

4 準位系の利得媒質における光増幅の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Light Amplification in Gain Media with Four-Level Atomic System

○上村凌平¹, 上垣将洋², 大貫進一郎³*Ryohei Uemura¹, Masahiro Kamigaki², Shinichiro Ohnuki³

Abstract: FDTD method incorporated with rate equations is effective to study of wave propagation in linear or nonlinear media. In this paper, we discuss the numerical analysis of light amplification in gain media with four-level atomic system.

1. はじめに

近年、光回路の信号発信源となるナノメートルサイズのレーザ発振器の研究が注目されている。このナノレーザ発振器の素子構造を検討する上で、数値シミュレーションに基づく構造設計手法の開発が望まれる。そこで、我々は電磁界解析手法である FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法に補助方程式 (auxiliary differential equation: ADE) としてレート方程式を組み合わせた ADE-FDTD 法により、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。本報告では、ナノレーザ発振器のシミュレーションに向け、4 準位系の利得媒質における光増幅のシミュレーションを行い、媒質中の電界、分極および電子数の時間応答を解析する。

2. 解析手法

非線形媒質における電磁波の影響は、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。

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

ここで、分極 $\mathbf{P}$ 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。

$$\frac{d^2 \mathbf{P}}{dt^2} + \Delta \omega_a \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \omega_a^2 \mathbf{P} = \frac{\gamma_r e^2}{\gamma_{ceo} m} \Delta N \mathbf{E} \quad (2)$$

ここで、 ω_a は媒質の共振角周波数、 $\Delta \omega_a$ は実際の遷移幅、 γ_{ceo} は固有振動の緩和レート、 γ_r は放射遷移レート、 e は電荷素量、 m は電子の質量である。

Fig.1 に 4 準位系のエネルギー構造を示す。レーザ遷移は準位 1-2 間で起こり、その準位間における電子数の差 $N_1 - N_2$ を ΔN としている。また、各エネルギー準位の電子数は次式に示す 4 準位系のレート方程式により求められる。

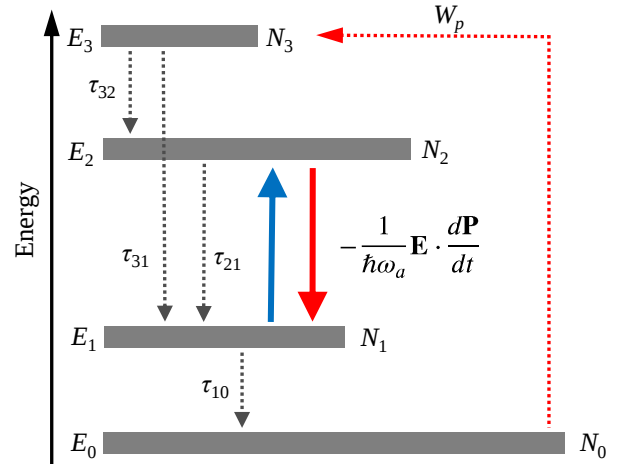


Figure 1. Four-level atomic system

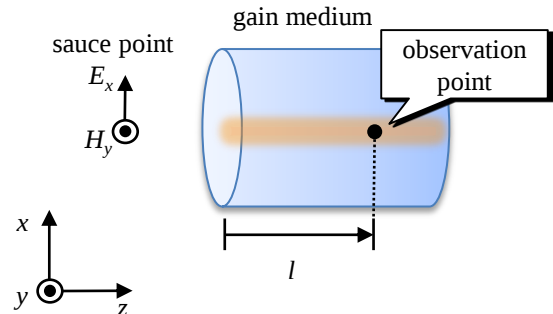


Figure 2. Computational model of the gain medium

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= W_p - \frac{N_3}{\tau_3} \\ \frac{dN_2}{dt} &= \frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{1}{\hbar \omega_a} \mathbf{E} \cdot \frac{d\mathbf{P}}{dt} - \frac{N_2}{\tau_2} \\ \frac{dN_1}{dt} &= \frac{N_3}{\tau_{31}} - \frac{1}{\hbar \omega_a} \mathbf{E} \cdot \frac{d\mathbf{P}}{dt} + \frac{N_2}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{10}} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\hbar$ はディラック定数、 τ_{ij} は準位 i - j 間の緩和時間、 τ_i は準位 i から全ての下準位への緩和時間、 W_p はポンピングレートである。この 4 準位系において、準位 0 の電子数 N_0 は他の準位の電子数より非常に多いものとする。

3. 解析結果

Fig.2 に解析モデルを示す. 真空中に 4 準位系の利得媒質を配置し, z 方向に電磁波が伝搬するような 1 次元モデルを想定する. 入射波源には周波数 $f_a = 1 \times 10^{14} \text{ Hz}$ の正弦波を用い, 真空中から媒質に入射し, 媒質の境界から距離 $l = 3 \mu\text{m}$ の地点を観測点とした. また, $W_p = 1 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$ 一定とし, 各準位の電子数の初期状態は式 (3) のレート方程式において $\mathbf{E} = 0$, $dN_i / dt = 0$ ($i=1,2,3$) を満たす N_1 , N_2 , N_3 を用い, 反転分布を形成している状態から解析を行った.

Fig.3 に準位 1-2 間における電子数の時間変化を示す. 入射波源の振幅が小さいときは電子数の変化はほぼ一定であるが, 振幅が非常に大きい場合は準位 1-2 間の電子数も大きく変動していることがわかる. また, 解析結果と文献^[1]の結果が一致することを確認した.

Fig.4 および Fig.5 に入射波源の振幅を変化させたときの観測点における電界と分極の時間変化を示す. Fig.4 から, 入射波源の振幅が小さいときの分極は線形な応答となるが, Fig.5 に示すように振幅が非常に大きい場合は分極に高調波が発生し, 非線形な応答を示している.

4. まとめ

ナノレーザ発信器のシミュレーションに向け, ADE-FDTD 法により 4 準位系の利得媒質における光増幅のシミュレーションを行った. 解析結果より, 入射波源の振幅を変化させることで媒質の応答が異なることから線形, 非線形光学現象を確認した.

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.

6. 参考文献

- [1] Amit S. Nagra and Robert A. York, "FDTD Analysis of Wave Propagation in Nonlinear Absorbing and Gain Media", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 3, MARCH 1998.
- [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] 上村凌平, 大貫進一郎, "マルチフィジックスシミュレーションによるナノレーザ発振器の設計", 電気学会 2015 第 6 回学生研究発表会, 6-6, 2015

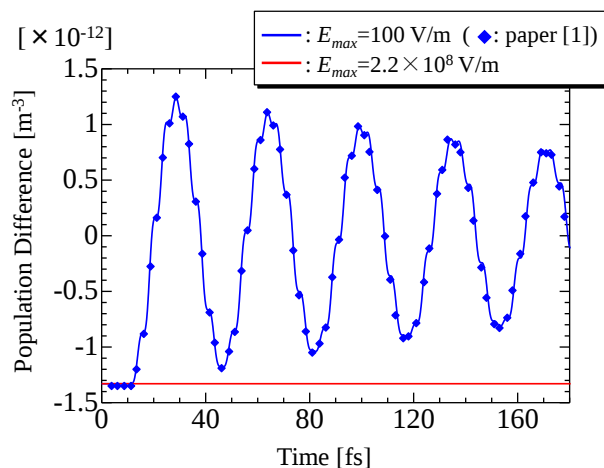


Figure 3. Time response of the population difference

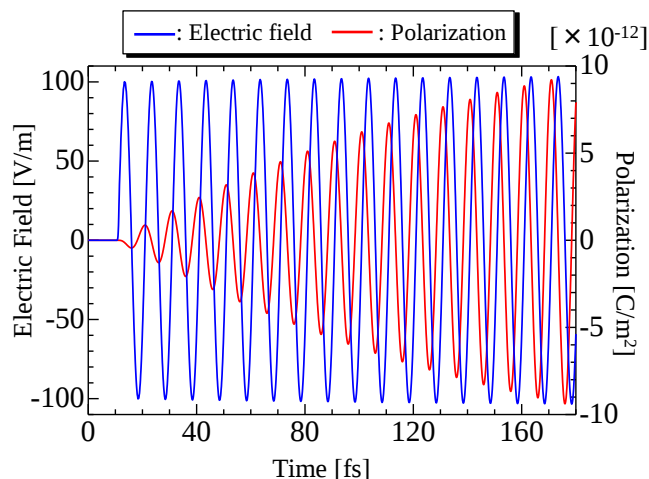


Figure 4. Time response of electric field and polarization in the media ($E_{\max} = 100 \text{ V/m}$)

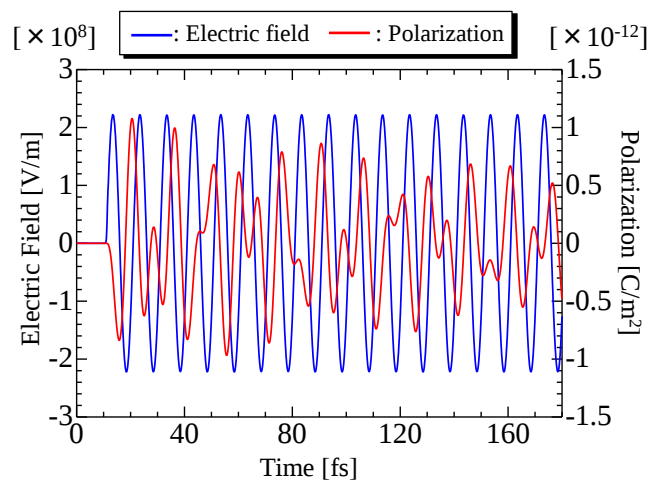


Figure 5. Time response of electric field and polarization in the media ($E_{\max} = 2.2 \times 10^8 \text{ V/m}$)