# 通信波長帯単一双極子による自然放出制御デバイスの研究開発(072103004)

Spontaneous Emission Control Devices Using Telecom-Band Single-Dipole

## 

**研究期間** 平成 19 年度~平成 21 年度

## 概要

共振器量子電気力学効果を用いた通信波長帯単一双極子の自然放出制御デバイスに関する研究開発を行った。単一双極子には室温で1.3µmの発光波長をもつInAs量子ドット励起子を用い、フォトニック結晶ナノ共振器中に配置しその自然放出を制御する。共振Q値およびモード体積Vmを最適化する事で、純度の高い単一光子の静的制御(パーセル効果)による発生、およびこれまでで最も通信波長帯に近い波長での励起子-光子コヒーレント結合の形成(強結合状態)に成功した。また光励起エネルギーを変化させる事で、強結合Rabi分裂スペクトルのdoublet/singlet変換が動的に制御出来る事を示した。

## Abstract

We studied spontaneous emission control devices of a telecom-band single-dipole that used a cavity quantum electrodynamics. An exciton in InAs quantum dot with the transition wavelength of around 1.3  $\mu$ m were used as a single dipole, and its spontaneous emission was controlled by photonic crystal nanocavities. We achieved generation by a static control (Purcell effect) of the single photon with high purity, and also coherent exciton-photon coupling (strong coupling) near the telecom-band. We also demonstrated that the doublet/singlet conversion of the Rabi splitting spectrum in the strong coupling regime could be controlled dynamically by an appropriate selection of the optical excitation energy.

#### 1. まえがき

今日の光情報通信容量・速度を遥かに凌駕すると期待 される次世代光・量子情報通信技術の実用化を目指し、単 一光子発生素子に代表される量子光機能デバイスの研究 が現在盛んに行われている。このような背景のもと、本研 究では半導体フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器中に埋 め込まれた通信波長帯量子ドット(QD)励起子を単一双極 子として用い、共振モードと励起子状態が単一光子を介し て結合されることによる共振器量子電気力学(Cavity QED)効果による自然放出制御単一光子発生素子の動作 原理の実証を試みた(Fig.1)。特にここでは単一の励起子 -共振モード結合における(1)非結合共振モード発光の発生 機構機構の解明とその抑制による高効率単一光子発生の 実現、および(2)通信波長帯における強結合状態の形成と それによる単一/複数光子発生の変換について報告する



Fig. 1 本研究に用いた単一 QD 励起子が埋め込まれた PhC ナノ共振器と単一光子を介した励起子・共振モード結 合の概念図。

## 2. 研究内容及び成果

#### (1) 共振器発光の解明と高効率単一光子発生

単一双極子-共振器結合において、それらの detuning energy:  $\delta = E_{diple} - E_{cavity}$ が大きい(結合がほとんどない) 場合、得られる発光スペクトルは原理的に双極子の発光再 結合によるものだけである。しかしながら QD 励起子を用 いた場合、共振器モードも強く発光することが知られてい る。この原因についてはこれまで諸説議論されてきたが、 決定的な結論を与えるまでには至っていない。この共振モ ード発光は、その発生機構によっては単一光子発生を阻害 する原因となるため、ここではその機構の解明と抑制を行 い高効率単一光子発生を実現する。

まず共振器モードと単一励起子との結合特性について ガス凝縮による detuning 法(4K 保持下)を用いて PL スペクトルを調べた。ここで励起には QD バリア層励起と なる 2540 meV のレーザ光を用いている。代表的な例を Fig. 2 (CavI) および 3 (CavII) に示す。Fig. 2(a)では 励起子(X)と共振器(C)の共鳴( $\delta = 0$ ) において、顕著な スペクトル強度の変化は見られない。これはこの励起子-共振器は結合しておらず、励起子発光の増大効果(パーセ



**Fig. 2 (a)** CavI の PL 強度マップと(b) *δ*=0 での光子強度 自己相関。



Fig. 3 (a) CavII の PL 強度マップと(b) 励起子、(c) 共振 器および (d) δ=0 での光子強度自己相関。

ル効果) が生じていないことを示している。一方 Fig. 3(a) では、非共鳴時の約9倍のスペクトル強度がδ=0におい て見られる。そのためこの励起子-共振器は弱結合してお りパーセル効果が働いているものと思われる。

上記2つの共振器 (CavI, CavII) に関して、各 detuning における単一光子強度相関測定をバリア層励起 にて行った。CavI の励起子-共振器共鳴下 ( $\delta = 0$ ) にお ける 2 次の自己相関関数は $g_{x+c}^{(2)}(\tau=0)=0.9\sim1$ となり(Fig. 2(b))、また CavII の  $\delta \neq 0$  での共振器のみにおいても g<sup>(2)</sup>(τ=0)≈1であった(Fig. 3(b))。これは共振器発光が古 典光発生となっていることを示し、その起源はバリア層か らの背景輻射であると考えられる。Fig. 3(c)に示すように 量子ドットのみではg<sup>(2)</sup>(τ=0)≈0.57のアンチバンチングを 示すが、弱結合状態である CavII では驚くことに古典光 である共振器発光との結合であるにもかかわらず量子ド ット単体の場合よりも低い(純度の高い)  $g^{(2)}_{x+c}(\tau=0)=0.35$ が得られた(Fig. 3(d))。これはバリア層からの背景輻射の 再結合寿命が非常に長い(10 ns~10 µs 程度)ため、パ ーセル効果によって 1.3 ns から 150 ps 程度に短寿命化し た励起子発光が支配的となり、励起子単体の場合よりも純 度の高い単一光子発生が実現したものである。以上より、 バリア層励起条件かつ背景輻射が存在する状況であって も、自然放出レートをパーセル効果によって十分な促進す ることにより高純度 ( $g_{r+r}^{(2)}(\tau=0)=0.35$ ) かつ高繰り返し (1/150 ps = 7 GHz) での単一光子発生が可能であること が実証された。

## (2) 強結合形成と単一/複数光子発生変換

Fig. 4(a)に QD 励起 (*E*<sub>exc</sub> = 1165 meV) 下における PL スペクトルおよび励起子-共振器エネルギー離調に伴 う PL スペクトルの強度マップ図を示す。ここでは強結合 形成のため、共振器モード体積が前節に比べ1/5程度に微 小化された共振器構造を用いている。これよりターゲット となる励起子と共振モードのエネルギー反発(黄点線)が 観測された。ゼロ離調において明瞭な Rabi 分裂(分裂幅 約91 µeV)が見られ、この系が強結合領域にある事が分 かる。実験より励起子の発光線幅は Γ<sub>x</sub> =55 μeV、共振器 Q 値は約 10,000 (Γ<sub>c</sub> = 110 µeV) であった。また励起子-共振器結合定数は g=100 µeV と見積もられ、強結合条件 である g>(Γx-Γ\_)/4 を十分満たしている。これらは励起子-共振器が単一光子を介した可逆的な結合状態にある事を 示しており、発光スペクトルは分裂しているものの放出さ れる光子は各イベントにおいて単一であることに注意し ておく。単一 QD 励起子-PhC ナノ共振器結合系では、こ れまでの報告に比べ最も通信波長帯に近い(約1200 nm) 強結合状態の形成に成功した。

> С С b а 10 cycle cycle 30 30 ŝ ž 40 40 50 1033 1034 5 1033.5 1034.5 1035.0

全く同一の試料に対し、バリア層励起(Eexc = 2330

meV) を用いた場合(Fig. 4(b))、ゼロ離調時 ( $\delta = E_c - E_x =$ 0) における PL スペクトルでは Rabi 分裂は消失し、単一 のピークが観測された。このピークは単一の Lorentz 関 数でのフィッティングが不可能で、*δ*≠0では各モードの エネルギー反発が Fig. 4(a)と同様に見られる事から(黄 点線)、系全体としての強結合状態は維持しつつ、結合に 寄与していない背景輻射等の古典光子群が共振器を介し て放出され Rabi 分裂スペクトルに重複しているものであ ると考えられる。これは前節で示したバリア層励起時に共 振モードを介して背景輻射が生じる結果と矛盾しない。こ れら結果は励起エネルギーの適切な選択により、スペクト ル領域での doublet⇔singlet (単一光子発生⇔複数光子発 生)変換が可能であることを示唆している(Fig.4挿入図)。

## 3. むすび

Cavity QED 効果を用いた通信波長帯単一 QD 励起子 の自然放出制御デバイスに関する研究開発を行った。単一 QD 励起子-共振器結合において、背景輻射を抑制した高 効率単一光子発生、および強結合形成とその Rabi 分裂ス ペクトルの doublet/singlet 変換制御を実現した。今後強 結合状態下における自然放出レートの時間領域での動的 制御の実現を目指し、屈折率変調等による共振エネルギー および Q 値の時間的変化といった光場に対するアプロー チへと展開していく。

#### 【誌上発表リスト】

- [1] T. Tawara, H. Kamada, T. Tanabe, N. I. Cade, H. Gotoh, E. Kuramochi, M. Notomi, T. Sogawa, Y. -H. Zhang, D. Ding, S. R. Johnson, "Quality Factor Control and Lasing Characteristics of InAs/InGaAs Quantum Dots Embedded in Photonic-Crystal Nanocavities", Opt. Express, Vol. 16 No. 8 pp. 5199-5205 (2008).
- [2] T. Tawara, H. Kamada, S. Hughes, H. Okamoto, M. Notomi, T. Sogawa, "Cavity mode emission in weakly coupled quantum dot-cavity systems," Opt. Express, Vol. 17 No.8 pp.6643-6654 (2009).
- [3] T. Tawara, S. Hughes, H. Kamada, H. Okamoto, P. Yao, P. K. Pathak, T. Tanabe, T. Sogawa, "Cavity-QED assisted attraction between a cavity mode and an exciton mode in a planar photonic-crystal cavity," Opt. Express, Vol. 18 No.3 pp.2719-2728 (2010).

# 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

http://www.brl.ntt.co.jp/people/tawara/

Energy (meV)

Fig. 4 (a) QD 励起および (b) バリア層励起における PL 強度マップ。この試料においては Rabi 分裂約 90 μeV の強結合 状態が形成されている。

Energy (meV)