

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560042

研究課題名(和文) 第一原理的手法によるデコヒーレンスまで含めた共振器 QED 効果の検証

研究課題名(英文) Cavity QED effect with decoherence by using ab initio calculation of radiation field.

研究代表者

落合 哲行 (OCHIAI TETUYUKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主任研究員

研究者番号：80399386

研究成果の概要(和文)：共振器 QED 効果をみるために、最も重要となるフォトンの局所状態密度を第一原理的に計算する手法を構築した。また通常の電気双極子遷移だけでなく、磁気双極子遷移をも扱えるように理論を拡張した。特に周期内包型フォトニックワイヤー構造に焦点をあて、その光学特性を詳細に解析した。また関連して、トポロジカルに保護されるために、デコヒーレンスや不規則性に強い光の導波路モードの理論的な提案をおこなった。

研究成果の概要(英文)：We have constructed an ab initio calculation of the radiation field to evaluate, in particular, the photon local density of states. Not only electric dipole transitions, but also magnetic dipole transitions are taken into account. We particularly have focused on one-dimensional photonic wire structures, and have analyzed their optical properties in detail. Besides, we have proposed optical waveguides that are robust against disorder and decoherence, owing their topological nature.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 2009年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 2010年度 | 600,000   | 180,000 | 780,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |

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：ナノフォトニクス、共振器 QED、フォトニック結晶

## 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体の微細加工技術を用いて、非常に高精度の微小共振器が作られるようになってきた。特にフォトニック結晶とよばれる人工周期構造に意図的に欠陥を導入してつくられた共振器では、実験的に 100 万を超える共振の Q 値が報告されている。これは共振波長を 1.5[micron] とすると 800[ps] のあいだフォトン共振器の中にとこむこと

を意味し、従来にはない光学デバイス、光電子デバイスの実現が可能になる。なかでも半導体微小共振器内に、エネルギー準位や位置について制御された単一あるいは複数の量子ドットを組み込んだ系は、単一光子光源や、励起子または電子スピンを用いた量子情報処理デバイスへの展開が見込める。何よりも系が固体でできているために、集積化に優れ、光による超高速応答が可能であるという点はこの系の大きなメリットである。

このような微小共振器系に対して、従来の簡易化された共振器のモデル（すなわち、単一の共振器モード+現象論的な減衰パラメータ）を単純に適用するのは危険である。特に導波路変調型の共振器の場合、電磁場の固有モードは空間的な広がりが大きく、局在モードというよりは定在波モードに近い。そのような共振器形状やモードの複雑性を正確に扱う理論が必要である。

## 2. 研究の目的

そこで従来の簡易化された共振器 QED のモデルの理論的扱いを脱却し、現実的な半導体微小共振器やその他のナノフォトニクス系における共振器 QED 効果を電磁場の第一原理計算をもちいて解析する。具体的な共振器ナノフォトニクス系を仮定し、そこに埋め込まれた量子ドットなどの点光源からの発光にかかわる理論の定式化をおこない、諸現象の数値解析をおこなう。また共振器 QED 効果を用いた量子情報処理へ向けて、デコヒーレンスなどのゆらぎに強い系の模索をおこなう。

## 3. 研究の方法

従来、パーセル効果などの共振器 QED 効果を議論するうえで基礎となる理論は、共振器 QED パラメータを用いた現象論的なモデルである。このパラメータは共振器の形状や動作周波数、共振器モードの空間プロファイル、発光体の遷移双極子モーメントなどに依存するパラメータであり、適当な仮定のもとでは、電磁場と発光体の第一原理計算によって求めることができる（本研究では問題を簡単化するために、発光体の第一原理計算にはふみこまず、発光体を理想的な点光源として長波長近似が成り立つことを仮定する）。しかし、近年得られている高 Q 値微小共振器ではそのような単純な仮定では記述できない複雑性をもっている。そこで、従来の共振器 QED モデルには基礎をおかず、電磁場の第一原理計算に立脚する発光の理論を構築する。また、いわゆる共振器には限定せず、一般のナノフォトニクス系をターゲットとする。

計算を簡単化するため、球や円筒、スラブといった building block を仮定し、そこからナノフォトニクス系を構成する。それに対し球面波展開法や円筒波展開法（いわゆるベクトル KKR 法）を用いて、光の散乱を記述する S 行列を定式化し、それを数値計算によって求める。次いで、その応用として電気および磁気双極子の取り出し効率から光の局

所状態密度を求める。得られた局所状態密度をもとに、ナノフォトニクス系に埋め込まれた点光源からの発光を量子論によるアプローチで求める。

## 4. 研究成果

### (1) 周期内包型フォトニックワイヤー構造における光学特性および QED 効果の解析

共振周波数付近でローレンツ型の局所状態密度スペクトルをもつ系は以前の研究から、ナイーブな共振器 QED モデルと良く合致することがわかっている。今回の研究では、非自明な LDOS スペクトルをもつ系として、周期内包型フォトニックワイヤー構造に着目し、その解析をおこなった。この構造の模式図を図 1 に示す。

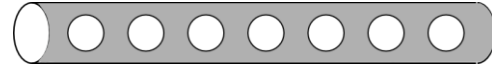


図 1：周期内包型フォトニックワイヤー構造

この系は図 2 にあるようなフォトニックバンド構造をもつ。ここで現れる分散曲線は基本的にファイバーの導波路モードのブリルアンゾーンへの折り畳みとみなすことがで

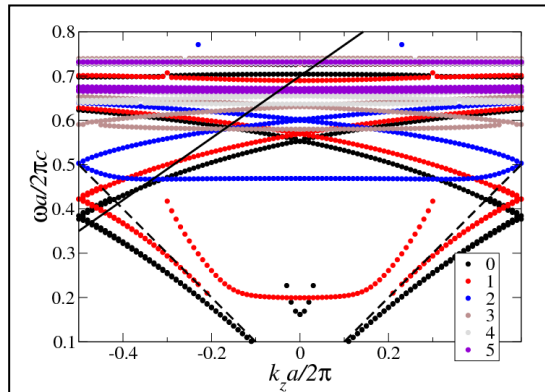


図 2：フォトニックワイヤー構造におけるフォトニックバンド図。色の違いは角運動量をあらわす。

きる。特筆すべきはワイヤー内での屈折率閉じ込め効果と、ブリルアンゾーン端でのスローライト効果により、臨界周波数を境に片側で発散するタイプの状態密度を示すことである。このようなタイプの発散は、ローレンツ型では近似できず、ナイーブな共振器 QED モデルが使えない。

そこで、この系の局所状態密度の定式化をおこなった。このためには、系のT行列を用いて、双極子輻射の問題を解く必要がある。この系のT行列は symbolic に以下の式で与えられる。

$$T = S_{-+} + S_{-} T_{cy} (1 - S_{+-} T_{cy})^{-1} S_{++}$$

$$T_{cy} = \tilde{g} T_{sp} g$$

$$T_{sp} = (1 - t_{sp} G)^{-1} t_{sp}$$

ここで  $S_{\pm\pm}$  はワイヤー表面でのS行列、 $T_{cy}$  ( $T_{sp}$ ) は円筒 (球面) 波ベースでの1次元球配列のT行列、 $t_{sp}$  は1個の球のt行列、 $g, \tilde{g}$  は球面波と円筒波の変換行列である。このT行列からユニタリ行列  $U = 1 + 2T$  が得られ、その固有位相シフト  $\delta_n$  ( $n = 1, \dots, \dim U$ ) から状態密度が

$$\rho(\omega, k_z) = \frac{1}{\pi} \sum_n \frac{\partial \delta_n}{\partial \omega}$$

と求まる。局所状態密度を求めるには、もう少し複雑な手続きが必要だが、基本的には電気双極子と磁気双極子輻射の問題をとけばよい。その結果得られるスペクトルは本質的に上式から得られる片側発散型のスペクトルから大きな変更はない。そこで、このス

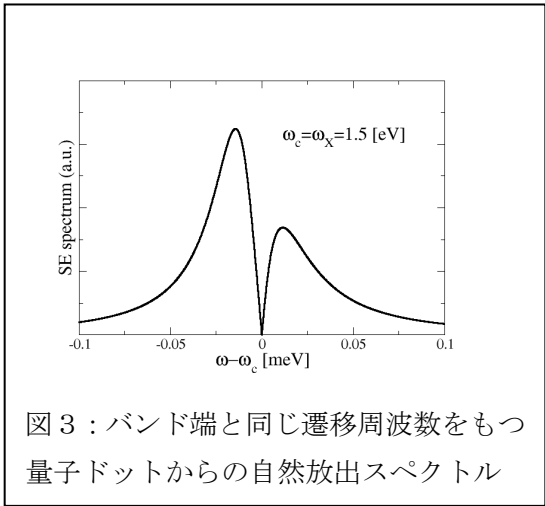


図3：バンド端と同じ遷移周波数をもつ量子ドットからの自然放射スペクトル

ペクトルを解析的に近似した局所状態密度を用いて得られた発光スペクトルを図3に示す。

図の原点がバンド端周波数であり、その右側がバンドギャップになる。量子ドットの遷移周波数をバンド端に一致させることにより、非対称なダブルピークが得られる。これは、通常の共振器QEDにおける真空ラビ分裂

に対応する。

(2) 不秩序や乱雑さに強い導波路モードの解析

量子ドット励起子を固体量子情報処理の基本要素として用いる場合、ひとつのスキームとしてナノフォトニクス系との融合による制御と集積化が考えられる。その場合ドット間の相互作用は光子によって媒介される。光子は導波路によって運ばれるために、ドット間の相互作用を制御するためには、導波路中での光子を外場などにより制御する必要がある。またその光子はデコヒーレンスや乱雑さなどに対して robust でなければならない。そのような導波路の候補として、空間反転対称性および時間反転対称性の破れたフォトニック結晶を用いたカイラルエッジ導波路の提案をおこなった。

カイラルエッジ導波路とは、適当な周波数帯で一方通行の伝播しか許さない導波路であり、電子系では磁場中の2次元電子系によるカイラルエッジ状態がよく知られている。このカイラルエッジ状態はトポロジカルに保護されるゆえに、ゆらぎに強い。またそのトポロジーはバルクのバンド構造から決まる。このアナロジーが光においても成り立つ。この系の模式図を図4に示す。

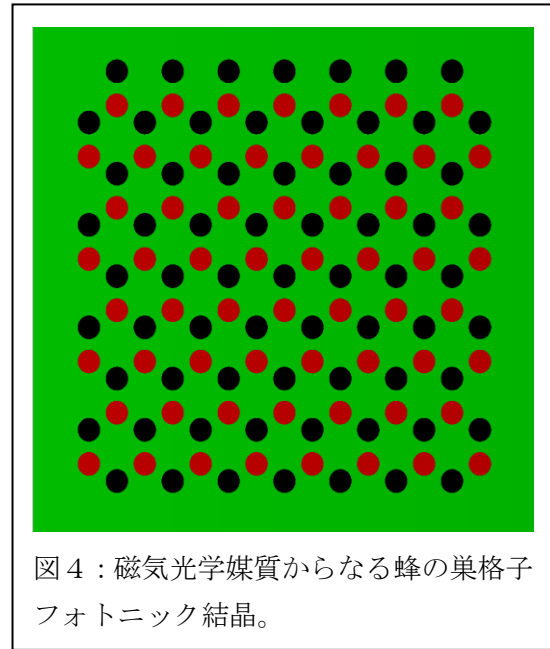


図4：磁気光学媒質からなる蜂の巣格子フォトニック結晶。

A, Bの副格子からなる蜂の巣格子構造をもつフォトニック結晶を仮定し、A, Bは磁気光学媒質とする。A, Bで誘電率や半径に差をつけると、空間反転対称性を破る。また外部磁場をかけると、時間反転対称性を破る。この2つの対称性の破れの度合いをパラメータとして、図5にあるような相図が得られる。

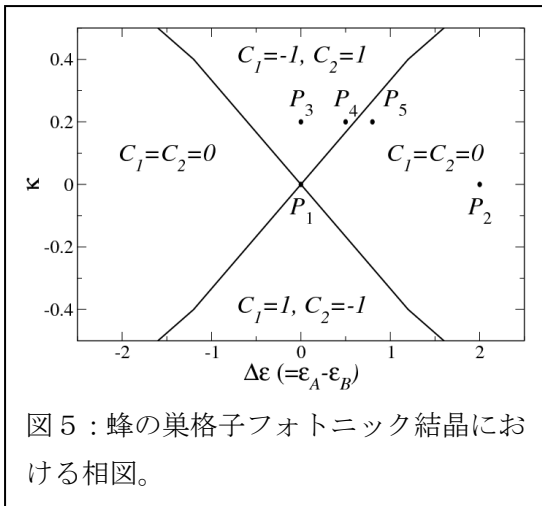


図5：蜂の巣格子フォトニック結晶における相図。

この相図はフォトニック結晶の第一バンドおよび、第2バンドに関するトポロジをあらわしており、図の線上ではバンドギャップが閉じる。この線を境に、2つのバンドの運動量空間におけるトポロジが変化する。図の  $C_1, C_2$  はチャーン数とよばれる位相不変量である。これがノンゼロとなるとき、カイラルエッジモードが現れる。

図6は蜂の巣格子のジグザグ端に局在するエッジモードの分散関係を示す。カイラルエッジモードの特徴は、ギャップをまたがって分散曲線が伸びるといふ点にあらわれる。このような導波路モードの両端に量子ドットがあると、対称性の破れのパラメータ次第でドット間を媒介するフォトンの伝播についてオンオフを切り替えることができ、量子ドット励起子間の相互作用を制御できる。

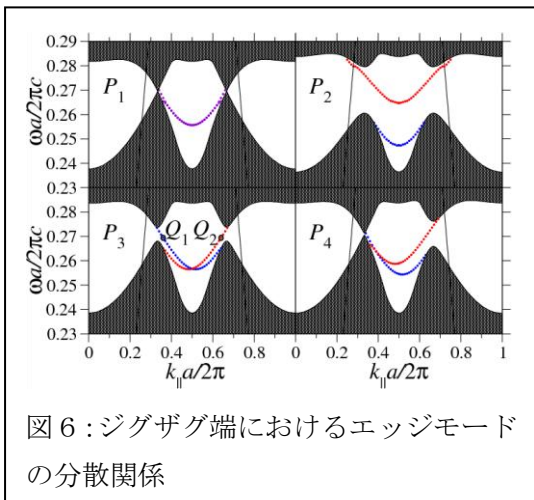


図6：ジグザグ端におけるエッジモードの分散関係

## 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6件)

- ① T. Ochiai, Imitating the Cherenkov radiation in backward directions using one-dimensional photonic wires, *Opt. Express* 18, 14165-14172 (2010). 査読有
- ② T. Ochiai, Topological properties of bulk and edge states in honeycomb lattice photonic crystals: the case of TE polarization, *J. Phys. Condens. Matt.* 22, 225502/1-6, (2010). 査読有
- ③ T. Ochiai and M. Onoda, Photonic analog of graphene model and its extension. Dirac cone, symmetry, and edge states, *Phys. Rev. B* 80, 155103/1-9 (2009). 査読有
- ④ M. Onoda and T. Ochiai, Designing of Spinning Bloch states for stirring nanoparticles, *Phys. Rev. Lett.* 103, 033903/1-4 (2009). 査読有
- ⑤ Y. Yuanzhao, T. Ochiai, et al. (2 番目/7 名), Electronic structure of GaAs/AlGaAs quantum double rings in lateral electric field, *Chin. Phys. Lett.* 7, 882-885 (2009). 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① T. Ochiai, Application of photonic Korringa-Kohn-Rostoker method to one-dimensional photonic wires, Tacona photonics 2010, 2010年11月5日, Bad Honnef.
- ② 落合哲行, フォトニックワイヤー構造におけるスミス・パーセル放射, 日本物理学会 2010年秋季大会, 2010年9月24日, 大阪府立大学
- ③ T. Ochiai, Bulk-edge correspondence in photonic analog of graphene, The international conference on nanophotonics 2010, 2010年6月1日, つくば国際会議場
- ④ T. Ochiai, Topological phase transition in photonic analog of graphene, *Meta' 10*, 2010年2月22日, Cairo.
- ⑤ 落合哲行, 蜂の巣格子フォトニック結晶におけるバルク・エッジ対応, 日本物理学会 2009年秋季大会, 2009年9月26日, 熊本大学
- ⑥ 落合哲行, 空間反転対称性の破れたフォトニック結晶における光トルネード状態と放射力, 日本物理学会 2009年年次大会, 2009年3月28日, 立教大学

- ⑦ T. Ochiai, Berry curvature and optical tornado in photonic crystals, Sapporo Winter school 2009, 2009年1月8日, 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

落合 哲行 ( OCHIAI TETUYUKI )  
独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主任研究員  
研究者番号 : 80399386

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし