

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14627

研究課題名（和文）非線形光学効果を用いた結合可変な共振器量子電気力学系の実現

研究課題名（英文）Cavity quantum electrodynamics system with tunable coupling via nonlinear optical effect

研究代表者

長田 有登 (Osada, Alto)

東京大学・大学院総合文化研究科・特任助教

研究者番号：90804138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、半導体自己形成量子ドットとフォトニック結晶共振器を用いた共振器量子電気力学系に、転写プリント法を用いた異種物質集積の技術を用いて新たな機能を付与することを目的とした。その要素技術としてはCMOSプロセスにより作製された光導波路への量子ドット-フォトニック結晶共振器強結合系の集積、および光導波路による量子ドットの共鳴的な励起を実現することができた。これらの成果は本研究の目的を達成するうえで重要なステップとなるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年発展の目覚ましい量子技術のなかでも、本研究は単一の量子系である半導体量子ドットとナノ光共振器の結合系を用いた共振器量子力学系に対し、新奇な集積手法を用いてそのさらなる多機能化を行ったものである。本研究は集積量子光回路という量子通信や量子計算などとも相性の良い系であるとされ、伸びしろの大きなものであるといえる。そのなかでもコヒーレントな量子操作を実現するためのナノフォトニック素子や高効率な光子の取り出しのための量子光素子といった重要な要素技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on extension of the cavity quantum electrodynamics system using strongly-coupled quantum-dot-photonic-crystal-cavity system empowered by the transfer printing method, which enables us to heterogeneously integrate nanophotonic devices. As building blocks, a strongly-coupled quantum-dot-photonic-crystal-cavity system is integrated onto a CMOS-processed silicon waveguide and resonant excitation of the quantum dot is implemented using the silicon waveguide as well. These techniques provides important stepping stones toward the realization of more functional, all-solid state photonic cavity quantum electrodynamics systems.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：半導体量子ドット フォトニック結晶共振器 集積量子光回路

1. 研究開始当初の背景

急速に発展する量子技術の実用化へ向けて半導体自己形成量子ドットを用いた共振器量子電磁気学系は品質と集積性の良い単一光子源として盛んに研究されているが、発光波長や結合強度の不均一性の制御の困難さが拡張性を損なっていた。こういった背景のもと、共振器量子電磁気学素子に光学的な非線形性や熱チューニング素子、導波路結合構造などの新たな機能性を付与することにより拡張性を高める試みが盛んにおこなわれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は半導体自己形成量子ドットを用いた共振器量子電磁気学素子に光学非線形性を新たに導入することによって結合強度の変調の機能を持たせる、さらには半導体自己形成量子ドットを用いた共振器量子電磁気学素子の拡張を推し進めることを大目標として、その要素技術の開発を行った。

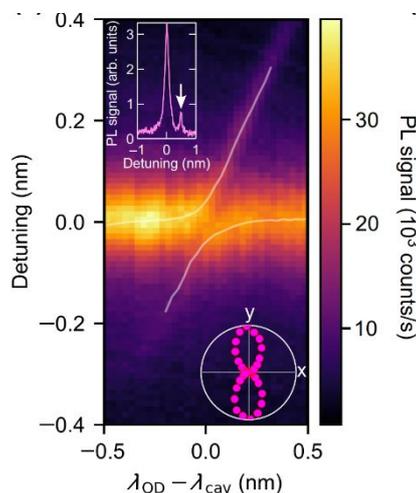
3. 研究の方法

上記の目標を達成するための要素技術として、本研究においては主に以下の二つの手法を開発した。ひとつは産業利用されている CMOS プロセスに従って作製され、集積光回路の重要な構成要素であるシリコン光導波路に対し、ガリウムヒ素製のフォトニック結晶共振器中に自己形成量子ドットが埋め込まれた共振器量子電磁気学素子を結合させるというものである。もう一つは、非線形光学効果を用いた共振器量子電磁気学素子の結合強度の変調を念頭に置き、自己形成量子ドットを共鳴的に励起するための共鳴レーザー光の導入を CMOS プロセスにより作製されたシリコン光導波路によって行うというものである。

4. 研究成果

まず、集積光回路の重要な構成要素であるシリコン光導波路に対し、ガリウムヒ素製のフォトニック結晶共振器中に自己形成量子ドットが埋め込まれた共振器量子電磁気学素子を結合させることに成功し、かつ強結合領域の共振器量子電磁気学系を初めてシリコン導波路に結合させることに成功した。この結果は Physical Review Applied 誌に掲載され、現在 21 件の引用を得ている[1]。

研究目標達成に向けては、この系において自己形成量子ドットの非線形光学効果による光学遷移を共鳴的に励起することが必要となる。そして、その共鳴的な励起をチップ上に集積された光導波路とその端のグレーティング素子を用いて行うことで、必要な機能がチップ上に集積された量子光回路を構築することが拡張性の観点で重要となる。



**図1 . シリコン導波路に結合した量子ドット - フォトニック結晶共振器結合系の実現
左は作製したデバイス、右は強結合領域にあることを示す反交差スペクトル。**

この光導波路端のグレーティング素子を用いた共鳴的な励起の実証のために、我々は図2(a)にあるような、ガラス中に埋め込まれたシリコン光導波路を用いて、その上方に転写プリントにより集積されたガリウムと素光導波路(図2)中の自己形成量子ドットを共鳴的に励起するようなデバイスを作製した。図 1(a)のデバイスにおいて、G1 のグレーティング素子に共鳴レーザー光を入射することでシリコン導波路にレーザー光を導入し、G2 のグレーティングから鉛直にレーザー光が出射される。出射部にはガリウムと素導波路があり、その中に埋め込まれた自己形成量子ドットが共鳴光により励起

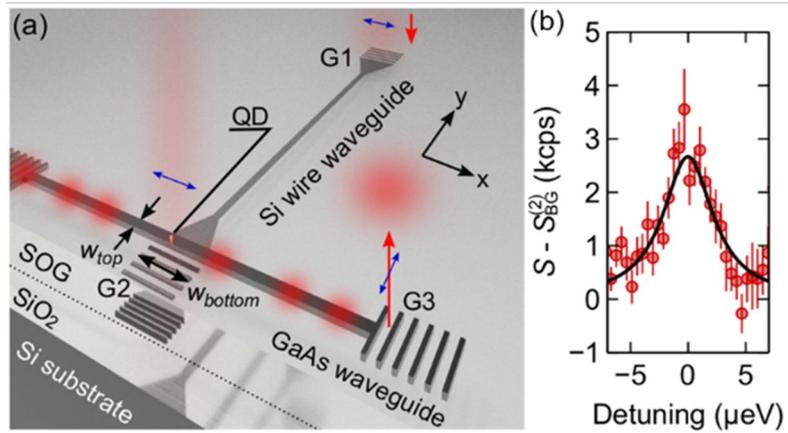


図2 . 共鳴励起構造の実証実験。

(a)実験のセットアップ (b)観測された共鳴蛍光

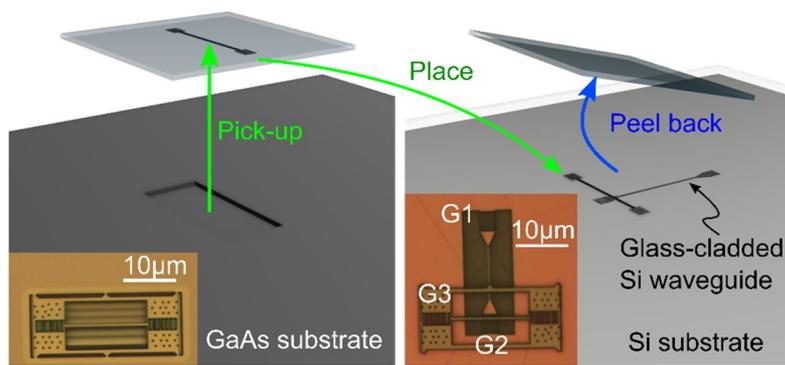


図3 . 転写プリント法による共鳴励起構造の作製

されるが、脱励起する際の発光の 60%程度がガリウムと素導波路に導入され、G3 のグレーティングからの発光を計測することができる。

事前に非共鳴的な励起によって発光波長を明らかにしてある単一の量子ドットについて共鳴光を上記のデバイスにより照射し、共鳴光のエネルギーに対する共鳴蛍光量の依存性をプロットしたものが図1(b)である。黒線はローレンツ関数によるフィッティングであり、eye-guide であるが、確かにこのデバイスによって量子ドットの共鳴的な励起が可能であることを実証した。本成果について、査読付き国際学術誌への投稿に向けて論文を執筆中である。

[1] A. Osada *et al.*, Phys. Rev. Appl. 11, 024071 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R. Katsumi, Y. Ota, A. Osada, T. Tajiri, T. Yamaguchi, M. Kakuda, S. Iwamoto, H. Akiyama, and Y. Arakawa	4. 巻 116
2. 論文標題 In-situ wavelength tuning of quantum-dot single-photon sources integrated on a CMOS silicon chip	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 41103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Osada,1,* Y. Ota,1 R. Katsumi,2 M. Kakuda,1 S. Iwamoto,1,2 and Y. Arakawa1	4. 巻 11
2. 論文標題 Strongly Coupled Single-Quantum-Dot-Cavity System Integrated on a CMOS-Processed Silicon Photonic Chip	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys Rev Applied	6. 最初と最後の頁 24071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.11.024071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasutomo Ota, Ryota Katsumi, Alto Osada, Masahiro Kakuda, Satoshi Iwamoto, and Yasuhiko Arakawa	4. 巻 FM3D
2. 論文標題 Hybrid integration of quantum dot-nanocavity systems on silicon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS	6. 最初と最後の頁 FM3D.4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/F10.2019.FM3D.4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Katsumi1,2,a), Yasutomo Ota3,b), Alto Osada3, Takuto Yamaguchi1, Takeyoshi Tajiri1, Masahiro Kakuda3, Satoshi Iwamoto1,3, Hidefumi Akiyama2, and Yasuhiko Arakawa3	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantum-dot single-photon source on a CMOS silicon photonic chip integrated using transfer printing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 36105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5087263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A. Osada,1,* Y. Ota,1 R. Katsumi,2 M. Kakuda,1 S. Iwamoto,1,2 and Y. Arakawa1
2. 発表標題 Strongly-coupled single quantum dot-cavity system on a silicon waveguide
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------