

誘電体円柱共振器を用いたレーザ発振の数値シミュレーション —利得媒質の空間分布と発振モード—

Numerical Simulation of Lasing Performance on a Dielectric Cylindrical Resonator - Lasing Mode Selection by Spatial Control of Doping Area -

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

Abstract: We report numerical simulation of lasing performance on a dielectric cylindrical resonator doped with gain inclusions. The lasing performance is simulated by the ADE-FDTD method which is incorporated the FDTD method with the equation of motion of an electron in the Lorentz model and rate equations. In this paper, we discuss lasing mode selection by spatial control of doping area.

1. はじめに

近年、光信号のみを利用した光集積回路が注目を集めており、光の閉じ込めやその制御を担う光共振器等の開発が行われている。その中でも、ウィスパーリングギャラリーモード (Whispering Gallery Mode) を用いたものは非常に小さな領域での光の閉じ込めができ、誘電体共振器に希土類元素や色素などの利得媒質をドーピングすることで低閾値なレーザ発振器を形成できる^[1]。そこで、我々はより小型で低閾値な素子構造を検討するために、電磁界解析手法である FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法^[2]に補助方程式 (Auxiliary Differential Equation: ADE) を導入した ADE-FDTD 法^{[3][4]}を用い、レーザ発振器の数値シミュレーションに取り組んでいる^{[5][6]}。本報告では、誘電体円柱共振器を用いたレーザ発振のシミュレーションを行い、利得媒質の空間分布を操作することにより発振モードの制御について検討を行う。

2. 解析手法

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。

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}_t}{\partial t}$$

ここで、 n は背景媒質の屈折率であり、分極 $\mathbf{P}_t$ は次式に示す Lorentz モデルを想定した電子の運動方程式により計算する。

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

ここで、 ω_a は媒質の共振角周波数、 $\Delta \omega_a$ は実際の遷移

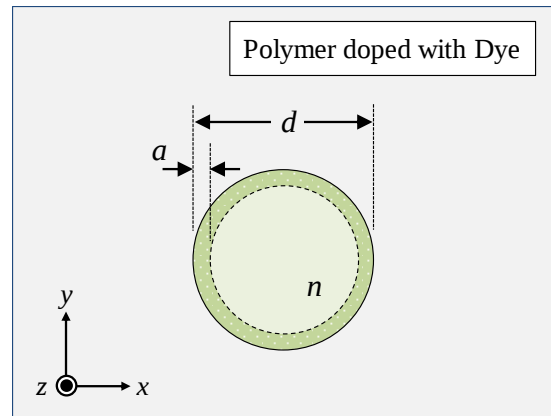


Figure 1. Computational model of a dielectric cylindrical resonator

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。

$$\begin{aligned} \frac{dN_3(t)}{dt} &= P_r N_0(t) - \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} \\ \frac{dN_2(t)}{dt} &= \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} - \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} + \frac{1}{\hbar \omega_a} \mathbf{E}(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{P}_t(t)}{\partial t} \\ \frac{dN_1(t)}{dt} &= \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} - \frac{N_1(t)}{\tau_{10}} - \frac{1}{\hbar \omega_a} \mathbf{E}(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{P}_t(t)}{\partial t} \\ \frac{dN_0(t)}{dt} &= \frac{N_1(t)}{\tau_{10}} - P_r N_0(t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\hbar$ はプランク定数/2 π 、 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。解析時間を削減するため、初期状態において各準位の電子密度は

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \frac{dN_2(t)}{dt} = \frac{dN_1(t)}{dt} = \frac{dN_0(t)}{dt} = 0 \quad (4)$$

を仮定することで、反転分布を形成した状態から解析

を始めた。

以上の方程式を FDTD 法の差分スキーム^[2]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

本報告では、Fig.1 に示す直径 $d = 5 \mu\text{m}$ の 2 次元円柱状のレーザ色素をドーピングしたポリマーから形成される誘電体共振器を用いたレーザ発振のシミュレーションを行う。このとき、利得媒質のドーピング領域 a を操作することにより発振モードの制御を検討する。

Fig.2 (a)は誘電体共振器に一様にドーピングした場合のレーザ発振スペクトルである。同時に今回用いたレーザ色素の利得係数を破線で示す。レーザ発振は、ドーピングしていない共振器自身がつもつ共振モードと利得係数のスペクトルが重なるところでその波長においてレーザ発振が起きる。ここでは複数のモードが確認できるが、これは利得係数のスペクトル内にある各共振モードがレーザ発振に至るのに十分な Q 値を持つためである。

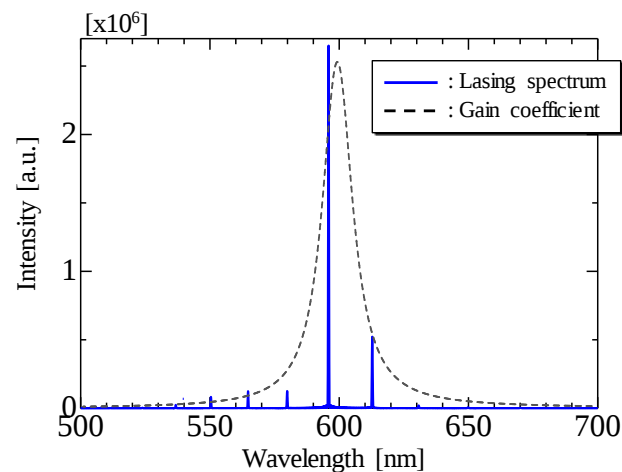
Fig.2 (b)に円柱表面から $a = 0.1 \mu\text{m}$ の厚さにドーピング層を制限した場合におけるレーザ発振スペクトルを示す。一様にドーピングした場合に比べてモードが単純化され、ほぼ単一モードでのレーザ発振となっている。これは共振器の円周上を周回するウィスパリングギャラリーモードが他のモードより強く増幅されることで発振モードが制限されるためである。このように利得媒質の空間分布を操作することで、発振モードを制御することが可能となる。また、このシミュレーション結果は実験により報告されている観測結果^[1]をよく再現している。

4. まとめ

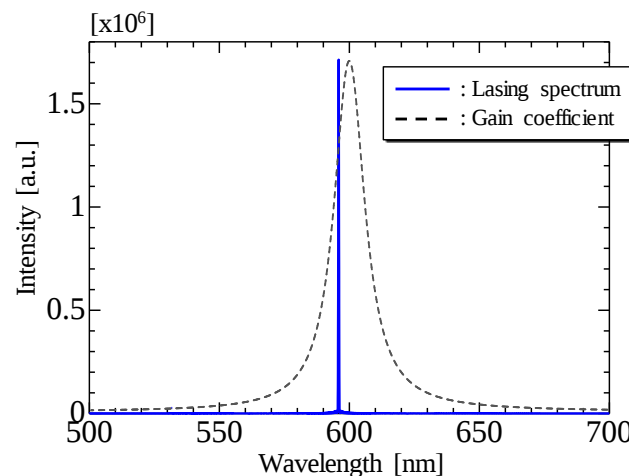
誘電体円柱共振器を用いたレーザ発振のシミュレーションを行い、利得媒質の空間分布を操作することによる発振モードの制御について検討した。直径 $5 \mu\text{m}$ の円柱表面から $0.1 \mu\text{m}$ の厚さにドーピング層を制限することで、ほぼ単一モードでのレーザ発振となることを示した。

5. 謝辞

本研究の一部は、及び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。



(a) The medium doped uniform



(b) The medium doped a part ($a = 0.1 \mu\text{m}$)

Figure 2. Lasing spectra with gain coefficient

6. 参考文献

- [1] 五神真, “ウィスパリングギャラリーモードレーザ”, 信学技報, LQE94-21, pp. 31-36, 1994.
- [2] 宇野亨, “FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析”, コロナ社, 1998.
- [3] A. S. Nagra and R. A. York, “FDTD Analysis of Wave Propagation in Nonlinear Absorbing and Gain Media”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 334-340, Mar. 1998.
- [4] 松井龍之介, 北口将大, “ADE-FDTD 法によるコレステリック液晶レーザの数値シミュレーション”, 信学技報, OME2010-25, pp. 41-44, 2010.
- [5] 上村凌平, 大貫進一郎, “ADE-FDTD 法による円柱状利得媒質の電磁界解析”, 信学技報, EST2016-49, pp. 231-234, Sep. 2016.
- [6] 上村凌平, 大貫進一郎, “利得を有する誘電体円柱の電磁界解析”, 2016 IEICE ソサイエティ大会, C-15-11.