

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：10101
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：17K06396
研究課題名（和文）高純度かつ高耐性な単一光子発生源の探求

研究課題名（英文）Highly pure and stable single photon source

研究代表者

小田島 聡 (ODASHIMA, Satoru)

北海道大学・電子科学研究所・特任助教

研究者番号：20518451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、量子暗号鍵配送技術に基づく量子情報通信を実験室段階から実際の通信網への応用へと昇華・発展させるため、既存の光ファイバー通信網への接続効率が高く且つ振動や温度変化など外乱に対し強固で恒久的利用が可能な単一光子源を実現することを目的としている。微細加工技術を駆使し、分子線エピタキシー法により成長された半導体量子ドット(QD)試料をナノスケールの柱状格子状に成形し、そのQD試料を光ファイバー端面に直接接続するタイプの単一光子発生源を開発した。柱状格子構造の最適化によりファイバー端面に接続するQD数を1～数個程度に制御し、数日間に及ぶ連続的・安定的な単一光子発生を実現するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の情報通信における暗号通信方式は、解読に要する膨大な計算コストにより安全性が確保されているが、量子コンピュータに代表される新奇の計算技術・解読アルゴリズムの出現により必ずしも安全とは言い難い。これに対し量子暗号通信は、量子力学的な現象である観測による波束の収縮を用いるので、原理的にありとあらゆる盗聴が検知可能であり情報通信の恒久的な安全性を保証する。光子による量子暗号通信では純度の高い単一光子の生成が成功の鍵となるが、本研究では単一光子を高純度且つ長期間安定的に生成することに成功しており、量子情報通信の根幹をなす量子の安定的供給に大いに寄与する研究成果となっている。

研究成果の概要（英文）：The generation of a single photon and its on-demand operation provides highly secure information technology based on quantum cryptography.

In this research, we fabricated the semiconductor single photon sources (SPSs) by using semiconductor InAs quantum dots (QDs) grown by molecular-beam epitaxy. The epitaxially QD grown GaAs substrates were processed in the form of a pillar array structure by using electron-beam lithography and reactive-ion etching. By optimizing the diameter of pillars and the lattice constant of the pillar array, we successfully controlled the QD number coupled to the fiber core. Such SPSs provided the highly pure single photon generation with a long-term stability. We expect that our SPS based on the QD pillar array directly coupled to a fiber can be implemented for the present optical-fiber network.

研究分野：物性物理，ナノ構造物理

キーワード：量子ドット 単一光子 光量子デバイス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の有線による通信網は、光ファイバーの出現により大きな進化を遂げた。旧来の金属線による電気通信は高周波での伝送損失が大きな問題であったが、光ファイバーによる光通信は伝送損失が小さく、特に単一モードファイバーでは伝送距離が飛躍的に伸びる為、中継器の数を大幅に削減することができる。また、伝送帯域は一般に数百 MHz ~ 数十 GHz であり、更には THz 域にも達し非常に広帯域である。低損失・広帯域と、光通信は電気通信に比べ大きなメリットがあり、現在は電話通信網の伝送線は金属線から光ファイバーに置き換わっている。では、光通信の次の展開はどうなるであろうか？ 例えば電子機器では年々ダウンサイジングが進み、LSI など半導体部品の製造プロセスはナノスケールに達している。究極のダウンサイジングは電子 1 個を用いた電子回路であり、単電子トランジスタなど単電子デバイスの研究・開発が各所で積極的に進められている。

光通信においても同様な展開がなされ、光の最小構成要素である"フォトン (光子)" を用いた研究が各所で精力的に行なわれている。この時フォトンが持つエネルギーおよびサイズスケールの微細化により量子効果が顕著となるが、この量子力学的効果を積極的に活用した量子情報通信としての展開が大いに期待されている。特に、究極的に安全な量子暗号鍵配送 (Quantum Key Distribution : QKD) 技術の進展は目覚しく、100km 超の距離での実証実験が報告されている。BB84 に代表される QKD では、光子の一つに暗号鍵の情報を載せ、観測による波束の収縮により盗聴者の存在を検知する。そのため同時に複数個の光子が生成されてしまうと、検知能力が著しく低下し、通信の安全性を担保できなくなる。高い伝送レートかつ長距離での QKD の実現には、複数光子の同時発生を極力抑制した純度の高い単一光子の生成が成功の鍵となる。実験室レベルでは顕微光学実験の手法を最大限に生かし高純度の単一光子生成を実現することができるが、単一光子による量子情報通信を実際の通信技術として昇華させるためには、1) 比較的簡単な手法で既存の通信網へ実装が可能、2) 長期間安定、である単一光子発生源の実現が必要不可欠となる。

2. 研究の目的

本研究は、量子暗号鍵配送技術に基づく量子情報通信を、実験室段階から実際の通信網への応用へと昇華・発展させることを最終的な目的としている。その目的遂行の為に、既存の光ファイバー通信網への接続効率が高く、かつ振動や温度変化など外乱に対し強固で恒久的利用が可能なる単一光子発生源を開発する。

3. 研究の方法

単一光子の供給源としては半導体量子ドット(QD)、冷却原子・分子、ダイヤモンド中の NV 中心などが挙げられるが、本研究では既存の半導体技術との親和性が高く現実的なデバイス作製を検討する上で有利である半導体 QD を用いる。半導体 QD 試料に微細加工を施すことで、既存の光ファイバー通信網への接続が容易で、単一光子としての純度が高く、外乱に対し高耐性な単一光子発生源を実現する。

(1) 単一光子光源としての微細構造の最適化

半導体 QD 成長膜に対し微細加工を施しピラーアレイ (柱状格子) 化する事で、単一モードファイバー端面に結合する QD 数が常に 1 ~ 数個となるよう QD 数密度を疑似的にコントロールする。使用する GaAs 基板 InAs QD は $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$ 個/cm² の数密度を持つので、ピラー内の QD 数を 1 ~ 数個に制限する為にはピラー直径を 200 ~ 400 nm の範囲に制限する必要がある。またファイバーのコア径が 2.6 μ m の場合、ピラーアレイを 2 ~ 2.5 μ m 間隔の正方格子もしくは三角格子にすることで、ファイバーコアに結合するピラーの数をほぼ 1 個に制限することが可能となる (図 2d)。ピラー内の QD 数・ファイバーに結合するピラー数を最適化することで、光源より発生する光子の単一性を高めることが可能となる。

(2) 単一光子生成の長期安定性

作製されたピラーアレイ状の QD 試料を、単一モードファイバー端面に圧着し固定する。構造的に堅固であるため振動や温度変化など外乱に強いことが予想されるが、長期間連続的に光子発生実験を行なうことで、本光子発生源の長期安定性を検証する。

(3) 光子取り出し効率の向上

使用する InAs QD の発光波長は 1 μ m 程度であり、この波長域での GaAs の屈折率は $n=3.5$ である。そのため QD からの光が GaAs 母体結晶から大気へ放出される際、臨界角 16.6° の制約を受ける。これは光子が GaAs 結晶外部に放出し得る領域の表面積が、QD を中心とした全方位に対し 2% 程度の断面積にしかならないことを意味しており、光子取り出し効率が頭打ちになる主な原因となっている。そこで光子発生部となるピラーを金属で埋め込む構造を作製し、光子取り出し効率の飛躍的向上を図る。

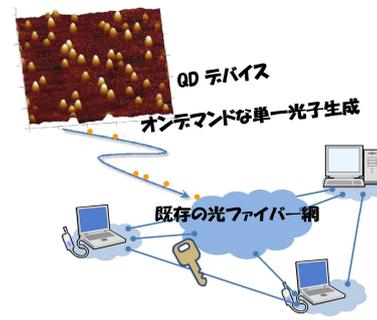


図 1. 光通信からフォトンによる量子情報通信へ

4. 研究成果

GaAs 基板に分子線エピタキシー法で成長された InAs QD 試料を用い、電子線描画およびドライエッチングによりピラーアレイ構造を作製した(図 2a,b)。試料をファイバー端面に接続した際に、ファイバーコア部に 1,2 個のピラーが接続するように設計されている(図 2d)。またピラー最表面での SEM 画像(図 3c)で明らかのように、おのおののピラーは数個~10 個程度の QD を内包している。そのうちピラー外周部に存在する QD は光学的に不活性であるので、実際は中心部に存在する 1~数個の QD が光子生成に寄与することになる。このピラーアレイ試料に対し HSQ をスパインコートすることで、ファイバー端面への接続に対する機械強度が担保される。このように QD 成長膜に微細加工を施しファイバーに結合する QD 数を制御することで、単一光子生成に適した光源を実現している。以下に、本ピラーアレイ構造光源による光学測定の結果を示す(図 3)。フォトルミネッセンス(PL)測定において、励起子に起因する輝線(X-line)を波長 1050nm 付近に得た(図 3a)。この輝線を用い自己相関 $g^{(2)}$ ()測定を行なったところ、励起エネルギーにほとんど因らず $g^{(2)}(0) \sim 0.0174$ といった結果を得た。これは単一光子として高い純度を保持していることを示している(図 3b)。また本試料で数日間に及ぶ連続測定を行なったところ、期間中光子検出数はほぼ一定であることが確かめられた(図 3c)。これらの結果により、本研究で開発された単一光子発生源は、高い単一性を堅持しつつ長期間安定な光子生成を実現していることが示された。また本ピラー構造に対し、ピラー部を Ag 金属に転写する手法を考察した(図 4)。本構造では金属 Ag 部が反射器として働くことで、光子取り出し効率の向上が大いに期待される。

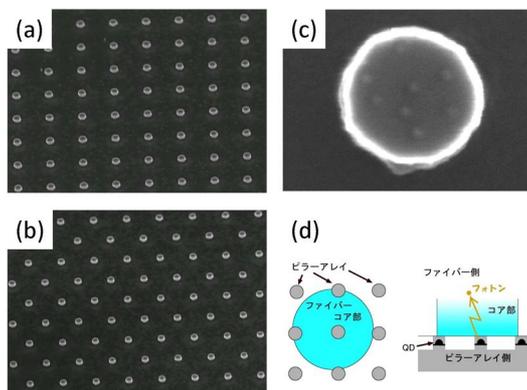


図 2. ピラーアレイ構造; (a) 正方格子, (b) 三角格子, (c) ピラー最表面での InAs QD, (d) ピラーアレイ試料のファイバー端面への接続

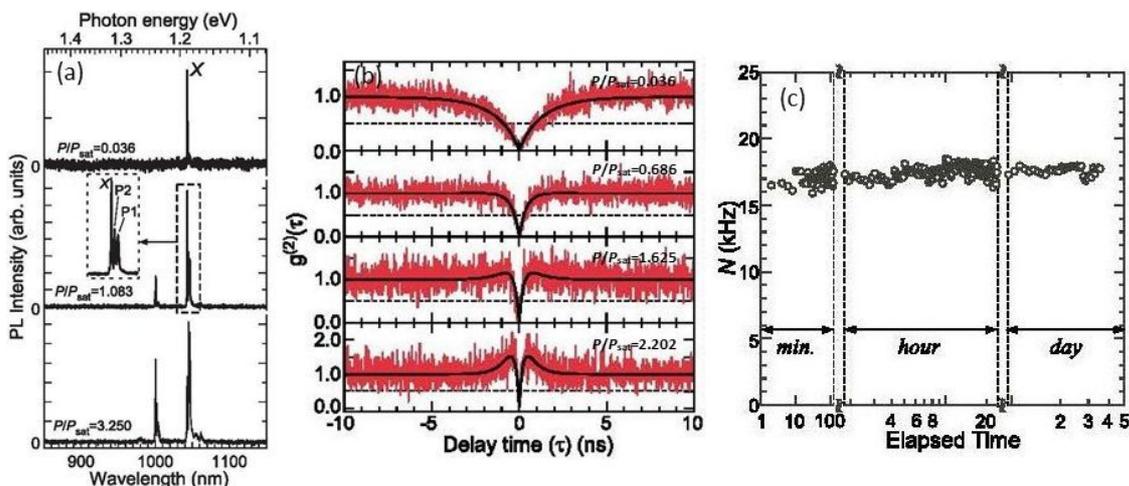


図 3. ファイバー端面に接続されたピラーアレイ構造による光学測定 (文献 1 より);

(a) PL 測定, (b) PL 測定での X-line における自己相関測定, (c) X-line における長時間測定での強度変化

【引用文献】

1. "Fiber-coupled pillar array as a highly pure and stable single-photon source", S. Odashima, H. Sasakura, H. Nakajima, H. Kumano, J. Appl. Phys. **122**, 223104 (2017).
2. "光ファイバー接続型量子ドットを用いた高純度単一光子状態の生成", 笹倉弘理, 小田島聡, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (2019).

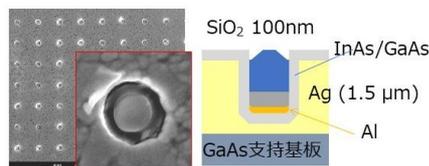


図 4. ピラーアレイの金属への転写 (文献 2 より)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Odashima, H. Sasakura, H. Nakajima, H. Kumano	4. 巻 122
2. 論文標題 Fiber-coupled pillar array as a highly pure and stable single-photon source	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 223104-1_6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4995225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. Odashima, H. Sasakura, H. Kumano, H. Nakajima
2. 発表標題 Semiconductor quantum dot nano-array as a single-photon source directly coupled to a fiber
3. 学会等名 European Advanced Materials Congress (EAMC2018)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Suzuki, S. Odashima, S. Kamono, K. Oomiya, H. Sasakura
2. 発表標題 Fiber array coupled semiconductor quantum dots for single photon emitter
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Odashima, H. Sasakura, Y. Suzuki, S. Kamono, K. Oomiya, Y. Matsuo
2. 発表標題 Single photon emission by a quantum dots coupled fiber array
3. 学会等名 The 19th RIES-Hokudai International Symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石田太郎, 鍛冶怜奈, 小田島聡, 足立智
2. 発表標題 単一量子ドット物性の歪みチューニングに向けたデバイスの作製と評価
3. 学会等名 第54回応用物理学会北海道支部会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田太郎, 松崎亮典, 鍛冶怜奈, 小田島聡, 海住英生, 西井準治, 足立智
2. 発表標題 単一量子ドットでの正孔g因子の歪みチューニングに向けたデバイスの作製と評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sasakura, S. Odashima, H. Nakajima, H. Kumano
2. 発表標題 Discrimination of exciton complexes in quantum-dot-in-fiber by photon correlations
3. 学会等名 International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笹倉弘理, 小田島聡, 大宮寛太, 熊野英和
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹倉弘理、小田島聡
2. 発表標題 光ファイバー接続型量子ドットを用いた高純度単一光子状態の生成
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Odashima, H. Sasakura
2. 発表標題 Directional single photon emitter made by semiconductor quantum dots with a metal reflector
3. 学会等名 The 20th RIES-Hokudai International Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Odashima, H. Sasakura, Y. Matsuo
2. 発表標題 Semiconductor single photon source with a metal reflector
3. 学会等名 RIES-NCUT Symposium
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	笹倉 弘理 (SASAKURA Hirotaka) (90374595)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	