and their environment were examined and mechanisms related to the blinking and spectral diffusion were clarified. I have also confirm the long-term stability over several days, indicating the robustness against external disturbances such as vibration and heat cycles. Furthermore, for the high functionality of the solid-state photon sources, I have studied the correlation between exciton states in a dot and a generated photon (-pair) states, clarifying the biphoton states are the Werner states, providing direction to further functionalize the sources such as miniaturization of the sources.

研究分野：量子物理学

キーワード：固体単一光子光源 量子もつれ光子対 量子ドット 量子鍵配送 量子情報科学

## 1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーの進展と共に電子や光の量子性が顕在化し、その能動的な状態操作も実現しつつある。特に量子暗号通信や量子計算分野では、古典的世界観とは相容れない量子力学の基本的性質が陽に利用され、基礎/応用両面から極めて興味深い学術領域を構成している。特に量子ビット伝送に基づく量子暗号通信は、近年基礎と応用が密接に協調して著しく進展しており、情報通信への悪意ある攻撃に対して究極的な安全性を保障する重要な社会基盤となるであろう。量子暗号通信の場合に、盗聴等の攻撃に対して究極の安全性が担保される根拠は、分割や複製が原理的にできない「1つの光子」をキャリアとして情報が運ばれる点にあり、一度に複数光子を生成しない光子源の実現が本質的である。更に、この強固な安全性を1対1の通信から現行の光通信のようにネットワーク展開するためには、対を成す2光子の間に働く量子論特有の強い相関を利用した光子転送や量子もつれ交換といった技術の実現が必須である。この場合でも、安全性を確保し、誤作動のない動作のためには、一度に「1つの光子対」を生成し、複数対生成のない単一光子対源（2光子源）の実現が厳しく要求される。

現在実用化に向けて進められている量子暗号通信用の光源は、生成過程が非線形光学効果に基づくために、各光パルスに含まれる光子数はポアソン分布し、光子発生レートを犠牲に平均光子数を下げても複数光子対発生を完全には抑えられず、また同期動作も困難という課題がある。空間的な3次元閉じ込め効果によって内部エネルギーが離散化し、本質的に複数光子（対）の生成が起こらない半導体量子ドット光源に置き換えることができれば、ドット中の離散準位に対して複数対生成を排除する機能を持つパウリ排他律が働き、単一の光子対生成（2光子生成）がクロック同期した形で可能になる。量子情報通信技術への展開を念頭に、安定且つ耐久性に優れ、また既存の光ファイバー通信網との親和性の高い単一光子また単一光子対の生成に向けた非古典光源の基盤技術開発が急務であった。

特に量子ドット系による量子相関を持つ2光子の発生は、相関の生成に必要な経路の重ね合わせ状態の実現に、真円状の量子ドットが不可欠である一方、この形成が極めて困難なため、学術的難度が高い。申請時はこの形状異方性を逐一外場で補償したり、事後処理による「良いとこ取り」で偏光もつれや非局所性を持つ2光子生成に ad hoc 的に到達して間もない段階である。そのため生成2光子状態について、「量子もつれの有無」のみに着目した1bitの評価が専らであり、定量性を伴う完全な状態指定、即ちどの程度純粋状態に近く、どの程度強い相関を有するかといった、量子ドット由来の相関2光子の活用に向けて重要な体系的な状態評価についても、重要な課題であった。

## 2. 研究の目的

今後の本格的な運用に向けて、構造的な安定性に優れ、長寿命且つ明るく、更に低コストで製造できる非古典光源の開発が必要不可欠であり、様々な物質材料・構造等で探索研究が行われている。我々は光子取得効率を高める金属埋め込み共振器中量子ドットにおいて、両者の接続機構の検討や背景光の要因を精査することで、光子発生源として冷却が必要な半導体量子ドットを用いた構造において実用化に資する高純度で機械的安定性を有する単一光子状態の長期安定生成を目指すとともに、量子ドット系を光源とする量子相関2光子状態の理想化および通信波長帯展開に向けた指針を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

半導体量子ドット構造を用いた非古典光源の高次機能化に向け、超高真空清浄環境下での半導体量子ドット構造の形成、ナノ加工プロセス、構造観察、主として光学的アプローチによる半導体量子ドット構造内部の電子状態評価、シミュレーション、解析、および安定動作可能なシステム化に向けた治具製作まで、一貫して行った。

#### 4. 研究成果

本研究開発課題は、半導体量子系を光源とする2光子状態の制御に必要な基礎物理を理解し、光源の高度化に向けた指針を明らかにすることで、優れた特性を持つ量子ドット光源の応用へ向けた展望を大きく広げ、量子情報通信分野へ多大な波及効果をもたらすことを目的として行った。多光子発生過程が抑制され、更に長時間安定性及び耐久性に優れた半導体量子ドットの作製はそのための最も基盤的な技術の1つであるが、量子ドット構造の場合、周囲に何も天然原子と異なり無数の格子状の原子が周囲を取り囲んでいるため、その熱振動や欠陥の影響を大きく受ける。特に欠陥準位や環境系とのキャリアのやり取りを介したエネルギー準位の変動は、単一の量子ドット構造を用いた光子数状態生成光源としての安定性を大きく損なう課題を残す。そこで、これら環境系と量子ドットとの相互作用のために生じる主要な2つの現象である、発光の明滅現象（ブリンキング）および遷移エネルギーのシフト（スペクトル拡散）を詳細に検討し、これら2つの現象間に強い相関があることを見出し、そのメカニズムを明らかにした。また独自の銀埋め込み構造の導入により、これらの現象を抑制し遷移エネルギーを安定化することに成功した（図1）。埋め込み構造を構成しない試料においては上のような効果は見られないことから、銀埋め込み構造により一部領域で実効的な励起強度が増強され、ある閾値を超える局所的な強励起光により結晶構造が不可逆的に均質化し、結果ドット成長時に形成された欠陥準位が消失することでドット発光の永続的な安定化が得られたものと考えられる（図2）。一度閾値を超える強励起を行ってスペクトル拡散とブリンキングが消失すると、揺らぎのある初期の状態には戻らないことから、この欠陥準位の消失は長期安定な光子数状態生成光源の作製に繋がる重要な手法となるものと期待される。

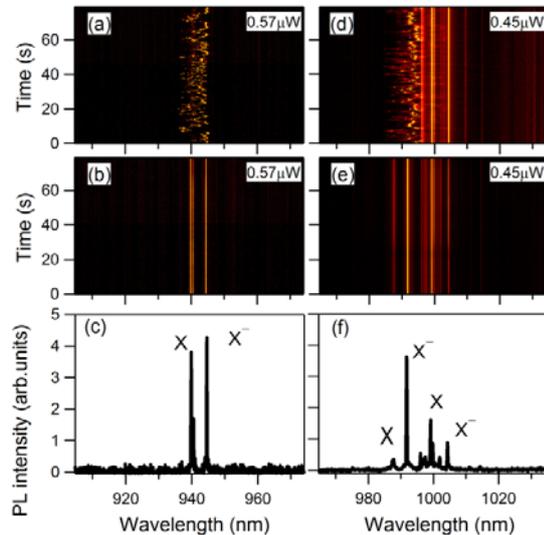


図1 強励起前 (a, b) および後 (b, d) の PL 強度の時間推移。c, fは、典型的な PL スペクトル。a-c, d-fは同一の量子ドット構造の結果である。

次に、体量子光源のネットワーク実装を意識し、InAs 量子ドット励起準位の共鳴励起といった外乱で急峻な特性変化を示す条件を避け、安定動作可能な GaAs 障壁層を励起する非共鳴励起を用いて光源特性評価を行った。

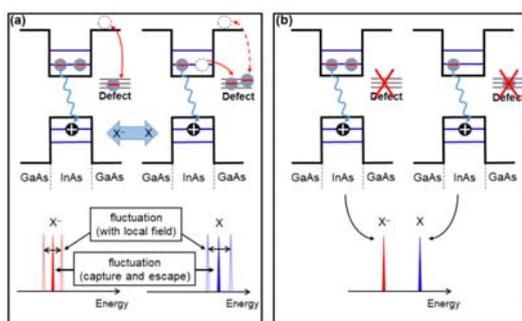


図2 PL スペクトルにおけるエネルギーシフトの基本的メカニズムである電的に中性なドット状態および負に荷電したドット間の状態遷移と、周囲に存在する欠陥準位の作用のモデル図。

ドット内部物理モデルの予測と広範な励起光強度範囲で良い一致が見られた。

単一光子・量子もつれ光子対等の光子数状態の生成源は、量子力学の原理に基づく安全且つ省電力な量子通信環境の構築の要素技術である。現在の光通信網を継承しつつ光子による量子

励起を用いて光源特性評価を行った。単一光子放出の程度を示す  $g$  値（理想的な単一光子光源の場合 0、古典的な光で 1 を取り、0 に極力近いことが期待される）は、弱励起から飽和領域まで、0.0174 と極めて低い値が得られた。これにより、当該研究で用いたピラーレイ型光源において、光子純度を劣化させる背景光が強く抑制されることが明らかとなった。更に単一光子強度と励起光強度の関係性を調べた結果、ドット内各エネルギー準位における始状態、終状態及び中間状態の分布の時間変動を記述するレート方程式による

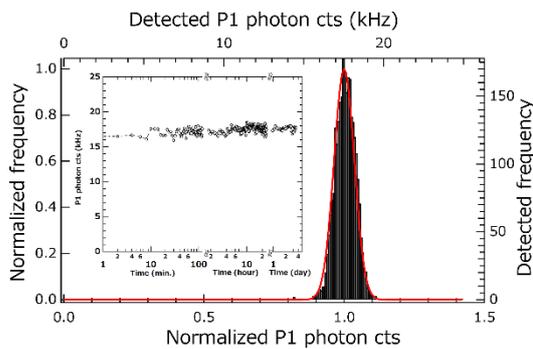


図3 今回設計した量子ドット-光ファイバー結合構造の単一光子光源としての連続動作安定性。挿入図は、4日間連続動作させた際の検出光子レートを2分間隔で取得したログデータ。

発光エネルギー、発光強度共に優れた安定性を示した。また、単一光子発生源の多元化を意図し、上記ピラーアレイ構造に HSQ(Hydrogen silsesquioxane)をスピコートすることで保護膜を形成し、ピラーアレイ領域を 0.6 mm×6 mm と横長に拡大することに成功した。

一方、光通信網に対する親和性向上の観点からは、QD 光源の発光波長の長波長化が課題であった。これまで実施してきたガリウムひ素(001)基板に代わり、通信波長帯への展開を目指してインジウムリン (111) 基板上への InAs 量子 QD の形成を試行し、最適な形成条件を見出すことに成功した。また、ピラーアレイ構造の形成プロセスの最適化を実施し (図 4)、更に発光効率を向上させるための金属埋め込み構造の形成に成功した。今後ガリウムひ素(001)基板上 QD での分光、物理モデル構築の過程で得られた知見をインジウムリン (111) 基板上 QD 系に

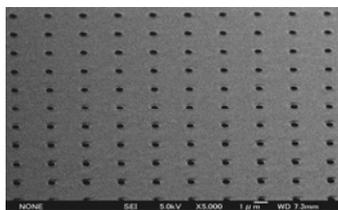


図4 現行光ファイバー網と親和性の高い発光帯を有する InP(111)基板上 InAs 量子ドット構造を内包するピラーアレイ加工の電子顕微鏡写真。

採用し、QD ベースの新しい量子光源の実現を急ぐ。また本研究の実施期間中、5G 技術もいよいよ大きく進展してきており、ますますセキュアネットワークの重要性が意識されている。更に、最近国内の情報系企業や GAFA と呼ばれる米大手 IT 企業をはじめとする世界の多くの企業が、量子計算機の研究開発を急いでおり、既に一部でクラウドサービスとして一般向けに開放されるに至っている。これらの技術はいずれも、安全な通信網に立脚した持続可能な社会発展を実現する上での基幹的技術であり、また特に量子暗号通信の研究開発を進める本課題と量子計算の間には技術的にも社会実装の面からも密接な関わり合いがある。各種の ICT、IoT デバイス機器等のエッジデバイス周りのセキュリティ確保は喫緊の課題である。

今後は本研究で得た多くの貴重な知見を活かし、量子ドット非古典光光源の更なる高次機能化に関する研究開発を進めると共に、ビッグデータ社会の起点となる各種エッジデバイス周りへの量子情報通信の適用、および量子情報通信の基礎科学・技術一般に対する教育・啓発活動にも、一層注力していきたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. S. Odashima, H. Sasakura, H. Nakajima, and H. Kumano: "Fiber-coupled pillar array as a highly pure and stable single-photon source", J. Appl. Phys. 122, 223104-1-6 (2017). DOI: 10.1063/1.4995225.
2. X. Liu, H. Nakajima, Y. Li, S. Odashima, I. Suemune, and H. Kumano: "Optical control of spectral

情報通信を実現するためには、現有の光通信網に対し親和性が高いファイバーベースの構造を持ち、通信波長帯での光子生成が可能な単一光子発生源の開発が必要になる。そこで、半導体量子ドット(QD)成長膜をピラーアレイ状に加工し単一モードファイバー端面に直接接続することで、冷却サイクル時の温度変化や振動などの外乱に対し強固で長期間安定な単一光子発生源が重要である。作製した光源の長期間安定性を確認するため、発光エネルギーおよび発光強度の4日間に渡る連続モニター試験を実施した。その結果を図 3 に示す。

diffusion with single InAs quantum dots in a silver-embedded nano-cone", Optics Express 25, 8073-8084 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.008073.

[学会発表] (計 7 件)

1. S. Odashima, H. Sasakura, H. Kumano, and H. Nakajima, "Semiconductor quantum dot nano-array as a single-photon source directly coupled to a fiber", European Advanced Materials Congress (EAMC 2018). **[Invited]**
2. 笹倉 弘理, 小田島 聡, 熊野 英和, 大宮 寛太: 「ピラー型微細形状を有する QDinF アレイを用いた光子数状態の生成」第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018-03).
3. H. Sasakura, S. Odashima, H. Nakajima, and H. Kumano: "Discrimination of exciton complexes in quantum-dot-in-fiber by photon correlations", International conference on optics of excitons in confined systems (OECS 2017), 10-15 September 2017, Univ of Bath, Bath, UK.
4. 笹倉弘理, 小田島聡, 熊野英和:「ピラー型微細形状を有する QDinF における相互相関信号による励起子複合体の推定」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市) (2017-03).
5. H. Kumano: "Quantum photon-pair generation from an isotropic quantum dot grown by droplet epitaxy", III International Workshop on Metal Droplet Epitaxy of Semiconductor Nanostructures (DeWork3), May 27, 2016, Jeju, Korea. **[Invited]**
6. S. Odashima, H. Sasakura, H. Nakajima, and H. Kumano: "Highly pure and stable single photon source directly coupled to a fiber", The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2016, Compound Semiconductor week 2016) June 26-30, 2016, Toyama, Japan.
7. 村上大輔, 小田島聡, 中島秀朗, 熊野英和, 笹倉弘理: 「ピラー型微細形状を有する QDinF を用いた高純度単一光子状態の生成」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東工大大岡山キャンパス (東京都大田区) (2016-03).

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁):

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。