

# 旁轴近似描述的耦合系统模式 耦合效率研究\*

李传东 鄢雨 胡文涛 周复正 张正泉 徐至展  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 从泵浦光与腔模的空间匹配函数出发, 讨论了泵浦光的发散角、焦点位置等因素对激光系统效率的影响。发现在旁轴近似下, 匹配函数的最大值随泵浦光发散角的增大而增大, 在考虑到像散的影响后, 得到泵浦光发散角的参考值。

**关键词** 纵向泵浦, 旁轴近似, 匹配函数。

## 1 引 言

纵向泵浦与横向泵浦相比有效率高、模式好的优点, 欲实现这些优点, 则要求泵浦光与腔模有良好的匹配, 因此对泵浦光束质量的要求也较高。在已有的文献中<sup>[1~3]</sup>, 均采用平均光斑半径来描述泵浦光与腔模式的模式匹配问题。采用这种方法简化了问题, 但同时又忽略了泵浦光的发散角、光腰位置等参数的影响, 而这些参数对光泵系统的实验和设计中又是比较关键的。

基于以上理由, 本文从理论上研究了泵浦光的发散角、焦点位置等因素对泵浦光与腔模匹配函数的影响, 发现在旁轴近似的条件下, 匹配函数值随着泵浦光发散角的增大而增大, 并在考虑了像散的影响后给出了泵浦光发散角的参考值。

## 2 泵浦光与腔模的匹配函数

泵浦光与激光模在晶体中的匹配情况如图1所示, 图中实线表示泵浦光束, 虚线表示腔模激光束。设泵浦光是空间非相干的, 激光腔为平-凹腔, 并以激光介质的一端作为平面全反射镜。取光轴为 $z$ 轴, 并设入射端 $z=0$ 。则泵浦光与腔模激光光斑半径随 $z$ 的变化为:

$$W_p(z) = W_{p0} + \theta_p |z - z_0| \quad (1)$$

$$W_m(z) = W_0 \sqrt{1 + (z/z_{01})^2} \quad (2)$$

其中 $W_{p0}$ 、 $W_{m0}$ 分别为泵浦光与腔模光的光腰半径,  $\theta_p$ 为泵浦光的发散角,  $z_0$ 为泵浦光焦点在晶体中的位置,  $z_{01} = \pi W_{m0}^2 / \lambda$ 。增益和腔模光强度的空间变化为:

\* 激光技术青年科学基金资助。

收稿日期: 1994年8月25日; 收到修改稿日期: 1994年12月5日

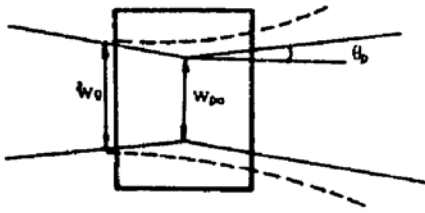


Fig. 1 Schematic of the pump beam and laser mode in the gain medium

$$E_r(x, y, z) = E_{r0} \frac{W_{p0}^2}{W_p^2(z)} \exp \left[ -\frac{r^2}{2W_p^2(z)} \right] \cdot \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

$$E_m(x, y, z) = E_{m0} \frac{W_0^2}{W_m^2(z)} \exp \left[ -\frac{r^2}{2W_m^2(z)} \right] \quad (4)$$

其中  $\alpha$  为激光介质的吸收系数,  $r^2 = x^2 + y^2$ 。与之相应, 介质内反转粒子数密度和信号光光子的密度分布也应有与 (3)、(4) 式相类似的形式。

从 (3) 式、(4) 式可以看出, 增益的空间强度的变化不仅有因介质吸收而造成的损耗, 还有因光束的会聚和发散引起光斑半径变化而造成的强度改变。如果单纯地用平均光斑半径来描述泵浦光束, 很显然会失掉了一些关键参数的影响。依照文献 [3], 对反转粒子数密度和信号光光子的密度分布进行如下的归一化处理,

$$N(x, y, z) = N_0 n(x, y, z), \quad (5)$$

$$S(x, y, z) = S_0 \dot{S}(x, y, z). \quad (6)$$

其中,  $N_0$  为介质内的反转粒子总数,  $S_0$  为自由空间中光子数密度的极大值。

为描述泵浦光与激光腔模的匹配程度, 定义如下的匹配函数:

$$F = \int_V n(x, y, z) S(x, y, z) dv \quad (7)$$

其中  $V$  为介质的体积。已有的文献表明 [1~3],  $F$  函数的值越大, 系统的阈值越低, 而其斜效率越大。因此, 对  $F$  函数值的讨论有利于深入了解有关参数对系统性能的影响, 以得出提高系统效率的有效途径。为使讨论更接近于实际, 计算中定义  $n\theta, W_{p0} = \text{常数}$ , 其中  $n$  为介质的折射率。作这种定义的依据为: 对一般可用旁轴成像光学描述的耦合系统, 其角放大率与横向放大率的乘积等于常数。对一般的腔模, 其光斑半径相对于泵浦光斑半径的变化来说极小, 可以认为在增益介质内  $W_m \approx W_{m0}$ 。

将 (5)、(6) 式代入 (7) 式并简化, 可得如下的单重积分:

$$F = \alpha n \int_0^l \frac{W_{m0}^2 \exp(-\alpha z)}{W_{m0}^2 + W_p^2(z)} dz \quad (8)$$

其中  $l$  为增益介质的长度。以下的讨论就以 (8) 式为出发点。

### 3 计算结果与讨论

#### 3.1 $F$ 函数的一般性讨论

图 2(a) 为不同吸收系数  $\alpha$  时  $F$  函数值随  $z_0$  的变化曲线, 图 2(b) 为泵浦光发散角不同时  $F$  函数的值随焦深  $z_0$  的变化曲线。图中的取值如下:  $W_0 = 150 \mu\text{m}$ ,  $W_{p0} = 15.0/\theta_0$ 。为使泵浦光能被充分吸收, 对  $\alpha = 0.85 \text{ mm}^{-1}$  的情况, 取  $l = 4 \text{ mm}$ ; 而对  $\alpha = 3.1 \text{ mm}^{-1}$ , 取  $l = 1 \text{ mm}$ 。

计算结果表明,  $z_0$  对  $F$  函数值有显著的影响, 而且  $\theta_0$  越大,  $F$  函数的值随  $z_0$  的变化越明显。为讨论方便, 定义使  $F$  函数最大时的  $z_0$  值为  $z_{0pt}$ 。从图 2 中可见,  $z_0 < z_{0pt}$  时  $F$  函数曲线要比  $z_0 > z_{0pt}$  时的  $F$  函数曲线陡。介质的吸收系数越大,  $z_{0pt}$  越靠近入射端, 这是与其较短的吸收长度相一致的。

对不同的吸收系数,  $F(z_{0pt})$  随着  $\alpha$  的增大, 亦呈现增大的趋势, 同时  $F$  函数值对  $z_0$  的变化也越发敏感,  $z_0$  稍有偏离  $z_{0pt}$ ,  $F(z_0)$  的值就会迅速减小。  $z_0$  取较大的值时,  $F(z_0)$  的值呈现出与

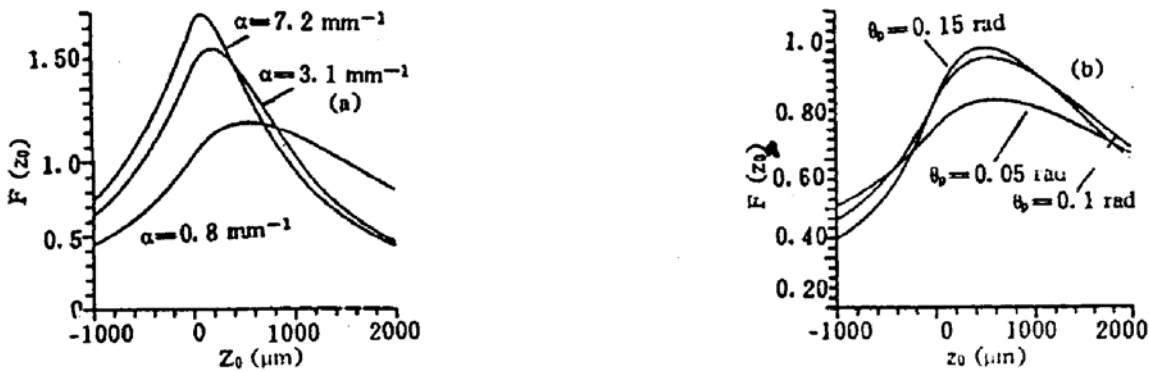


Fig. 2 The variation of  $F$  as a function of  $z_0$

(a) different absorption coefficients at  $\theta_p = 0.15$  rad, (b) different divergence angle at  $\alpha = 0.8$  mm<sup>-1</sup>

$F(z_{opt})$  处相反的变化关系, 此时  $\alpha$  越大, 则  $F(z_0)$  越小。这一点与 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器性能的比较是相符的。实际上, 图 2(b) 中的三个  $\alpha$  值正对应着 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub> (1.1 atom%)、Nd:YVO<sub>4</sub> (2.0 atom%) 三种激光介质的吸收系数。

### 3.2 泵浦光发散角 $\theta$ , 对 $F$ 值的影响

从图 2(b) 中可以看出,  $\theta$ , 对  $F$  函数值的影响是显著的。在旁轴近似下, 随着  $\theta$ , 的增大,  $z_{opt}$  的位置逐渐接近  $z = 0$ , 即焦点的最佳位置随  $\theta$ , 的增大而逐渐接近入射端面。出乎意料的是,  $F(z_{opt})$  的值随着  $\theta$ , 的增大而增大, 而并非一般实验中所认为的泵浦光的发散角越小越好。产生这种差异的原因正是前面的定义:  $\theta, W_{p0} = \text{常数}$ 。显然, 随着  $\theta$ , 的增大,  $W_{p0}$  减小, 又由于  $z_{opt}$  随  $\theta$ , 的增大而减小, 所以 (8) 式会随  $\theta$ , 的增大而增大。直观地讲, 在泵浦光功率一定的条件下, 随着  $\theta$ , 的增大, 泵浦光的光腰面积成平方反比缩小, 从而使泵浦光的功率密度也随  $\theta$ , 的增大而迅速增大, 有利于提高系统的效率。

需要指出的是, 以上的讨论只在旁轴近似的条件下适用。当  $\theta$ , 较大时, 由于存在着像散等因素的影响,  $W_{p0}$  也并不一定随着  $\theta$ , 的增大而减小。另外, 欲使纵向泵浦获得理想的单纵模输出, 最简单有效的方法就是使泵浦光斑的截面小于腔基模光斑, 从而形成一个“增益光阑”。如果  $\theta$ , 过大, 泵浦光斑会随着  $z$  偏离  $z_0$  而迅速增大, 有可能使泵浦光在入射端的光斑半径大于腔基模, 从而使高阶横模也有可能起振, 此时上述的讨论亦不再适用。

为更深入地了解  $\theta$ , 对  $F(z_{opt})$  的影响, 在  $F$  函数中, 令  $\partial F / \partial z_0$  即可求得  $z_{opt}$  随  $\theta$ , 的变化, 再将  $z_{opt}$  代入  $F$  函数中去, 即得到  $F$  函数的最大值随  $\theta$ , 的变化情况。图 3 为计算结果。从图中可见, 在旁轴近似下,  $F(z_{opt})$  的值随  $\theta$ , 的增大而迅速增大, 其原因前面已说明。但  $\theta$ , 的增大是有限的, 当  $\alpha$  较小 ( $\alpha = 0.85$  mm<sup>-1</sup>), 即使在旁轴近似下  $F(z_{opt})$  也并非随着  $\theta$ , 单调增加。图 3 中, 在  $\theta, > 0.2$  rad 时,  $F(z_{opt})$  呈现下降的趋势。原因在于, 虽然  $W_{p0}$  随  $\theta$ , 的增大而减小, 但此处考虑的是一个体积分, 对较小的吸收系数, 介质的吸收长度较大,  $\theta$ , 过大使泵浦光束在  $z = 0$  处有较大的扩散 ( $W_p(0)$  较大), 降低了泵浦强度。虽然在焦点处其增益较大, 但从整体来看, 不利于提高泵浦效率。而对较大吸收系数  $\alpha$ , 因为其吸收长度较短,  $z_{opt}$  相对于  $\alpha$  较小时更接近于入射端面, 即使对较大的  $\theta$ , 泵浦光的光斑半径在  $z = 0$  处和  $z = z_0$  处相比, 远不如  $\alpha$  较小时来得大, 因此在旁轴近似下,  $\alpha$  越大, 系统越能容忍较大的泵浦光发散角。

这里再次强调以上结果只适用于旁轴的情况。在上述计算中如果去除了  $\theta$ , 和  $W_{p0}$  的反比关系, 使  $\theta$ , 独立于  $W_{p0}$  而变化, 则  $F(z_{opt})$  是随着  $\theta$ , 的增大而减小的。对较大的发散角, 像散使泵浦光在焦点处的光斑半径不可能无限制地减小, 若像散的作用占优势,  $W_{p0}$  不随  $\theta$ , 的增大而

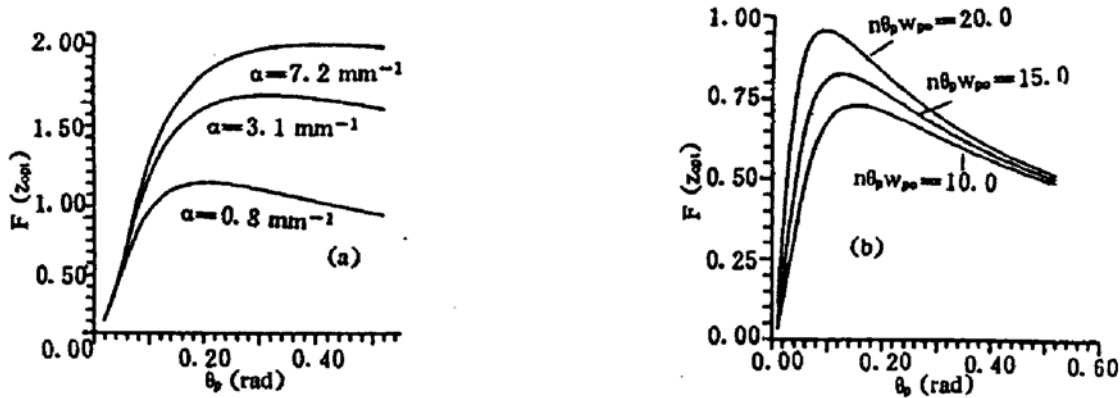


Fig. 3 Maximum value of  $F$  as functions of  $\theta_p$

(a) different absorption coefficients, (b) different value of  $n\theta_p w_{p0}$

减小, 此时  $F$  函数值就会随发散角的增大而减小。这种影响的结果就是使图 3 中  $F(z_{opt})$  随  $\theta_p$  变化的曲线在泵浦光发散角较大时会明显地向下弯曲,  $F(z_{opt})$  值减小, 即使  $\alpha$  较大也不例外。因此, 对一般的光泵系统,  $\theta_p$  需仔细考虑,  $\theta_p$  的取值可以从图 3(b) 中得到。

**结 论** 以上的分析表明, 泵浦光的发散、焦点的位置对提高系统的效率也是非常关键的。而在已有文献中用平均光斑半径对其进行描述却忽视了这些参数的影响。在旁轴近似的条件下 ( $\theta_p < 0.2$  rad), 泵浦光与腔模的匹配函数的极大值随着  $\theta_p$  的增大而增大, 但  $\theta_p$  的增大是有限的, 主要是像散的影响。对本文中的取值,  $\theta_p$  在 0.2 rad 左右应可获得理想的实验结果。随着  $\theta_p$  的增大, 焦点的最佳位置也逐渐靠近泵浦光的入射端。

### 参 考 文 献

- [1] T. Y. Fan, A. Sanchez, Pump source requirement for end-pumped laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26 (1): 311~316
- [2] M. J. F. Digonnet, C. J. Gaeta, Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators. *Appl. Opt.*, 1985, 24(3): 333~342
- [3] P. Laporta, M. Brussard, Design criteria for modesize optimization in diode-pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, QE-27(10): 2319~2326

## Theoretical Study on the Pumping Efficiency of Coupling System Described by Paraxial Approximation

Li Chuandong    Yan Yu    Hu Wentao    Zhou Fuzheng  
Zhang Zhengquan    Xu Zhizhan

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

(Received 25 August 1994; revised 5 December 1994)

**Abstract** Based on the matching function of pumping light and mode lasing, the effects of some parameters, such as the divergence angle and focus position of pumping light, on the efficiency are investigated. At paraxial approximation the maximum of the matching function is increasing with increased divergence angle. For different brightness of pumping light, the optimum value of the angle is obtained.

**Key words** longitudinally pumping, paraxial approximate, matching function.