

銅蒸気レーザーの指向性に対する不安定共振器の効果

奥西 哲・岩堀淳一郎・上田芳文

(物理学)

Effect of Unstable Resonators on the Directivity of Copper Vapor Laser

Akira OKUNISHI, Jun'ichiro IWAHORI and Yoshifumi UEDA

Department of Physics

Abstract. We propose a numerical method which provides the angular distribution of output beam for longitudinally excited copper vapor lasers with unstable resonators. Rays are traced by *ABCD* matrix and gain coefficient is treated as a quantity changing both spatially and temporally in the discharge tube. Several examples of the calculation on the directivity are given.

1. はじめに

銅蒸気レーザー (CVL) は自己終端型の準位構造をもち、可視域の2波長、510.6nm (緑)、578.2nm (黄) でパルス発振をする。製作したレーザーの構造の詳細、発振特性については先に報告した。^{1), 2)} 著者らはこのCVLを励起光源とし、Ti:Al₂O₃結晶をレーザー媒質とする縦励起式波長可変固体レーザーを開発中であり、既に高繰返し率、高平均出力 (5kHz, 1W) の発振を得ている。³⁾ このようなレーザー励起固体レーザーで可変波長域を拡げ、コヒーレンスを改善するためには、入射励起ビームと発振モードの空間領域を合致させる工夫が必要である。指向性の高い励起ビームを与える不安定共振器を設計する手段として、モンテカルロ・シミュレーションを行なった。

これまでにもCVLの指向性と不安定共振器の関係は考察されており、出力ビームの拡がり角を回折限界までおさえるために媒質の利得係数と不安定共振器の倍率に課される条件を導き、それを実験によって定性的に示した報告がある。^{4), 5)} しかし、利得の時間依存性や反転分布の空間的不均一性は考慮されていない。ここでは、簡単なモデルを用いてレーザー利得の時間的

間の変化を取り入れ、出力光強度の角度分布の時間発展を記述した。以下、2節で定式化、3節でシミュレーションの方法、4節でその結果を述べる。

2. 光線の進路と強度⁶⁾

共振器反射鏡の焦点距離、曲率半径、直径を各々 f , R , D で表し、両端の反射鏡に関する量を 1, 2 の添字で区別する。近軸光線を $ABCD$ 行列によって記述する。共振器内の 1 点の共振器対称軸（中心軸）からの距離を r , その点での光線の傾きを r' とすると、ある光学系によって r , r' が受ける変換は

$$r \rightarrow Mr, \det M = 1$$

と表される。ここで $r = (r, r')^t$, M は 2×2 行列である。真空中の光の進行に対応する行列 M_0 及び両端の鏡 m_1, m_2 での反射に対応する行列 M_1, M_2 は

$$M_0 = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, M_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_i & 1 \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2)$$

である。ただし凹面鏡に対しては、 f の符号を負とする。 m_1 の表面に軸から r_0 だけ離れて置かれた点光線から、 $r' = r'_0$ の向きに出た光については、 $r = (r_0, r'_0)^t$ に $M_0, M_2, M_0, M_1, \dots$ を順次左から掛けることにより、その進路を追うことができる（図 1）。

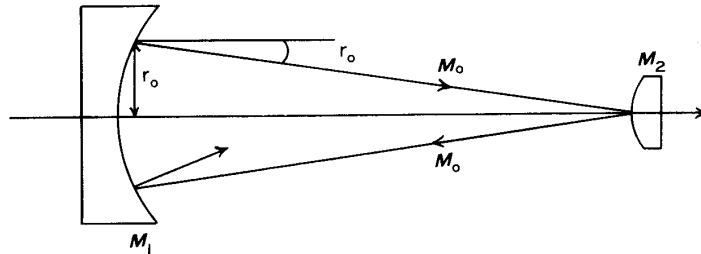


図 1 光線の進路と $ABCD$ 行列の対応。

共振器内にレーザー媒質が存在し、利得係数が零でない場合には、光は誘導放出過程により増幅作用を受けながら進行する。従ってビームの指向性を評価するためには、上述の受動的な共振器の理論に加えて強度（エネルギー流束）の変化を考慮する必要がある。縦型放電励起式の CVL では、利得は放電期間中一様一定ではなく、管壁の近傍から立ち上がる。⁷⁾ 放電管の軸対称性より、利得係数 g は中心軸からの距離 r と時刻 t の関数 $g(r, t)$ となる。ここでは $g(r, t)$ が次のような簡単な関数で近似されるものとみなす。

$$g(r, t) = g_0 \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi}{b} (r + vt) \right] \right\} \quad (1)$$

ただし g_0, b, v は適当に定められるべきパラメーターである。中心軸上に z 軸をとり、 m_1 との交点を z_1 とする。光線が m_1 で反射してから m_2 に達するまでに受ける増幅作用を考える（図

2)。光強度 I の時間発展は次式によって記述される。

$$\frac{dI}{I} = g(r, t) ds \quad (2)$$

ただし ds は光線の微小線要素である。光線の進路を示す線分の端点を P, Q とし、点 P において $r = (r_1, r_1')^t$ とおけば

$$r = | r_1 + r_1'(z - z_1) |$$

$$ds = \sqrt{1 + r_1'^2} dz$$

が成立する。また z 軸の原点を適当に選べば、媒質中での光速を c として、近軸光線に対し近似的に $t = z/c$ が成立する。従って(1), (2)式より、

$$d(\log I) = g_0 \sqrt{1 + r_1'^2} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi}{b} \left\{ | r_1 + r_1'(z - z_1) | + \frac{v}{c} z \right\} \right] \right\} dz \quad (3)$$

を得る。 L は共振器長であり、 $r_1' < -(r_1/L)$ の場合、光線は中心軸と交差する。(3)式を積分すると、

$$\begin{aligned} \log \frac{I(z_1 + L)}{I(z_1)} &= g_0 a \left\{ L + \frac{1}{A} [\sin(Az_1 + B) - \sin\{A(z_1 + L) + B\}] \right\} \quad (r_1' \geq -\frac{r_1}{L}) \\ &= g_0 a \left\{ L + \frac{1}{A} [\sin(Az_1 + B) - \sin\{A(z_1 + d) + B\}] \right\} \\ &\quad + \frac{1}{P} [\sin\{P(z_1 + d) + Q\} - \sin\{P(z_1 + L) + Q\}] \quad (r_1' < \frac{r_1}{L}) \end{aligned}$$

ここで

$$a = \sqrt{1 + r_1'^2} \quad , \quad d = -\frac{r_1}{r_1'}$$

$$A = \frac{\pi}{b} (r_1' + \frac{v}{c}) \quad , \quad B = \frac{\pi}{b} (r_1 - r_1' z_1)$$

$$P = \frac{\pi}{b} (\frac{v}{c} - r_1') \quad , \quad Q = \frac{\pi}{b} (r_1' z_1 - r_1)$$

とおいた。

これとは逆に m_2 で反射してから m_1 に達するまでの強度変化についても、全く同じ議論が成立する。従って初期条件の与えられた任意の光線について強度 I の時間変化が求められる。

3. シミュレーションの構造

以上の議論に基づいて構成した計算機プログラムは、時刻 $t = 0$ において m_1 (全反射側) 表

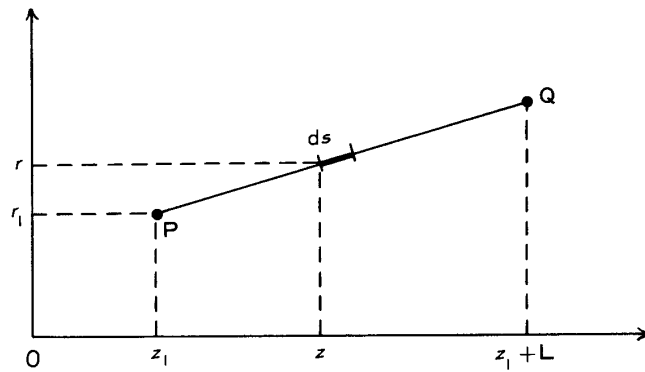


図2 媒質中での光線の進路.

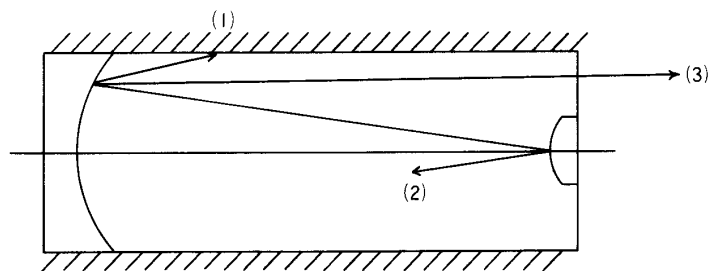
面を様々な条件 (r, r') で出発した多数の光線に対し、そのおのこの進路と強度変化を追う。そして共振器内を $n-1/2$ ($n=1, 2, 3, 4$) 往復して m_2 (出力側) の位置に達した時の I, r' の値からビーム強度の角度分布を与える。初期条件については、一様乱数により次の範囲内で r, r' に数値を付与する。

$$0 \leq r \leq \frac{D_1}{2}$$

$$0 \leq |r'| \leq \frac{2D_1}{L}$$

D_1 は 30mm とおいた。(1)式で $b=D_1/2=15\text{mm}$ とした。発振パルス²⁾の時間幅 (FWHM) が 40ns であることから、²⁾ 利得係数のピークがこの間に管壁から中心軸まで移動すると仮定して $v=4 \times 10^8 \text{mm/s}$ とした。

$D_2 < D_1$ の共振器では、 m_1 を出発した光線の進路は、 r, r' の値によって次の 3 通りに分けられる (図 3)。

図3 進路の分類。(1): 管壁との衝突, (2): m_2 での反射, (3): 共振器外への射出.

- (1) 放電管壁に衝突する
- (2) m_2 に達し、反射する
- (3) 共振器外に射出する

それぞれの場合に応じて次のように処理する。

- (1) 以後、考慮の対象から除外する

(2) 計算を続行する

(3) 数値を集計して出力光強度 I の $|r'|$ に対する分布を与える

同様の手続を繰り返すことにより、 $n=2, 3, 4$ の出力光に対しても強度の角度分布を得る。

4. 計算結果

シミュレーションの結果を図4～6に示す。縦軸は対数の任意目盛で I 、横軸は $|r'|$ である。共振器長 $L=1.5\text{m}$ 、 $g_0=0.2\text{cm}^{-1}$ 、各光線の初期強度を 10^{-60} 、光線の総数を 10^6 本とした。比較のため平行平面型共振器に対する結果を図4に示す。このとき

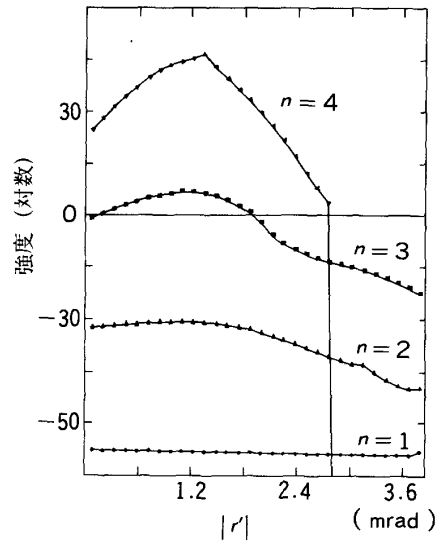


図4 平行平面型共振器に対する $n-1/2$ 往復後の強度分布。出力鏡の反射率 8%。

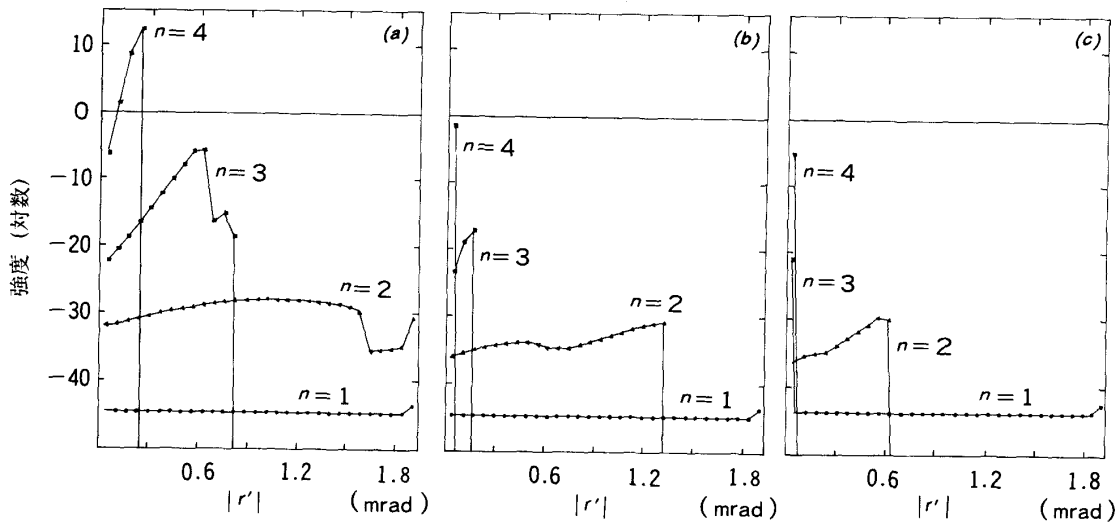


図5 不安定共振器に対する $n-1/2$ 往復後の強度分布。

(a) : $\alpha = 3$, $R_1 = 4.5\text{m}$, $R_2 = 1.5\text{m}$, $D_1 = 30\text{mm}$, $D_2 = 10\text{mm}$.

(b) : $\alpha = 7$, $R_1 = 3.5\text{m}$, $R_2 = 0.5\text{m}$, $D_1 = 30\text{mm}$, $D_2 = 4.2\text{mm}$.

(c) : $\alpha = 16$, $R_1 = 3.2\text{m}$, $R_2 = 0.2\text{m}$, $D_1 = 30\text{mm}$, $D_2 = 1.8\text{mm}$.

$$(1) M_{1,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(2) 各光線は m_2 で一部反射, 残りは出力光

となる。共焦点型不安定共振器の特性を図5に示す。平行平面型に比べて著しい指向性を示している。不安定共振器の倍率 α は, $\alpha = f_1/f_2$ で定義され, 図5(a), 5(b), 5(c)は各々3, 7, 16に対応している。倍率を高めると指向性は改善されるが出力は低下する。 $\alpha = 7$ の場合に $g(r, t) = 0$ とおいて得た結果を図6に示す。図5(b)とは全く様子が異なり, 静的受動的共振器理論では指向性を捉えられないことが分かる。

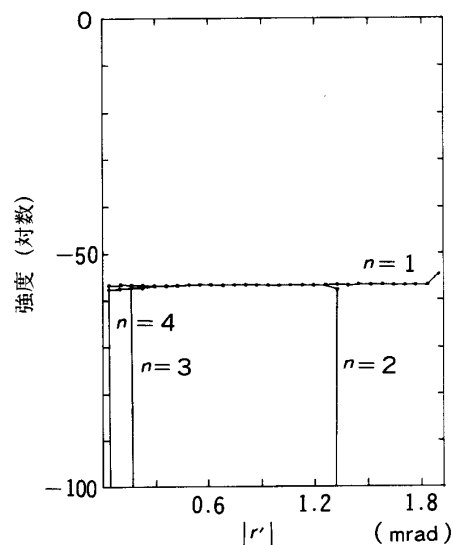


図6 $\alpha = 7$ の不安定共振器で $g(r, t) = 0$ とした場合の $n-1/2$ 往復後の強度分布。

5. まとめ

計算機シミュレーションによって不安定共振器と指向性の対応を評価し, いくつかの具体例を示した。プログラムは単純であり, わずかな変更で異なるタイプの共振器にも適用できる。

参考文献

- 1) 平岡延章, 城田雅敏, 上田芳文, 放電加熱型銅蒸気レーザーの製作 I, 高知医科大学一般教育紀要, 3, 23-31 (1987)
- 2) 平岡延章, 上田芳文, 放電加熱型銅蒸気レーザーの製作 II, 高知医科大学一般教育紀要, 4, 49-58 (1988)
- 3) 上田芳文, 平岡延章, 応用物理学会1988年春季連合講演会, 31p-ZQ-6 (1988)
平岡延章, 有澤孝, 上田芳文, 日本物理学会1988年秋の分科会, 6a-E5-4 (1988)
- 4) K.I. Zemskov, A.A. Isaev, M.A. Kazaryan, G.G. Petrash, and S.G. Rautian, "Use of unstable resonators in achieving the diffraction divergence of the radiation emitted from high-gain pulsed gas lasers," *Sov. J. Quantum Electron.*, 4, 474-477 (1974)
- 5) A.A. Isaev, M.A. Kazaryan, G.G. Petrash, S.G. Rautian, and A.M. Shalagin, "Shaping of the output beam in a pulsed gas laser with an unstable resonator," *Sov. J. Quantum Electron.*, 7, 746-752 (1977)

- 6) 霜田光一, 矢島達夫編著, 量子エレクトロニクス (上), 第2章, 裳華房 (1972)
- 7) M.J. Kushner and B.E. Warner, "Large-bore copper-vapor lasers: Kinematics and scaling issues," *J. Appl. Phys.*, **54**, 2970-2982 (1983)

(1989年9月10日受理)