

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760043

研究課題名 (和文) 新光源としての相関制御された量子もつれ光子の生成

研究課題名 (英文) Generation of correlation-controlled entangled photons as a new light source

研究代表者

岡 寿樹 (OKA HISAKI)

大阪大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：00508806

研究成果の概要 (和文)：

半導体微小共振器系を用いて、「量子相関」という新しい特性をもつ光子対の効率的な生成法およびその制御法を提案し、2光子励起に応用することで、従来と比べ非常に高効率な2光子励起が可能であることを明らかにした。また、量子相関を適切に制御することで、従来の光励起法では難しかったターゲットの電子状態だけを狙った選択励起と励起効率増強が同時に実現できることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

We have proposed efficient-generation and control methods of a photon pair with quantum correlation using a semiconductor microcavity, and have shown that highly efficient two-photon excitation can be realized by utilizing the photon pair, compared with conventional methods. In addition, we have shown that we can concurrently realize the selective excitation of an electronic state and the enhancement of excitation efficiency by controlling the quantum correlation of the photon pair.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,000,000	300,000	1,300,000

研究分野：工学

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：量子相関光子、量子もつれ合い、量子状態制御、共振器 QED

## 1. 研究開始当初の背景

量子もつれ光子対 (以下、もつれ光子) は次世代通信技術として注目されている量子情報通信の情報媒体として有名である。しかし最近では高精度光計測技術、例えば高精度測位・測距システム、あるいは高分解光リソグラフィなど、もつれ光子を光源とした新材料の物質科学・バイオ科学への応用を視野にいたした研究が展開されつつある。これらの実

現のためには、もつれ光子を効率良く生成させること、更にはもつれ光子がもつ「量子相関」の制御が重要な課題となる。

最近、ナノスケールの半導体微小共振器系を用いたもつれ光子生成の新技术が提案され、物質をデザインすることにより、従来の生成法と比較すると桁違いに高い生成効率が実現可能であることが理論的に示された。具体的には、半導体のナノ構造や共振器のサ

イズ、光の入射角を調節することで、従来の半導体における生成法（共鳴ハイパーパラメトリック散乱法）と比較すると生成効率が3桁以上増強する。

半導体微小共振器系を用いたもつれ光子生成の類似研究は、これまでいくつか提案されているが、いずれも量子情報通信技術の要請によるもので、もつれ光子をオンデマンドに生成するのが目的であった。しかし、微小共振器系を利用したもつれ光子の生成法は、制御の自由度が大きいため、もつれ光子の相関制御にも適用が可能である。この生成法をさらに発展させれば、相関制御されたもつれ光子を効率的に生成することが可能となり、励起光源としての様々な応用が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の微小共振器系を利用したもつれ光子生成法をさらに発展させて、新光源としての「相関制御された量子もつれ光子」の効率的生成と光反応場への応用を理論の立場から追求することにある。具体的には以下の二つの目標を設定した。

- (1) 半導体微小共振器系を用いたもつれ光子の相関制御法
- (2) もつれ光子を励起光とした量子ダイナミクスの解析法の確立

微小共振器系から生成されるもつれ光子の量子相関は、生成元となる物質の状態の影響を強く受ける。そこで項目(1)で、光と物質の相互作用、特に微小共振器中に閉じ込められた物質量子状態（励起子状態）と光子との相互作用を微視的な物質デザインを通して制御し、もつれ光子がもつ量子相関の制御と効率的生成の両立を実現する量子もつれ光子生成法を理論の立場から探求する。具体的には、共振器中の光子と量子ナノ構造中の励起子との強結合状態（共振器ポラリトンおよびバイポラリトン状態）を光子-励起子間結合係数、励起光入射角度、共振器離調などを物質デザインにより変化させ、その量子状態を制御することで、もつれ光子の相関制御および効率的な生成条件を解析する。

項目(2)では、光反応場への応用を視野に入れ、もつれ光子を励起光源とした物質の量子ダイナミクス制御の可能性を理論の立場から探求する。光反応では、光を吸収して形成される分子の励起状態が引き金となるため、反応生成物や量子収率は分子の励起状態によって決定される。それゆえ対象とする系によってその解析条件が大きく異なることが考えられる。そこで、まずその第一ステップとして、2光子励起に焦点を絞り、光励起状態のシンプルなモデルである3準位系に対する量子ダイナミクスの解析法を確立し、光反応制御に有効なもつれ光子の量子状態

を同定することを目標とした。

## 3. 研究の方法

本研究が掲げるもつれ光子生成、特に光源設計には、物質デザイン制御の指標が必要になる。そこで研究を効果的に進めるために、まず励起光源として求められるもつれ光子の最適状態を明らかにするため、2. 研究の目的における項目(2)を先行して解析し、その結果を受けて、研究の目的の項目(1)でその最適状態を実現するための物質デザインおよび相関制御法の解析を進めた。

もつれ光子を励起光としたダイナミクスの解析では、解析モデルとして図1に示すような原子系と相互作用する一次元光子場を考えた。ここで2光子パルスは $r$ 軸に沿って伝搬し、 $r=0$ で局所的に原子系と相互作用する。原子系は基底状態 $|g\rangle$ 、中間状態 $|m\rangle$ 、励起状態 $|e\rangle$ をもつ3準位系を考え、基底状態のエネルギーを0とし、 $\hbar=c=1$ の単位系を用いて、中間状態および励起状態のエネルギーをそれぞれ $\omega_m$ 、 $\omega_e$ とおく。また $k_0$ は入射光子の中心エネルギーである。一般的に、光ビームは空間的な広がりをもって伝搬するため、厳密には $r$ 軸に垂直な面における光の空間形状を考慮した3次元的な取扱いが必要になる。しかし本研究で議論する量子効果に対しては、そのような入射パルスの厳密な空間形状はほとんど影響しないため一次元的な取扱いで十分である。

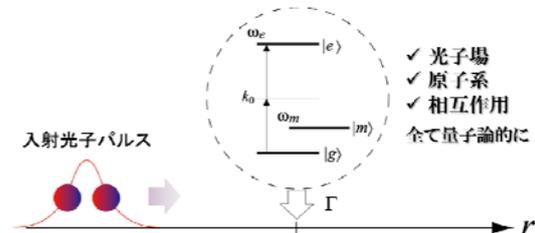


図1. 2光子励起モデルの概念図。

また一般的に2光子励起は、中間状態のエネルギーが入射光のエネルギーと大きく異なる2光子吸収と、中間状態のエネルギーが入射光のエネルギーとほぼ等しい2段階励起の二つに分類される。本研究では、中間状態のエネルギーを変化させ、これら2つの場合について解析を行った。

もつれ光子の相関制御法の研究では、具体的な系として、分布帰還ブラッグ反射鏡(DBR)によって構成される励起子系を閉じ込めた微小共振器系を用いた(図2)。励起子系としては半導体薄膜やJ会合体のLB膜などを想定する。共振器中の光子と薄膜中の励起子との強結合状態（共振器ポラリトンおよび共振器バイポラリトン状態）は光子-励起子間結合係数や共振器離調などを変化させることで制御が可能であり、物質の微視的状态

制御を介した光量子状態制御が可能となる。

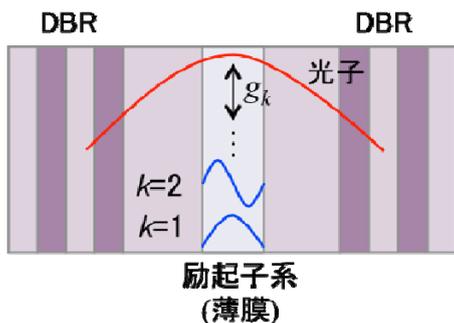


図2. 半導体微小共振器系の概念図

#### 4. 研究成果

##### (1) 2光子吸収に対する結果

図3は2光子吸収効率に関する計算結果であり、もつれ光子と従来のレーザー光の2光子パルスの2入力に対する励起効率を比較したものである。横軸は入射光のパルス幅を入射光の中心波長で規格化したもの、縦軸はもつれ光子による2光子励起効率をレーザー光のもので規格化したもの(増強度)である。この解析から、もつれ光子は常に励起効率で従来のレーザー光を上回ることが分かる。更にパルス幅を制御し、超短パルスのもつれ光子(横軸右側)が生成できれば、100倍近い励起効率の増強が可能になることを明らかにした。この結果は、もつれ光子の生成法のための物質デザインの大きな指標となるものであり、また低強度のもつれ光子でも十分に効率的な2光子励起が期待できることを示唆する重要な結果である。

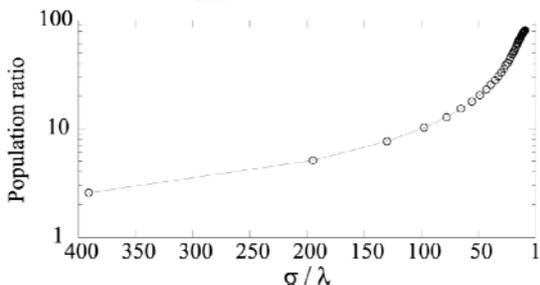


図3. 2光子吸収効率の増強

##### (2) 2段階励起に対する結果

図4は2段階励起効率に対する計算結果である。横軸は原子減衰率 $\gamma$ を入射パルス幅 $\sigma^{-1}$ で規格化したもの、縦軸は励起効率の増強度 $\xi$ を表したもので、もつれ光子によって励起された電子状態の占有率をレーザー光によって励起された電子状態の占有率の最大値で規格化したものである。2段階励起であっても、横軸の値が小さくなる物理条件( $\gamma \ll \sigma^{-1}$ )であれば、10倍近い励起効率の増強が可能であり、もつれ光子を励起光として応用することにメリットがあることが分かる。一方、横軸( $\gamma\sigma$ )が大きいときは、 $\xi$ が1より

も小さくなり、もつれ光子が従来のレーザー光よりも励起効率を著しく低下させてしまうことを明らかにした。このように、中間状態が実励起されるような2段階励起系では、占有率の絶対値そのものは2光子吸収よりも大きくなるが、もつれ光子による効率の増強は小さくなり、2光子吸収と比較するともつれ光子を用いるメリットは少なくなる。

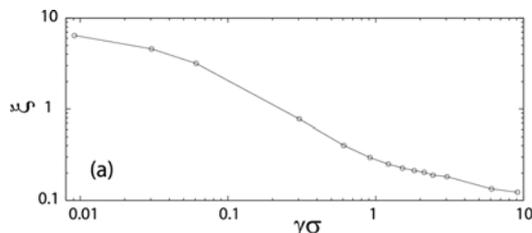


図4. 2段階励起効率の増強

##### (3) 分子系における効率的選択2光子励起

さらに、光反応系における量子状態制御への応用の第一ステップとして、解析対象を原子から分子系へと拡張し、もつれ光子による2光子励起効率の増強を理論的に解析した。もつれ光子とレーザーパルスに対する励起効率を比較した結果、分子系においても原子系同様の著しい励起効率の増強が可能であることを明らかにした。さらに2光子間の量子相関を制御することでターゲットとなる特定の分子励起状態だけを狙った選択励起が可能であることを明らかにした(図5)。光反応は分子励起状態が引き金となって引き起こされるため、本研究で構築した効率的選択励起法は、新しい光反応制御法へと繋がる重要な結果である。

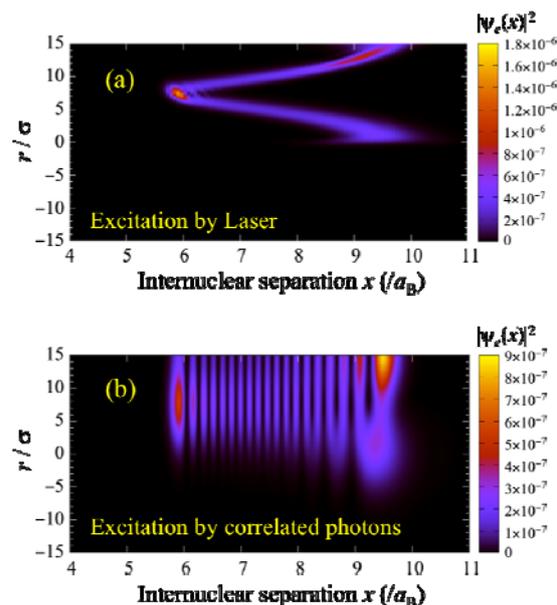


図5. もつれ光子による分子状態の選択励起。レーザー光による励起(a)では分子振動は波束を形成しながら振動するが、もつれ光子による励起(b)では分子振動の単一固有モード

だけを選択的に励起することができる。  
 (4) 半導体微小共振器系による光スクイーミング

半導体薄膜と微小光共振器を用いた系、特に CuCl 薄膜中の励起子分子を利用した光スクイーミング (光の相関制御) を理論的に解析し、量子もつれ光子の生成を最適化する薄膜長および入射光強度が存在することを明らかにした。この結果は半導体微小共振器中の励起子分子を介したもつれ光子の効率的生成原理を提供する重要な結果であり、入射光の入射角度や時間遅延などを新たにパラメータに加えることで、もつれ光子の相関制御も可能となる。

図6は、光スクイーミング度をプロットしたものであり、横軸は入射光の強度、縦軸は入射光の相対位相である。N は薄膜の膜厚に相当するパラメータであり、値が大きくなるほど厚い薄膜に対応する。図中の黒い領域で光スクイーミングが大きくなり、もつれ光子が効率的に生成される。薄い薄膜 (N=5) では2つの比較的広い領域でもつれ光子が生成されることが分かる。一方、厚い薄膜 (N=70) では、もつれ光子の生成領域は極端に狭くなる。しかし生成効率の観点では、N=70の方が5倍ほど光スクイーミングの度合いが大きい。このように薄膜の膜厚の違いにより、もつれ光子の生成条件、生成効率が大きく異なることが分かる。

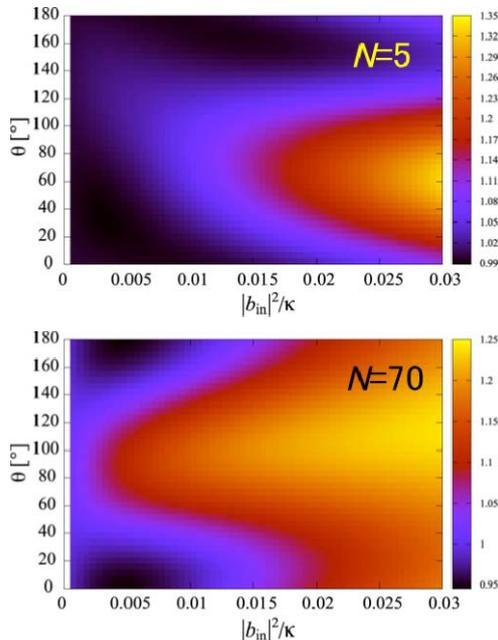


図6. 微小共振器系による光スクイーミング。

本研究の期間内では、量子相関の相関制御法の確立までは残念ながら至らなかったが、もつれ光子の生成条件およびその物質のデザインに関する指標を与えられたことは大きな成果である。とくに半導体微小共振器中の励起子分子を介したもつれ光子の生成は

近年注目を集めており、本研究成果はそのような研究におけるマイルストーンになるものと期待できる結果である。

#### 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)

##### ① Hisaki Oka

Selective two-photon excitation of a vibronic state by correlated photons  
 The Journal of Chemical Physics **134**, 124313-1-6 (2011) 査読有

##### ② 岡 寿樹

量子相関光子による効率的2光子励起の条件  
 レーザー研究 **39**, 133-137 (2011) 査読有

##### ③ Hisaki Oka and Hiroshi Ajiki

Light squeezing via a biexciton in a semiconductor microcavity  
 Physical Review B **83**, 045305-1-5 (2011) 査読有

##### ④ Hisaki Oka

Efficient two-step up-conversion by quantum-correlated photon pairs  
 Optics Express **18**, 25839-25846 (2010) 査読有

##### ⑤ Hisaki Oka

Real-time analysis of two-photon excitation by correlated photons: Pulse-width dependence of excitation efficiency  
 Physical Review A **81**, 053837-1-4 (2010) 査読有

[学会発表] (計8件)

##### ① 岡 寿樹

相関光子による振動電子状態の効率的選択2光子励起  
 日本物理学会第66回年次大会, 2011年3月26日, 新潟大学

##### ② 岡 寿樹

量子相関光子による2光子励起  
 第58回応用物理学関係連合講演会【招待講演】, 2011年3月25日, 神奈川工科大学

##### ③ Hisaki Oka

Theoretical analysis of up-conversion of quantum-correlated photons  
 16th Microoptics Conference, 2010年11月2日, The Ambassador Hotel (台湾)

##### ④ 岡 寿樹, 安食博志

半導体微小共振器中の励起子分子を介したポラリトンスクイーミング

日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 25 日, 大阪府立大学

⑤ 岡 寿樹

量子相関光子による周波数上方変換の理論解析

日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 23 日, 大阪府立大学

⑥ 岡 寿樹

量子相関光子による選択的 2 光子励起

日本物理学会第 65 回年次大会, 2011 年 3 月 22 日, 岡山大学

⑦ 岡 寿樹

量子相関光子による 2 光子励起効率の増強  
レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会,  
2010 年 2 月 3 日, 千里ライフサイエンスセンター

⑧ 岡 寿樹, 石原 一

量子相関光子による 2 光子励起の理論解析  
日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 27 日, 熊本大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 寿樹 (OKA HISAKI)

大阪大学・工学研究科・特任助教

研究者番号: 00508806