

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年 5月18日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760030

研究課題名 (和文) 単一人工原子フォトリック結晶ナノ共振器レーザ

研究課題名 (英文) Single artificial atom photonic crystal nanocavity laser

研究代表者

野村 政宏 (Nomura Masahiro)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構・特任助教

研究者番号：10466857

研究成果の概要 (和文) : 本研究は高品質なエアブリッジ型二次元フォトリック結晶ナノ共振器を用いて世界に先駆けて単一半導体量子ドットレーザを実現することを目的として行われた。

実施期間中に、目的通り世界で初めて単一半導体量子ドットレーザを実現した。量子ドットは人工原子ともよばれるため、本レーザは単一人工原子レーザとも呼ぶことができる。単一量子ドット中の励起子とナノ共振器中の光子が1つの量子レベルで強く相互作用すると、真空ラビ分裂というスペクトル上での分裂が観測される。このような単一量子ドットとナノ共振器の強い結合が保証された系において、レーザ発振を実現した報告はなく、本研究が固体系で初めてである。さらに、発振閾値において真空ラビ分裂が維持されており、可逆過程と不可逆過程が同居するという物理的に極めて興味深い状態を実現した。

本成果は、たった一つの量子ドットを利得とし、光の回折限界程度の極めて小さいサイズの共振器を用いたことで、物理的に極限微小な半導体レーザを実現したため、半導体分野でのマイルストーン的意義を持つ。この重要性から、インパクトファクターの極めて高い *Nature Physics* 誌に掲載され、日本経済新聞などを通じて新聞報道も行われた。また、固体系において初めて量子1つレベルでの光-物質相互作用をする状態からレーザ発振に至る系を実現したことで、今後の固体共振器量子電気力学分野における実験の先鞭をつけたという意味で学術分野において重要な成果とも言える。

研究成果の概要 (英文) : The objective of research is the first demonstration of single semiconductor quantum dot laser using a high quality two-dimensional photonic crystal nanocavity with air-bridge structure.

We have succeeded in the demonstration for the first time. This single quantum dot laser can be called as a single artificial atom laser, because a quantum dot is an artificial atom. Vacuum Rabi splitting, which is a spectral splitting in photoluminescence spectrum, can be observed when an exciton in a single quantum dot interacts with single photon in a nanocavity. There was no report on lasing in such a strongly coupled system in solid-state material. We have achieved lasing in this strongly coupled system for the first time. Moreover, the vacuum Rabi splitting is sustained at the laser threshold, which indicates that coexistence of reversible and irreversible physical processes at the same time.

This achievement can be said as one of the important mile stones in the field of semiconductor lasers. Therefore, this article was published by *Nature Physics*, which has a very high impact factor, and was reported by several newspapers. The transition from the strong-coupling to lasing regime occurs with single-quantum-level. Therefore, this is the first step towards solid-state cavity quantum electric experiments with large number of quanta.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学－工学基礎・応用光学－量子光工学

キーワード：フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

研究開始当時は、半導体ナノ加工技術の急速な発展を受けて、半導体中でも強い光－物質相互作用が研究できる体制が整いつつあった。当時は、単一発光体を用いたレーザは、トラップ原子を用いたものであり、固体中における単一発光体レーザは実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、1に書いたような背景から、スケラブルで極めて安定な固体における単一発光体レーザ、すなわち単一量子ドットレーザを実現することを目的とした。

3. 研究の方法

発光体としては、InGaAs 半導体量子ドットを選択し、共振器としてフォトニック結晶ナノ共振器を選択した。まず、単一量子ドットを本質的な利得媒質とするために、低密度量子ドットサンプルに共振器を作製した。このようにして、共振器の中に量子ドットがたった1つだけ存在する単一量子ドットナノ共振器系を作製し、単一量子ドットレーザの実現を試みた。

4. 研究成果

(1) 量子ドット試料とナノ構造作製

結晶は分子線エピタキシー法によって(100)GaAs 基板上に作製された。まず、厚さ300 nm の GaAs を成長し、その上に後に厚さ700 nm の  $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$  犠牲層を成長し、その上に厚さ160 nm の GaAs スラブ層を成長した。このスラブ層には密度が約  $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  の InAs QD が1層埋め込まれている。6KでのQDの基底準位からの発光波長は930 nm であつ

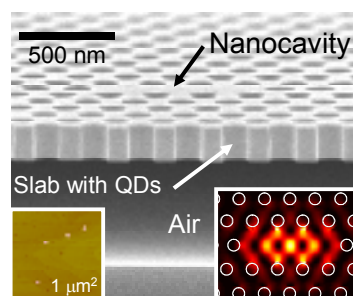


図1 PhC ナノ共振器の走査電子顕微鏡像(断面図)とキャップなし QD 試料の原子間力顕微鏡像(左)および最低次モードの電界強度分布(右)。

た。

PhC ナノ構造は、電子線描画およびドライエッチング、ウェットエッチングを用いて作製された。まず、試料の上にレジストを塗付し、電子線描画を行う。現像後、そのパターンを塩素系誘導結合プラズマ反応性イオンエッチングで GaAs に転写した。最後に HF ウェットエッチングで AlGaAs 犠牲層を PhC 直下のみ除去することで、図1に示すようなエアブリッジ型の二次元 PhC スラブ構造を作製した。

フォトニック結晶には、円形空孔三角格子を用いた。共振器には、 $\Gamma$ -K 方向に3つ空孔のない L3 型ナノ共振器を用いた。両端から1番目と3番目の円孔は共振器の Q 値を上げるために外側に  $0.16a$  ( $a$  は円孔格子定数) だけシフトさせてある。光は水平方向にはフォトニックバンドギャップによって、この共振器に強く閉じ込められる。この閉じ込め作

用が共振器としての機能を提供する。図 1(b)の挿入図に時間領域差分法により計算した最低次共振器モードの電界強度を示す。光子が共振器に強く閉じ込められている様子がわかる。

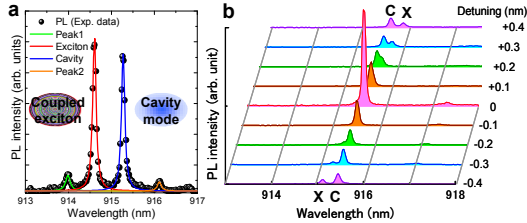


図 2 a. 6 K における PL スペクトル(15 nW)。b. 各 detuning 量の際の PL スペクトル(60 nW)。

### (2) 弱結合領域におけるレーザ発振

図 2 a に示すような単一 QD(SQD)-ナノ共振器系について光学測定を行った。QD 励起子発光(X)および共振器モード(C)が明瞭に観測されている。試料の温度を変化させることで、2つのモードの detuning 量( $\Delta\lambda$ )を精密に制御できる。図 2 b に 27 から 45 K まで温度を変化させたときの PL スペクトルを示す。X が C を通過するにあたり、 $\Delta\lambda$  が小さくなると C の PL 強度が著しく増大する。これは、SQD が共振器モードに弱結合していることを示している。

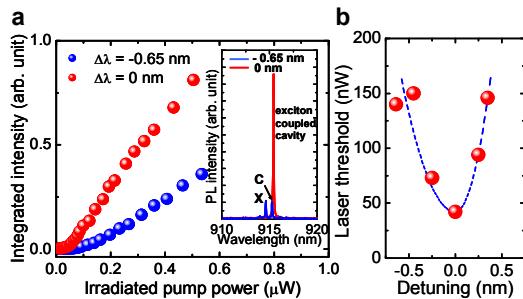


図 3 a. 6 K における PL スペクトル(15 nW)。b. 各 detuning 量の際の PL スペクトル(60 nW)。

図 3 a に  $\Delta\lambda = 0$  および  $-0.65$  nm のときの光入出力プロットと PL スペクトルを示す。SQD と共振器モードがスペクトル的に完全に結合しているときに、系の利得は最大となり閾値は  $42$  nW であった。図 3 b はレーザ閾値の  $\Delta\lambda$  依存性を示したものであるが、detuning による系の利得の増減を反映して、閾値が変化する様子が観測されている。 $\Delta\lambda$  が大きいときの閾値は約  $150$  nW となり、本系の大部分の利得が SQD から供給されていることがわかる。これらの測定に加えて、光子相関測定も行うことで、本系が SQD を本質

的な光子供給源として機能しつつ、レーザ発振領域に達することが確認された。

### (3) 強結合領域におけるレーザ発振

(2) では、弱結合領域にある SQD-ナノ共振器系におけるレーザ発振を示したが、この節では強結合状態を示す本系における発振について議論する。図 4 に図 2 a と同様な  $\Delta\lambda$  が大きいときの PL スペクトルを示す。短波長側のピークが QD 励起子発光で、長波長側のピークが共振器モードである。温度チューニングにより detuning 量を変化させると、図 4 b に示すように共振器モードと SQD 励起子発光がアンクロッシングを示した。これは、本系の光-物質相互作用が極めて強いため、光と励起子がポラリトンと呼ばれる新しい固有状態を形成するため、PL スペクトルにおいては doublet として観測される。この分裂は真空ラビ分裂とよばれ、系の光-物質相互作用が強い程分裂幅が大きくなる。その結合の強さを示す指標である励起子-共振器モード結合強度  $g$  は約  $70$   $\mu\text{eV}$  であった。detuning 量がゼロのときには、その性質から、エネルギーおよび線幅が 2 つのピークでほぼ等しくなることが知られており、本系もその特徴が観測された。

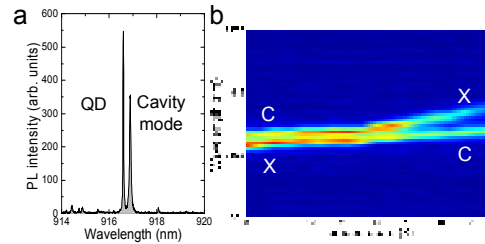


図 4 a.  $\Delta\lambda$  が大きいときの PL スペクトル。b. 温度チューニングによる強結合状態の制御。

図 5 a, b に PL スペクトルの励起強度依存性と 2 つのポラリトンブランチを Voigt 関数で解析した L-L プロットをそれぞれ示す。低励起 ( $25$  nW) ではポラリトンダブルレットが明瞭に観測されており、励起強度を上げるにしたがって、単一ピークになる。この単一ピークの波長は相互作用がない場合、すなわち SQD が十分に共振器モードから detune されているときの共振器波長に等しい。ポラリトンに見られる非対称性は、実験時に不作為的についた約  $20$  pm の detuning に起因するが、本質的ではない。図 5 b の L-L プロットにおいて、Lower ブランチ (長波側) は励起強度の増加にともない、レーザ発振に至る。プロットの変曲点で定義される閾値は約  $90$  nW である。ここで特に重要なことは閾値において PL スペクトルがいまだポラリトンダブル

ットを形成していることである。ここで物理的な描像を考えてみると、閾値においては不可逆現象である誘導放出が徐々に始まっているにも関わらず、量子が共振器モードと SQD 間でコヒーレントにやりとりがなされる真空ラビ振動が部分的に維持されている状況が実現されていることになる。無論、閾値よりも励起強度が十分に高い場合の完全なレーザ発振状況下では、誘導放出が光子生成過程を支配する。しかし、系の重要なパラメータである  $g$  や  $Q$  値次第では、閾値付近でも真空ラビ振動が抑制されつつも存在することが実験的に示唆されたことは極めて意義深い。

マスター方程式に基づいて PL スペクトル、平均共振器光子数および  $g^{(2)}(0)$  の励起レート依存性を求めた。計算においてもポラリトンダブルレットが単一レーザモードに遷移する様子が再現されている。励起レートを上げる過程で、真空ラビ振動を阻害する主要な要素はレーザ発振に関する準位への量子の出入りに起因する pump-induced dephasing である。線幅の励起強度依存性についても解析し、閾値を超えると誘導放出による線幅の減少

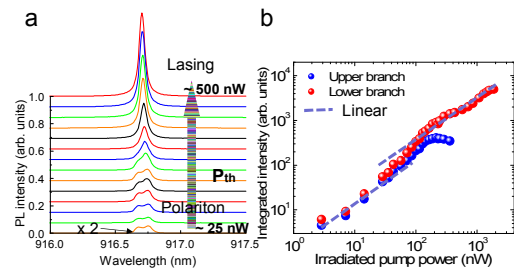


図5 a. 強結合時の PL スペクトルの励起強度依存性。b. 各ブランチの L-L プロット。

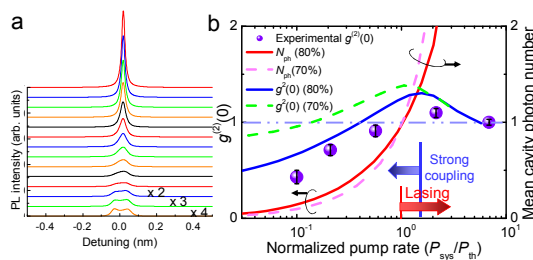


図6 a. PL スペクトルの励起レート依存性 (計算, 60-1200 GHz)。b. 励起光強度またはレートについて規格化された実験および計算された  $g^{(2)}(0)$  と平均共振器光子数。

が確認された。これは光子相関測定と合わせて、レーザ発振を示す不可欠な証拠となる。

光子相関実験において低励起状態では SQD が本質的な発光体として機能することを示すアンチバンチング特性 ( $g^{(2)}(0) < 1$ ) およびレー

ザ発振領域 ( $g^{(2)}(0) \sim 1$ ) への移行を示すバンチング特性 ( $g^{(2)}(0) > 1$ ) が観測されている。閾値における SQD からの光子供給が 80% 程度のとき、 $g^{(2)}(0)$  の励起強度依存性はこれらの実験的な  $g^{(2)}(0)$  の振る舞いをよく再現した。また、計算によって求めた閾値および強結合限界励起レートは各々 590 GHz と 800 GHz であり、計算からも閾値において強結合状態が部分的に維持していることが示唆された。

強結合領域におけるレーザ発振は、2003 年にトラップ原子を用いて実現された例があるが、安定した固体中における本現象の報告はこれが初めてであり、共振器量子電磁気学分野において 1 つの重要なマイルストーンになるといえる。

### 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 5 件、全て査読有)

- ① M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Laser oscillation in a strongly coupled single quantum dot-nanocavity system," *Nature Physics*, **6**, 279-283 (2010).
- ② M. Nomura, K. Tanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "High-Q design of semiconductor-based ultrasmall photonic crystal nanocavity," *Opt. Express*, **18**, 8144-8150 (2010).
- ③ M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Observation of unique photon statistics of single artificial atom laser," *Physica E*, doi.org/10.1016/j.physe.2009.11.100 (2009).
- ④ M. Nomura, S. Iwamoto, A. Tandrachanurat, Y. Ota, N. Kumagai, and Y. Arakawa, "Photonic band-edge micro lasers with quantum dot gain," *Opt. Express*, **17**, 640-648 (2009).
- ⑤ M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Photonic crystal nanocavity laser with a single quantum dot gain," *Opt. Express*, **17**, 15975-15982 (2009).

[学会発表] (計 17 件)

- ① M. Nomura (Invited), S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Single quantum dot laser using photonic crystal nanocavity," 22<sup>nd</sup> International Conference on Indium

Phosphide and Related Materials, Kagawa, Japan, June 4 (2010).

- ② M. Nomura, K. Tanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Design of a high-Q H0 photonic crystal nanocavity for cavity QED," The 37th International Symposium on Compound Semiconductors, Kagawa, Japan, June 4 (2010).
- ③ 野村 政宏, 田辺 克明, 岩本 敏, 荒川 泰彦, "高Q値H0型フォトニック結晶ナノ共振器の設計" 第57回応用物理学学会学術講演会, 20p-M-1, 東海大学, 神奈川 (2010. 3. 20).
- ④ 野村 政宏, 熊谷 直人, 岩本 敏, 太田 泰友, 荒川 泰彦, "単一量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器レーザ," 電子情報通信学会LQE-Thu29-am3, 京都大学 (2010. 1. 29).
- ⑤ M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa "Lasing in single quantum dot-photonic crystal nanocavity coupled system", The 1st Japan-German Workshop on Quantum Dot Nanolasers, A-5, Tokyo, Japan, December 21 (2009).
- ⑥ M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Lasing in single quantum dot-photonic crystal nanocavity coupled systems," International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, FrF-5, Tokyo, Japan, November 20 (2009).
- ⑦ 野村 政宏, 熊谷 直人, 岩本 敏, 太田 泰友, 荒川 泰彦, "強結合単一量子ドット-ナノ共振器におけるレーザ発振の実現," 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 9p-B-6, 富山大学 (2009. 9. 9).
- ⑧ 野村 政宏, 太田 泰友, 岩本 敏, 荒川 泰彦, "強結合単一量子ドット-ナノ共振器におけるレーザ発振の理論解析," 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 9p-B-5, 富山大学 (2009. 9. 9).
- ⑨ M. Nomura (Invited), S. Iwamoto, Y. Arakawa, "Laser oscillation in single quantum dot-photonic crystal nanocavity coupled systems," The 36th International Symposium on Compound Semiconductors, 8.1, University of California, Santa Barbara, August 31 (2009).
- ⑩ M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Observation of unique photon statistics of single artificial atom laser," 14th International Conference

on Modulated Semiconductor Structure, M9c, Kobe, Japan, July 24 (2009).

- ⑪ M. Nomura (Invited), S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Single Quantum Dot Laser with Photonic Crystal Nanocavity," Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications, IMF3, Hawaii, USA, July 13 (2009).
- ⑫ M. Nomura (Invited), N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa, "Photonic Crystal Nanocavity Laser with Single Quantum Dot Gain," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) CMP1, Baltimore, USA, June 1 (2009)
- ⑬ M. Nomura, S. Iwamoto, A. Tandraechanurat, Y. Ota, N. Kumagai, and Y. Arakawa, "Quantum Dot-based Photonic Bandedge Lasers," Photonic and Electromagnetic Crystal Structures VIII, 115, Sydney, Australia, April 7 (2009).
- ⑭ 野村 政宏, 熊谷 直人, 岩本 敏, 太田 泰友, 荒川 泰彦, "単一量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器レーザ ~単一人工原子レーザの実現~, " 第 56 回応用物理学学会学術講演会, 31p-ZN-1, 筑波大学 (2009. 3. 31).
- ⑮ 野村 政宏, 岩本 敏, タンデシーヌラット アニワット, 太田 泰友, 熊谷 直人, 荒川 泰彦, "量子ドット-フォトニックバンドエッジレーザの超低閾値動作," 第 56 回応用物理学学会学術講演会, 31p-ZN-2, 筑波大学 (2009. 3. 31).
- ⑯ 野村 政宏, 熊谷 直人, 岩本 敏, 太田 泰友, 荒川 泰彦, "単一人工原子レーザの光子統計," 第 56 回応用物理学学会学術講演会, 31p-ZB-11, 筑波大学 (2009. 3. 31).
- ⑰ 野村 政宏 (招待講演), 岩本 敏, 荒川 泰彦, "量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器系を用いた超低閾値レーザ," 電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会, BCI-1-7, 明治大学生田キャンパス, (2008. 9. 2).

[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://qdot.iis.u-tokyo.ac.jp/nomura/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野村 政宏 (Nomura Msahiro)  
東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス  
研究機構・特任助教  
研究者番号：10466857

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし