

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22483

研究課題名（和文）1次元・2次元回折の相互作用を利用した大面積・高輝度フォトニック結晶レーザの実現

研究課題名（英文）Realization of large-area, high-brightness photonic crystal lasers by utilizing mutual interaction between one- and two-dimensional diffractions

研究代表者

吉田 昌宏 (Yoshida, Masahiro)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20880636

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、フォトニック結晶の2次元共振作用をレーザ発振に利用した半導体レーザ（フォトニック結晶レーザ）において、180度および90度回折効果の相互作用を利用することによる大面積単一モード発振の実現を目指した。その結果、二重格子フォトニック結晶構造における空孔の大きさや空孔間距離などの構造パラメータの調整により、直径1mmを超える大面積単一モード発振が期待できる格子点構造の設計に成功した。さらに、設計した構造を導入した直径1mmの共振領域を有する大面積フォトニック結晶レーザを作製し、単一モード発振を実験的に実証することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体レーザは、小型・安価・低消費電力・高速制御可能といった優れた特長を有しており、現在、情報通信や光記録分野を中心に広く利用されている。しかしながら、従来の半導体レーザは、光出力増大のために光出射面積を拡大すると、出射されるビーム品質が劣化してしまうという課題を抱えている。本研究で実証に成功した大面積・高輝度フォトニック結晶レーザは、このような従来の半導体レーザの課題を克服するものであり、スマートモビリティやスマート製造の核となる高度光センシングや光加工などをはじめとして、幅広い分野に応用でき、将来の超スマート社会を支える次世代光源としての利用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed large-area, high-brightness photonic crystal lasers by utilizing mutual interaction between 180°- and 90°-diffracted light waves. We have succeeded in designing a lattice point structure that enables a single mode lasing with a large area (>1mm<sup>2</sup>) by adjusting structural parameters of a double-lattice photonic crystal. We have fabricated a 1mm<sup>2</sup> photonic crystal laser with the designed double-lattice structure and demonstrated large-area single mode lasing.

研究分野：光工学・光子科学

キーワード：フォトニック結晶レーザ フォトニック結晶 半導体レーザ

## 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザーは、小型・安価・低消費電力・高制御性といった優れた特長を有しており、情報通信や光記録などの分野で広く普及している重要な光源である。しかしながら、従来の半導体レーザーは、単一モードでの発振を維持できる光射出面積に原理的に限界があり、光出力増大のために面積を拡大すると、発振モードが多モード化して、出射されるビーム品質（集光性）が劣化してしまうという根本的な課題を抱えている。したがって、高出力化と高ビーム品質化の両立、すなわち高輝度化が困難である。そのため、現在、レーザー加工や金属3Dプリンタ等の大きな光出力（100W~1kW級）が要求される用途においては、ガスレーザーや固体・ファイバレーザー等の大型・高価・低効率なレーザー光源が主に利用されている。もし、半導体レーザーにおいて、単一モード発振による高ビーム品質動作を維持しながら高出力化が実現できれば、従来の大がかりなレーザー装置をワンチップの半導体レーザーで置き換えることが可能になり、加工システムの大幅な小型化・低コスト化などが期待される。

従来の半導体レーザーの課題を克服し、高出力・高ビーム品質（＝高輝度）動作の実現が期待できる新しい半導体レーザーとして、フォトニック結晶レーザー（図1）が挙げられる。本レーザーは、活性層（量子井戸層）の近傍に2次元フォトニック結晶を設けたデバイス構造を有する。フォトニック結晶層内を伝搬する光波は、格子点空孔における180度および±90度方向への回折効果により互い結合し、その結果として2次元的な定在波状態（共振状態）が形成される。この2次元共振状態は、原理的に面積を拡大しても維持されるために、大面積・単一モード動作が可能となる。これまで研究代表者は、上述のフォトニック結晶レーザーの大面積・単一モード動作に適したフォトニック結晶構造として、図2に示す二重格子フォトニック結晶という独自の構造を提案・実証してきた。本構造は、2つの空孔をxおよびy方向に4分の1波長だけずらして重ね合わせたものである。それぞれの空孔で面内180度方向に回折される光波に打ち消し合いの干渉を生じさせることが可能となり、フィードバック効果が弱まることで、共振器に閉じ込められる光がより共振器全面に広がりやすくなる。このとき、共振器の端部にエネルギーが分布する多峰状の高次モードは、単峰状の基本モードに比べて、より多くのエネルギーが共振器端から漏れやすくなる。その結果、高次モードの面内方向への損失が増大し（すなわち、閾値利得が増大し）、その発振を抑制することができ、大面積においても基本モード単一での動作が可能となる。これまで、上述の二重格子構造を導入することで、直径500 $\mu\text{m}$ の共振面積を有するフォトニック結晶レーザーにおいて、単一基本モード動作の実現に成功している。しかし、180度方向の1次元的回折効果のみに着目していたこれまでの手法では、これ以上の大面積化には限りがあり、今後、冒頭に記載したようなレーザー加工等への応用へと展開するためには、フォトニック結晶レーザーのさらなる大面積・高輝度化を可能とする格子点構造の深化が必要であった。

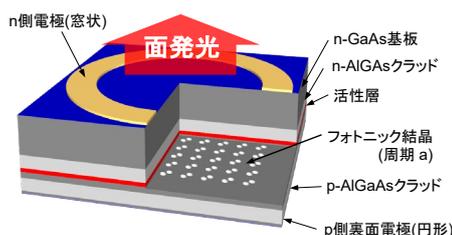


図1. フォトニック結晶レーザーの模式図。

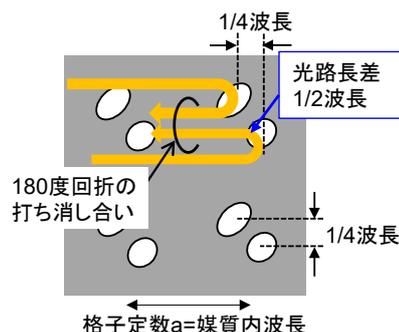


図2. 二重格子フォトニック結晶の概念図。

## 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、フォトニック結晶レーザーのさらなる大面積・高輝度化の実現に向けて、格子点設計の深化を図るとともに、これまでの限界を超えたミリメートル級の面積フォトニック結晶レーザーの実証を目指す。具体的には、二重格子構造を用いて、これまで検討してきた180度回折に加えて、2次元フォトニック結晶の特徴ともいえる90度方向の2次元的な回折効果も含めて制御し、図3に示すように両者の打ち消し合い干渉を誘起することで、より効果的に光閉じ込め効果を弱め、大面積単一モード動作の実現を目指した。

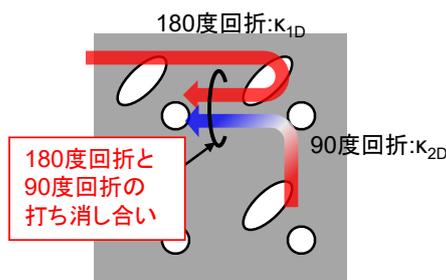


図3. 180度回折と90度回折の打ち消し合い干渉の概念図。

### 3. 研究の方法

まず、二重格子構造における 180 度および 90 度回折効果を表す結合係数や、単一モード安定性などについて、3 次元結合波解析を用いた数値解析を行い、格子点構造の設計を行った。そして、設計した格子点構造を導入したフォトニック結晶レーザを、電子ビーム露光や ICP エッチング等を用いた半導体プロセスによって作製した。そして、作製したレーザデバイスについて、電流注入により駆動し、電流・光出力特性、遠視野像などの各種レーザ特性の評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 二重格子構造の設計の深化

上述の設計指針をもとに、180 度回折と 90 度回折の打ち消し合いを実現するための具体的な格子点設計を行うために、二重格子構造のもつ様々な設計パラメータを変化させた場合について、180 度および 90 度回折効果を表す結合係数である  $\kappa_{1D}$ 、 $\kappa_{2D}$  の大きさ・位相の解析を行った。その結果、二重格子構造を構成する楕円と真円の 2 つの空孔の大きさ (=空孔充填率 楕円  $f_1$ 、真円  $f_2$ ) の比が、結合係数  $\kappa_{1D}$ 、 $\kappa_{2D}$  を制御するうえで重要な設計パラメータのひとつであることを見出した。そして、図 4(a)、(b)に空孔充填率の比  $f_1/f_2$  に対する結合係数の大きさおよび位相の変化を示すように、適切な値 (ここでは、 $f_1/f_2=1.4$  程度) とすることで、結合係数の大きさが揃い ( $|\kappa_{1D}|=|\kappa_{2D}|$ )、かつ、その位相が逆位相 (位相差 180 度) となり、打ち消し合いの条件を満たすことが明らかとなった。さらに、本構造について、様々な共振器直径に対して、単一モード安定性の指標である、基本モードと高次モードの発振閾値利得の差  $\Delta\alpha$  を解析した結果、図 4(c)に示すように、従来設計と比較して、 $\Delta\alpha$  が大幅に増大し、直径 1mm を超える大面積においても、単一モード発振が期待できることが明らかとなった。

#### (2) 大面積 1mm $\Phi$ フォトニック結晶レーザの作製・評価

上記 (1) の設計に基づき、直径 1mm の共振領域を有する大面積フォトニック結晶レーザを作製した。レーザデバイスの作製においては、まず、電子ビーム露光、ICP エッチング等を用いて、GaAs 半導体基板上にフォトニック結晶空孔を形成し、さらにその上に、MOVPE 法を用いた結晶再成長を行うことで、空孔を維持したまま、デバイス内部に埋め込んだ。この際、エッチング後および埋め込み後の各段階において、断面 SEM 観察等による空孔形状の抽出を行うことで、プロセス条件へとフィードバックし、所望の空孔形状を実現した。そして、電流注入を行うために、p 側裏面電極 (直径 1mm) と n 側窓電極を形成した。作製したデバイスの写真を図 5(a)に示す。

本デバイスについて、CW 電流注入により駆動し、電流・光出力特性、遠視野像を評価した結果を図 5 (b)、(c)に示す。図 5(b)のように、 $\sim 3.2\text{A}$  ( $\sim 4\text{kA/cm}^2$ ) で発振が得られ、最大で 10W の光出力を得ることに成功した。さらに、図 5(c)の遠視野像に示すように、 $\sim 0.15^\circ$  以下 ( $1/e^2$  幅) の極めて狭い拡がり角を維持しており、直径 1mm という大面積において基本モード動作が実現できていることを示す結果が得られた。

以上のように、二重格子構造において、従来の 1 次元的な回折効果のみならず、2 次元的な回折効果も含めて制御し、両者の打ち消し合い干渉を誘起するという新たな設計指針のもと検討を行い、直径 1mm を超える大面積単一モード動作が可能な格子点設計に成功するとともに、実験的にも、直径 1mm フォトニック結晶レーザにおける大面積・高輝度動作を実証した。今後、本研究結果をもとにさらに発展させていくことにより、100W $\sim$ 1kW 級のワンチップ半導体レーザの実現に繋がり、将来のスマート製造の実現などへの貢献が期待される。

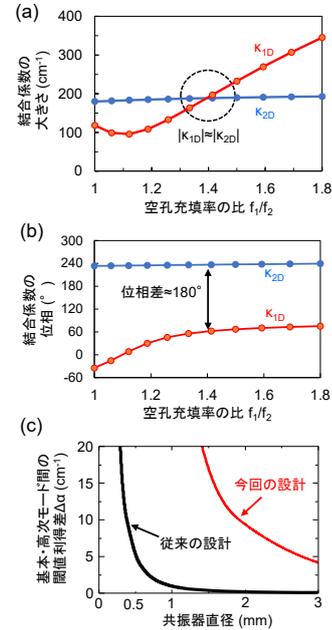


図 4. 空孔充填率の比を変化させた場合の結合係数の (a) 大きさ、(b) 位相。(c) 閾値利得差  $\Delta\alpha$  の共振器直径依存性。

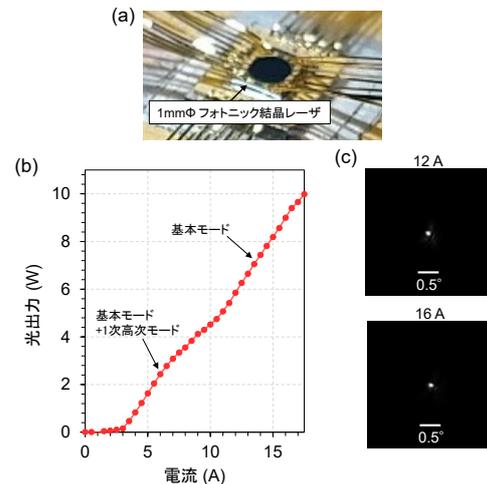


図 5. (a) 作製した 1mm $\Phi$  フォトニック結晶レーザ。(b) 電流・光出力特性。(c) 電流値 12A および 16A における遠視野像。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yoshida Masahiro, De Zoysa Menaka, Ishizaki Kenji, Kunishi Wataru, Inoue Takuya, Izumi Koki, Hatsuda Ranko, Noda Susumu	4. 巻 3
2. 論文標題 Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Photonics	6. 最初と最後の頁 022006 ~ 022006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2515-7647/abea06	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 De Zoysa Menaka, Yoshida Masahiro, Song Bongshik, Ishizaki Kenji, Inoue Takuya, Katsuno Shumpei, Izumi Koki, Tanaka Yoshinori, Hatsuda Ranko, Gelleeta John, Noda Susumu	4. 巻 37
2. 論文標題 Thermal management for CW operation of large-area double-lattice photonic-crystal lasers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 3882 ~ 3887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.411086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sakata Ryoichi, Ishizaki Kenji, De Zoysa Menaka, Fukuhara Shin, Inoue Takuya, Tanaka Yoshinori, Iwata Kintaro, Hatsuda Ranko, Yoshida Masahiro, Gelleeta John, Noda Susumu	4. 巻 11
2. 論文標題 Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality two-dimensional beam scanning lasers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17092-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Katsuno Shumpei, Inoue Takuya, Yoshida Masahiro, Zoysa Menaka De, Ishizaki Kenji, Noda Susumu	4. 巻 29
2. 論文標題 Self-consistent analysis of photonic-crystal surface-emitting lasers under continuous-wave operation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 25118 ~ 25118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.427783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 de Zoysa Menaka, Inoue Takuya, Yoshida Masahiro, Ishizaki Kenji, Kunishi Wataru, Gelleeta John, Noda Susumu	4. 巻 57
2. 論文標題 Light Detection Functionality of Photonic-Crystal Lasers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JQE.2021.3091153	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40件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 井上 卓也、吉田 溪介、吉田 昌宏、Gelleeta John、野田 進
2. 発表標題 二重格子フォトリック結晶レーザーにおける例外点近傍のバンド構造の制御 - 理論 -
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 昌宏、石崎 賢司、和泉 孝紀、井上 卓也、De Zoysa Menaka、吉田 溪介、初田 蘭子、野田 進
2. 発表標題 二重格子フォトリック結晶レーザーにおける例外点近傍のバンド構造の制御 - 実験 -
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 卓也、吉田 溪介、吉田 昌宏、Gelleeta John、野田 進
2. 発表標題 フォトリック結晶レーザーの超大面積単一モード動作条件の解析解の導出
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和泉 孝紀、吉田 昌宏、井上 卓也、勝野 峻平、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、野田 進
2. 発表標題 大面積単一モード動作条件の解析解に基づき設計した3mm フォトニック結晶レーザーの発振特性解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝野 峻平、吉田 昌宏、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、井上 卓也、野田 進
2. 発表標題 1mm フォトニック結晶レーザーのCW10W級高ビーム品質動作の実現
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國師 渡、宮井 英次、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、吉田 昌宏、初田 蘭子、野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶レーザーの広温度範囲(-40~100 )動作
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 John Gellera、Masahiro Yoshida、Susumu Noda
2. 発表標題 Analysis of PCSELS considering recoupling of reflected radiative waves
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 昌宏、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、井上 卓也、和泉 孝紀、勝野 峻平、初田 蘭子、Gelleeta John、野田 進
2. 発表標題 高出力・高ビーム品質二重格子フォトニック結晶レーザー - 超大面積単一モード動作実現に向けて -
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和泉 孝紀、吉田 昌宏、勝野 峻平、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、井上 卓也、初田 蘭子、野田進
2. 発表標題 3mm 大面積フォトニック結晶レーザーの作製・特性評価 ( )
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 卓也、吉田 昌宏、森田 遼平、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、野田 進
2. 発表標題 屈折率勾配を導入したフォトニック結晶レーザーの自励パルス発振動作の観測 (II) 注入電流依存性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 國師 渡、宮井 英次、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、吉田 昌宏、西村 健太郎、野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶レーザ搭載型LiDARの開発
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 勝野 峻平、井上 卓也、吉田 昌宏、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、野田 進
2. 発表標題 連続駆動時のフォトニック結晶レーザーの自己無撞着動作解析(II)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsuno Shumpei、Yoshida Masahiro、Izumi Koki、Inoue Takuya、Ishizaki Kenji、De Zoysa Menaka、Hatsuda Ranko、Gellesta John、Enoki Kentaro、Noda Susumu
2. 発表標題 29-W Continuous-Wave Operation of Photonic-Crystal Surface-Emitting Laser (PCSEL)
3. 学会等名 27th International Semiconductor Laser Conference (ISLC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 昌宏、石崎 賢司、井上 卓也、勝野 峻平、De Zoysa Menaka、和泉 孝紀、初田 蘭子、野田 進
2. 発表標題 高輝度1mm フォトニック結晶レーザーの系統的評価とレーザーマーキング動作の実現
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國師 渡、宮井 英次、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、吉田 昌宏、西村 健太郎、澁谷 夢人、井上 恵介、野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶レーザーの高輝度化(>1GW/cm <sup>2</sup> /sr)とLiDARの小型化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 勝野 峻平、吉田 昌宏、井上 卓也、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、野田 進
2. 発表標題 温度補償構造を導入したフォトニック結晶レーザーのCW動作特性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和泉 孝紀、吉田 昌宏、勝野 峻平、De Zoysa Menaka、井上 卓也、石崎 賢司、野田 進
2. 発表標題 3mm 大面積フォトニック結晶レーザーの電気的特性の解析と電極構造設計
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 勝野 峻平、吉田 昌宏、和泉 孝紀、De Zoysa Menaka、石崎 賢司、井上 卓也、野田 進
2. 発表標題 フォトニック結晶レーザーの30W級CW動作の実現
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和泉 孝紀、吉田 昌宏、石崎 賢司、榎 健太郎、勝野 峻平、井上 卓也、De Zoysa Menaka、野田 進
2. 発表標題 二重格子フォトニック結晶共振器の結合係数制御とバンド構造変化
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 2次元フォトニック結晶面発光レーザ	発明者 野田 進、井上 卓 也、吉田 昌宏、石崎 賢司	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-27908	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

フォトニック結晶レーザーを搭載したLiDARの開発に成功 <a href="https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-08">https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-08</a> フォトニック結晶レーザー搭載LiDARの大幅な小型化（体積1/3）に成功 <a href="https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-07-14-1">https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-07-14-1</a>
--

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
---------	---------