

# 掺钕单模光纤激光器的实验与理论研究

陈光德 龚华仁

(西安交通大学物理系光学教研室, 710049)

**提要:** 作者在对单模掺钕光纤激光器进行仔细实验研究的基础上, 用基模高斯光束近似泵浦光场分布和信号光场分布, 给出了阈值功率和斜度效率的解析表示式。理论计算和实验结果符合的程度是令人满意的。

**关键词:** 掺钕单模光纤激光器, 阈值功率, 斜度效率

## Experimental and theoretical study of Nd-doped single-mode fiber lasers

Chen Guangde, Gong Huaren

(Physics Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an)

**Abstract:** Based on experimental study of Nd-doped single-mode fiber lasers, we use the fundamental mode Gaussian function to approximate signal light field and pumping light field distribution, and to obtain analytical expressions for the threshold power and slope efficiency. Our calculation results agree well with the experimental ones.

**Key words:** Nd-doped single mode fiber lasers, threshold power, slope efficiency

掺杂单模光纤激光器是一种新型波导腔激光器件。同其它类型的激光器相比具有阈值功率低、转换效率高等优点。本文作者在对掺钕单模光纤激光器的连续波特性进行了仔细的实验研究后, 利用基模高斯光束近似泵浦光场分布和信号光场分布, 建立了掺钕单模光纤激光器连续波特性的理论模型, 给出了阈值功率和斜度效率的解析表示式。理论结果和实验值之间符合的程度相当好。

### 一、实验装置

图 1 是我们进行掺钕单模光纤激光器连续波特性的实验装置示意图。其中  $L$  是  $\text{Ar}^+$  激光器, 输出波长为  $514.5 \text{ nm}$  时光束模式为  $\text{TEM}_{00}$  模,  $R_1$  是一般光学玻璃片, 其反射光由  $D_1$  探测, 用以监测泵浦功率水平和稳定程度。 $\text{MO}1$ 、 $\text{MO}2$ 、 $\text{MO}3$  分别是  $\times 20$ 、 $0.25 \text{ NA}$  显微物镜,  $M_1$  是信号光全介质膜,  $M_2$  是平面输出镜(对  $1088 \text{ nm}$  信号光的透过率为  $30\%$ ),  $M_1$  和  $M_2$  构成法-珀光学共振腔。  $F$  是  $5 \text{ m}$  长掺钕单模光纤(其外径为

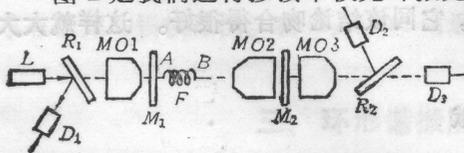


图 1 掺钕单模光纤激光器的 CW 特性测量装置示意图

0.2 mm, 芯径为 3.5  $\mu\text{m}$ , 光纤芯基质是石英, 掺  $\text{Nd}^{3+}$  浓度为 300 ppm), 光纤 A 端切平后直接与全反介质膜  $M_1$  相抵, B 端悬空, 其信号光经光纤后由显微物镜 M02 耦合到  $M_2$  上输出。  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别为美国激光精密仪器公司生产的 RK-5100、RK-5200、RS-5900 型功率计系统热释电探测器, 用来测量信号光和泵浦光的功率大小。  $R_2$  是 514.5 nm 光波的全反介质膜。

## 二、主要实验结果

图 1 中, 当显微物镜前置斩光器, 在  $D_3$  处置放 PIN 管, 然后将 PIN 管接于存贮示波器上, 观察到掺铈单模光纤激光器的弛豫振荡现象。图 2 是在存贮示波器上拍下来的掺铈单模光纤激光器的弛豫振荡照片。示波器分度值为 20  $\mu\text{s}/\text{div}$ 。由照片上看到, 弛豫振荡周期约为 20  $\mu\text{s}$ , 这和理论上用速率方程微扰近似求得的结果符合得很好。

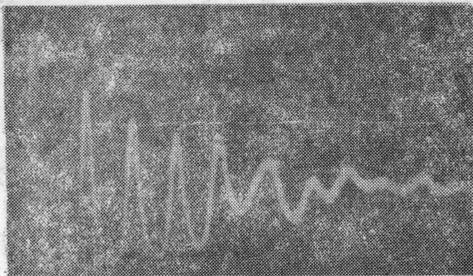


图 2 掺铈单模光纤激光器的弛豫振荡特性  
纵座标为光强  $I$  (任意单位), 横座标为时间  $t$   
(在  $\lambda_s = 1088\text{nm}$  处)

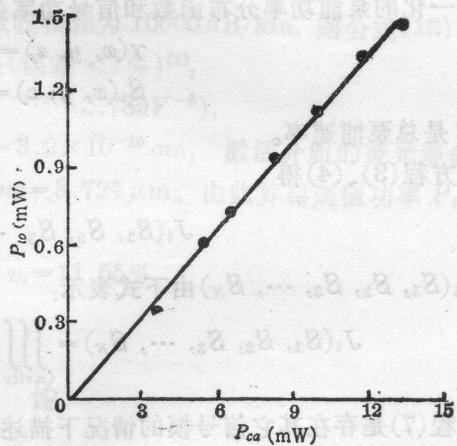


图 3 掺铈单模光纤激光器的 CW 振荡特性

图 3 是测得的掺铈单模光纤激光器的连续波振荡特性。其中圆点是实验值, 线是根据实验值用最小二乘法拟合得到的结果。横坐标  $P_{ca}$  为光纤芯中吸收的泵浦光功率, 纵坐标  $P_{10}$  为光纤激光器输出的 1088 nm 波长激光功率。得到阈值功率为 0.280 mW, 斜度效率为 11.5%, 实验中观察到的 1088 nm 波长激光的最大输出功率为 4.10 mW。

## 三、理论分析

考虑位于光学共振腔中长度为  $L$  的四能级激光介质(掺铈激光介质属四能级系统), 如图 4 所示。其中  $M_1$  是全反射镜,  $M_2$  是部分反射镜。用波长为  $\lambda_p$  的光源对此装置进行端泵浦。在这种系统中, 单位体积泵浦率  $\gamma(x, y, z)$ 、反转粒子数密度  $n(x, y, z)$  和第  $i$  个模的信号光子数密度  $S_i(x, y, z)$  之间的相互作用可用如下的激光器速率方程描述。其中  $c$  是真空中光速,  $n_1$  是激活介质的折射率,  $\delta_i$  是第  $i$  个模在腔内的往返一周损耗,  $\sigma$  是激活粒子的有效发射截面,  $\tau_f$  是激活介质的荧光寿命。

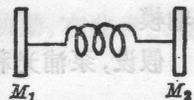


图 4

$$\frac{dn(x, y, z)}{dt} = \gamma(x, y, z) - \frac{n(x, y, z)}{\tau_f} - \frac{c\sigma n(x, y, z)}{n_1} \sum_{i=1}^N S_i(x, y, z), \quad (1)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{c\sigma}{n_1} \iiint_{\text{Cavity}} n(x, y, z) S_i(x, y, z) dV - \frac{c\delta_i}{2Ln_1} S_i. \quad (2)$$

方程(1)中的求和遍及存在于光腔中的  $N$  个模式。  $S_i = \iiint_{\text{Cavity}} S_i(x, y, z) dV$  是腔中第  $i$  个模式的总光子数。

激光器稳态运转时,  $\frac{dn(x, y, z)}{dt} = \frac{dS_i}{dt} = 0$ , 于是方程(1)、(2)变为

$$\gamma(x, y, z) - \frac{n(x, y, z)}{\tau_f} - \frac{c\sigma n(x, y, z)}{n_1} \sum_{i=1}^N S_i(x, y, z) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{c\sigma}{n_1} \iiint_{\text{Cavity}} n(x, y, z) S_i(x, y, z) dV - \frac{c\delta_i}{2Ln_1} S_i = 0, \quad (4)$$

定义归一化的泵浦功率分布函数和信号功率分布函数分别为  $\gamma_0(x, y, z)$  和  $S_{0i}(x, y, z)$ , 则有

$$\gamma(x, y, z) = R\gamma_0(x, y, z) \quad (5)$$

$$S_i(x, y, z) = S_i S_{0i}(x, y, z) \quad (6)$$

其中  $R$  是总泵浦速率。

解方程(3)、(4)得

$$J_i(S_1, S_2, S_3, \dots, S_N) = \frac{\delta_i}{2L\sigma\tau_f R} \quad (7)$$

其中  $J_i(S_1, S_2, S_3, \dots, S_N)$  由下式表示:

$$J_i(S_1, S_2, S_3, \dots, S_N) = \iiint_{\text{Cavity}} \frac{S_{0i}(x, y, z)\gamma_0(x, y, z)}{1 + \frac{c\sigma\tau_f}{n_1} \sum_{i=1}^N S_i S_{0i}(x, y, z)} dV. \quad (8)$$

方程(7)是存在其它信号模的情况下描述第  $i$  个模中光子数的基本方程。但此方程的解很难表示成一个简洁的解析形式。然而,对单模情况可作如下简化处理。

令方程(7)中  $S_2 = S_3 = \dots = S_N = 0$ , 则

$$J_1(S_1) = \frac{\delta_1}{2L\sigma\tau_f R} \quad (9)$$

其中

$$J_1(S_1) = \iiint_{\text{Cavity}} \frac{\gamma_0(x, y, z)S_{01}(x, y, z)}{1 + \frac{c\sigma\tau_f}{n_1} S_1 S_{01}(x, y, z)} dV \quad (10)$$

要求出方程(9)的精确解析解也是困难的。我们考虑到若光波在单模光纤中传输时其对应的归一化频率  $V < 2.41$ , 相应的传输模为零级贝塞尔函数, 而零级贝塞尔函数与基模高斯函数十分相似(在  $0 < V < 2.41$  范围内), 根据激光束的特点, 可采用基模高斯函数近似光纤中的传输模。

假设, 泵浦光和信号光的归一化功率分布函数形式为

$$\gamma_0(x, y, z) = A \exp\left(-\frac{2r^2}{w_p^2}\right) \cdot e^{-\alpha z} \quad (11)$$

$$S_{01}(x, y, z) = B \exp\left(-\frac{2r^2}{w_s^2}\right) \quad (12)$$

其中  $A$ 、 $B$  为归一化常数,  $Z$  为光波在光纤中传播方向上的坐标,  $r$  为从光纤轴算起的径向坐标, 满足关系式  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $w_p$  和  $w_s$  分别为泵浦光和信号光的光斑半径,  $\alpha$  为光纤对泵浦光的吸收系数。在式(12)中没有吸收项是因为光纤对信号光的吸收极小, 可忽略不计。

在(11)、(12)形式下, 由方程(9)、(10)得到掺铒单模光纤激光器的阈值功率  $P_{th}$  和斜度效率  $\eta_s$  的具体解析式为

$$P_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma\tau_f} \cdot \frac{\delta_1}{2} \cdot \frac{\pi(w_p^2 + w_s^2)}{[1 - \exp(-2a^2/w^2)](1 - e^{-\alpha L})} \quad (13)$$

$$\eta_s = \frac{T_2}{\delta_1} \cdot \frac{h\nu_s}{h\nu_p} \cdot [1 - \exp(-2a^2/w_p^2)](1 - e^{-\alpha L}) \quad (14)$$

其中  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别为泵浦光和信号光的频率;  $T_2$  为输出镜的透过率;  $a$  为光纤芯半径;  $w$  为光纤中传输光的折合光斑半径, 满足关系式:

$$\frac{1}{w^2} = \frac{1}{w_p^2} + \frac{1}{w_s^2} \quad (15)$$

对 514.5 nm 波长的泵浦光, 实验用光纤的吸收损耗为 10000 dB/km, 则公式(13)、(14)中的  $(1 - e^{-\alpha L})$  项可近似为 1。  $w_s$  由如下公式给出(误差 < 1%)<sup>[4]</sup>:

$$w_s = a \times (0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.789V^{-6}), \quad (16)$$

光纤芯半径  $a = 1.75 \mu\text{m}$ , 有效发射截面  $\sigma = 3.2 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ , 激活介质的荧光寿命  $\tau_f = 450 \mu\text{s}$ <sup>[2]</sup>,  $\delta_1$  和  $w_p$  由实验测得, 分别为  $\delta_1 = 0.44$ ,  $w_p = 3.724 \mu\text{m}$ 。由此算得阈值功率  $P_{th}$  和斜度效率  $\eta_s$  的理论结果分别为

$$P_{th} = 0.204 \text{ mW}; \quad \eta_s = 11.55\%$$

对照实验结果, 理论和实验符合得相当好。

#### 四、结 论

从以上的实验结果看, 我们所采用的掺铒单模光纤激光器实验系统是成功的。实验结果比在同样条件下(主要指泵浦波长相同)已见报道的阈值功率低, 输出功率大。若采用半导体激光器作泵浦源(波长在 810 nm 左右), 结果将会更好。

比较理论和实验结果看到, 对掺铒单模光纤激光器, 基模高斯光束近似是一个较好的模型。这种近似对 1088 nm 的信号光来说, 由于其对应的归一化频率  $V_s = 2.12$ , 满足关系式  $0 < V_s < 2.41$ , 其近似误差 < 1%; 稍嫌不足的是, 对泵浦光(514.5 nm),  $V_p = 4.49 > 2.41$ , 即泵浦光在实验用光纤中传输时, 除基模成份外, 还有高阶模成份(实验中观察到从光纤中输出的泵浦光光斑除 TEM<sub>00</sub> 模外还有 TEM<sub>11</sub> 模)。无疑, 高阶模所携带的那部分能量在转换过程中效率是低的, 这是造成阈值功率的理论值和实验值之间有误差的主要原因。可以预料, 若用半导体激光器作泵浦源, 采用基模高斯光束近似处理, 将会是非常成功的。

在实验过程中曾得到我系郁皆欢工程师、谢谔同志和任明善高工的热情协助, 在此表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 Luc. B. Jenuhomme, Single-Mode Fiber Optics. Marcel Dekker INC., New York Base 1983
- 2 S. B. Pool, D. N. Payne et al., *Electr. Lett.*, **22**, 737~738 (1985)