

积分腔的性质和应用——I 理论分析

胡企铨 曾和平 王 扬 刘 敏

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文研究了一种漫反射积分腔作为一种新型短脉冲激光放大器件. 文中对积分腔特性进行了详细的理论分析和数值计算, 并给出了与其它光泵方式(如 Bethune 棱镜和角锥反射器)的分析比较.

关键词 积分腔放大器, 增益径向分布.

1 引 言

激光泵浦的激光振荡或放大系统, 通常采用两种不同的泵浦方式: 横向泵浦或纵向泵浦. 前者大多用于脉冲运转系统, 后者则常见于连续或准连续系统. 一些高功率超短脉冲激光放大链末级也有采用纵向泵浦以减小非线性效应并获得较高的输出和较好的光束质量. 由于泵浦激光模式的影响及泵浦方式的固有原因, 这两种激光泵浦方式即使信号光束质量很好, 放大后的光束也很难保持有好的输出光束质量. 为解决这一问题, 曾经有人研究过 Bethune 棱镜^[1]及角锥反射器^[2,3]的特性并用于染料激光放大器放大短脉冲或超短脉冲激光. 本文则研究另一种漫反射积分腔, 其特点是基于积分腔多次漫反射特性把泵浦激光束均匀化, 使放大介质中光泵的吸收从而使粒子数的反转及增益呈某种特定的分布. 在轴对称的柱形放大介质中, 当选用适当的介质吸收率(相应于浓度)和径向尺寸, 可以获得类似于高斯分布的增益径向分布特性, 从而使放大光束能保证有很好的光束质量且和泵浦激光束模式结构无关. 它特别适用于短脉冲或超短脉冲激光的放大和高重复率运转. 积分腔还有泵浦光能利用率高、可以获得高的放大功率输出、容易加工、调整方便等优点. 作者曾简单报道过其研究结果^[4]. 本文则详细报道对这种积分腔放大器特性进行的理论分析、数值计算、有关参数选用原则及与其它光泵方式的比较分析.

2 理论模型

图 1 所示的圆柱体漫反射积分腔, 泵浦光由窗口射入腔内经多次漫反射后, 在积分腔内空间分布均匀化. 当腔内有一圆柱形放大介质时, 其表面的泵浦光辐照率(单位面积单位立体角的泵浦光强度)应是均匀的. 为简单起见, 设圆柱轴为坐标系的 Z 轴. 圆柱放大介质半径为 a , 长度为 l , 放大介质对泵浦光的吸收系数为 α , 折射率为 n , 其外面的介质折射率取为 1 (这相当于放大介质外面的折射率与空气相同). 设积分腔内入射到放大介质的光线矢量为:

$$-x = (\cos \phi \sin \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \theta),$$

在 $Q(a \cos \psi, a \sin \psi, z)$ 点处折射进入放大介质, 在放大介质内空间任意一点 $P(\rho, r, z_0)$ 处观测泵浦光强度. 用 \mathbf{n} 表示 Q 点圆柱的外法线方向. 令 $\mathbf{V} = \mathbf{pq} = (a \cos \psi, a \sin \psi - r, z - z_0)$. 从而, 入射角 i 及折射角 j 可以分别表示为:

$$\cos i = \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}, \quad \cos j = \mathbf{n} \cdot \mathbf{V} / |\mathbf{V}| \quad (1)$$

由折射定律立即得到: $\sin i = n \sin j$,

$$(z - z_0) \sin(\psi - \phi) \sin \theta - r \cos \psi \cos \theta = 0 \quad (2)$$

设 L 为工作介质表面的泵浦光辐照率, 则在工作介质内 P 点观测的泵浦光辐照率为:

$$\left. \begin{aligned} L(p) &= n^2 L (T_{\perp} + T_{\parallel}) \exp(-\alpha |\mathbf{V}|) \\ T_{\perp} &= 4n \cos i \cos j / (\cos i + n \cos j)^2, \\ T_{\parallel} &= 4n \cos i \cos j / (\cos i + n \cos j)^2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 T_{\perp} 、 T_{\parallel} 分别为工作介质界面处泵浦光, 在平行和垂直于入射面方面的透射率, 在 P 点处放大介质吸收的泵浦光强度应为 $\alpha L(P)$, 对以 P 点为心所张开的立体角积分:

$$I(p) = \alpha n^2 L \int_{\Omega'} (T_{\perp} + T_{\parallel}) \exp(-\alpha |\mathbf{V}|) d\Omega' \quad (4)$$

考虑到光线传输的实际限制, 以及 T_{\perp} 和 T_{\parallel} 为实值的要求, (4) 式应改写为:

$$I(p) = \alpha n^2 L \int_{\theta'_1}^{\theta'_2} \int_{\phi'_1}^{\phi'_2} (T_{\perp} + T_{\parallel}) \exp(-\alpha |\mathbf{V}|) \sin \theta' d\theta' \quad (5)$$

注意到 θ' 、 ϕ' 是以 P 点为球心的坐标角, 由几何关系以及折射定律可以给出如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} |\mathbf{V}| &= [-r \sin \phi' + (a^2 - r^2 \cos^2 \phi')^{1/2}] / \sin \theta' & |\mathbf{V}| \cos \theta' &= z - z_0 \\ \cos j &= (1 - r^2 \cos^2 \phi' / a^2)^{1/2} \sin \theta' & \cos i &= (1 - n^2 \sin^2 j)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于 $\cos i$ 为实值, $n^2 \sin^2 j \leq 1$, 从而:

$$\cos^2 \theta' \leq (1/n^2 - r^2 \cos^2 \phi' / a^2) / (1 - r^2 \cos^2 \phi' / a^2) \quad (7)$$

同时要求:

$$\cos^2 \phi' \leq a^2 / (n^2 r^2) \quad (8)$$

(7)、(8) 两式中, 如果不等式右边的值大于 1, θ' 或 ϕ' 的取值范围将不受限制. 另一方面, 放大介质的长度 l 对 θ' 的取值范围也有限制:

$$\theta'_{m1} \leq \theta' \leq \theta'_{m2} \quad (9)$$

式中下标 $m1$ 、 $m2$ 分别对应放大介质两个端面, θ'_{m1} 、 θ'_{m2} 应满足:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta'_{m1} &= (l/2 - z_0) / |\mathbf{V}_1|, & \cos \theta'_{m2} &= [-(l/2) - z_0] / |\mathbf{V}_2| \\ V_1^2 &= (l/2 \pm z_0)^2 + [(a^2 - r^2 \cos^2 \phi')^{1/2} - r \sin \phi']^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $i = 1$ 时, 取一号; $i = 2$ 时, 取二号. θ' 的取值范围应由 (7) 式和 (9) 式共同决定. 这样 (5) 式改写为

$$\begin{aligned} I(p) &= 2\alpha n^2 L \int_{-\pi/2}^{-\phi'_1} d\phi', \int_{\theta'_1}^{\theta'_2} (T_{\perp} + T_{\parallel}) \exp(-\alpha |\mathbf{V}|) \sin \theta' d\theta' \\ &+ 2\alpha n^2 L \int_{\phi'_1}^{\pi/2} d\phi', \int_{\theta'_1}^{\theta'_2} (T_{\perp} + T_{\parallel}) \exp(-\alpha |\mathbf{V}|) \sin \theta' d\theta' \end{aligned} \quad (11)$$

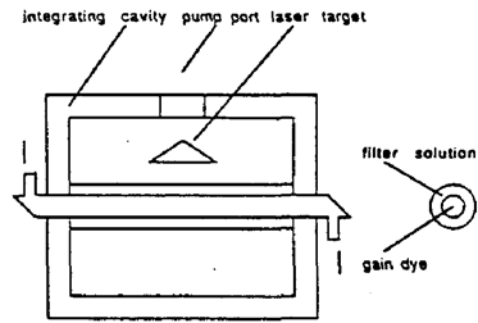


Fig. 1 Cross-section of the integrating cavity amplifier

式中 $\cos^2\phi_1 = a^2/(n^2r^2)$; $\theta'_1 \leq \theta' \leq \theta_2$. 利用(11)式便可求得放大介质所吸收的泵浦光强的空间分布、以及相应的反转粒子数和增益空间分布.

在定态条件下, 反转粒子数 $N^*(r)$ 取决于归一化泵浦光强度 $I(p)$ (可用介质的饱和增益光强进行归一):

$$N^*(r) = N_0 \cdot I(p) / [1 + I(p)]. \tag{12}$$

增益和反转粒子数之间关系由下式给出:

$$\text{Ln}G(r) + I_{in}[G(r) - 1] = \sigma_l l_{eff} N^*(r). \tag{13}$$

式中 I_{in} 为相对放大介质饱和增益光强归一的输入强度; σ_l 为相应受激辐射跃迁截面; l_{eff} 为放大介质增益的有效长度; $G(r)$ 为放大介质的增益.

3 数值计算

对上节分析所得公式进行数值求解, 以得到放大介质中增益的径向空间分布. 下面对数求解的一些结果进行分析.

3.1 与泵浦光光强的关系

图 2 给出了不同泵浦光强对介质增益线型的影响. 数值计算时相应的参数选取如下: $I_{in} = 0.1$, $\sigma_s N_0 l_{eff} = 40$, $\alpha r_0 = 0.3$, $l_{eff} = 20$, $L = 0.03(a)$; $0.06(b)$; $0.12(c)$; $0.24(d)$. 由图 2 可知, 泵浦光强对增益大小的变化起主要作用, 对增益的空间分布影响不十分明显. 这正是实际应用中所需要的. 人们期望在改变泵浦光光强时不影响输出光的空间分布及横模结构. 在积分腔泵浦装置中, 泵浦光小幅度改变对增益 $G(r)$ 的径向分布经线型影响不大. 因而, 实际应用中对泵浦光光强的要求并不高. 实用起来十分方便. 同时, 增益 $G(r)$ 与泵浦光束的模式结构无关. 从而, 它克服了以往常用的横、纵向泵浦方式中固有的增益受泵浦激光光强及模式影响的缺点.

3.2 染料浓度的影响

图 3 为不同染料浓度下放大介质增益的径向分布: $I_{in} = 0.1$, $l_{eff} = 20$, $L = 0.06$, $\alpha r_0 = 0.3$; 0.6 ; 0.9 ; 1.2 ; 1.5 . $\sigma_s N_0 l_{eff} = 40$; 80 ; 120 ; 160 ; 200

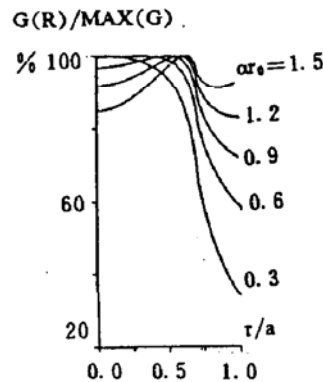
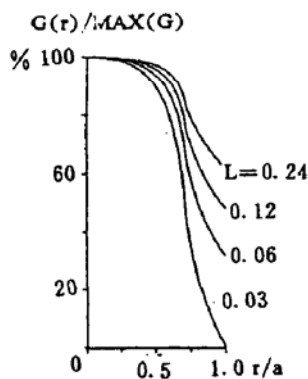


Fig. 2 The radial gain distribution for different normalized pump power intensity Fig. 3 The r-dependent gain VS different dye solution concentration

从图 3 可以知道, 对于选定的染料, 选择适当的染料浓度和径向半径, 其增益的空间分布将是类似于高斯分布. 由于 $G(r) \equiv I_{out}(r)/I_{in}(r)$, 如果输入光为一高斯光束, 输出光 $I_{out} = I_{in}G(r)$ 仍为一高斯光束. 用这种激光放大器进行放大, 其输出光束将保持有良好的输入光束特性. 计算表明, 当 $\alpha a \sim 0.3$ 时, 放大介质和径向分布最接近于高斯分布.

3.3 与其它泵浦方式的比较

图 4 给出了 Bethune 棱镜及反射激光放大器中泵浦光光强在放大介质内的径向分布. 与图 5 给出的积分腔中放大介质的泵浦光光强径向分布相比, 很明显, 积分腔激光放大器中泵浦光强和径向分布更接近高斯分布.

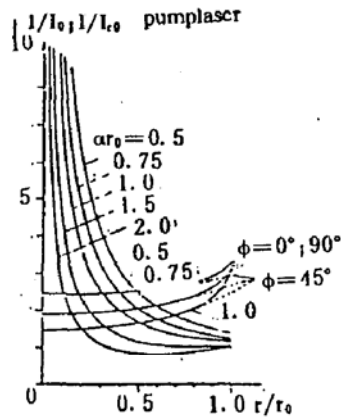


Fig. 4 Radial intensity distribution in a Bethune-cell (a~c) and a cone-cell (d through h)

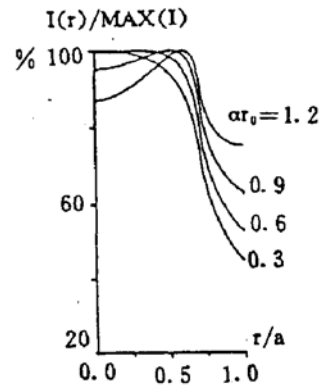


Fig. 5 Radial intensity distribution in integrating cavity amplifier

结论 本文对积分腔中放大介质内泵浦光光强及增益的空间分布进行了数值计算. 结果表明: 这种装置优于以前的泵浦装置, 如 Bethune 棱镜, 角锥反射器. 作者认为积分腔泵浦在激光放大特别是短脉冲激光放大方面有较广的应用前景. 相应的实验结果将在另文报道.

参 考 文 献

- [1] D. S. Bethune, Dye cell design for high-power low divergence excimer-pumped dye lasers. *Appl. Opt.*, 1981, 20 (11):1897~1899
- [2] F. P. Schafer, On some properties of Axicons. *Appl. Phys. (B)*, 1986, B39(1):1~8
- [3] G. Kuhnle, G. Marocoshy, G. A. Reider, Laser amplification using Axicon reflectors. *Appl. Opt.*, 1988, 27 (13):2666~2667
- [4] Q. Hu, C. Wang, E. S. Fry, Integrating cavity dye cell amplifier for high power ultrashort pulses. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1989, 34(7):1667

The characteristics and application of integrating cavity

I — theoretical analysis

HU Qiquan ZEN Hepin WANG Yang LIU Min

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 23 October 1992; revised 26 November 1992)

Abstract

The use of a diffusing integrating cavity as a new type short-pulse laser amplifier pumped by laser is proposed in this paper. Theoretical analysis and numerical calculation on its characteristic and comparison with other pumping modes such as Bethune or axicone-cell are given in detail.

Key words integrating cavity amplifier, radial gain distribution.