303 マイクロ波励起によるガスレーザーの数値電磁流体力学的基礎研究

Numerical MHD Study of Gas Laser Excited by Microwaves

○学 竹本 広文(電通大院) 正 前川 博(電通大)

Hirofumi TAKEMOTO, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo
 Hiroshi MAEKAWA, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo

Microwave discharge for excitation of gas laser has been considered as an improvement of their efficiencies. It can excite the gas without electrodes, so it can avoid the contamination. Up to this time, new laser systems have been developed experimentally by trial and error. However, numerical simulations can be very effective, in understanding the details of the physical process. In this study, the quantum physics, the gas dynamics and the thermodynamics of gas laser were investigated by combining MHD equation with the rate equation.

Key words: MHD equation, Laser, Microwave, Rate equation

1. 緒言

従来のガスレーザーの主な励起方法である、直流放電方式は放電管内に金属電極を置くため、電極のスパッタリングによるガスの劣化など、不利な点が多い。その問題点を解決する方法として、マイクロ波による励起方法⁽¹⁾が提案されている。マイクロ波励起方法はガスを電磁波で直接放電できるため、放電管内に電極を置かずに媒質を励起することができるため、ガスの劣化を防ぐ事ができる。また、電子レンジに使用されているマイクロ波を発生するマグネトロンを採用すれば、電源素子が安価に入手でき低コスト化も図ることができる。さらに、放電で熱くなったガスを高速で放電空間から除去することによってもガスの劣化を防ぐ事ができ、更には温度上昇を押さえる事ができると考えられている。

本研究では、マイクロ波励起による高速循環ガスレーザーについて、プラズマの流れがどのようにレーザー発振に影響を与えているのかを電磁流体方程式、レート方程式、定常電磁界方程式より求めた。レーザー媒質に関しては、励起機構の比較的簡潔な Ar イオンレーザーを用い、イオン基底準位からレーザー準位までの間を表現した。流体場の解析には時間依存法を用い、その各時刻における電磁場については定常解を求める方法を用いた。

Ar⁺3s²3p⁴4p、レーザー下準位 Ar⁺3s²3p⁴4s である。また、自然遷移確率 ω_{lm} の添え字 lm は l から m への遷移を表わし、誘導遷移確率 S_{lm} の添え字 lm は l と m 間の遷移を表わす。

2. 計算方法

本研究では完全電離したプラズマをマイクロ波により励起させ、レーザー光が放出されるまでの過程をシミュレーションした。粒子はイオン基底準位、レーザー準位、レーザー下準位の3つで近似する。熱伝導、粘性などは無視する。磁場については外部磁場は存在せず、導伝電流による自己磁界のみ考慮する。運動量保存式、エネルギーの式は1流体として解く。反転分布が起きると、波長 514.5nm のアルゴンイオンレーザー光としてエネルギー放出されるものとした。流体場については時間依存式、電磁界方程式については各時刻における定常解を求めた。時間積分には4次精度 Runge-Kutta 法を、空間微分には6次精度コンパクトスキームを用いた。遷移は Fig.1 のように近似する。イオン基底準位 Ar⁺3s²3p⁵ から、電子衝突によってレーザー準位 Ar⁺3s²3p⁴4p へ励起され、レーザー下準位 Ar⁺3s²3p⁴4s へレーザー遷移をし、光放出緩和によりイオン基底へ戻る。

記号

k ; ボルツマン定数
 h ; プランク定数
 c ; 光速
 ν ; 周波数
 μ_0 ; 真空の透磁率
 ϵ_0 ; 真空の誘電率
 μ ; 電気双極子モーメント

Fig.1 energy state and principal laser transfer of Ar+laser

添え字 i, d, j はイオン基底準位 Ar⁺3s²3p⁵、レーザー準位

支配方程式は以下のレート方程式と 3 つの保存則、電磁界方程式である。

レート方程式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = S_{ij}n_j - S_{id}n_i - \omega_{id}n_i + \omega_{di}n_d \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = -S_{ij}n_j + S_{jd}n_d \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} = S_{id}n_i - S_{jd}n_d - \omega_{di}n_d + \omega_{id}n_i \quad (3)$$

ただし、ここで自然遷移確率は

$$\omega_{lm} = \frac{16\pi^3\nu^3\mu^2}{\epsilon_0 c^3 h} \quad (4)$$

$$\omega_{ml} = \omega_{lm} \cdot e^{-h\nu/kT} \quad (5)$$

誘導遷移確率は、

$$S_{lm} = B\rho(\nu) = \frac{\omega_{lm}c^3}{8\pi h\nu^3} \cdot \frac{8\pi h\nu^3}{c^3(e^{h\nu/kT} - 1)} = \frac{\omega_{lm}}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (6)$$

のように示される。3 つの保存則は、

連続の式は

$$(\partial \rho_s / \partial t) + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{u}) = n'_s \cdot m_i \quad (7)$$

ただし、 n'_s : レート方程式右辺、 m_i : 粒子質量

運動方程式は

$$\rho_m (\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \rho_e \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla p \quad (8)$$

エネルギー方程式は

$n_d \leq n_j$ のとき、

$$(\partial / \partial t)(K + U) + \nabla \cdot [(K + U + p)\mathbf{u}] - \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (9)$$

$n_d > n_j$ のとき、

$$(\partial / \partial t)(K + U) + \nabla \cdot [(K + U + p)\mathbf{u}] - \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = -(n_d - n_j) \cdot S_{jd} \cdot h\nu \quad (10)$$

$$\text{ただし、} K = \frac{1}{2} \rho u^2, U = \frac{1}{\gamma - 1} p$$

電磁場の式は

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (11)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (12)$$

のように表わされる。

ただし、電気伝導度 σ は電子とイオンの衝突によるものとし、次のように与える。

$$\sigma = 1.5 \times 10^{-3} T^{3/2} \quad (13)$$

3. 計算結果

アルゴンイオンレーザーのレーザー準位における励起寿命は約 10^{-8} [s] である。非常に短い時間での変化であるため、

計算において時間ステップを小さく取る必要がある。そのため定常状態を得るために、計算時間が非常にかかる。また、波長 12cm のマイクロ波を電界として与えると、その振幅がピークになる所で温度が上昇し、遷移確率が温度の変化に対して級数的に高くなった。1 次元計算では、全長 25[cm]、始めの 5[cm] では電界の影響を受けないノズルと仮定、ノズル入り口での流入物理量を一定とした。流入条件が圧力 50[Pa]、流量 3.1×10^{-5} [kg/m³] の結果を Fig2,3 に示す。

Fig2 density of laser state $3s^23p^4p$ and $3s^23p^4s$; (1) 0[s], (2) 1.0×10^{-5} [s], (3) 2.0×10^{-5} [s], (4) 3.0×10^{-5} [s]

Fig3 (a) temperature, (b) velocity ; (1) $t=0$ [s], (2) $t=1.0 \times 10^{-5}$ [s], (3) $t=2.0 \times 10^{-5}$ [s], (4) $t=3.0 \times 10^{-5}$ [s], (5) $t=4.0 \times 10^{-5}$ [s]

4. まとめ

電磁流体方程式とレート方程式を組み合わせる事によって、ガスレーザーを表現する事ができた。圧力が約 40~60[Pa]、温度が約 4000[K] 以上で反転分布し、マイクロ波励起によるレーザー発振が確認できた。

参考文献

- (1) 池田、団野、"マイクロ波励起 CO₂ レーザーの基礎研究"、第 41 回レーザ熱加工研究論文集(1997.7)
- (2) 宮坂、藤原、"音速流入条件を満たす MPD 推進器内 2 次元軸対称電磁流体流れの数値解析"、日本航空宇宙学会論文集 第 47 巻 第 541 号(1999、2)
- (3) Sanjiva K. Lele, "Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution", Journal of Comput Phys 103,16-42(1992)