

平成21年6月26日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18740252  
 研究課題名(和文) 量子ドット微小共振器結合系での基盤的問題に対する理論的研究  
 研究課題名(英文) theoretical study on fundamental problems in quantum dot-microcavity coupled systems  
 研究代表者  
 井上 純一 (INOUE JUN-ICHI)  
 独立行政法人物質・材料研究機構・計算科学センター・主任研究員  
 研究者番号：90323427

## 研究成果の概要：

半導体微小共振器中に量子ドットが埋め込まれた系を対象とし、量子ドット内部に形成された電荷励起からの自然放出スペクトルを理論的に考察した。その結果、1) Q値が大きい弱結合状態があり得る、2) 弱結合であってもスペクトルがダブルレット構造を持つ場合がある、3) 弱結合と強結合の間に両者がなめらかに移り代わるクロスオーバー領域がある、4) 量子干渉現象の1つである Fano 効果が発現する、5) 時間領域で有意な情報を与える物理量を導入し、それをを用いることで周波数領域と時間領域との相補的な議論が可能になる、の5項目を明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	210,000	2,410,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子/分子/量子エレクトロニクス/プラズマ

キーワード：量子エレクトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

量子情報演算素子を開発するための基盤要素として、Q-bit を実現し、それに対して論理演算を行うことを目指した研究が精力的に行われている。その中で、電荷の励起を用いた Q-bit を実現する系として、半導体微小共振器中に埋め込まれた量子ドットが注目されている。最終的な目標に到達するために、達成しておくべき要素技術がいくつか列挙されているが、その1つに、「量子ドット

内に生成された電荷励起と、共振器内部に存在する光との強結合状態を実現する」というものがあつた。当時の研究指向は、強結合状態を実現するためには、微小共振器の光閉じ込め能、つまり Q 値が大きければよいとされ、Q 値の大きい微小共振器をいかに作るか、に焦点が当てられていた。

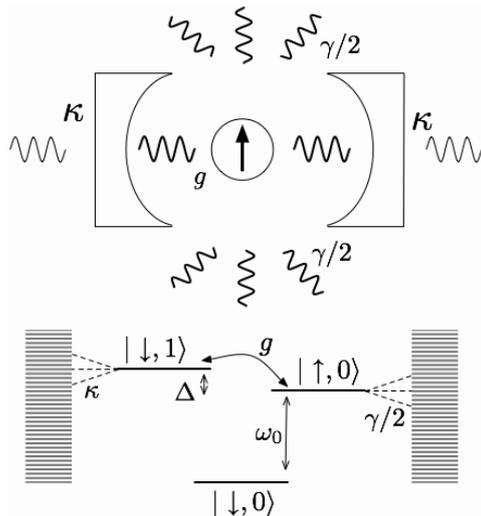
## 2. 研究の目的

Q 値は、微小共振器内部の光の緩和を記述

する量である。共振器内部に存在するのは、光だけではなく、そこに内包された量子ドット内部の電荷励起も存在する。したがってその2つの自由度が結合した状態が、一方の緩和の大きさだけで決まれていると考えるより、むしろ、Q値と電荷励起の緩和の双方が、結合状態の性質を決めていると考える方が自然であると思われる。そこで、共振器内部の光の緩和( $\kappa$ )と、量子ドット内部の電荷励起の緩和( $\gamma$ )の双方を考慮した場合に、得られる結合状態の性質を理論的に調べ、強結合状態を実現するための条件を求めることを目的とし、今後の当該分野発展の一助となることを目標とした。

### 3. 研究の方法

上で述べた目的のためのモデル設定として、半導体微小共振器中に量子ドット1つが埋め込まれている系を考え、光と電荷の結合状態を反映する量として、量子ドットからの自然放出スペクトルを議論する。このスペクトル形状から、形成されている光と電荷の結合状態に関する情報を得ることが可能である。

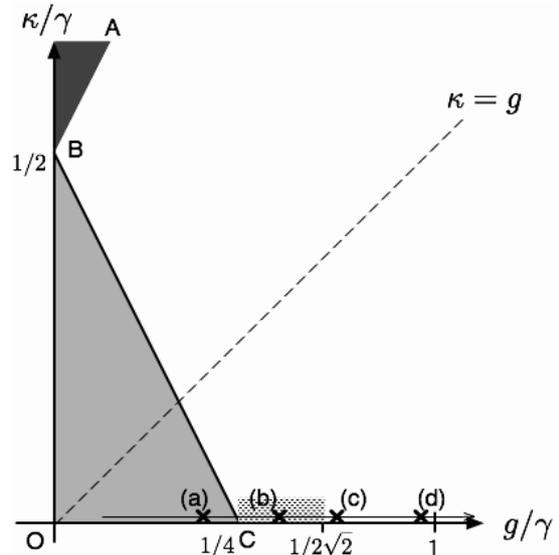


共振器中に許される光のモードは1つであるとし、光と電荷が強さ  $g$  で相互作用しているとする。模式的には上図で表される。このモデルに対し、ハミルトニアンを書き下し、マスター方程式をたてる。これより、電荷励起の2時間相関関数のフーリエ変換として定義される自然放出スペクトルを厳密に計算し、その形状を各パラメータに対して議論する。

### 4. 研究成果

厳密に得られた自然放出スペクトルから、光の電荷励起の結合状態の強弱が決定できる。それらを「相図」として示したものが次図である。灰色で描かれた2つの三角形領域が弱結合領域、それ以外が強結合領域である。得られた1つ目の成果として、従来は小さい

値では弱結合、大きいQ値では強結合という対応が信じられていたが、電荷の緩和も適切に考慮すると、Q値が大きくても( $\kappa/\gamma$ が小さい領域)電荷の緩和と電荷と光の相互作用の比  $g/\gamma$  が小さければ弱結合状態が形成されることがわかった。つまり、Q値を大きくしさえすればいつでも強結合状態が得られるとするこれまでの考え方が適当ではなかったと結論できる。



スペクトル形状の立場からは、弱結合はシングレット構造、強結合はダブルット構造を与えると考えられていた。実際、実験上強結合状態形成の証拠と考えられていたのは、ダブルット構造のスペクトルを観測することであった。そこで相図内の各領域において自然放出スペクトル形状を詳細に調べた。各領域の代表的な形状を5つ選択し、まとめた物が下の表である。

まず、Q値の小さい領域でみられる弱結合状態は、単純なシングレット構造をもち、これまで結論を再確認した。

次に、Q値の大きい領域での弱結合状態に移ると、スペクトル形状の立場からは、さらに2つの領域に分けられることがわかった(下表2, 3段目)。一方の領域では、弱結合状態の特徴であるシングレット構造を持っている。しかし、シングレットはQ値の小さい弱結合状態のシングレット構造とは性質が異なっており、スペクトルピークの幅を決定している物理量が定性的に異なっている。他方の領域では、弱結合であるにもかかわらず、スペクトル形状はダブルット構造を示す。つまり、2つめの成果として、電荷励起の緩和を適切に考慮すると、自然放出スペクトル形状がダブルット構造だからといって、強結合状態を結論できないことがわかった。このダブルット構造は、ピークが2本というよりは、幅の広い1つのピークが鋭く切り込まれたような形状をしていることが特徴である。

表4, 5段は強結合状態のスペクトルを表している. 4段目は $\kappa/\gamma$ が十分小さい場合の強結合状態, 5段目は, 相図白領域の中心付近でみられる強結合状態である. 後者は従来から知られている典型的な強結合状態のダブルレット構造を与えている. これに対して,  $\kappa/\gamma$ が十分小さい場合の強結合状態はダブルレット構造を与えているものの, その構造は弱結合領域でみられたダブルレット構造と酷似している. すなわち, 下表3, 4段目のようなスペクトル形状を観測した場合, その形状だけでは弱結合か強結合かの区別がつかない. その意味で,  $\kappa/\gamma$ が十分小さい領域では強結合と弱結合の境界は明確ではなく, むしろ両者がなめらかに移り変わるクロスオーバー領域として理解すべきであることを提案した(成果3).

下表3, 4段目にみられるダブルレット構造は, 実は他の様々な分野の実験で得られるスペクトル形状と類似している. このことは, 単に光学的な現象ではなく, 背後に, 様々な分野にまたがる共通の物理概念が潜んでいることを示唆している. そのような観点から, 再検討をしてみると, 実は, 鋭く切れ込まれたスペクトル形状を与えている背景には, Fano 効果として知られている量子干渉効果が発現していることがわかった(成果4). ここでいう, 量子干渉は, 量子的な状態が時間発展する際に, 終状態へむかう量子力学的経路が互いに干渉することを意味する. 通常はある1つの経路が支配的であるが, 複数の経路が同等の確率を持っているときに, 干渉が起こる. 具体的には, 離散準位が連続スペクトル中に埋め込まれている系で観測され, 原子分子の分光から, 磁性現象まで幅広く適用される概念である. 現在の問題では, 量子ドット内の電荷励起が緩和して, 共振器外部の光となって観測される際に取り得る経路が2つあることを反映している. 1つは, 量子ドットから直接共振器外部の光へ変換するもの, もう1つは, 一端共振器内部の光へ変換したものがもう一度量子ドット内部の励起として戻り, そこから共振器外部へと緩和する経路である. 後者のような経路が可能になるのは, 微小共振器のQ値が大きく, 共振器内部の光から外部の光へ変換される確率がきわめて小さいからである.

さて, スペクトル形状的には弱結合か強結合かを区別することが困難なクロスオーバー領域においても, 背後の弱/強結合という特性を反映した物理量を提示することは重要である. そのような目的に見合う時間領域の量として, 電荷が励起されている確率の対数で定義される動的緩和時間を導入し, それを計算して有用性を示した(成果5). これらは, 表右列に, スペクトル形状と対応する形式でまとめてある. スペクトル形状では区別

できなかった3, 4段目について, 時間領域では明確な区別が可能であることがわかる. 一般に, 時間領域の情報と, 周波数領域の情報はフーリエ変換で結びついているので, 一方の領域で「類似形状」が得られる場合には, もう一方の領域でも「類似形状」が得られるはずであるが, 「類似」は同一を意味しないので, 定量的にはわずかと見なせる有限の差が, フーリエ変換を通じて強調されていると理解することができる. つまり, 定量的には良い近似になっていても, 実は定性的には大きく異なっているという興味深い例になっている. 今の問題では, 時間領域のグラフに現れるピークの数は, ある方程式の解の数に対応している. つまり, 解が1つであるか, 無限個あるかという定性的な違いが表の3, 4段目には存在し, それは時間領域で初めて顕著になる. それとは対照的に, スペクトル領域では明確な区別があった2, 3段目が, 時間領域ではともにピークを1つ持つ構造となり, 今度は時間領域では定性的な区別がなくなった. ここから, 周波数領域, 時間領域それぞれの情報は相補的であるので, どちらか一方だけではなく, 両者を併せて議論する必要があることがわかる.

本研究で得られた結果は, 今後, 量子情報演算素子を設計する上で有用な知見を与えていると考えている. また, 基礎的な問題としても, 複数の緩和経路を持つ系の応答関数という非自明な問題を厳密解を用いて解析しているという特徴を有すると考えている.

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 4 件)

- ① Jun-ichi Inoue, Tetsuyuki Ochiai and Kazuaki Sakoda,  
“Spontaneous emission properties of a quantum dot in an ultrahigh-Q cavity: Crossover from weak- to strong-coupling states and robust quantum interference”,  
Phys. Rev. A vol.77, 015806-1 -- 015806-4 (2008). 査読有
- ② J. Inoue, T. Ochiai and K. Sakoda,  
“Spontaneous emission from an exciton in a quantum dot embedded in a microcavity”,  
Phys. Stat. Sol. (c) vol.5, 2473 -- 2476 (2008). 査読有
- ③ Jun-ichi Inoue, Tetsuyuki Ochiai and Kazuaki Sakoda,  
“Emission Spectra from a High Q Weak Coupling System”,  
J. Phys. Soc. Jpn., 75, 094720-1 -- 094720-5 (2006). 査読有
- ④ Tetsuyuki Ochiai, Jun-ichi Inoue and Kazuaki Sakoda,  
“Spontaneous emission from a two-level atom in a bisphere microcavity”,  
Phys. Rev. A vol.74, 063818-1 -- 063818-9 (2006). 査読有

[学会発表] (計 1 件)

- ① 井上純一, 落合哲行, 迫田和彰 「高 Q 値弱結合領域での自然放出特性」  
日本物理学会第 6 2 回年次大会, 北海道大学,  
2007 年 9 月 21 日 ~ 24 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上純一 (INOUE JUN-ICHI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・計算  
科学センター・主任研究員  
研究者番号 : 90323427

### (2) 研究分担者

無し ( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者  
無し ( )

研究者番号 :