

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0126-03

# 掺铒 YAG 固体激光器研究

任 重 宁国斌 李树元 金光勇 闫晓媛 梁 柱

(长春光学精密机械学院科技开发中心, 长春 130022)

**提要** 用铒高掺杂的 YAG 晶体( $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ )产生中心波长为  $2.94\ \mu\text{m}$  的激光输出。在理论分析的基础上,对该波长激光的输出特性进行了实验研究,探讨了掺铒 YAG 固体激光器在效率和输出能量等方面的问题。并研制出一台小型化,无水冷,低重频,输出中心波长为  $2.94\ \mu\text{m}$  的激光器样机。

**关键词** 掺铒 YAG 固体激光器, 高阈值, 抽运效率

**中图分类号** TN248.1<sup>+</sup>3 **文献标识码** A

## Study on Er-doped YAG Solid Laser

REN Zhong NING Guo-bin LI Shu-yuan JIN Guang-yong  
YAN Xiao-yuan LIANG Zhu

(Development Center of Science and Technology, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

**Abstract** A compact, no water cooled Er-doped YAG laser with the central wavelength of  $2.94\ \mu\text{m}$  was developed and fabricated. The output characteristics were studied.

**Key words** Er-doped YAG solid laser, high threshold, pumping efficiency

## 1 引 言

掺铒钇铝石榴石( $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ )晶体是将三价铒离子掺入钇铝石榴石基质晶体中形成的,掺铒激光器起先在工业和军事上没有受到重视。但近年来,因铒的两个特殊波长的发现而重新引起人们的兴趣。用铒高掺杂的 YAG 晶体( $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$ )产生波长  $2.94\ \mu\text{m}$  的激光输出,以及掺铒磷酸盐玻璃产生波长  $1.54\ \mu\text{m}$  的激光输出。这两个波长可以被水吸收,特别是  $2.94\ \mu\text{m}$  激光引起医学应用的浓厚兴趣。较短的波长对使用军事测距仪的人眼安全和检测光纤通信系统的故障位置有意义。

本文对掺铒 YAG 固体激光器进行了深入的理论和实验研究,针对影响激光输出的诸因素,做了大量探索实验,根据已掌握的基本参数,研制出一台小型化,无水冷,低重频,输出中心波长  $2.94\ \mu\text{m}$  的激光器样机。

## 2 理论分析

前苏联最早发现高掺杂度的  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  晶体(铒的浓度为 50%)具有激光作用,激光发射波长约

为  $2.9\ \mu\text{m}$ 。它可以应用于激光医学和作为红外光源而受到重视。在 YAG 晶体中,铒离子  $\text{Er}^{3+}$  光谱跃迁( $2.94\ \mu\text{m}$ )的上能级是由波长小于  $0.6\ \mu\text{m}$  的抽运光源产生的。所以,在这种材料中抽运效率不是很高的,由于下能级的寿命非常长, $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  激光器不能用于调 Q 开关。 $2.94\ \mu\text{m}$  激光跃迁发生在  $\text{Er}^{3+}$  离子的  $^4I_{11/2}$  和  $^4I_{13/2}$  能级之间,其下能级的寿命比上能级长得多(2 ms 与 0.1 ms 之比),所以这种跃迁因  $^4I_{13/2}$  能级上的粒子积累而中断。荧光寿命为  $90\ \mu\text{s}$  左右<sup>[1]</sup>。尽管有这些缺点,这种激光器由于它的波长与水的吸收线相吻合,故特别引起人们的兴趣。又由于人体组织中水的光吸收特别大,大于  $3000\ \text{cm}^{-1}$ ,使其具有广阔的医学应用前途。

## 3 实验设计

### 3.1 激光谐振腔的设计

采用平行平面腔,目的在于获得大模体积的激光输出。为了增强纵模选择,在设计中有意识地压缩了腔长,抑制不需要的纵模模式。同时兼顾激光器的小型化。为确定激光谐振腔的参数,利用辐射

与物质相互作用方程组, 建立一个四能级激光的速率方程组。

$$\frac{d\Delta}{dt} = \omega_i(N - \Delta) - B\phi\Delta - \frac{\Delta}{\tau_a} \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = B\phi\Delta - \frac{\phi}{\tau_p} \quad (2)$$

其中,  $\Delta$  为反转总粒子数,  $\phi$  为腔内的光子数,  $\omega_i$  为抽运几率,  $N$  为工作物质总粒子数,  $\tau_a = T_1$  表示粒子在激光上能级的寿命,  $B$  为一个光子引起的受激辐射率。

$$B = \frac{c\sigma}{V_m} \quad (3)$$

式中  $\sigma$  为单个粒子的吸收截面。

$$\sigma = \frac{\mu^2 \Omega_q T_2 L (\omega - \Omega_q)}{c\epsilon h} \quad (4)$$

其中  $\Omega_q$  为腔第  $q$  个模的频率,  $T_2$  为横向弛豫时间,  $\omega$  为激光上、下能级频率差, 而

$$L(\omega - \Omega_q) = \frac{1}{T^2} \left[ \left( 1 - \frac{1}{T^2} \right) + (\omega - \Omega_q)^2 \right] \quad (5)$$

(3)式中

$$V_m = \frac{\pi L \omega_0^2}{4} + \frac{\lambda^2 L^3}{12\pi \omega_0^2} + \frac{\lambda^2 L_1 L_2 L}{4\pi \omega_0^2} \quad (6)$$

式中,  $\omega_0$  为光束腰斑半径,  $L$  为腔长,  $L_1$  和  $L_2$  分别为在腰斑为坐标原点的坐标系中两个腔镜的位置坐标。(2)式中的  $\tau_p$  表示无增益时的光子寿命, 与谐振腔的损耗有关。

$$\tau_p = \frac{L/c}{\alpha + T/2} \quad (7)$$

其中  $\alpha$  为腔内单程损耗,  $T$  为腔镜透过率<sup>[2]</sup>。

(1)式、(2)式虽然与通常的四能级激光速率方程组不同, 但物理意义是相同的, 更重要的是通过  $B-V_m-\omega_0$  显含着谐振腔的几乎所有的几何参数。以此为基础, 讨论功率稳定激光腔几何参数所满足的关系式。在(2)式中取  $d\phi/dt = 0$  得到阈值反转总粒子数为

$$\Delta_t = 1/(B\tau_p) \quad (8)$$

在(1)式中取  $d\Delta/dt = 0$ ,  $\Delta = \Delta_t$ ,  $\phi = 0$  得到阈值抽运几率

$$\omega_i = \frac{\Delta_t}{\tau_a(N - \Delta_t)} \quad (9)$$

对于四能级系统方程  $N$  远大于  $\Delta_t$ 。因此有

$$\omega_i = \frac{\Delta_t}{\tau_a N} \quad (10)$$

在(1)式中取  $d\Delta/dt = 0$ ,  $\Delta = \Delta_t$ , 并利用(9)式可得到腔内总光子数

$$\phi_0 = \frac{\omega/\omega_i - 1}{\tau_a B} \quad (11)$$

利用(3)式、(7)式、(11)式得到

$$P = \frac{h\Omega_q \phi_0 (T/2)}{L/c} = \frac{V_m h \Omega_q T [(\omega \tau_a N \sigma L / V_m \alpha) / (1 + T/2\alpha) - 1]}{2L\tau_a \sigma} \quad (12)$$

对(12)式求  $dP/dt = 0$ , 可得最佳透过率

$$T_M = 2\alpha [(\omega \tau_a N \sigma L / V_m \alpha)^{1/2} - 1] \quad (13)$$

用(13)式中  $T_M$  代替  $T$ , 用(10)式中  $\omega_i$  代替  $\omega$ , 则由(11)式得最佳输出功率

$$P_{Mz} = \frac{V_m h \Omega_q \alpha [(1 + T/2\alpha)^{1/2} - 1]^2}{L\tau_a \sigma} \quad (14)$$

为了使功率稳定应有

$$dV_m/(d\omega_0) = 0 \quad (15)$$

成立。依此条件, 由(6)式可得

$$\omega_0 = [\lambda^2 (L^2/3 + L_1 L_2) / \pi^2]^{1/4} \quad (16)$$

(16)式即为功率稳定激光腔几何参数所满足的关系式, 这是一个普适条件<sup>[3]</sup>。

在确定了谐振腔腔长后, 通过系统分析与对比实验, 获得最佳透过率  $T = 30.5\%$  下  $2.94 \mu\text{m}$  激光的输入-输出能量曲线, 如图 1 所示。

综合多年来从事 YAG 激光器设计的经验, 考虑到不同材料的抗伤阈值, 最后决定全反镜采用金属膜, 输出镜则采用一种特殊设计的双膜输出窗。取得了较满意的实验结果。

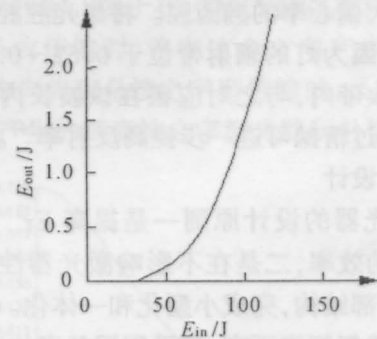


图 1 最佳透过率下输出特性

Fig. 1 Input characteristics in optimum transmissivity

### 3.2 聚光器的设计

常用的聚光器有多种类型, 针对  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  晶体材料效率较低, 需要高效聚光器的特点, 决定采用单椭圆柱聚光器。衡量聚光器质量的参数是聚光效率  $\eta_c$ , 可表示为

$$\eta_c = \eta_{op} \times \eta_{ge} \quad (17)$$

其中  $\eta_{op}$  为聚光器的光学效率,  $\eta_{ge}$  为几何传输效率

$$\eta_{op} = \gamma_w (1 - \gamma_y)(1 - f)(1 - \alpha_c) \quad (18)$$

$\gamma_w$  为聚光器反射面对抽运带光谱的反射率,  $\gamma_y$  为激光棒表面的反射率,  $f$  为聚光器非反射表面积与总的内表面积之比,  $\alpha_c$  为灯与激光棒之间的光学介质的吸收率。(18) 式是基于灯的辐射只有一次反射的假设之上。激光器获得的总光能应为截获的所有光能之和。

$$\eta_{ge} = \frac{1}{\pi} [\alpha_0 + (\gamma_R/\gamma_L)\theta_0] \quad (19a)$$

式中  $\alpha_0$ ,  $\theta_0$  为参考点所对应的角度

$$\cos\alpha_0 = \frac{1}{e} \left[ 1 - \frac{1}{2}(1 - e^2)(1 + r_R/r_L) \right] \quad (20)$$

$$\cos\theta_0 = (r_R/r_L)\sin\alpha_0 \quad (21)$$

进一步考虑实际情况

$$\eta'_{ge} = \frac{1}{\pi} [\alpha_0 + (r_R/r_L)(\theta_0 - \theta_1)] \quad (19b)$$

$$\sin\theta_1 = r_L/2c \quad (22)$$

$$\sin\theta_1 = r_L/2ae \quad (23)$$

$\eta_{ge}$  可以表示成偏心率  $e$  和灯棒直径比的函数。有资料证明, 对具有 0.2 ~ 0.6 之间偏心率的椭圆腔来说, 如果反射率由  $\gamma = 1$  下降至  $\gamma = 0.6$ , 则传递效率大约要下降 35%, 而对于具有很大偏心率的椭圆腔, 传递效率大约下降 50%, 故选择  $e = 0.5$  是较为合适的。

分析表明, 在考虑多次反射的影响后, 聚光的传递效率在很大程度上要依赖于聚光器的反射率, 特别是具有大偏心率的椭圆腔。将聚光腔腔表面镀银是必要的, 因为灯的辐射带位于 0.53 ~ 0.58  $\mu\text{m}$  附近的钕吸收带内, 与之对应银在该波长内的反射率较高, 再经过精抛可进一步提高反射率<sup>[4]</sup>。

### 3.3 整体设计

该激光器的设计原则一是提高  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  固体激光器的效率, 二是在不影响激光器性能的前提下, 优化各部结构, 完成小型化和一体化。考虑到该激光器的重复频率不高, 宜采用铜基底传导散热, 省去了不必要的水冷装置。设计使用一种螺杆连结调整结构, 将两个谐振腔窗片与激光器主体连为一体, 利用螺纹旋进, 达到平平腔的精确调节和锁定的双重目的<sup>[5]</sup>。这样既提高了激光器的稳定性和可靠性, 又大大压缩了激光器的尺寸, 为今后的产品开发

应用创造了条件。

## 4 研究结果及分析

根据实验数据做出输出特性曲线, 并与理论曲线进行对比, 基本吻合(图 2), 由此计算出激光器的斜效率为 1.9%。

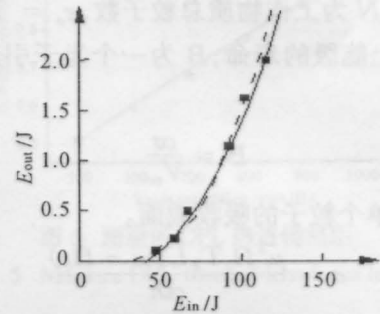


图 2 理论与实际对比曲线( $\phi 4 \times 90 \text{ mm}$ , 300 K)

Fig. 2 Comparison of output characteristics between theory and experiment



图 3 不同输入电压下的近场光斑

Fig. 3 Near-field light spot in variant input voltage

该激光器重量小于 240 g, 并且无需水冷, 稳定可靠。适用于激光医疗、激光加工、激光测距、科学实验等诸多领域, 有广泛的应用前景。目前, 该激光器已在医用激光采血分析系统中得到应用。

## 参 考 文 献

- 1 E. A. Seigman. *Lasers*. California: University Science Books, 1986. 110~115
- 2 Zhang Baozheng *et al.*. Experimental study on stable power solid laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, A20(9): 646~649(in Chinese)
- 3 V. Magri. Resonators for solid lasers with large volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, 25(1):924~926
- 4 Gan Fuxi, Deng Peizhen. *Laser Materials*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996. 270 (in Chinese)
- 5 W. Sikerrell. *Solid Laser Engineering*. Science Press, 1983. 254~259