

二次元フォトリック結晶ナノ共振器に基づく ハイブリッド集積単一光子源に関する研究

2025 年度

藤田晃成

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲	第	号	氏 名	藤田 晃成
主 論 文 題 名：					
二次元フォトリソニック結晶ナノ共振器に基づくハイブリッド集積単一光子源に関する研究					
(内容の要旨) シリコン (Si) フォトニクス集積回路は、スケーラブルな光量子情報処理に向けた有力なプラットフォームである。しかし、光回路の母材料である Si から量子情報の媒体となる単一光子を直接かつ決定論的に生成することは難しい。そこで、異種材料からなる単一光子源の Si 上ハイブリッド集積が注目を集めている。中でも、明るさ・コヒーレンス・純度に優れた単一光子源として、InAs/GaAs 半導体量子ドット(QD)の集積が求められている。また、QD 単一光子源の性能を最大限引き出す上で、フォトリソニック結晶(PhC)ナノ共振器の活用が期待されている。しかし、PhC ナノ共振器に基づく QD 単一光子源を高効率に Si 光回路へ接続する光学構造や、設計構造を高精度に作製する技術は明らかではなかった。そこで本研究では、スケーラブルなシリコン量子フォトニクスの開拓を目指し、二次元フォトリソニック結晶ナノ共振器に基づく QD 単一光子源の Si 光回路上ハイブリッド集積について検討を行った。 第1章では、本研究の背景、研究目的および本論文の構成について概説した。 第2章では、本研究の基礎となる量子ドット単一光子源およびフォトリソニック結晶ナノ共振器などの物理的背景について述べるとともに、有限差分時間領域法などの数値計算手法に関して論じた。 第3章では、本研究で用いた微細加工技術について述べた。電子線リソグラフィードライおよびウェットエッチングを組み合わせた PhC ナノ共振器およびガラス薄膜クラッドの作製方法について論じ、プロセス上の課題と解決策を提示した。また、PhC ナノ共振器をハイブリッド集積する上で転写プリント法の活用を議論し、転写集積時の課題と解決策を提示した。 第4章では、二次元フォトリソニック結晶ナノ共振器に基づく QD 単一光子源の Si 導波路上ハイブリッド集積について述べた。共振器モードと Si 導波路の高効率な光学結合について設計を行うとともに、設計構造を微細加工技術により作製し光学評価を行った。その結果、二次元フォトリソニック結晶に基づく導波路結合型単一光子源の動作を実証した。 第5章では、より低損失な窒化シリコン(SiN)光回路への QD 単一光子源の集積を目指し、二次元 PhC ナノ共振器と結合交差導波路構造を導入したハイブリッド集積構造を提案した。提案構造により、高効率に SiN 光導波路へ単一光子結合できることを数値計算により明らかにした。また、設計構造を作製し光学評価することで、SiN 上ハイブリッド集積 QD 単一光子源を実証した。 第6章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望について述べた。					

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ “KOU” ☐ “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	Fujita, Akinari
Thesis Title Study on hybrid-integrated single photon sources based on two-dimensional photonic crystal nanocavities			
Thesis Summary Silicon (Si) photonic integrated circuits are an attractive platform for scalable quantum photonic information processing. However, Si possesses an indirect bandgap and hinders the deterministic generation of indistinguishable single photons. To address this challenge, hybrid integration of single photon sources on Si has been regarded as a promising approach. Among various solid-state single photon emitters, InAs/GaAs semiconductor quantum dots (QDs) stand out due to their high brightness, coherence, and purity. To further enhance their performance, it is desirable to couple QDs to photonic crystal (PhC) nanocavities. Nevertheless, efficient optical coupling between QDs in PhC nanocavities and Si photonic circuits, as well as their experimental realization, has remained challenging. In this study, the hybrid integration of QD single-photon sources based on two-dimensional PhC nanocavities on Si photonic circuits was investigated, paving the way toward scalable Si quantum photonics. In Chapter 1, the background of the research, the research objectives, and the structure of this dissertation are outlined. Chapter 2 describes the physical background of QD single photon sources and PhC nanocavities, together with numerical simulation methods such as the finite-difference time-domain method. Chapter 3 discusses nanopatterning techniques for PhC nanocavities with QDs and for glass thin films. Transfer printing, which is the hybrid integration approach employed in this study, is also discussed. Chapter 4 presents the hybrid integration of QD single photon sources based on two-dimensional PhC nanocavities on Si waveguides, and experimentally demonstrates waveguide-coupled single-photon generation. In Chapter 5, a hybrid integration structure incorporating a two-dimensional PhC nanocavity and a coupled crossover waveguide structure is proposed for QD single-photon sources on low-loss silicon nitride (SiN) photonic circuits. The proposed structure is numerically analyzed by electromagnetic simulations and its fabrication and optical characterization are described. In Chapter 6, the results obtained in this research are summarized, and future prospects are discussed.			