

Title	円形欠陥フォトリック結晶レーザに関する理論的及び実験的研究
Author(s)	熊, 一帆
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/82237">https://doi.org/10.18910/82237</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 熊 一帆 )

論文題名 円形欠陥フォトニック結晶レーザに関する理論的及び実験的研究

## 論文内容の要旨

プロセッサの処理能力はMoore法則が予測したように急速に増強してきている。しかし、電気配線伝送方式の発熱や遅延によって、限界が懸念される。高帯域幅、低損失及び低干渉などの特徴を持つ光伝送方式はこのボトルネックを解消する有望な候補の一つである。光伝送方式において、伝送距離の短縮に伴って、必要とされる伝送容量密度が急速に増加している。チップ内光伝送を実現するには10 Pbps/cm<sup>2</sup>が必要と推測される。しかし、現段階では、チップ内光伝送の要求を満たす適切なレーザ光源が未だ存在していない。そこで提案されたのは、円形欠陥フォトニック結晶レーザである。円形欠陥フォトニック結晶レーザは、周期的に配置しているフォトニック結晶構造に円形欠陥を導入することで共振器を構成している。フォトニックバンドギャップの効果により、光が円形欠陥共振器に強く閉じ込められ、高Q値の共振器が形成される。共振器の半径を変えることにより、高Q値を維持したまま、共振波長を制御できる。そこで、複数の半径の異なる円形欠陥共振器を共通の導波路の近傍に設置すれば、チップ内波長多重通信が実現でき、チップ内光伝送の伝送容量密度需要を達成できると期待される。本研究はチップ内光伝送実現に向けて、円形欠陥フォトニック結晶レーザの有望性を理論及び実験の両方から検討するものである。

本論文は7章で構成し、第1章の序論では、前述のような研究の背景と先行研究を取りまとめた。

第2章では、円形欠陥フォトニック結晶レーザ構造の特徴について述べた。円形欠陥フォトニック結晶レーザでは、円形欠陥共振器とAlGaAs/A10<sub>x</sub>クラッド層を利用することが特徴である。これらの特徴がもたらす利点について述べた。また、円形欠陥フォトニック結晶レーザに基づいて、チップ内波長多重通信を図るレーザアレイ構造を提案し、その実用性について検討した。

第3章では、レート方程式と時間領域差分法を用いて、円形欠陥フォトニック結晶レーザの理論特性を検討し、円形欠陥フォトニック結晶アレイの理論可能性について述べた。レート方程式の計算結果から、円形欠陥フォトニック結晶レーザが低閾値、高速動作できる可能性が示された。時間領域差分法の計算結果から、円形欠陥共振器の半径を変調することにより、共振波長を制御できる可能性が示された。また、円形欠陥共振器が20nm以上の波長帯で高Q値を有することが示された。

第4章では、円形欠陥フォトニック結晶レーザの作製に必要な電子線リソグラフィとドライエッチング技術について述べた。また、高精度の電子線リソグラフィを実現する方法について述べた。

第5章では、電流注入型円形欠陥フォトニック結晶レーザを実現する前段階として、2種類のクラッド層構造の円形欠陥共振器を作製し、その発光特性について述べた。具体的に、上クラッド層と下クラッド層がそれぞれ空気とA10<sub>x</sub>で構成される構造と上下クラッド層ともA10<sub>x</sub>で構成される構造を用いた。1つ目の構造は、空気クラッド層を用いるためエッチングが容易となり高い垂直性の空孔が得られる。一方、2つ目の構造は、共振器中心部分のAlGaAsがA10<sub>x</sub>に酸化されている以外は電流注入型円形欠陥フォトニック結晶レーザの層構成と同様である。この二種類の構造を持つ円形欠陥フォトニック結晶レーザが低閾値、単一モードで動作することが示された。また、共振器半径を変調することにより、共振波長を制御できることが示された。

第6章では、円形欠陥フォトニック結晶レーザアレイにおける隣接共振器間の電流分離溝を実現するGaAs/A10<sub>x</sub>の選択ドライエッチング技術について述べた。具体的にCl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub>の混合ガスを利用したドライエッチングによるGaAs/A10<sub>x</sub>選択エッチングを述べた。フォトニック結晶構造を形成する空孔の存在がエッチングに影響すると考えられるため、フォトニック結晶構造を有するGaAs/A10<sub>x</sub>ヘテロ層とフォトニック結晶構造のない平坦なGaAs/A10<sub>x</sub>ヘテロ層について選択エッチングを実施した。そして、円形欠陥共振器アレイ上に電流分離溝を作製し、隣接する共振器間の電気抵抗を測定した。その結果から電流分離溝の電気絶縁効果が実証された。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、本論文における結論を述べた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 熊 一 帆 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	近藤 正彦
	副 査	教授	片山 竜二
	副 査	教授	大岩 颯
	副 査	教授	森 勇介
	副 査	教授	片山 光浩
	副 査	教授	尾崎 雅則
	副 査	教授	森 伸也
	副 査	教授	廣瀬 哲也
	副 査	教授	八木 哲也

## 論文審査の結果の要旨

プロセッサの処理能力は、Moore法則に従って急速に向上している。しかし、電気配線伝送方式における発熱や信号遅延によって、その限界が懸念され始めている。高帯域幅、低損失及び低干渉などの特徴を持つ光伝送方式は、この問題を解消する有望な候補として期待されている。光伝送方式において、伝送距離の短縮に伴って必要とされる伝送容量密度が急速に増加し、チップ内光伝送を実現するには10 Pbps/cm<sup>2</sup>の伝送容量密度が必要と推測されている。しかし、現段階では、その要求を満たす適切なレーザ光源が未だ存在していない。本論文はチップ内光伝送実現に向けて、円形欠陥フォトニック結晶レーザの有望性を理論及び実験の両方から検討するものであり、以下の7章から構成されている。

第1章の序論では、円形欠陥フォトニック結晶レーザの研究の背景及び先行研究について概説し、本研究の目的及び本論文の概要を述べている。

第2章では、円形欠陥フォトニック結晶レーザの特徴について概説し、円形欠陥フォトニック結晶レーザアレイと円形欠陥フォトニック結晶フォトダイオードアレイを組み合わせた新規光送受信器を提案している。円形欠陥フォトニック結晶レーザは円形欠陥共振器とAlGaAs/AlO<sub>x</sub>クラッド層を利用することにより、電気抵抗、熱抵抗また機械的安定性などの点において従来の空気クラッド層を利用するフォトニック結晶レーザより性能が優れると期待される。円形欠陥共振器の共振波長は共振器半径を変えることにより制御できるので、複数の半径の異なる円形欠陥共振器を共通の光導波路の両辺に設置すれば、チップ内波長多重通信の実現が期待できる。

第3章では、レート方程式と時間領域差分 (Finite-difference time-domain: FDTD)法を用いて円形欠陥フォトニック結晶レーザの特性を解析している。レート方程式の結果は、円形欠陥フォトニック結晶レーザの $Q$ 値が2000以上であれば、10  $\mu$ A以下の低閾値電流でレーザ動作できる可能性を示している。また、注入電流が400  $\mu$ Aの場合、円形欠陥フォトニック結晶レーザの緩和振動周波数が39.5 GHzに達し、50 Gbpsの変調速度を達成できる可能性を示している。一方、FDTD法の解析結果は、whispering gallery mode (WGM)の共振波長が共振器半径 $R$ に比例することを明らかにしている。そして、円形欠陥共振器の各パラメータがWGMに与える影響を定性的・定量的に分析することにより、円形欠陥共振器の設計方針を見出している。また、WGMの $Q$ 値を改善する新構造を提案している。新構造では、円形欠陥共振器を形成する空孔の位置の最適化により、WGMの共振波長を変化させることなく20 nm以上の波長帯域幅で5000以上の $Q$ 値を実現できる。最後に、円形欠陥共振器と線形欠陥フォトニック結晶導波路の結合について概説している。線形欠陥フォトニック結晶導波路の導波路幅を狭めることにより、円形欠陥共振器との結合を制御できる。

第4章では、円形欠陥フォトニック結晶レーザ作製に重要な電子線リソグラフィとドライエッチング技術に

について概説している。特に、高精度の電子線リソグラフィーを実現する方法について述べている。

第5章では、光励起を用いて2種類のクラッド層を持つ円形欠陥共振器の光学特性について調べている。一つは、上クラッド層と下クラッド層がそれぞれ空気と $\text{AlO}_x$ で構成される構造、もう一つは、上下クラッド層の二層がともに $\text{AlO}_x$ で構成される構造である。空気と $\text{AlO}_x$ で構成される構造は、25  $\mu\text{W}$ の低閾値でレーザ発振する。WGMの線幅が装置分解能の0.07 nmに達し、サイドモード抑制比 (Side Mode Suppression Ratio: SMSR) が50 nmの波長範囲で約20 dBに達する。共振器半径 $R$ を2.75~2.81 aの範囲で変えることにより、WGMの共振波長を20 nm以上の波長範囲で制御できる。一方、二層 $\text{AlO}_x$ クラッド層構造は、約50  $\mu\text{W}$ の低閾値でレーザ動作する。そして、WGMの線幅が装置分解能の0.07 nmに達し、SMSRが50 nmの波長範囲で約28 dBに達する。共振器半径 $R$ を2.75~2.81 aの範囲で変えることにより、WGMの共振波長を20 nm範囲で制御でき、WGMの共振波長と $R$ が線形関係になっている。これらの実験結果は、円形欠陥フォトニック結晶レーザを用いてチップ内波長多重通信が実現可能であることを示している。

第6章では、円形欠陥フォトニック結晶レーザアレイにおける各共振器を独立に動作させるために必要な電流分離溝を作製するGaAs/ $\text{AlO}_x$ 選択エッチング技術について述べている。 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ の混合ガスを使用したレシピは、GaAsに対して高いエッチングレートを示し、 $\text{AlO}_x$ に対するエッチングレートが殆ど0である。したがって、 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{CH}_4$ の混合ガスを使用したレシピは、 $\text{AlO}_x$ に対するGaAsのエッチング選択性が非常に高い。このレシピを用いて、フォトニック結晶構造を有するGaAs/ $\text{AlO}_x$ ヘテロ層において、電流分離溝を作製できる。また、空孔周辺のp-GaAsのエッチング速度は、空孔間のp-GaAsのエッチング速度よりも遅いことを見出している。そして、円形欠陥共振器アレイにおいて幅の異なる電流分離溝を作製し、幅が0.4  $\mu\text{m}$ 以上の電流分離溝が電流分離効果を有することを示している。これにより、円形欠陥フォトニック結晶レーザアレイにおいて複数のレーザを独立に動作させることが可能であると示される。

第7章では、第2章から第5章まで得られた研究成果を総括し、本論文における結論を述べている。

以上のように、本論文は、円形欠陥フォトニック結晶レーザのチップ内光通信への応用性を示すものであり、チップ内波長多重通信を実現する電流注入型円形欠陥フォトニック結晶レーザアレイの開発において極めて重要な知見を与えており、電気電子情報通信工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。