

Si/SOI 基板上への量子ドット・フォトニック結晶微小光源の集積 (082103005)

Quantum-dot photonic-crystal microcavity light sources on Si/SOI wafers

研究代表者

岡野 誠 独立行政法人 産業技術総合研究所

Makoto Okano National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

研究分担者

天野 建 独立行政法人 産業技術総合研究所 (研究期間: 平成 20 年度)

Takeru Amano National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

研究期間 平成 20 年度～平成 22 年度

概要

量子ドット・フォトニック結晶微小光源は、超小型、高性能な量子光源の実現が可能であり、その物性解明を目的とした基礎研究が精力的に行われている。ここで、量子ドット・フォトニック結晶微小光源を実用化に推し進めるためには、上記に加えて、実システムへの導入に主眼をおいた、地道なデバイス改良、実用的なデバイス構造の提案、研究開発が求められる。本研究では、量子ドット・フォトニック結晶微小光源を実用化に推し進める上で、大きな障害となっていた 3 つの課題「微小光源の実装方法」、「空気クラッド問題」、「光取り出し方法」に関して、解決手段を明らかとすることを目標に、研究開発を行った。

Abstract

Quantum-dot photonic-crystal microcavity light sources have the potential to realize ultracompact and high-performance quantum light sources, and the quantum physics of them has been intensively researched. For translating them into practical applications, steady improvements and practical proposals are essential. This project aims to resolve three important issues about the integration of quantum light sources, the air cladding, and the light extraction from quantum light sources.

1. まえがき

現在、企業が抱える情報には、クレジットカードに関する個人情報等、個人に直接的な被害をもたらす重要な機密データが含まれており、安全なネットワークの実現に対する要望は、年々高まりつつある。次世代ネットワークでは、盗聴等による情報漏洩を防ぐための暗号技術の向上が強く求められている。そこで、物理法則に基づく安全性保障を特徴とする量子暗号通信が注目を集めている。特に、単一光子を用いた量子暗号通信は、暗号鍵配布に適した方式として、大きく期待されている。

単一光子を用いた量子暗号通信は、「原理上」、絶対的な安全性を保障するが、その実現には、「理想的な装置」が必要となる。例えば、単一光子源として、微弱レーザー光を用いる方式では、光子数分布がポアソン分布に従う制約から、理想的な単一光子源を実現できないことが知られている。

近年、理想的な単一光子源を実現する方法として、量子ドット・フォトニック結晶微小光源が注目を集めている。量子ドットによる電子制御、フォトニック結晶光共振器による輻射場制御を組み合わせることで、超小型、高性能な単一光子源の実現が可能であり、近年、その物性解明を目的とした基礎研究が精力的に行われている。

ここで、量子ドット・フォトニック結晶微小光源を実用化に推し進めるためには、上記に加えて、実システムへの導入に主眼をおいた、地道なデバイス改良、実用的なデバイス構造の提案、研究開発が求められる。

本研究では、量子ドット・フォトニック結晶微小光源を実用化に推し進める上で、大きな障害となっていた 3 つの課題「微小光源の実装方法」、「空気クラッド問題」、「光取り出し方法」に関して、解決手段を明らかとすることを目標に、研究開発を行った。

2. 研究内容及び成果

2. 1 Si 基板上への化合物半導体光デバイス集積化技術の研究開発 —光電子集積回路へ向けて—

量子ドット・フォトニック結晶微小光源に関する研究分野では、「微小光源をどのような形で実装すべきか」という、実用上重要な課題に関して、具体的な議論が、ほとんど行われていないという問題があった。

本研究では、微小光源の実装方法として、量子暗号通信用光電子集積回路の実現へ向けた、Si/SOI 基板上への量子ドット・フォトニック結晶微小光源の集積を提案し、研究開発を行った。

第一に、BCB 樹脂を用いた異種接合技術による、Si 基板上への GaAs 薄膜集積化技術の研究開発を行った。一般に、GaAs/Si の異種接合は、熱膨張係数差が大きい等の理由から、難しい組み合わせであることが知られていたが、ウエハ接合界面の気泡を除去するための真空加熱工程の

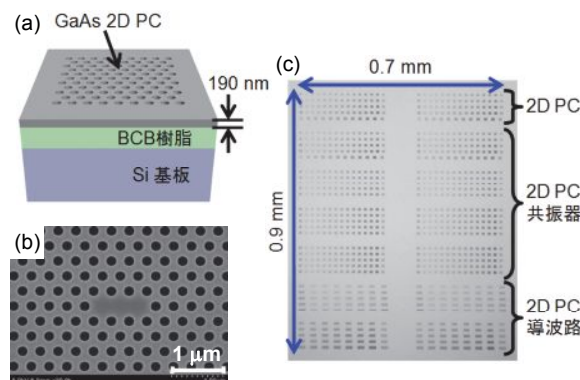


図 1: Si 基板上への GaAs 2 次元フォトニック結晶アレイの集積。
(a) 模式図、(b) SEM 像、(c) 光学顕微鏡像、 $0.7 \times 0.9 \text{ mm}^2$ 中に約 900 個の 2 次元フォトニック結晶パターンを形成。

導入、加熱時の温度分布の均一化等の改善を行うことにより、良好な接合を実現することができた。第二に、Si 基板上への GaAs 2 次元フォトニック結晶アレイの集積を、世界に先駆けて達成した (図 1)。Si 基板上に集積された厚さ 190 nm の GaAs 薄膜が、半導体微細加工プロセス (EB 描画、ICP エッチング等) に耐えられるだけの強度をもつことが実証された。第三に、Si 基板上への 1.3 μm 帯 InAs/GaAs 量子ドット光源の集積を、世界に先駆けて達成した。フォトルミネッセンス特性評価、発光寿命評価を行い、集積化プロセスによる発光特性への深刻なダメージが無いことが確認された。

2. 2 低屈折率材料クラッド型フォトニック結晶光共振器の利用 —空気クラッド型からの脱却—

現在、量子ドット・フォトニック結晶微小光源の基礎研究においては、空気クラッド型 2 次元フォトニック結晶光共振器が用いられている。空気クラッド型は、フォトニック結晶コアの上下が、屈折率の小さな空気であるため、非常に強い光閉じ込めを実現できるという利点がある。しかしながら、実用化を考えた場合、機械的強度が弱いという深刻な問題点がある。

本研究では、空気クラッド型からの脱却を図るため、低屈折率材料クラッド型 2 次元フォトニック結晶光共振器の利用を提案し、研究開発を行った。

本研究では、大型計算機による 3 次元電磁界解析を用いて、低屈折率材料クラッド型 2 次元フォトニック結晶光共振器の詳細な理論解析を行った。複数種類の光共振器構造に対して設計を行った結果、提案書の目標値 Q 値 1 万を大きく上回る、10 万以上の高い Q 値を達成した。また、本研究を通じて、ダブルガウシアン包絡関数による高 Q 値化、分布帰還作用による高 Q 値化、分布帰還作用による共振モード形成理論といった新しい設計手法を発見することができた。

長年に渡り、当該分野では、「空気クラッド型でなければ、高い Q 値の実現は難しい」という定説が定着していたが、本研究によって、その定説を覆すことができた。

今後は、「物理の探求を試みる空気クラッド型フォトニック結晶の研究」と並行する形で、「実用化を試みる低屈折率材料クラッド型フォトニック結晶の研究」が注目を集めていくものと期待される。

2. 3 アモルファス Si 細線光導波路を用いた光取り出し方法の提案 —Si フォトニクスとの融合—

現在、量子ドット・フォトニック結晶微小光源の基礎研究においては、微小光源からの放射光は、上方に設置した外部光学系 (光学レンズ、光プローブ等) により集光され、光ファイバーへと伝送される。物性解明を目的とした基礎

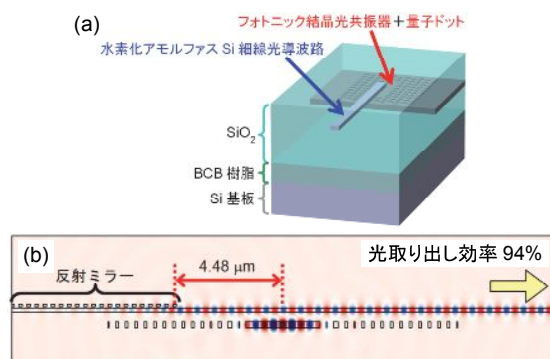


図 2: アモルファス Si 細線光導波路を用いた光取り出し。
(a) 模式図、(b) 反射ミラーを導入した光取り出しの一例。

研究では、上記光取り出し方法で十分と言えるが、実用化を考えた場合、実用化に適した光取り出し方法の検討が必要である。

本研究では、実用化に適した光取り出し方法として、水素化アモルファス Si 細線光導波路を用いた、独自の光取り出し方法を提案し、研究開発を行った。水素化アモルファス Si 細線光導波路は、Si 細線光導波路と同様の伝搬特性が実現可能であることが実証されており、将来有望な光導波路の一つである。

本研究では、大型計算機による 3 次元電磁界解析を用いて、光取り出し構造の詳細な理論解析を行った。光取り出し構造の改善を、粘り強く、繰り返した結果、提案書の目標値光取り出し効率 50%を大きく上回る、90%以上の高い光取り出し効率を達成した。

3. むすび

本研究では、量子ドット・フォトニック結晶微小光源を実用化に推し進める上で、大きな障害となっていた 3 つの課題「微小光源の実装方法」、「空気クラッド問題」、「光取り出し方法」に関して、研究開発を行った。第一に、Si 基板上への化合物半導体光デバイス集積化技術の開発、第二に、低屈折率材料クラッド型フォトニック結晶光共振器の高 Q 値化 (>10 万)、第三に、水素化アモルファス Si 細線光導波路を用いた高効率光取り出し ($>90\%$) を実現し、上記課題の解決へ向けた重要な指針を明らかにした。

最後に、本研究成果は、量子ドット・フォトニック結晶技術と Si-LSI 技術、Si フォトニクス技術の融合を促進するものであり、今後、次世代ネットワークにおける本格的な量子暗号通信システムへの貢献が期待される。

【誌上発表リスト】

- [1] M. Okano, N. Yamamoto, K. Komori, “Fabrication and Analysis of GaAs Triangular Two-Dimensional Photonic Crystals on Silicon Wafers”, Japanese Journal of Applied Physics Vol.47 No.9 pp7453-7458 (2008/9/12)
- [2] M. Okano, T. Yamada, J. Sugisaka, N. Yamamoto, M. Itoh, T. Sugaya, K. Komori, M. Mori, “Analysis of two-dimensional photonic crystal L-type cavities with low-refractive-index material cladding”, Journal of Optics Vol.12 No.7 pp075101-1-10 (2010/6/23)
- [3] M. Okano, T. Yamada, Y. Sakakibara, T. Kamei, J. Sugisaka, N. Yamamoto, M. Itoh, T. Sugaya, K. Komori, M. Mori, “Analysis of vertical coupling between a 2D photonic crystal cavity and a hydrogenated-amorphous-silicon-wire waveguide”, Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications pp1-9 (In Press, Available online 2011/6/17)

【申請特許リスト】

- [1] 岡野誠、天野建、五島敬史郎、山本宗継、菅谷武芳、小森和弘、森雅彦、光デバイスの製造方法、日本、2008 年 8 月 27 日
- [2] 岡野誠、山田智也、杉坂純一郎、山本宗継、伊藤雅英、菅谷武芳、小森和弘、森雅彦、榊原陽一、亀井利浩、単一光子発生装置、日本、2009 年 9 月 2 日
- [3] 岡野誠、山田智也、榊原陽一、亀井利浩、杉坂純一郎、山本宗継、伊藤雅英、菅谷武芳、小森和弘、森雅彦、フォトニック結晶光源装置、日本、2010 年 3 月 16 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://unit.aist.go.jp/photonics/oe-device/aist/>