

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K20931

研究課題名(和文)半導体量子ドット-光ナノ共振器結合系を用いた多光子NOON状態生成の理論

研究課題名(英文)Theoretical study for generating multi-photon NOON states with quantum dot-nanocavity systems

研究代表者

上出 健仁(Kamide, Kenji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：50454062

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、量子標準限界を超えた高分解能計測を可能とする光NOON状態生成器(多光子もつれ光源)の設計法を新たに提示し、従来法と比べた高性能化に向けた明確な指針を得ることを目指した。これに関し(1)-(3)の成果を得た。(1)量子ドットと結合光ナノ共振器を用いた光NOON状態生成法を考案し設計指針を得た。(2)スペクトルフィルタリングが量子光源のデバイス性能をどの程度改善することができるか、理論整備と共に数値シミュレーションを行い定量評価した。(3)量子ドットと結合光ナノ共振器を用いることにより、高速変調動作を有するレーザー発振が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：Main objective of this project is finding a new method for generating photonic NOON state based on quantum dots in coupled-nanocavities, which can be applied to a new technology offering high-resolution optical microscopy with the resolution level below the standard quantum limit. The system exhibits strong optical nonlinearity at few photon level, which can offer better figure of merit compared to conventional devices. Following achievements were obtained: (1) We have proposed a method for generating photonic NOON state with quantum dot-nanocavity systems, which is extensible to higher photon numbers with $N>2$. (2) We developed a theory for simulating the effects of spectral filtering on the figure of merit of quantum light source. Changes in the single-photon purity after passing through a spectral filter were analyzed quantitatively. (3) Self-pulsating laser oscillation was found theoretically in nanolasers based on quantum dot-coupled nanocavity systems.

研究分野：物性理論、光物性、量子光学、フォトニクス

キーワード：量子ドット もつれ光源 NOON状態 ナノ共振器 量子光源 共振器電気力学

1. 研究開始当初の背景

半導体自己形成量子ドットは、高度化した成長技術により、数密度、発光エネルギーや不均一線幅、形成位置などの物性を制御することが可能となった。高密度の量子ドットは、その閉じ込め効果のため量子井戸レーザーと比べ低閾値かつ温度耐性の高い利得媒質となること荒川・榊により示され[1]、量子ドットレーザーとして実用化された[2]。他方、低密度の量子ドットは、特定の単一量子ドットの発光を抽出することにより、人工原子と呼ばれるように離散化した狭線幅の発光スペクトルを有する。この単一量子ドットは高品質の単一光子源として優れた特徴を有する[3,4]。本研究では量子ドットの量子光源としての性質に注目し新しい利用法の開拓を目指した。

高品質な量子ドットは、光を波長程度の空間に閉じ込めるフォトニック結晶ナノ共振器[5]と組み合わせることにより強い光・物質相互作用が実現し、共振器量子電磁力学(CQED: cavity Quantum Electrodynamics)効果を発現する(図1)。CQED効果の強さを示す性能指数 g/κ (g : 励起子-光子間結合、 κ : 共振器ロス)は研究開始当初で1を大きく超えており2018年現在では6.4に達した[6]。

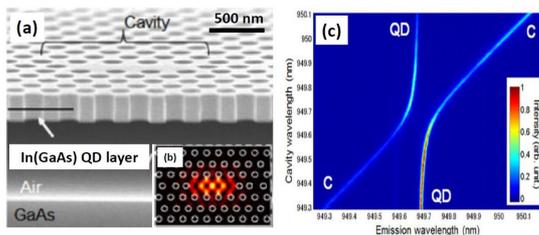


図1. 量子ドット-ナノ共振器系[7]: (a)SEM像、(b)電場分布、(c)発光スペクトルに現れたラビ分裂($g/\kappa=3.2$)

量子ドットとナノ共振器の結合系は、弱結合領域($g/\kappa < 1$)で Purcell 効果により単一光子生成レートが増大することが確認されている [8,9]。他の単一光子源と比べ量子ドットからの発光レートは大きい、Purcell 効果を利用することにより、さらに高速の1GHzを得ることも可能である。研究代表者は、研究開始当初、量子ドット-ナノ共振器系が、高速単一光子源としてどこまで高い性能を導き出せるか、単一光子の純度や発光レートをどこまで高めることができるのか、さらに量子ドット励起子の物性により性能限界はどのように決まるかについて知見を深めた[10]。量子ドット-ナノ共振器系を単一光子源として利用する場合、基本的には弱結合領域($g/\kappa < 1$)の利用が適している。このように単一光子源としての応用について研究は進んだ。

本研究では、量子ドット-ナノ共振器の結合系から効率的に NOON 状態を生成する多光子もつれ光源の開発を目指すことにし

た。この系からの多光子放出に関しては既にナノ共振器を量子ドットの励起子分子と共鳴させることにより二光子自然放出が効率的に起こることが観測されていた[11]。このような多光子状態の発光に量子もつれをいかに付与するかが、本研究で解決すべき課題であった。NOON 状態は、強い量子もつれを有する多光子状態の一つであり、量子標準限界を超えた空間分解能(解像度)を有する顕微鏡に利用できることが実証されている[12]。量子ドットの単一光子源への応用は多くの研究がされてきたが、NOON 状態のような新しい量子光源への応用を目指す研究はあまり進んでいない。

[1] Y. Arakawa, and H. Sakaki, Appl. Phys. Lett. 40, 939 (1982). [2] QD laser 社 HP(<http://www.qdlaser.com>) [3] S. Buckley et al., Rep. Prog. Phys. 75, 126503 (2012). [4] M. Holmes et al., Nano Lett. 14, 982 (2014). [5] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987). [6] Y. Ota et al., Appl. Phys. Lett. 112, 093101 (2018). [7] Y. Arakawa et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 18, 1818 (2012). [8] E. M. Purcell, Phys. Rev. 69, 681 (1946). [9] D. Englund et al., Phys. Rev. Lett. 95, 013904 (2005). [10] K. Kamide et al., Phys. Rev. Lett. 113, 143604 (2014). [11] Y. Ota et al., Phys. Rev. Lett. 107, 233602 (2011). [12] T. Ono et al., Nat. Commun. 4, 3426 (2013).

2. 研究の目的

本研究では、単一もしくは複数の量子ドットと光ナノ共振器を用い、量子計測(量子標準限界を超えた高分解能計測)へ応用可能な多光子 NOON 状態を生成する手法を理論的に確立することを目的とする。量子ドット系は既存の他の量子光源(原子系や超伝導回路)と比較し発光レートが圧倒的に早く、ナノ共振器と結合させることにより発光レートはさらに増強される。このため、既存の系において極めて低いレートでしか得られない多光子 NOON 状態を飛躍的に高いレートで生成することができる可能性がある。また単一光子源がナノ共振器との弱結合を利用するのに対し、NOON 状態生成では強結合領域が活躍の場を得る可能性もある。量子ドットの単一光子源以外の量子光源へ応用はあまり注目されていないが、本研究が量子光源の研究に新しい方向性を提示する可能性も期待できる。

3. 研究の方法

本研究は理論解析によって進められた。量子ドット-ナノ共振器系における多光子 NOON 状態発生機構を明らかにするために、最も基礎的なモデルから理論計算を進め、励起条件や

制御パラメタ、電子状態の詳細、測定系の影響など、徐々に現実系を定量的に扱い、最終的には高効率な発生条件の特定を目指した。対象も、初年度は単一量子ドットからなる系を中心に徹底的に調べ、その後、複数量子ドット系に理論を拡張し三光子以上の多光子 NOON 状態発生について考察を進めることとした。

4. 研究成果

本研究では光 NOON 状態生成器の設計法を新たに提示し、従来法で得られない高性能化に向けた明確な指針を得ることを目指した。これに関し以下の主要成果を得た。

[主な成果]

量子ドットと結合光ナノ共振器を用いた光 NOON 状態生成法の考案

はじめに結合した光ナノ共振器(フォトリック分子と呼ばれる)に1つの量子ドットが励起子分子の二光子共鳴点付近で結合した CQED 系を考えた(図 2(a))。

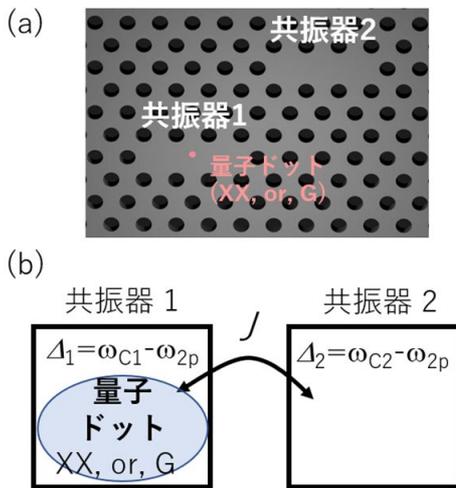


図 2. (a) 結合した二つのフォトリック結晶ナノ共振器 1,2 (モード間結合 J) と共振器 1 に位置する量子ドットのイメージ。(b) 量子ドット励起子分子 XX (G は量子ドットに励起子がない基底状態) が二光子共鳴周波数 (ω_{2p}) 付近で二つの共振器 (各離調 Δ_1, Δ_2) と結合している理論モデル

この量子ドット-ナノ共振器系の量子ダイナミクスは図 2(b) に示される理論モデルによりよく記述される。これを用いて、この系が二光子 NOON 状態を効率的に放出することができる条件を探索した。

励起子分子が共振器 1 に二光子を放出する遷移 ($|XX, 00\rangle \rightarrow |G, 20\rangle$ 、ただし $|j, n_1, n_2\rangle$ は量子ドットの状態が j にあり、共振器 1 と 2 に n_1 個と n_2 個の光子が存在する状態を表す) や、光子が二つの共振器内をレート J で行き来する量子ダイナミクスを考えると、二光子 NOON 状態が生成されるための条件は、NOON 状態に

おいて除去されるべき状態 (この場合 $|G, 11\rangle$) が負の量子干渉により除去される条件として見つけることができる。より明示的には図 3(a) に示すように、 $|G, 20\rangle \rightarrow |G, 11\rangle$ と $|G, 02\rangle \rightarrow |G, 11\rangle$ で表される二つの遷移課程が負の干渉を起こす条件として与えられる。この量子ドット-ナノ共振器系のエネルギー固有状態が、そのような負の干渉を起こす条件を満たす場合に、この量子系は高純度な二光子 NOON 状態を生成し外部へ放出することができる。図 3(b) は、そこに示される二つの曲線上の値にナノ共振器の離調 (Δ_1, Δ_2) を選べば、そのような条件が満たされ、二光子 NOON 状態生成器となることを示すものである。

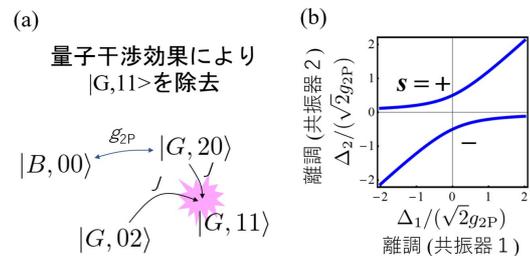


図 3. (a) 図 2 の量子系において二光子 NOON 状態が生成されるために必要な量子干渉プロセス (b) 量子干渉条件を満たす共振器離調 (Δ_1, Δ_2) の組み合わせ

つまり、多光子状態の中で、取り出したい NOON 状態において除去すべき状態を全て量子干渉により除去することができる系であれば、目的の NOON 状態を高純度に生成することができる。系の固有状態が、そのような条件を満たすように、調整可能な設計パラメタ (共振器離調や量子ドットとの結合定数など) を選ぶことにより NOON 状態生成器を設計することができるというアイデアである。したがってこの方法は二光子 NOON 状態に限らず一般の N 光子の NOON 状態を生成する場合にも拡張することができる。たとえば、図 4(a)-(b) で示される二つの量子ドットを含む結合共振器系に対しては、図 5 で示され

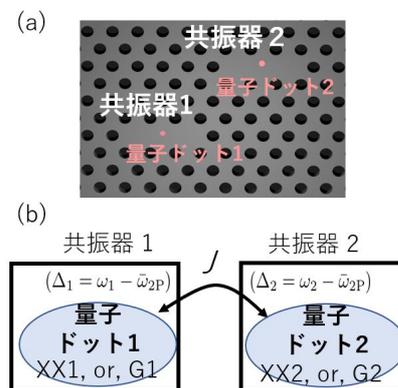


図 4. 結合ナノ共振器と二つの量子ドットが二光子共鳴付近で結合した量子系 (a) とそのモデル (b)

量子干渉効果により

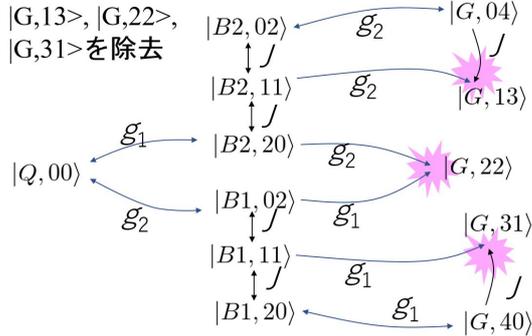


図5. 図4の量子系で4光子 NOON 状態が高純度生成されるために用いられる量子干渉プロセス

る干渉条件を考慮することにより、4光子 NOON 状態の高純度生成が得られる。

この新しい NOON 状態設計法は、共振器口スレートを具体的に与えた場合に、どのくらいの発光レートでどのくらい高純度の NOON 状態が生成されるかといった NOON 状態生成器としての性能指数についての知見と共に、論文〔雑誌論文、学会発表〕にその詳細がまとめている。これにより本研究の主要目的は達成された。

〔その他の関連研究成果〕

上記に加え、量子ドット量子光源や結合共振器と量子ドットを用いた新しい光源に関連する研究として、以下の成果も得られた。

〔雑誌論文〕

量子光源の外部で行われるスペクトルフィルタリングによる調整が、量子光源としてのデバイス性能（発光レートや単一光子純度）をどの程度改善することができるか、理論整備と共に数値シミュレーションを行い定量評価した。

量子ドットの共鳴励起による Mollow サイドバンドを用いた単一光子源に対して、周波数ドメインで矩形型のフィルタを適用した際、フィルタのバンド幅がある条件を満たす場合に、単一光子純度を非常に高めること、またこれが一種の量子干渉効果に起因することを示した。これにより量子光源の外部制御法に関し新しい知見を得た。この成果の詳細は、雑誌論文 にまとめられている。

〔学会発表〕

量子ドットと結合ナノ共振器を用い、単一量子ドットレーザーに見られない効果として、自励振動に起因する高速変調動作を有するレーザー発振が得られることを理論シミュレーションにより示した。この成果の詳細は学会にて報告された。

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 2 件)

K. Kamide, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Eigenvalue decomposition method for photon statistics of frequency-filtered fields and its application to quantum dot emitters," Phys. Rev. A 92, 033833 (2015).

K. Kamide, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa "Method for generating a photonic NOON state with quantum dots in coupled nanocavities," Phys. Rev. A 96, 013853 (2017).

〔学会発表〕(計 4 件)

上出健仁、岩本敏、荒川泰彦「量子エミッタを含む結合ナノ共振器系のダイナミクスの解析」第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (2016 年 3 月、東工大)

K. Kamide, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Self-pulsation in coupled cavity QED systems", PLMCN17 (Mar. 2016, Nara, Japan).

上出健仁、太田泰友、岩本敏、荒川泰彦「量子ドット-結合共振器系におけるもつれ二光子 NOON 状態生成の理論」第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016 年 9 月、朱鷺メッセ)

上出健仁、太田泰友、岩本敏、荒川泰彦「量子ドット-ナノ共振器系による NOON 状態生成 ~N>2 への拡張~」第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017 年 3 月、パシフィコ横浜)

〔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://www.qdot.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上出 健仁 (KAMIDE, Kenji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：50454062

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者
なし