

審査の結果の要旨

論文提出者 太田泰友

共振器量子電磁力学 (Cavity QED) とは、共振器中における光と物質の相互作用を、特にその量子的な性質が顕著な場合に着目して取り扱う学問領域である。その研究内容は、高効率レーザや量子情報デバイスといった多くの応用において重要な基礎の一つを成している。本論文は、「Study on Cavity Quantum Electrodynamics with Single Quantum Dots in High Q Photonic Crystal Nanocavities (高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器中の単一量子ドットを用いた共振器量子電磁力学に関する研究)」と題して、高 Q 値フォトニック結晶を用いた単一量子ドット Cavity QED の研究について論じており、全 8 章から構成され、英文で書かれている。

第 1 章では、「Introduction」と題して、Cavity QED の研究分野の発展と現状の研究情勢について論じ、本論文の目的と構成を示している。

第 2 章では、「Basis for cavity quantum electrodynamics in quantum dot photonic crystal nanocavity systems」と題して、量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器結合系を用いた Cavity QED について基礎的事項について概説している。

第 3 章では、「Fabrication and characterization methods for photonic crystal nanocavities with QDs」と題して、量子ドット-フォトニック結晶ナノ共振器結合系の作製法とその評価手法について論じている。前半部分では、本論文で確立されたガリウムヒ素フォトニック結晶ナノ共振器の高精度作製技術について論じており、電子線リソグラフィ、ウェット/ドライエッチングといったプロセス技術各々の最適化について述べられている。また、硫黄化合物を用いた表面処理法を発見し、フォトニック結晶ナノ共振器の高 Q 値化が可能であることを示している。これらの技術を基礎として、現在量子ドットを含み $1\mu\text{m}$ 以下で動作するフォトニック結晶として最高の Q 値 $\sim 80,000$ を実現している。後半部分では、本論文で構築・利用された低温顕微分光システムについて述べられている。測定系は $1\mu\text{m}$ 帯単一量子ドットからの発光測定に対して最適化が図られている。

第 4 章では、「Simultaneous utilization of multiple cavity QED effects for efficient QD emission」と題して、単一量子ドットに対する複数の Cavity QED 効果を同時に適用すること手法を論じている。そして、複数の Cavity QED 効果を適用することで、バルク中単一量子ドットに比べ約 180 倍の発光増強が可能であることを示している。

第 5 章では、「Vacuum Rabi splitting in coupled QD-photonic crystal nanocavity system」と題して、単一量子ドットと H1 型フォトニック結晶ナノ共振器との強結合状態実現について論じている。H1 型には小さなモード体積を持つ 2 重縮退した基底モードが利用出来るという利点がある。また、その縮退共振器モードとの強結合状態を活用することによって、量子ドットの共振器内位置を特定する手法が示されている。

第 6 章では、「Solid state features in strongly coupled QD-cavity system」と題して、強結

合状態における固体系特有の Cavity QED 現象について論じている。前半部分では、電子-フォノン相互作用の Cavity QED 系に対する影響が実験・理論両面から議論されている。まず、真空ラビ分裂スペクトルが極低温下で非対称になる現象を観測し、それが電子-フォノン相互作用の影響の結果であることを、フォノン効果を取り入れた Cavity QED モデルによる理論計算との一致から導き出している。同時に、フォノンによる位相緩和が、共振器離調時の共振器モードからの強い発光に大きく寄与していることを見出している。後半部分では、共鳴条件下において、真空ラビ分裂スペクトルの励起パワー依存性を測定し、強励起条件下で第3のピークが顕在化する現象を観測している。量子相関測定を行うことで、その第3のピークは主にバックグラウンド発光に起因するものであることを明らかにしている。

第7章では、「Nonlinearity in QD-based cavity QED systems」と題して、量子ドット-高Q値フォトニック結晶ナノ共振器結合系における単一光子レベルの光非線形性について論じている。前半では、高Q値共振器による強い場の増強効果を用いることで観測に成功した、単一量子ドットからの2光子自然放出に関して論じている。観測されたスペクトルの振る舞いは2光子状態を考慮したマスター方程式を基礎とする計算によってよく再現されている。後半では、強結合領域下の Cavity QED 系における Jaynes-Cummings ladder と呼ばれる多光子励起状態とその観測方法について理論的に論じている。マスター方程式を基礎においた計算等を用いて、熱的光源によるブロードバンドな励起法を用いた場合、本論文で述べられている技術で実現可能なフォトニック結晶を利用することで、Jaynes-Cummings ladder の観測が可能であると結論づけている。

8章では、「Conclusions and future prospects」と題して、各章の主要な成果をまとめて総括し、本論文の結論、及び将来展望について述べている。

以上これを要するに、本論文は、高Q値フォトニック結晶ナノ共振器を実現することにより、量子ドット-ナノ共振器結合系において、電子-フォノン相互作用が関与した強結合状態を観測するとともに、励起子分子からの共振器増強2光子自然放出を実現するなど、固体系特有の共振器量子電磁力学効果とその応用の可能性を明らかにしたものであり、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。