

## 纵向泵浦准三能级激光系统的再讨论

林碧洲

(华侨大学材料物理化学研究所, 泉州, 362011)

摘要: 考虑了激光上、下能级不同的能级寿命以及上能级自发辐射给下能级布居数所造成的影响, 本文修正了 Fan 等提出的纵向泵浦准三能级系统的理论模型。尽管推导出的结果数学形式上与 Fan 等结果相似, 但其物理意义更明确和丰富。理论计算得到了实验的验证。

关键词: 纵向泵浦 Nd YAG 激光器

## Rediscussion on longitudinally pumped quasi-three-level laser system

Lin Bizhou

(Institute of Material Physical Chemistry, Huaqiao University)

**Abstract:** Taking into account that the laser upper and lower levels have different level lifetimes and that the natural decay of the upper level will affect the population of the lower level, the author revises the quasi-three-level model developed by Fan et al. Although the derived predictions are similar to those by Fan mathematically, the revised model is more appropriate to describe the lasing process. The theoretical calculations have a good agreement with the experimental results.

**Key words:** longitudinal pumping Nd YAG laser

### 一、引言

纵向泵浦具有阈值低、效率高、模式易控等优点而成为目前新材料的激光试验和二极管泵浦全固化固体激光器中通常采用的泵浦方式。为解释基于  $4F_{3/2} - 4I_{9/2}$  跃迁的纵向泵浦 946nm Nd: YAG 激光的运转特性, Fan 和 Byer 提出了包含布居数热分布的准三能级模型, 并获得了较好的结果<sup>[1]</sup>。然而, 由于该模型将激光上、下能级的能级寿命视为相同, 并忽略了上能级自发辐射所引起的下能级布居数的变化, 使得该模型的物理概念不够清晰。之后, Risk 在该模型的基础上开展了泵光与振荡光的相对光束大小对激光运转特性的影响规律研究, 得出了当泵光光束半径小于或等于振荡光束半径时, 激光输出特性较佳的结论<sup>[2]</sup>。为正确阐述纵向泵浦 946nm Nd: YAG 激光器的运转特性, 本文沿用 Fan 等的模型, 并对该准三能级模型的失误之处给予纠正, 重新就 946nm Nd: YAG 激光器的纵向泵浦进行讨论, 以使该模型的物理意义更明确。

### 二、准三能级模型

本文沿用文献 [1] 的模型。模型所用的  $Nd^{3+}$  能级结构如图 1 所示, 并考虑了激光上能级自发辐射导致的激光下能级布居数的增加, 以及激光上、下能级的不同能级寿命, 则上、下能级布居数密度的速率方程应修正为:

$$\frac{dN_2(r, z)}{dt} = f_2 R r_p(r, z) - \frac{N_2(r, z) - N_2^0}{\tau_2} - \frac{f_2 c^0 [N_2(r, z) - N_1(r, z)]}{n} \Phi_{p_0}(r, z) \quad (1)$$

$$\frac{dN_1(r, z)}{dt} = -f_1 R r_p(r, z) - \frac{N_1(r, z) - N_1^0}{\tau_1} + \frac{f_1 c \sigma [N_2(r, z) - N_1(r, z)]}{n} \Phi \Phi_0(r, z) + \{f_1 [N_2(r, z) - N_2^0]\} / (f_2 \tau_{21}) \quad (2)$$

式中,  $N_i(r, z)$  为能级布居数密度;  $N_i^0$  为热平衡时布居数密度;  $f_i$  为上、下能级布居数占所在能态布居数的百分比, 在  $\text{Nd}^{3+}$ : YAG 中  $f_1 = 0.0074, f_2 = 0.6$ ;  $\tau_i$  为能级寿命;  $\tau_{21}$  为上、下能级跃迁寿命;  $c$  为真空中光速;  $\sigma$  为受激发射截面;  $\Phi$  为振荡光子数;  $R$  为泵浦速率  $R = P_p \eta_a / h \nu_p$ ,  $P_p$  为泵浦功率,  $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_p l)$  为长为  $l$ , 吸收系数  $\alpha_p$  的介质对泵光吸收的百分比,  $h$  为 Planck 常数,  $\nu_p$  为泵光频率;  $r_p(r, z), \Phi_0(r, z)$  为归一化能量空间分布函数, 即

$$\iiint r_p(r, z) dV = \iiint \Phi_0(r, z) dV = 1 \quad (3)$$

设振荡光和泵浦光均为 TEM<sub>00</sub> 模, 则有

$$r_p = [(2\alpha_p) / (\eta_a \pi w_p^2)] \exp(-2r^2 / w_p^2) \exp(-\alpha_p z) \quad (4)$$

$$\Phi_0(r, z) = [2l / (\pi w_l^2 l)] \exp(-2r^2 / w_l^2) \quad (5)$$

式中,  $w_i$  为高斯光束的光束半径, 定义为能量为  $r = 0$  的  $1/e$  的光斑大小。

相应地, 腔中总光子数  $\Phi$  满足 
$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iiint \Delta N(r, z) \Phi \Phi_0(r, z) dV - \Phi / \tau_c \quad (6)$$

式中,  $\Delta N(r, z) = N_2(r, z) - N_1(r, z)$  为反转布居数密度;  $\tau_c = 2nl / c(L + T)$  为光子寿命,  $L$  为往返程损耗,  $T$  为耦合输出损耗。

对比文献[1], 本文所用的速率方程与文献[1]相似, 不同之处在于: (1) 考虑了上、下能级不同的能级寿命(见(2)式右边第二项); (2) 考虑了上能级粒子数自然衰减给下能级布居数所造成的影响(见(2)式右边第四项)。同时应该指出, 本文和文献[1]一样采用了总激活粒子数  $N_0 \gg N_2$  的近似条件, 将泵光吸收系数视为与  $N_2$  无关的常数, 这在低损耗情况下(多数实际情况如此)是一种很好的近似。

稳态时, 由(1), (2)式和(6)式可求得反转粒子数密度的空间分布函数  $R_{th}$ 、泵浦阈值  $P_{p,th}$  和振荡光子数  $\Phi$  所满足的关系式:

$$\Delta N(r, z) = [\Upsilon R r_p(r, z) - N_1^0] / [1 + (c\sigma/n) \Upsilon \Phi \Phi_0(r, z)] \quad (7)$$

$$P_{p,th} = [\pi h \nu_p (w_p^2 + w_l^2) (L + T + 2\sigma \nu_l^0 l)] / (4\sigma \Upsilon \eta_a) \quad (8)$$

$$\frac{L + T}{2\sigma} = R \Upsilon \iiint \frac{r_p(r, z) \Phi_0(r, z) dV}{1 + (c\sigma \Upsilon / n) \Phi \Phi_0(r, z)} - N_1^0 \iiint \frac{\Phi_0(r, z) dV}{1 + (c\sigma \Upsilon / n) \Phi \Phi_0(r, z)} \quad (9)$$

式中,  $\Upsilon = [\tau_1 + (\tau_1 \tau_2 / \tau_{21})] f_1 + \tau_2 f_2$ 。对照文献[1, 2]所得结果, 不同之处在于  $\Upsilon$  的定义不同, 文献[1, 2]中  $\Upsilon = \tau_2 (f_1 + f_2)$ 。类似于文献[2]中的讨论, 对不同  $w_p / w_l$  值条件下的反转粒子数数值解作一比较, 有: 当  $w_p > w_l$  时易导致高阶模振荡; 为获得单模振荡, 应选择  $w_p \leq w_l$ 。从(10)式知, 对某一确定  $w_l$  值,  $w_p$  越小,  $P_{p,th}$  越低。

(9)式右边第二项为可积积分, 第一项仅当  $w_l^2 / w_p^2$  为整数时方可积。实际应用中, 常取  $w_p = w_l = w$  情形, 由(9)式可得泵浦阈值速率  $R_{th}$ 、泵浦阈值功率  $P_{p,th}$  及振荡光子数  $\Phi$  与泵浦速率  $R$  的关系式为:

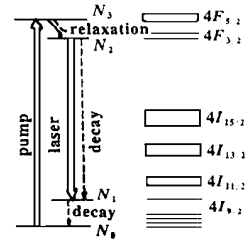
$$R_{th} = (\pi w^2) / (2\sigma \Upsilon) (L + T + 2\sigma \nu_l^0 l) \quad (10)$$


Fig. 1 Energy-level diagram of the 946nm Nd:YAG laser

$$P_{p,th} = (h\nu/\eta_a) R_{th} \quad (11)$$

$$R = (c\sigma/n) \{[(L+T)/(2Q)] \Phi^2 + N_1^0 Q \Phi \ln[1 + (\Phi/Q)]\} / \{\Phi - Q \ln[1 + (\Phi/Q)]\} \quad (12)$$

式中,  $Q$  为等效饱和光子数  $Q = (n\pi w^2 l) / (2f\tau_c\sigma)$ 。而输出功率  $P_{out}$  和斜线效率  $\eta_{slope}$  则分别由下两式给出:

$$P_{out} = (Th\nu c) / (2nl) \Phi \quad (13)$$

$$\eta_{slope} = (Tc\eta_a) / (2nl) - (\nu_i/\nu_p) [1 / (dR/d\Phi)] \quad (14)$$

式中,  $\nu_i, \nu_p$  分别为振荡光和泵浦光的频率。

### 三、分析与讨论

1. 文中考虑了上、下能级不同的能级寿命以及上能级、粒子数衰减给下能级布居数密度所造成的影响, 使该准三能级模型的物理意义更加明了清晰。将下能级速率方程(2)式右边第一项去掉, 则文中的速率方程可用来描述包含布居数热分布的激光四能级系统<sup>[3]</sup>。文中修正的准三能级模型更具普遍意义。应该指出, 尽管文中修正的准三能级模型的物理意义更明确、丰富, 但正如上一节所示, 最终的推导结果数学形式上与文献[1, 2]的结果无异, 不同之处仅在于赋予参数  $\Upsilon$  的物理内容不同。当  $\tau_1 f_1 \ll \tau_2 f_2$  时, 不管有没有考虑上述两因素,  $\Upsilon$  值均可近似为  $\tau_2 f_2$ 。

2. 由(12)式知,  $\Phi$  与  $R$  并不呈线性关系, 因而  $\eta_{slope}$  不为常数, 这主要由纵向泵浦的空间分布所决定。文献[2]利用(7)式讨论表明: 当  $w_p/w_l < 0.5$  时,  $\eta_{slope}$  不管  $\Phi$  为何值, 均可近似为常数; 而当  $w_p/w_l > 0.5$  时,  $\eta_{slope}$  则随  $\Phi$  的增大而增大。(12)式还表明, 当  $\Phi$  足够大时,  $\eta_{slope}$  亦可近似为常数。图2示出了纵向泵浦 946nm Nd: YAG 激光器理论计算与实验结果比较。从图中亦不难得出上述结论。图中实验结果取自文献[4]。其中的有关参数如下:  $N_0 = 1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_1^0 = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\sigma = 4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_2 = 230 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{21} \approx \tau_2$ ,  $\tau_1 \approx 10^{-13} \text{ s}$ ,  $f_1 = 0.0074$ ,  $f_2 = 0.6$ ,  $L = 0.001$ ,  $T = 0.001$ ,  $l = 1 \text{ mm}$ ,  $w_p = w_l = w = 20 \mu\text{m}$ , 泵浦光由 588nm 染料激光器提供。

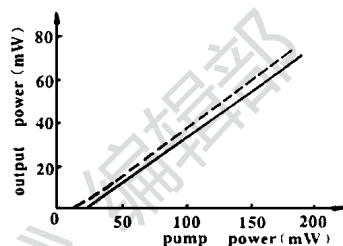


Fig. 2 Comparison of theoretical predictions (dashed) with experimental results (solid) for a 946nm Nd: YAG laser pumped by a dye laser ( $\lambda_p = 588 \text{ nm}$ )

### 四、结束语

本文利用激光上、下能级的能级寿命不同以及  $4F_{3/2}$  态上布居数的自然衰变给下能级布居数造成影响的事实修正了 Fan 等提出的准三能级模型, 使该模型的物理意义更明确、丰富。并着重分析实际应用常采用的  $w_p = w_l$  情形下激光器运转特性。理论结果得到实验的验证。

### 参 考 文 献

- 1 Fan T Y, Byer R L. IEEE J Q E, 1987; QE-23(5): 605
- 2 Risk W P. J O S A(B), 1988; 5(7): 1412
- 3 Mead P F, Bush S P, Davis C C. IEEE J Q E, 1994; QE-30(12): 2902
- 4 Duczynski E W, Fluber G, Mitzscherlich. Tunable Solid State Lasers II. Berlin: Springer-Verlag, 1986: 282

作者简介: 林碧洲, 男, 1967年11月出生。助理研究员。主要从事色心晶体材料和固体激光技术研究。