

京都大学	博士 (工学)	氏名	中村 達也
論文題目	量子ドット-フォトリック結晶ナノ共振器結合系の発光制御		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、量子ドット・ナノ共振器結合系のデバイス応用を見据えて、単一の半導体量子ドットを内包するフォトリック結晶ナノ共振器の特性を制御することによる、量子ドット・ナノ共振器結合系の結合状態の制御を提案・実証した成果をまとめたものであって全7章から構成される。</p> <p>発光体と光共振器の融合した系における発光現象を研究する共振器量子電磁力学(Cavity quantum electrodynamics: Cavity-QED)と呼ばれる研究分野は、発光体と光共振器の融合した系のなかでもっとも単純な、単一共振器モード-単一二準位電子結合系における、弱結合領域における電子系からの自然放出割合の増大(Purcell effect)や、強結合領域におけるコヒーレントな相互作用による振動的なエネルギーの授受(Rabi 振動・分裂)などの非常に興味深い物理現象を予言する。これらの現象は量子状態の制御による量子ビット・演算素子のような量子情報処理や、高確率での単一光子の生成、無閾値レーザになどのまったく新しい光デバイスの応用が期待されている。従来、Cavity-QED の検証は、発光体として孤立原子を、光共振器として空洞共振器を用いて実験・理論の両面から行われてきた。さらに Cavity-QED に基づく物理現象を半導体内部で生じさせることが出来れば、デバイスの小型化や定常的なデバイス動作、既存の情報処理デバイスとの高い親和性などさまざまな恩恵を受けることが出来ると予想される。</p> <p>そこで、近年発達が著しい半導体微細加工技術を生かして、固体中における Cavity-QED の研究が精力的に進められており、半導体中に形成した微小共振器と量子ドットを組み合わせる Purcell 効果や Rabi 分裂など、Cavity-QED に基づく、著しい発光現象の変調が確認されてきた。しかし、発光体と共振器の結合状態を変化させることは難しく、それぞれの特性や位置関係などで決まる静的な結合状態を観察しているにすぎず、固体 Cavity-QED を現実的な応用へと高めるために Cavity-QED を制御する方法が必要であった。</p> <p>そこで本論文では、低損失な共振器や反射鏡、導波路を形成可能な 2 次元フォトリック結晶構造を用いて、これらの光機能を集積することで特性を変調可能なナノ共振器を形成する技術を用いて、共振器と量子ドットの結合状態を変化させる手法を提案・実証した。結果として共振器の光閉じ込めの性能指数である Q 値を 3500 から 6900 まで変化させることで、量子ドット・共振器結合系の発光レートを 2 倍以上変化させることに成功した。また、共振器 Q 値を高速に制御することで発光現象そのものを変化させられることを実証した。</p> <p>第 1 章は序論であり、量子ドット・光共振器結合系について過去の報告を振り返り、固体中においても Cavity-QED の予言する興味深い現象が観測されていることを述べた後、量子ドット・光共振器結合系を現実的な応用に高めるための物理現象の制御の必要性が指摘されている。</p> <p>第 2 章では Cavity-QED のもっとも単純な系である単一二準位電子系と共振器の結合状態における物理について説明し、この系において共振器の Q 値によってその振る舞いが大きく変化することが示されている。そのあと、Q 値の制御による電子系と共振器の結合系の物理現象の変調により、量子状態の制御やタイミングを制御した単一光子の発生などの応用が期待できることが述べられている。</p> <p>第 3 章では本研究において用いるフォトリック結晶について概説し、量子ドット・フォトリック結晶ナノ共振器結合系の作製方法について述べられ、典型的な評価手法である PL 測定法、窒素</p>			

堆積による結合状態評価手法, 反射測定法が導入されている

第4章では, 有限領域時間領域法を用いたフォトニック結晶のシミュレーション手法を導入し, 主に垂直方向の特性に着目して解析を行い, Cavity-QED の観測に適したフォトニック結晶構造について検討されている。

本論文において用いる 2次元フォトニック結晶の作製時には, フォトニック結晶の下部に半導体基板が存在することを避けられない。本論文では, フォトニック結晶共振器の放射成分が半導体基板により反射されることでフォトニック結晶共振器の特性が変化すること指摘した。加えて, フォトニック結晶スラブと半導体基板の距離を最適化することでCavity-QEDに基づく物理現象の測定に適した構造を設計することを提案し, 量子ドット-共振器結合系の測定シグナルが50倍以上に改善されることを示した。測定シグナル強度の向上は, 先述した単一光子発生において重要な, 単一光子発生確率の向上につながる重要な成果である。

本論文ではフォトニック結晶に共振器-導波路-反射鏡集積系を構築することで, 孤立共振器から Q 値を下げ, その下げ幅を変化させることで量子ドット-フォトニック結晶共振器系の発光現象を制御することを提案している。ここで, 量子ドット-フォトニック結晶共振器結合系を柔軟に制御するために, 共振器の Q 値を大幅に変化させる必要がある。その前提条件としてフォトニック結晶共振器の Q 値が十分に高い必要がある。従来よりフォトニック結晶共振器の Q 値を高めるためにさまざまな構造が提案されてきたが, 高 Q 値化にともないモード体積が大きくなる傾向にあった。モード体積が大きくなると, その分量子ドットと共振器の結合は弱くなってしまふ。そこで, 本論文では共振器の電界分布から漏れ成分を抽出・可視化し, 漏れ成分が集中する構造部分を補正することでモード体積を保ったまま Q 値を増大させる, 新たなフォトニック結晶共振器の設計手法を提案した。実際に提案手法を L3 共振器, zero-cell 共振器に適用することで, それぞれ Q 値 500 万, 100 万と非常に高い Q 値が得られることを示し, 加えてモード体積の変化を 10%以下に抑制できることを明らかにした。

第5章では, 本論文の目的である, 共振器 Q 値の制御による量子ドット・ナノ共振器結合系における物理現象の制御を達成すべく, フォトニック結晶構造についての検討および制御方法について検討し, 静的な物理現象の制御を実証した結果について述べられている。

共振器 Q 値を制御可能な構造として, フォトニック結晶中の共振器-導波路-反射鏡集積系を用いた。この系は従来より Q 値制御が可能であることが述べられ, 実験的にも実証されていた。今回, 詳しく解析し, 数値シミュレーションをすることで, 変調を受ける共振器モードが, 理論式から得られる Q 値や, 共振波長の変化とはズレることを示した。またこのようなズレが, 共振器と導波路内に形成される Fabry-Perot モードとの結合によるものであることを指摘した。

加えて, 2次元フォトニック結晶において安定して Q 値を制御手法として共振器表面に固体窒素を凝縮させたのち, レーザ照射により局所的に剥離する窒素堆積・剥離法を導入した。 Q 値が 3500 から 6900 まで変化するフォトニック結晶共振器を作製し, 上述した窒素堆積・剥離法を用いて Q 値を変化させながら量子ドットの発光を観察することで, 発光レートを 2.3 倍変調することに成功し, Q 値の制御により発光現象が制御できることを実証した。

第6章では, 第5章で述べた量子ドット-フォトニック結晶共振器結合系の Q 値変調を, キャリアプラズマ効果を用いて高速に発生させることで発光現象を変調可能であることを示した。実験で観測された発光現象の変調効果はきわめて小さいものの, 実験条件の改善で変調の効果をより大きくすることが可能であることを数値シミュレーションを通して示した。

第7章は結論であり, 本論文の成果について要約し, 将来の展望について述べられている。