

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分

平成30年 5月31日現在

研究課題名（和文） **量子ドット-ナノ共振器多重量子結合系における  
固体量子電気力学探究と新ナノ光源創成**

研究課題名（英文） Solid-state Quantum Electrodynamics in  
Quantum Dot-Nanocavity Multiply-Coupled Quantum  
Systems and Its Application to Novel Light Sources

課題番号：15H05700

研究代表者

**荒川 泰彦** (ARAKAWA YASUHIKO)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構・特任教授



研究の概要：半導体チップ上に形成された量子ドットとフォトニック結晶光ナノ共振器を舞台として固体共振器量子電気力学を探索し、その未踏領域の開拓を目指す。特に、有限少数個の量子ドットとナノ共振器との結合系に対して新たな制御技術を創出することにより、複数の量子が関わりあう多重量子結合系量子電気力学を追求する。さらにその学術の深化を基礎とし、有限少数個量子ドットレーザを中心とする革新的ナノ光源創成のための基盤科学技術の構築を図る。

研究分野：量子ナノデバイス工学

キーワード：量子ドット、フォトニック結晶、共振器量子電気力学、半導体レーザ

### 1. 研究開始当初の背景

光共振器中の光子と物質の量子力学的相互作用を扱う共振器量子電気力学 (Cavity Quantum Electrodynamics, CQED) は、量子光学の深化、レーザ性能の追求を図る上で特に重要な学術領域である。特に固体 CQED は、応用上重要な集積化や電流注入も可能であり、多くの研究者の関心を集める重要分野である。

固体 CQED においては、半導体量子ドットを発光体として用いた物理探究が進展している。なかでも、半導体チップに形成された光ナノ共振器と組み合わせた系において、強い光と物質の相互作用に起因する興味深い現象が次々と明らかになっている。しかしながら、複数光子との相互作用など、その極限的物理の観測には至っておらず、未だ十分に確立されたとは言えない状況にあった。

### 2. 研究の目的

本研究では、申請者がこれまで培ってきた高品質単一量子ドット-2次元フォトニック結晶ナノ共振器結合系の研究成果を更に発展させ、固体 CQED の未踏領域を開拓することを目指す。さらに、有限少数個の量子ドットとナノ共振器から構成される多重量子結合系を実現し、そこで現れる物理を明らかにするとともに、有限少数個量子ドットレーザを中心とした新規光源および新規量子情報素子への展開に向けた基盤研究を推進する。

### 3. 研究の方法

インジウム砒素量子ドットを内包するガリウム砒素フォトニック結晶光ナノ共振器を中心とする半導体 CQED 系を用いて研究を進める(図1)。結晶成長・ナノ加工技術を開拓・洗練し高度に制御された CQED 系を実現することでその究極的な物理を探索する。光学実験および理論研究から得た知見を基盤として、新規光源技術へ展開する。

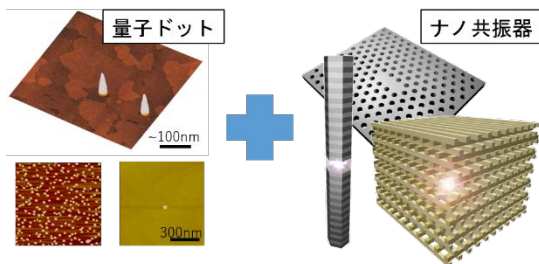


図1 量子ドットCQED系

### 4. これまでの成果

(1) ナノ精度量子ドット位置読み取り技術・高Q値ナノ共振器形成技術

ナノ共振器中の光子と量子ドットとの結合を議論する際、その相対位置関係が重要となる。本研究では、走査電子顕微鏡を用いて、量子ドットに起因するフォトニック結晶表面のナノサイズ隆起を検出することで、両者の相

対位置を決めることに成功した(図2)。さらには、光学実験と組み合わせることで、量子ドット CQED における双極子近似の妥当性を検証した。一方、共振器設計・ナノ加工技術を洗練することで、量子ドットを内包する二次元・三次元フォトニック結晶ナノ共振器の高 Q 値化を達成した。

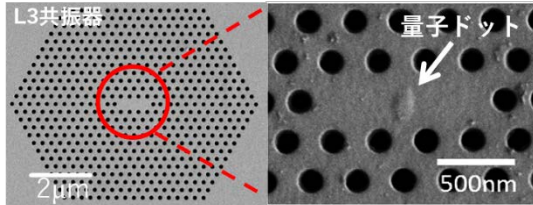


図2 ナノ精度量子ドット位置読み取り技術

### (2) 真空ラビ振動の時間領域観測

高 Q 値 2次元フォトニック結晶ナノ共振器による量子ドット CQED 系を用いて、真空ラビ振動の時間領域観測を実現した(図3)。キャリア注入下において発光時間分解測定を行い、同系におけるキャリア・位相緩和過程の影響を明らかにした。これは強結合状態にある量子ドット CQED 系において、環境との相互作用を理解する上で起点となる成果である。

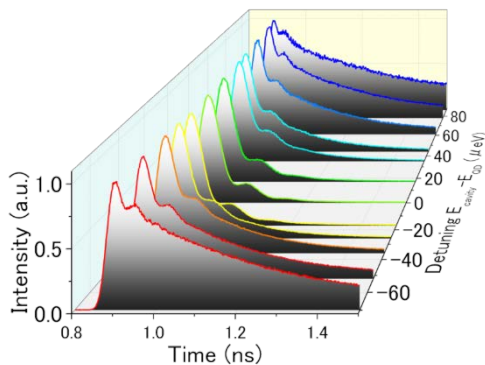


図3 真空ラビ振動の時間領域観測

### (3) 有限少数個量子ドットレーザ

量子ドット・ナノ共振器形成技術を基盤として、ナノワイヤ・プラズモニック・フォトニック結晶ナノ共振器による有限少数個量子ドットレーザを実現した。2次元フォトニック結晶ナノ共振器と有限少数個の量子ドットを組み合わせた系においては、その内部で発現

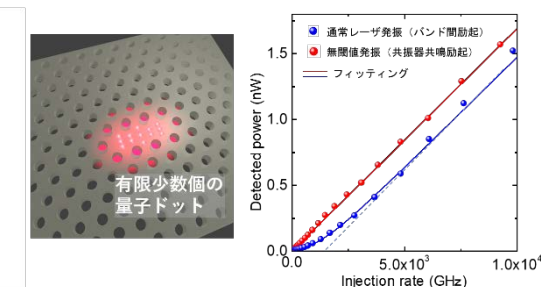


図4 無閾値量子ドットレーザ発振の観測

する強い CQED 効果を活用することで、光出力に閾値動作を示さない無閾値レーザ発振を実現した(図4)。この場合、量子ドット発光の自然放出結合定数は上限値である1に近づく。従って、その量子ドットが可能とする微分ゲインの最大値を実現しており、低消費電力・高速動作の観点から同レーザ構造における一極限を実現したものと位置づけられる。

### 5. 今後の計画

- (1) 量子ドット・ナノ共振器形成技術のさらなる探求を進める。結晶成長・ナノ加工・設計など多角的視点から量子ドット CQED 系を最適化し、その高度制御技術の構築を図る。
- (2) 実験・理論の両面から多重量子結合系を含む固体 CQED の物理を追求し、その未踏領域に引き続き挑戦する。
- (3) これまでの成果を活用し、有限少数個量子ドットレーザを中心とする極限量子ドット光源技術を開拓する。

### 6. これまでの発表論文等

- (1) K. Kuruma, Y. Ota, M. Kakuda, D. Takamiya, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Position dependent optical coupling between single quantum dots and photonic crystal nanocavities," Appl. Phys. Lett. 109, 071110 (2016).
- (2) J. Tatebayashi, S. Kako, J. Ho, Y. Ota, S. Iwamoto, Y. Arakawa, "Growth of InGaAs/GaAs nanowire-quantum dots on AlGaAs/GaAs distributed Bragg reflectors for laser applications" J. Crystal Growth 468 144 (2017).
- (3) Y. Ota, M. Kakuda, K. Watanabe, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Thresholdless quantum dot nanolaser," Opt. Express 25, 19981 (2017).
- (4) K. Kamide, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Method for generating a photonic NOON state with quantum dots in coupled nanocavities," Phys. Rev. A 96, 013853 (2017).
- (5) S. Takahashi, Y. Ota, T. Tajiri, J. Tatebayashi, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Circularly polarized vacuum field in three-dimensional chiral photonic crystals probed by quantum dot emission," Phys. Rev. B 96, 195404 (2017)

他論文発表 33 件

### 受賞

第 107 回日本学士院賞、The MOC Award(2017) など

ホームページ等

<http://qdot.iis.u-tokyo.ac.jp/>  
<http://qdot.iis.u-tokyo.ac.jp/tokusui.html>  
[arakawa@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:arakawa@iis.u-tokyo.ac.jp)