

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。

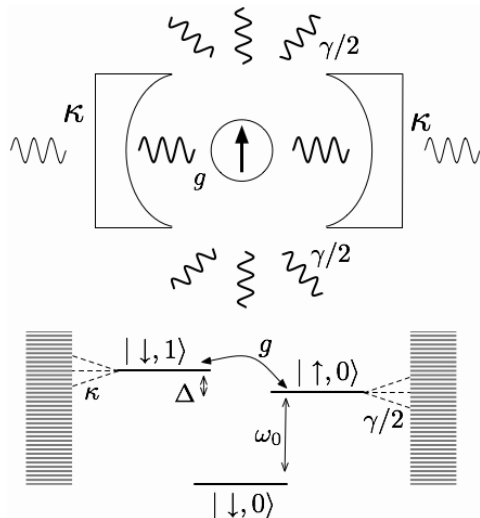
2. 研究の目的

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っ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(κ)と、量子ドット内部の電荷励起の緩和(γ)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。

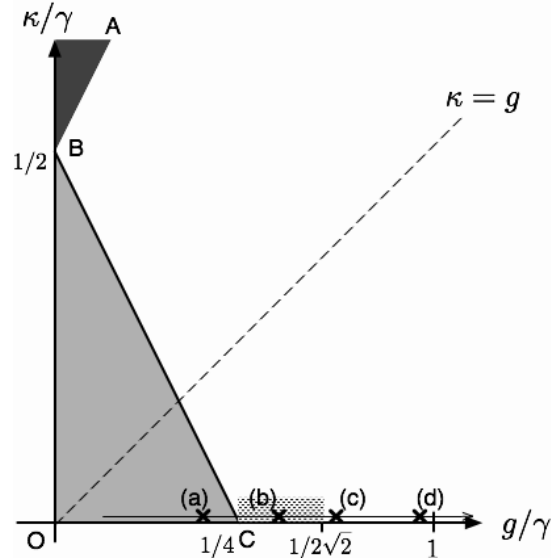


共振器中に許される光のモードは1つであるとし、光と電荷が強さ g で相互作用しているとす。模式的には上図で表される。このモデルに対し、ハミルトニアンを書き下し、マスター方程式をたてる。これより、電荷励起の2時間相関関数のフーリエ変換として定義される自然放出スペクトルを厳密に計算し、その形状を各パラメータに対して議論する。

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(κ/γ が小さい領域)電荷の緩和と電荷と光の相互作用の比 g/γ 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。

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 :