

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540339

研究課題名（和文） 共振器QEDに基づく高効率な光非線形物質の設計

研究課題名（英文） Design of high efficient optical nonlinear material based on cavity QED

研究代表者

安食 博志 (AJIKI HIROSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・特任教授

研究者番号：60283735

研究成果の概要：新しいタイプの量子もつれ光子対生成法として、共振器-V型3準位系のドレスト状態（光と物質励起状態の結合状態）を介したカスケード緩和過程を提案した。これまでの生成方法と異なり、入射光の偏光と振動数を選ぶだけで、すべてのBell状態の量子もつれ光子対が生成できる。この特徴は、典型的な共振器QED（共振器中の光を量子化した状態として扱う枠組み）効果に由来するものであり、高純度の量子もつれ光子対を生成するうえでも重要な役割を果たす。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：光物性、量子もつれ光子対、共振器

1. 研究開始当初の背景

量子もつれ光子対は光の強い量子状態で、量子コンピューティングや量子情報処理技術の基本的媒体として、最近特に注目を集めている。これまでは主にバルクの非線形光学材料を用いて量子もつれ光子対が生成されていた。最近、東北大学のグループがバルクの半導体結晶を用いた量子もつれ光子対の生成に成功した。そこでは、共鳴励起した励起子分子からの励起子を介したカスケード放射を利用している。ただし、デバイス化の観点から

すると、バルクの結晶よりも半導体ナノ結晶を用いる方が望ましい。しかし、ナノ結晶では光と物質系の相互作用が小さいために、量子もつれ光子対を高効率に生成させることが難しい。そこで、ナノ構造でありながらもつれあい光子対を高効率に生成するような物質設計を行うことが、デバイス化に向けた最重要課題の1つといえる。量子ドットや量子井戸を埋め込んだ共振器は、そのような要求に応えることのできる最も有望な系と考えられている。

一方、研究代表者は本研究課題に関連して、共振器中のナノ結晶による非線形光学応答の理論研究を行ってきた。その結果、以下の成果が得られていた。

- (1) これまで共振器中のナノ結晶による光学応答は半古典論的な考察が主流であったが、共振器QEDに基づいた考え方が不可欠であることを指摘した。
- (2) 量子ドットを埋め込んだ共振器に対して、非線形光学応答の最適化条件を共振器QEDの枠組みで明らかにした。
- (3) 量子井戸 (CuCl) を埋め込んだ共振器による高効率な量子もつれ光子対生成の条件を明らかにした。

2. 研究の目的

本研究では、共振器QEDに基づいた各種非線形光学応答の最適化条件を探索し、光機能デバイスの設計に役立たせることを目的とする。さらに、その土台となる物理学の基礎においても重要な概念を見いだすことも目標とする。

3. 研究の方法

共振器中の励起状態と光の相互作用は、共振器中の光を量子化して取り扱う (共振器QED)。また、input-output theoryを用いて、コヒーレント光を共振器系に入射して生成される光子の状態を計算する。入射光が弱い極限では、解析的に定性的な議論も行う。入射光を強くした場合の光子対の生成効率、量子もつれの度合いは主として数値計算を行う。

4. 研究成果

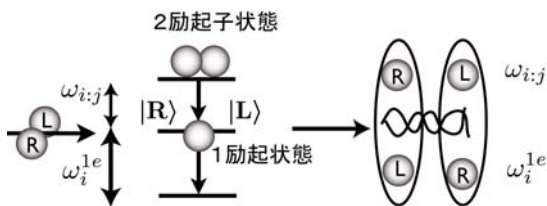


図1：共振器-V型3準位系による量子もつれ光子対生成の概略図。

本研究では、特にV型3準位系 (基底状態と2種類の直交する偏光励起状態からなる) を共振器に埋め込んだ系に着目する。偏光と振動数の異なる2種類のコヒーレント光を入射した場合に生成される量子もつれ光子対の状態とその純度、さらに、その生成効率を重点的に調べた (図1を参照)。

共振器QEDに従えば、共振器-V型3準位系の結合モード (ドレスト状態) は (共振器モードの光子数状態) と (3準位系の状態) の重ね合わせで記述される。共振器に右回り偏光 (R偏光) の光子が1個入った場合のドレスト状態 (1励起状態) は2個あり、それらの準位は真空ラビ分裂をしている。同様に、左回り偏光 (L偏光) の1励起状態も存在し、R偏光の1励起状態と縮退している。共振器に光子が2個入った場合の2励起状態は、2個の光子がそれぞれR偏光とL偏光にある異種2励起状態と、R偏光の光子2個またはL偏光の光子2個の同種2励起状態に分類することができる (図2を参照)。

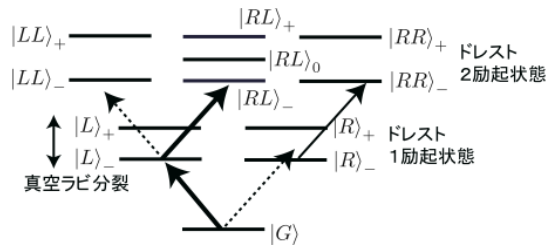


図2：ドレスト状態の準位図。

共振器-V型3準位系にR偏光とL偏光のコヒーレント光を入射して、2励起状態を2光子で共鳴励起するような共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程を考える。この場合、2励起状態から1励起状態を介して量子もつれ光子対が生成される。

V型3準位系は共振器モードと強く結合しているため、ほとんどの光子は入射光と同じ方向に散乱される。したがって、量子もつれ光子対と線形応答で散乱される光子を分離する必要がある。そのためには、振動数でフィルタリングすればよい。例えば、R偏光かL偏光の振動数を1励起状態の下の準位に合わせ、もう片方の偏光の振動数を2励起状態の準位に合わせるとする。すると、1励起状態の上の準位を介して生成される光子対の振動数は入射光子の振動数と異なる (図3の準位図を参照)。生成される光子対の振動数だけが透過するようにすれば、線形応答で散乱される光子を除外することができる。

これまで、入射光子の偏光として右回りと左回りを考えてきたが、直交する直線偏光 (H偏光とV偏光)、直交する斜め偏光 (D偏光とD'偏光) を入射した場合には、別の状態の量子もつれ光子対が生成される。その結果を表1にまとめておく。

	$ \xi_{\pm}\rangle$	$ \xi_0\rangle$
(R, L)	$ LR\rangle + RL\rangle$	$ LR\rangle - RL\rangle$
(H, V)	$ LL\rangle - RR\rangle$	$ LR\rangle - RL\rangle$
(D, \bar{D})	$ LL\rangle + RR\rangle$	$ LR\rangle - RL\rangle$

表 1 : (RL), (HV), (D \bar{D})を入射したときに生成される量子もつれ状態。 $|\xi_{\pm}\rangle$ と $|\xi_0\rangle$ は励起される異種 2 励起状態で、入射光子の偏光に依存する。

これまでの量子もつれ光子対生成と全く異なり、入射光の直交偏光と振動数を調節するだけで、4 種類の Bell 状態 (最大量子もつれ状態) をすべて生成することに注意したい。例えば、束縛励起子準位を介して生成される量子もつれ光子対の状態は入射光子の偏光をどのように組み合わせても $|LR\rangle + |RL\rangle$ しかない。

コヒーレント光はさまざまな光子数状態の重ね合わせであるため、偏光量子もつれ光子対だけではなく、同じ偏光のもつれない光子対も一般には含まれる。そこで、混合状態にある光子対のもつれあいの度合いを調べるためにコンカレンス C を計算した。コンカレンスはもつれあいの度合いが大きくなるにしたがって、0 から 1 へと単調に増加する。量子相関が完全な場合、コンカレンスは 1 である。

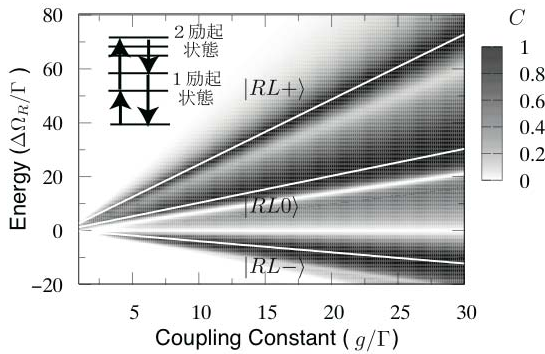


図 3 : g と Ω_R の関数として計算したコンカレンス。3 本の白い実線は 2 励起状態への共鳴励起条件。

図 3 は、共振器モードの光と 3 準位系との相互作用の強さ g (共振器モードの光子の緩和定数 Γ で規格化されている) と R 偏光の入射光振動数 $\Delta\Omega_R = \Omega_R - \omega_0$ (ω_0 は 3 準位系の励起振動数) の関数として計算したコ

ンカレンスを示している。ただし、入射光が弱い極限 (3 次非線形応答) を考え、3 準位系の励起状態の緩和定数は $\gamma/\Gamma = 0.1$ とした。 g が大きくなるにつれてコンカレンスが 1 に近づく。すなわち、ほとんどすべての光子対は量子もつれ光子対であり、同種偏光の光子対の生成が強く抑制されている。

このことは「フォトン・ブロッケード」の考え方から理解できる。N 個の同種偏光の光子が 2 準位系を含む共振器中にある場合、この共振器系のエネルギー準位 (N 励起状態) は $2\sqrt{N}g$ のエネルギー間隔でそれぞれ 2 個の準位に分裂している。1 励起状態の下側の準位に共鳴した振動数をもつ光を共振器系に入射した場合、1 個目の光子は共鳴的に (透過率 1 で) 共振器中に入る。しかし、2 個目の光子は 2 励起準位のエネルギー分裂が 1 励起準位の分裂よりも大きいため共鳴振動数からずれている。したがって、相互作用 g が大きくなるにつれて、2 個目の光子が共振器中に入りにくくなり、同種偏光の光子対が放出されにくくなる。このフォトン・ブロッケードのために g が大きくなるにつれてコンカレンスが 1 に近づく。また、Q 値が大きくなると各準位のスペクトル幅が狭くなり、フォトン・ブロッケードの効果が強くなる。つまり、Q 値が大きいほどコンカレンスは 1 に近づく。

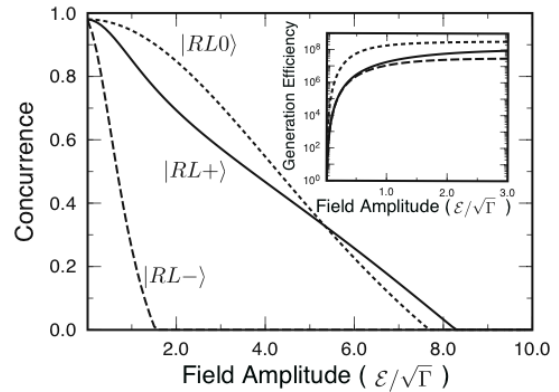


図 4 : 光電場の振幅 ϵ の関数として計算したコンカレンス ($g/\Gamma = 30$)。挿入図は異種偏光光子対の生成効率を示している。

最後に、入射光強度の関数として計算したコンカレンスを図 4 に示す。L 偏光の入射光の振動数を 1 励起状態の下側の準位に合わせ、R 偏光の振動数は 2 励起状態を共鳴励起

する条件に合わせる。また、結合定数は $g/\Gamma=30$ に固定している。入射光強度を強くするにしたがって共振器中の光子数は増えるので、5 励起状態まで含むようにフォック空間を拡張した。挿入図は異種偏光の量子もつれ光子対の生成効率である。コンカレンスは入射光強度が増えるにしたがって小さくなり、最終的に 0 になる。一方、量子もつれ光子対の生成効率は急激に増大し、2 励起状態が飽和するため、生成効率も飽和する。 $0 < \epsilon/\sqrt{\Gamma} < 1$ の範囲で、 $|RL+\rangle$ と $|RLO\rangle$ を共鳴励起したときのコンカレンスはほとんど減少しないが、生成効率は電場強度の 2 乗で増大することに注意したい。このことは、適度な入射光強度で純度の高い量子もつれ光子対を高効率に生成できることを意味している。

これまでに、共振器を利用した量子もつれ光子対の生成に関して様々な方法が提案されてきた。半導体に関してはほぼすべての提案が励起子分子を必要としている。励起子分子を励起した場合には、共振器がなくても量子もつれ光子対は生成される。しかし、本研究で提案した系は、共振器がない場合には決して量子もつれ光子対が生成されない V 型 3 準位系を考えている。これを共振器に埋め込むことにより、ドレスト状態が形成され、ドレスト状態を介したカスケード緩和過程により初めて量子もつれ光子対が生成される。その意味で、共振器 QED の効果が大変重要な役割を果たしている。また、真空ラビ分裂を利用したスペクトルフィルタリングをかけることで、線形応答によるもつれあいのない光子を遮断することができる。さらに、フォトン・ブロック効果により、純度の高い量子もつれ光子対が生成することが可能になる。なかでも、入射光の偏光と振動数を適切に変更するだけで所望の Bell 状態の量子もつれ光子対を生成することができるのは、特筆すべき成果である。以上のように、本研究により共振器 QED に立脚したきわめて斬新な成果を上げることができた。

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 8 件)

- ① H. Ajiki, H. Ishihara, and K. Edamatsu, “Cavity-assisted generation of entangled photons from a V-type three-level system” New J. Phys. 11, 033033-1-9 (2009)
査読有

- ② H. Ajiki and H. Ishihara, “Biexcitonic cavity quantum electrodynamics effect on nonlinear spectra of a quantum dot”

J. Appl. Phys. 104, 123105-1-8 (2008)

査読有

- ③ H. Oka, K. Taniguchi, H. Ajiki and H. Ishihara,

“General mechanism of optical nonlinearity enhancement by cavity QED”

Phys. Rev. B, 78, 245420-1-5 (2008)

査読有

- ④ H. Ajiki and H. Ishihara,

“Entangled-photon generation in biexcitonic cavity QED”

J. Phys. Soc. Jpn. 76, 053401-1-4

査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① H. Ajiki and H. Ishihara,

“Entangled-photon generation from a quantum dot in cavity QED”

8th Int. Conf. on Excitonic Processes in Condensed Matter

2008年6月25日、京都

- ② H. Ajiki and H. Ishihara

“Degree of Entanglement of Photon Pairs Generated from V-Type System in Microcavity”

9th Int. Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors

2008年5月28日、Muritz, Germany

- ③ H. Ajiki and H. Ishihara

“Second-Order Correlation Function of Entangled Photons from a Quantum Dot in Microcavity”

10th Conference on the “Optics of Excitons in Confined Systems”

2007年9月10日、Messina, Italy

- ④ H. Ajiki and H. Ishihara

“Entangled Photon Generation from a V-Type Atom in Microcavity”

The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics

2007年8月27日、Seoul, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安食 博志(AJIKI HIROSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・特任教授

研究者番号：60283735

(2)研究分担者

石原 一 (ISHIHARA HAJIME)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60273611

(3)連携研究者