

円柱状微小レーザの放射光制御に関する検討 —マルチモードを利用した指向性解析—

A Study on Light Emission Control of Cylindrical Microcavity Laser - Directivity Analysis on Multi-Mode Lasing -

○上村凌平¹, 大貫進一郎²*Ryohei Uemura¹, Shinichiro Ohnuki²

Abstract: Whispering gallery mode lasers can confine electromagnetic fields in a minute region for a long time and work as a low threshold laser. However, directivity control is necessary for the laser because it emits light to all directions. In this report, directivity in multi-mode lasing with phase shift is discussed based on multiphysics simulation.

1. はじめに

近年、光信号のみを利用した光集積回路の小型化に向け、微小レーザ発振器の研究・開発が注目を集めている。その中でも、WG (Whispering Gallery) モードを利用するレーザは非常に小さな領域での光の閉じ込めができ、低閾値なレーザ発振が可能となる^[1]。しかし、その放射する光は WG モード特有の点対称な放射界となるため指向性の制御が必要不可欠である。そこで、我々は外部エネルギーによる放射光の電気的な制御を検討するために、レーザ発振について複合物理シミュレーションに基づいた研究を行っている^[2-4]。本報告では、マルチモード発振時の位相差を利用した指向性の制御を検討する。

2. 解析手法

レーザ発振のシミュレーションには、Maxwell 方程式に中心差分を適用する FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法^[5]を用いた。分散性媒質における電磁界の影響は、媒質中の分極の応答を次式に示す Maxwell 方程式に加えることにより表すことができる^[6-8]。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}_l}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 n は誘電体共振器の屈折率、 \mathbf{P}_l は添加する利得媒質の分極であり、次式に示す Lorentz モデルを想定した電子の運動方程式により計算する。

$$\frac{\partial^2 \mathbf{P}_l}{\partial t^2} + \Delta \omega_a \frac{\partial \mathbf{P}_l}{\partial t} + \omega_a^2 \mathbf{P}_l = F \frac{e^2}{m} \Delta N \mathbf{E} \quad (3)$$

ここで、 ω_a は媒質の共振角周波数、 $\Delta \omega_a$ は実際の遷移幅、 F は振動子の強さである。 $\Delta N (= N_1 - N_2)$ は準位 1, 2 間の電子密度の差であり、次式に示す 4 準位系のエネ

ルギー構造を想定したレート方程式により求めることができる。

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = P_r N_0(t) - \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} \quad (4)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} - \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} + \frac{1}{\hbar \omega_a} \mathbf{E}(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{P}_l(t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} - \frac{N_1(t)}{\tau_{10}} - \frac{1}{\hbar \omega_a} \mathbf{E}(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{P}_l(t)}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = \frac{N_1(t)}{\tau_{10}} - P_r N_0(t) \quad (7)$$

ここで、 \hbar はプランク定数/ 2π 、 τ_{ij} は準位 i, j 間の緩和時間、 P_r はポンピングレートである。

式(1)-(7)の方程式を FDTD 法の差分スキーム^[5]に則り、空間および時間について差分を取ることで数値シミュレーションを行う。

3. 解析結果

Fig.1 に円柱状微小レーザ発振器の解析モデルを示す。半径 $r = 360$ nm、屈折率 $n = 3$ の z 軸方向に一様な 2 次元誘電体共振器に利得媒質を添加したレーザを想

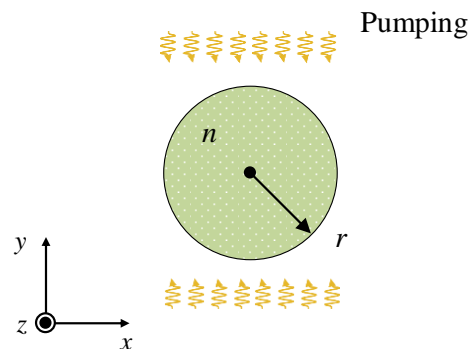


Figure 1. Computational model of a cylindrical cavity laser

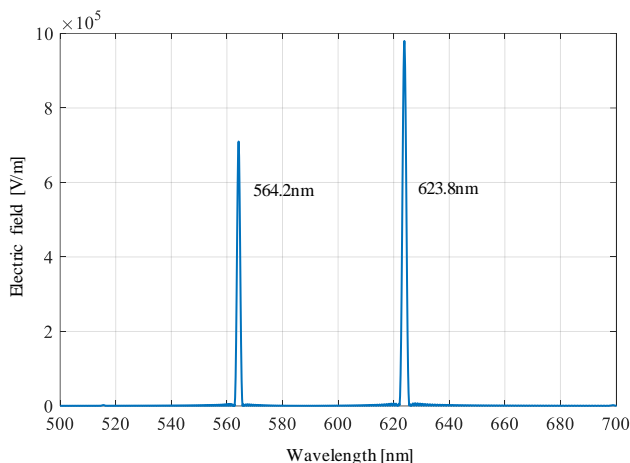


Figure 2. Lasing spectrum in multi-mode

定しており、外部エネルギーによるポンピングは一律に与えるものとする。また、任意の発振波長を選択するために、誘電体共振器に添加する利得媒質の共鳴波長を適切に設定した。本報告では、マルチモード発振時の位相差を利用した指向性の制御を検討する。

レーザ発振時の波長スペクトルを Fig.2 に示す。共振器の共振点を包含するように利得媒質の共鳴波長を設定することで、任意のモードが励起されレーザ発振が起きる。今回は 564.2nm と 623.8nm を共振点とする WG モードを選択した。

次に、レーザ発振時 ($t=3.8210\sim 3.8320$ ps) における電磁界分布と $y=0$ における電磁界強度を Fig.3 に示す。WG モード特有の円周方向に対して疎密が存在する界分布となっているが、原点对称な分布になっていないため、複数のモードが励起されていることがわかる。

(a)においては $-x$ 軸方向に放射光強度が強いのにに対して、(b), (c)と徐々にその向きを変え、結果的に(d)に示すように $+x$ 軸方向に放射光強度が変わっている。図よりおよそ 20fs 周期で x 軸方向に対して放射光強度が周期的に変化しており、指向性が得られていることが確認できた。

4. まとめ

マルチモード発振時の位相差を利用した指向性の制御を検討した。 x 軸方向に対して放射光強度が周期的に変化し、WG モードで励起したにも関わらず指向性を得ることができた。

5. 謝辞

本研究の一部は、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の援助を受けて行われた。

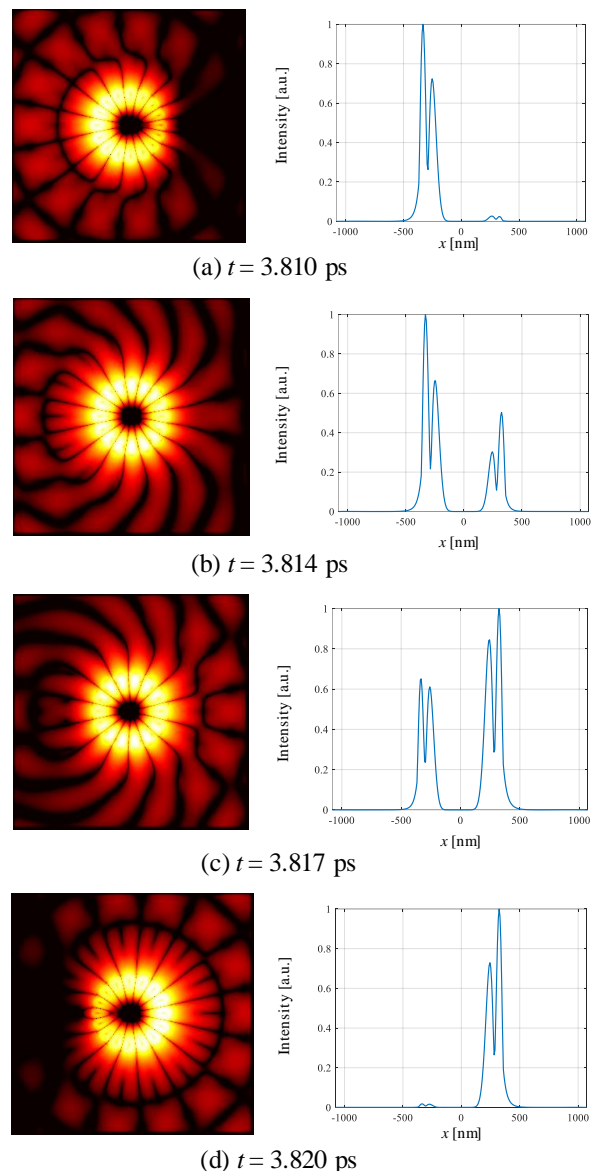


Figure 3. Electromagnetic field distribution

6. 参考文献

- [1] M. Gonokami and K. Takeda, *Optical Materials* **9**, pp. 12-17, 1998.
- [2] 上村凌平, 大貫進一郎, 信学技報, EST2016-49, pp. 231-234, Sep. 2016.
- [3] 上村凌平, 大貫進一郎, 2017 IEICE ソサイエティ大会, C-1-8.
- [4] R. Uemura and S. Ohnuki, Proc. of PIERS, 1A1.
- [5] A. Taflove and S. C. Hagness, *Artech house*, 2005.
- [6] A. S. Nagra and R. A. York, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **46**, pp. 334-340, 1998.
- [7] T. Matsui, *InTech*, ISBN 978-953-307-620-1, 2011.
- [8] 松井龍之介, 北口将大, 信学技報, OME2010-25, pp. 41-44, 2010.