

京都大学	博士 (電子工学)	氏名	山口 真
論文題目	半導体量子ドット・微小共振器結合系における共振器量子電磁力学の理論		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、半導体量子ドット・微小共振器結合系の発光過程を統一的に説明できる理論手法を開発・体系化したものであり、全7章からなる。</p> <p>一般に、発光体が微小共振器の内部に置かれると、その発光過程は大きく変化する。このような現象を取り扱う研究分野は共振器量子電磁力学 (cavity quantum electrodynamics; 共振器 QED) と呼ばれ、もともとは発光体として原子を用いることで詳細に調べられてきた。しかしながら、半導体内部において共振器 QED の効果を引き出すことができれば、従来の半導体発光素子の大幅な性能向上だけでなく、無閾値レーザや高効率な単一光子光源、量子ビット記憶・演算素子といった、これまでにない光素子を実現できるという期待がある。このため、近年、半導体量子ドットを微小共振器中に埋め込み、その結合を評価する研究が盛んに行われている。</p> <p>しかしながら、量子ドットを用いた共振器 QED においては、従来の理論では説明できない現象が複数存在し、この分野の発展を大きく阻んでいた。特に、共振器の共振波長と量子ドットの発光波長が異なる (離調した) 状況においても、共振器準位から強い発光が得られるという現象は、10 年程度前から報告・議論されてきたにも関わらず、その明確な物理起源は不明のままであった。さらに、この現象の他にも発光ピークの分裂 (Rabi 分裂) が期待される共鳴条件下においては、代わりに三重線 (Triplet) が観察されることなども報告されている。</p> <p>このように量子ドットを用いた共振器 QED においては、発光体として原子を用いた場合には観察・予測されてこなかった物理現象の存在が明らかになりつつある。このため、共振器 QED の新たな応用や用途を開拓していく上で、実験事実を正確に解釈、そして予測できる理論手法の確立が必要不可欠である。これに対し、本論文では、原子系において構築された共振器 QED の理論を基礎として、半導体量子ドット・微小共振器結合系の発光過程を統一的に取り扱う理論手法を確立することにより、上述した未説明現象、すなわち、(i) 離調時における共振器準位の発光、および、(ii) 共鳴時における Triplet、の物理機構を解明している。以下に、それぞれの章における内容を示す。</p> <p>第1章は、序論であり、本研究で対象とする半導体量子ドットを用いた共振器 QED の背景、現状、そして問題点について述べている。その後、本研究の位置づけ、目的を明確にしている。</p> <p>第2章では、原子系において構築された共振器 QED の理論を基礎として、量子マスター方程式と呼ばれる解析手法を一般的な視点から説明している。さらに、この手法を利用した計算方法などを示している。</p> <p>第3章では、まず量子ドットを2準位系により近似し、その周囲に存在する電子や音響量子との相互作用 Hamiltonian を導出している。次に、この相互作用 Hamiltonian を用いて、第2章で説明した量子マスター方程式を求めている。その後、簡単な解析例を示すことにより、純位相緩和(エネルギー緩和を伴わないデコヒーレンス (量子干渉消失) 過程) が2準位系に対して生じること</p>			

を説明している。また、量子ドット・微小共振器結合系から放出された光の検出モデルについても詳説し、定式化を行っている。

第4章では、第3章の定式化に基づき、量子ドット・微小共振器結合系における発光過程の解析を行っている。一般に、微小共振器の内部に置かれる発光体を理想的な2準位系と見なせる場合、共振器 QED においては2つの重要な発光機構が知られている。一つは、2準位系と共振器との結合が比較的弱い場合に発現する Purcell 効果であり、もう一つは、両者の結合が比較的強い場合に発現する Rabi 振動・分裂である。しかしながら、第4章においては、発光体として量子ドットを用いた場合、Purcell 効果や Rabi 振動・分裂に次ぐ新たな発光機構が存在することを示している。その発光機構とは、純位相緩和に基づく量子アンチゼノ効果 (quantum anti-Zeno effect; AZE) である。AZE とは一般に、連続的な観測やデコヒーレンスによって量子状態間の遷移速度が加速される現象として知られるが、本論文では発光スペクトルの視点から AZE の新たな物理側面を見出している。そして、AZE を用いることで、初めて離調時における共振器準位の発光を説明し、その物理起源を解明している。しかしながら、第3章の定式化に基づいて解析を行うと、2準位系と共振器とが共鳴する際には依然として Rabi 分裂が生じ、共鳴時における Triplet を説明できないことに言及している。

第5章では、これまでの定式化 (第3章) に基づいた場合、共鳴時の Triplet を説明できないという結果 (第4章) を踏まえ、より現実に近い物理モデルの考案を試みている。特に、第3章の定式化では、量子ドットを2準位系により近似しているが、現実の量子ドットでは電子や正孔の配置に応じて荷電励起子や励起子分子等の種々の電子状態が形成される。そこで、この事実に着目して定式化を行い、量子マスター方程式の改良を行っている。

第6章では、第5章の定式化に基づき、発光スペクトルを解析している。その際、量子ドット内部に形成される種々の電子状態と純位相緩和とを同時に考慮した場合には、共鳴時には Rabi 分裂でなく Triplet が生じることを明らかにしている。これは、単純な2準位モデル (第3章, 第4章) には存在しなかった性質である。そして、この現象を物理的に解釈した結果、共振器と共鳴した電子状態が Rabi 分裂を形成する過程と、共振器とは非共鳴な電子状態が AZE を生じる過程とが、それぞれ別々の時刻に生じてスペクトル領域で重なることで、共鳴時の Triplet が形成されることを解明している。また、実験報告との比較も同時に行い、理論と実験は、非常によい対応をもつことを示している。これにより、量子ドット・微小共振器結合系の発光過程を高精度に説明できる理論の構築に成功したと結論付けている。

第7章は結論であり、本論文で得られた結果をまとめると同時に、今後の展開について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、半導体量子ドット・微小共振器結合系における発光過程を取り扱う理論手法を開発・体系化したものである。一般に、発光体が微小な光共振器の内部に置かれた場合、その発光過程は大きく変化する。このような発光過程を取り扱う研究分野は共振器量子電磁力学 (cavity quantum electrodynamics; 共振器 QED) と呼ばれ、無閾値レーザーや高効率な単一光子光源、量子ビット記憶・演算素子といった、従来にない応用が期待されている。しかしながら、発光体として半導体量子ドットを用いた場合には、従来の共振器 QED の理論では説明できない2つの現象が存在し、この分野の発展を大きく阻んでいた。まず1つ目は、共振器の共振波長と量子ドットの発光波長が異なる (離調した) 状況においても、共振器準位から強い発光が得られるという一見、エネルギー保存則に反した現象である。また2つ目は、両者が共鳴した状況において、従来の理論からは発光ピークの分裂 (Rabi 分裂) が予想されるのに対し、実際には3重線 (Triplet) が観察されるという現象である。本論文では、これらの未解明現象を統一的に説明できる理論の構築に成功している。得られた主な成果は、次の通りである。

1. 量子ドットを単純な2準位系で近似し、その周囲に存在する電子や音響量子との相互作用と、それに伴う純位相緩和 (デコヒーレンス過程の一種) を考慮して、共振器 QED の定式化を行った。その結果、純位相緩和に基づく量子アンチゼノ効果 (quantum anti-Zeno effect; AZE) が、離調時における共振器準位の発光に対して非常に重要な物理機構となることを見出した。AZE とは、一般に、連続的な観測やデコヒーレンスによって量子状態間の遷移速度が加速される現象として知られる。しかし、これまで AZE が発光スペクトルに与える影響は不明確であった。本論文では、発光スペクトルの視点から AZE のもつ新たな物理側面を明らかにし、初めて、離調時における共振器準位の発光を解明した。
2. 現実の量子ドットでは、2準位系とは異なり、電子や正孔の配置に応じて荷電励起子や励起子分子等の種々の電子状態が形成される。そこでさらに、これらの電子状態と AZE とを同時に考慮できる理論を構築した。その結果、共振器と共鳴した電子状態が Rabi 分裂を生じる過程と、共振器とは非共鳴な電子状態が AZE を生じる過程とが、それぞれ別々の時刻に生じて重なることで、共鳴時の Triplet が形成されることを突き止めた。

以上のように、AZE の新たな物理側面を見出し、現実の物理系において AZE が担う役割を明確に示したという点において、本論文の独創性は非常に高い。また、本論文において構築された理論は、半導体量子ドットを用いた共振器 QED の実験事実を正確に解釈できるだけでなく、冒頭で述べた応用上の設計指針を得る上でも極めて有力な手段となり得る。このように本論文は、学術上、実際上における寄与が極めて大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。また、平成 22 年 2 月 1 日、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行い、合格と認めた。