スマートフォトニック結晶レーザーの開発

メーナカ デ ゾイサ*

Development of Smart Photonic Crystal Laser

Menaka DE ZOYSA*

In this study, we develop a smart photonic crystal laser that dynamically controls the lasing state (the spatial intensity and phase distribution of light) on demand. To control the lasing state, we introduce a multiple electrode array to the back side of photonic crystal laser to manipulate the distribution of current injection. Additionally, by employing machine learning, we establish a correlation between the injected current distribution and the laser beam pattern, which reflects the lasing state. We successfully achieve high-precision prediction of the current injection distribution required to realize target beam patterns. These results pave the way toward a new generation of smart laser sources essential for stabilizing the lasing mode even under the influence of environmental factors, as well as tailoring the laser beam for advanced laser processing and additive manufacturing etc.

1. 序論

超スマート社会の実現に向けて、デジタル制御が可能なレーザーを用いた製造(加工,三次元造形等)の重要性が増し ている.これまで、レーザーを用いた製造における光源としては、大型・低効率・高価ではあるものの高輝度動作が可能 な、炭酸ガスレーザーやファイバーレーザー等が主に使われてきた.一方、小型・高効率・安価という特徴を有する半導 体レーザーは、高いビーム品質を保ったままで高出力化ができない(すなわち、輝度が低い)という課題を有していたた めに、製造分野では、ほとんど利用されていない.そのような状況の中、近年、高ビーム品質かつ高出力化(すなわち、 高輝度化)を可能とする新たな半導体レーザーとして、フォトニック結晶レーザーが注目を集めている¹⁻³⁾.フォトニック 結晶レーザーは、光を発生・増幅する活性層近傍に、光の波長オーダの周期構造からなる2次元フォトニック結晶を設け た半導体レーザーであり、大面積コヒーレント発振により、大型のレーザーに匹敵する高輝度化が実現されている.

本研究では、このような優れた特徴を有するフォトニック結晶レーザーをさらに発展させ、特に光・電子・熱のマルチ フィジクスが絡む連続駆動時のレーザーの発振状態(光の空間的な強度分布や位相分布)をオンデマンドに制御できる次 世代のスマートフォトニック結晶レーザーを実現していくことを目指している.このようなスマートレーザーにおいて、 発振状態の制御を通じて、ビーム形状の制御が可能となり、用途に応じた形状のビームのオンデマンドな出射等が可能に なると期待される.これにより、例えば、ビーム形状を変化させながらレーザー加工を行うといった加工の高度化等が可 能となり、製造技術の一層の進展に繋がると期待される.それに加えて、レーザーの使用中に環境変動等により生じた発 振状態の変化を、リアルタイムに補正すること等も可能となるなど、これまでにない機能性の付加も可能と期待される.

2. スマートフォトニック結晶レーザーの概要

スマートフォトニック結晶レーザーの概要を,模式的に図1に示す.同図に示す ように,電極を複数に分割したフォトニック結晶レーザーにより,分割した領域間 における相互同期(領域間における引き込み)現象を利用しつつ,電流注入の分布 を制御することで,フォトニック結晶レーザー共振器内に存在し得る発振モード (単峰状の基本モード,双峰状の第一高次モード等)からなる発振状態の制御を可 能とする^{4.5)}.このようなレーザーにおいて,注入する電流注入分布と発振状態を 反映したビーム形状との関係について,機械学習を用いて相関づけることで,狙い とするビーム形状を得るために必要な電流注入分布の予測をも可能とし,高度なオ ンデマンド制御を実現することを目指している.



図1 スマートフォトニック結晶 レーザーの概図.

3. 研究の成果

発振状態制御のために、図2に示すような分割電極フォトニック結晶 レーザーを作製した.図2(a),(b)は、デバイスの裏面側(p側)の分割 電極および、表面側(n側)の窓状電極の様子を示している.本デバイ スのp側分割電極は、一領域あたり150µm角の電極を、20µmの間隔をあ けて、6×6のマトリックス状(全体で、~1mm角)に配置した構造と なっている.ここで、電極の間隔は、隣接する領域同士が同期できるよ うに設定している⁴⁾.フォトニック結晶としては、大面積動作に適した 二重格子構造²⁰を用いた.このようなデバイスを、各々の分割電極に独 立して電気的にアクセスできるようにしつつ、連続駆動でも動作できる ように、図2(c)のように、ヒートシンク上にフリップチップ(分割電極 が下向きになるように)実装を行った.また、パソコンでの制御によ り、各領域へと、設定した電流を注入可能な回路も、併せて作製した.

図3には、連続駆動における、ビット分布(電流分布)とその時に得 られたビーム形状の測定結果を示す.ここで、分割電極フォトニック結 晶レーザーから出射されるビーム形状は、CMOSカメラを用いて測定し た. 同図より,電流分布を変化させることによって,発振状態が変化 し、その結果として、ビーム形状が変化していることがわかる.次に、 与えた電流分布と得られたビーム形状の測定データをもとに、畳み込み ニューラルネットワークを用いた機械学習を活用して、ビーム形状の制 御を行うことを試みた.訓練済みの学習モデルを用いて,目標とする ビーム形状の実現に必要なビット分布を予測し、さらに、その予測結果 をデバイスに入力してビーム形状を測定し、狙いの形状と比較すること で、学習モデルを評価した. 目標ビーム形状として、訓練に用いていな いテストデータおよび人工的に生成した形状を用いた場合の、評価結果 を図4に示す. 同図に示すように、目標ビーム形状と予測した入力分布 を用いて得られた実際のビーム形状とはよく一致し、一致度の平均とし て、90%以上が得られた.以上の結果から、光・電子・熱のマルチフィ ジクスが絡む連続駆動において、高度な発振状態制御を実現することに 成功したと言える.



図2(a)分割電極フォトニック結晶レーザーの裏面の様子.(b)表面の様子.(c)実装後の様子.



図4 機械学習を活用した,狙ったビーム形状を実現するために必要なビット分布の予測および、予測ビット分布をもとに実験的に得られたビーム形状の測定結果.

4. まとめ

本研究では、発振状態をオンデマンドに制御できる次世代のスマートフォトニック結晶レーザーの開発に取り組ん だ.発振状態を制御するために、フォトニック結晶レーザーの裏面電極を意図的に分割し、電流注入分布の動的に制御 することを可能とした.さらに、機械学習を活用して、注入する電流分布と、発振状態を反映したレーザーのビーム形 状との相関関係を学習させ、必要なビーム形状の実現に要する電流注入分布の高精度に予測することにも成功した.

謝辞

日頃からご指導頂く,京都大学の野田進教授に感謝する.また,本研究は,野田進教授他,和泉孝紀氏,石崎賢司特 定准教授,井上卓也助教,吉田昌弘助教,坂田諒一特定助教との共同研究の成果である.

REFERENCES

- 1) M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata and G. Sasaki, Appl. Phys. Lett., 75 (1999) 316.
- M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, M. Kawasaki, R. Hatsuda, B. S. Song, J. Gelleta and S. Noda, *Nature Materials*, 18 (2019) 121.
- 3) S. Noda, T. Inoue, M. Yoshida, J. Gelleta, M. De Zoysa and K. Ishizaki, Advances in Optics and Photonics, 15 (2023) 977.
- 4) M. De Zoysa, Y. Nakagawa, K. Izumi, T. Inoue, K. Ishizaki, M. Yoshida, J. Gelleta and S. Noda, Optica, 10 (2023) 754.
- 5) K. Izumi, M. De Zoysa, Y. Nakagawa, N. Gyoja, T. Inoue, S. Katsuno, R. Sakata, K. Ishizaki, M. Yoshida, J. Gelleta, R. Hatsuda and S. Noda, *JOSA B*, **41** (2024) 392.