

(論文内容の要旨)

本論文は2次元フォトニック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系に関する成果をまとめたものであり、6章から成る。フォトニック結晶とは周期的屈折率分布をもつ新しい光ナノ構造であり、特定の波長域の光の存在を許さないフォトニックバンドギャップをもつことを特長とする。フォトニックバンドギャップは自然放出の抑制に利用可能であり、またフォトニック結晶に適切な人為欠陥を導入すると、光ナノ共振器等が形成可能となる。これに対して量子ドットは電子を3次元的にドブロイ波長程度の領域に閉じ込めるナノ構造であり、デルタ関数状の状態密度をもつため狭い線幅をもつ。またキャリアが空間的に局在することによって、バルク半導体や量子井戸と比較して非発光再結合や位相緩和が抑制されるという特長をもつ。これらの量子ドットとフォトニック結晶ナノ共振器を組み合わせることで、固体において共振器電磁気学的効果が発現され、さらに将来的には量子情報処理に利用できる可能性が期待されている。共振器電磁気学的効果（パーセル効果や真空ラビ分裂等）は共振器Q値と共振器体積の比が大きいほど、また発光体の緩和が少ないほど効果が大きくなるため、前者2つを同時に満たすことのできるフォトニック結晶ナノ共振器と後者を満たすことのできる量子ドットを利用することが非常に有効である。ここで、これらを用いた量子情報処理技術を開発していくには、まずこの系における共振器電磁気学効果の基礎的研究を行う必要がある。しかしながら、このような研究は始まったばかりであり、様々な作製および評価上の課題が存在する。本研究においては、その中で最も重要と考えられる量子ドットとナノ共振器の一对一の相互作用を実験的に観測する手法を確立し、状況を大幅に前進させることに成功した。また、作製法および基礎評価法に関しても大幅な改善を達成した。

第1章は序論であり、まず本研究の背景であるフォトニック結晶と量子ドットの基礎、およびそれらの融合系の現状および期待される効果が述べられている。つぎに本研究の位置づけ、目的が述べられている。

第2章では、本研究における基礎となる手法が述べられている。まずフォトニック結晶との融合を考慮した量子ドットの結晶成長法および最適化方法が述べられ、次にフォトニック結晶およびナノ共振器の設計法および作製方法が述べられている。

第3章では、まず基礎段階として量子ドットと2次元フォトニック結晶（欠陥を含まない）の評価を行い、フォトニックバンドギャップの効果を確認している。2次元フォトニック結晶の面内方向においてフォトニックバンドギャップによって自然放出が禁止されることで発光寿命が増大し、そこで抑制されたエネルギー放出が面外方向へと分配されることで、上面への発光強度の増加が観測されたことが述べられている。また量子ドットを発光体として用いたことで非発光緩和過程が抑制されたため、これらの寿命の増大と上面への発光強度の増加が2次元結晶での理論限界に近い値まで発現されたことも述べられている。

さらに、フォトニック結晶に点欠陥を導入してナノ共振器を形成することで、共振モードを人工的な発光チャンネルとして用いることについて述べられている。この場合、ナノ共振器と多数の量子ドットが相互作用しており、面内のフォトニックバンドギャップの自然放出抑制効果と量子ドットの非発光緩和過程抑制効果によって量子ドットに蓄積されたエネルギーが、ナ

ノ共振器との相互作用を通じて効率よく面外に放出されるため、非常に低い励起強度から共振器モードの発光が観測されることが示されている。また、比較的高温においては量子ドット間のキャリアの移動が生じるため、ナノ共振器と強く相互作用している量子ドットが優先的に発光している可能性が示唆された。

第4章においては共鳴励起法を用いることで共振器内部にある小数の量子ドットのみを励起する手法を確立した結果について述べている。ナノ共振器の高次モードに波長と偏光方向を合わせたレーザを用いて共鳴励起を行うことにより、そのモード電界分布内に存在する量子ドットのみを選択的に励起する手法を提案し、これによって背景的な発光を抑制できるだけでなく、共振器内部に存在する個々の量子ドットの発光線を個別に観測することに成功している。また、温度を変化させることで量子ドットの発光線を共振器モードに一致させたときに発光強度が増大する現象を観測し、パーセル効果が生じていることを確認している。またその増大割合を理論的に検証し、量子ドット位置における共振器電界の大きさの上限と下限を推定して、量子ドットが存在する位置を推定している。さらに、様々な共振器高次モードを通して励起を行い、励起モードに対する量子ドットの発光強度を測定し、これを各高次モードの電界分布の違いを考慮して検証することで、共振器内部で量子ドットが存在する位置をさらに絞り込むことに成功している。

第5章においては、量子ドット・ナノ共振器相互作用をより純粋に観測するための手段として、反射測定法を開発したことが述べられている。まず発光測定等の従来の測定方法では、電子系を励起してから量子ドットの基底準位にまでキャリアが到達するまでの緩和過程が量子ドットとナノ共振器の相互作用を測定する上で外乱となっているため、共振器波長の光を直接入射してその応答を観測する反射スペクトル測定法が純粋な観測のためには有効であることが述べられている。つぎにこの反射測定法を確立するために、様々な共振器の反射スペクトル測定を行い、また得られた結果を理論計算結果と比較することで、広い波長範囲にわたって反射スペクトルから共振波長や共振器Q値等の情報を得ることが可能であることを実証している。また、量子ドットを含む共振器および含まない共振器に対して測定を行い、どちらの場合においても共振モードの測定が可能であることを示している。また2次元フォトリソニック結晶の厚みが材料内共振波長の約1/2の時に反射スペクトルが非常に弱くなることを実験において発見し、これがある種の干渉効果によることをモード結合理論によって解明している。最後にこのような反射測定法は、量子情報的な応用では重要となるデコヒーレンスの影響をできるだけ抑制した測定を可能にする手法として有用であることを述べている。

第6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2次元フォトリック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系について報告している。ナノ共振器と量子ドットの融合系は発光制御や量子情報処理への応用可能性が期待されており、本論文ではその実現のベースとなる様々な基礎的効果・技術を検討した結果を示している。得られた主な成果は以下のようにまとめられる。

1. まず2次元フォトリック結晶に多数の量子ドットを導入した系について検討を行い、2次元フォトリックバンドギャップの効果を検証している。面内方向への発光抑制と面外方向へのエネルギー分配が同時に観測され、バンドギャップ効果が実証された。またこのような系にナノ共振器となる点欠陥を導入すると、その共振モードがフォトリックバンドギャップ中に生じた唯一の発光チャネルとして作用するため、量子ドットに蓄えられたエネルギーがナノ共振器との相互作用を介してのみ光に変換される状況が実現できることを明らかにした。

2. 続いてナノ共振器と相互作用する量子ドットの数減らしてより純粋な相互作用効果を調べる検討を行っている。偏光方向および波長を一致させたレーザを用いて共鳴的にナノ共振器の高次モードを励起し、これを介して共振器内に局在した領域に存在する量子ドットのみを励起することで、個々の量子ドットからの発光線を観測することに成功した。さらに温度を変えることで、この発光線をナノ共振器の波長に一致させ、発光強度の増大（パーセル効果）を確認した。またその増大割合を定量的に検討し、量子ドットの位置における共振器電界の大きさを推定した。さらに、励起光波長を様々な高次モードに一致させ、それぞれの場合の量子ドットの発光強度を測定した。そして、各高次モードが異なる電界分布をもつことを利用して、量子ドットが存在する位置を推定した。これらの方法を組み合わせることで共振器内の量子ドットの位置を絞り込むことに成功した。

3. 最後に、外乱をできるだけ与えずにナノ共振器と量子ドットの融合系を観測する方法についても検討を行っている。従来の発光過程を通じた評価法では電子系の励起状態から基底状態へのバンド内緩和過程が測定結果に影響を与えていた。これに対して本研究ではナノ共振器の共振波長付近の光を共振器に直接入射してその反射スペクトルを測定する手法を開発した。広い波長範囲にわたってナノ共振器のQ値を測定可能なこと、量子ドットを含む場合も含まない場合もナノ共振器の特性を評価できること等を実験的に示した。これにより反射スペクトルによる評価法の基礎が確立された。これは、量子情報的な応用では重要となるデコヒーレンスの影響をできるだけ抑制した測定を可能にする手法として評価できる。

以上、本論文は、フォトリック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系の作製および評価法を確立する上で、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 2009 年 1 月 28 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。