

端面抽运固体激光器的腔模匹配分析

尚连聚

(曲阜师范大学物理系, 曲阜 273165)

(2002 年 9 月 16 日收到; 2002 年 10 月 28 日收到修改稿)

探讨了端面抽运固体激光器的腔模匹配问题, 文中的分析可为端面抽运固体激光器的设计提供参考.

关键词: 腔模匹配, 端面抽运, 固体激光器

PACC: 4255R, 4260B, 4260D

1 引 言

固体激光器具有高效率、紧凑、稳定、长寿命和光束质量高等优点, 在军事、工业、医学和科研等领域已经得到了广泛应用^[1]. 为了提高固体激光器的光2光转换效率和工作稳定性, 必须认真考虑有关腔模匹配的基本问题. 本文深入探讨了端面抽运固体激光器的腔模匹配问题, 集中体现在以下几个方面: 抽运光模尺寸的选取; 抽运光焦点在激光介质中最佳位置的确定; 振荡光模尺寸的选取; 最佳输出耦合率的确定. 文中进行具体的理论与数值计算时均以激光二极管端面抽运的 1134μm Nd: YVO₄ 激光器^[2]为例说明问题, 抽运激光波长 $\lambda_p = 808\text{nm}$, 抽运光束为圆对称高斯光束, Nd: YVO₄ 晶体^[3]的具体参数: 长度 $l = 5\text{mm}$; 受激发射截面 $\sigma = 6.0 \times 10^{-19}\text{cm}^2$; 吸收系数 $\alpha_p = 1416\text{cm}^{-1}$; 荧光寿命 $\tau_f = 90\mu\text{s}$. 本文所提出的腔模匹配方案可为同类固体激光器的设计提供参考.

2 理论基础

Nd: YVO₄ 晶体的辐射机理是典型的四能级过程, 从激光器的理想四能级系统速率方程理论出发, 我们能推导出下面的重要结论^[4].

2.1 激光器的抽运阈值

针对 TEM₀₀ 模, 激光器的抽运阈值为

$$P_{th} = \frac{h_p}{\tau} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{n}{2L} \cdot \frac{1}{J_1}, \quad (1)$$

其中 h_p 为抽运光子能量; τ 为光学系统的耦合效率; f 为增益介质的吸收效率; A 为受激发射截面; τ_f 为激活介质的荧光寿命; α 为腔的往返损耗; n 为激活介质对信号光的折射率; L 为腔长; J_1 是表示抽运模与振荡模相互重叠的积分^[5].

(1) 式中的 τ 和 J_1 的表达式分别为

$$\tau = 1 - \exp(-\alpha_p \cdot l),$$
$$J_1 = \frac{2 \alpha_p}{L [1 - \exp(-\alpha_p l)]} \int_0^l \frac{\exp(-\alpha_p z)}{\alpha_p^2(z) + \alpha_{0s}^2} dz, \quad (2)$$

其中, l 为增益介质长度; α_p 为增益介质对抽运光的吸收系数; $\alpha_p(z)$ 为抽运光在增益介质内 z 处的光斑半径, 通常 $\alpha_p(z)$ 满足下式: $\alpha_p(z) = \alpha_{0p} + |z - z_{0p}|$, 式中 α_{0p}, z_{0p} , 分别为抽运光的束腰尺寸、焦点位置、发散角; α_{0s} 为振荡光束腰尺寸; 通常情况下, z 处振荡光的光斑半径 $\alpha_s(z)$ 近似等于 α_{0s} 的大小.

2.2 近阈值情况下的输出功率

针对 TEM₀₀ 模, 近阈值情况下的输出功率为

$$P_{out} = \tau \cdot \frac{h_s}{h_p} \cdot T \cdot \frac{J_1^2}{J_2} (P_{in} - P_{th}), \quad (3)$$

其中, h_s 为振荡光子能量; P_{in} 为输入功率; T 为输出耦合率; J_2 也是表示抽运模与振荡模相互重叠的积分^[5].

(3) 式中 J_2 的表达式为

$$J_2 = \frac{4 \alpha_p}{\alpha_{0s}^2 L^2 [1 - \exp(-\alpha_p l)]} \int_0^l \frac{\exp(-\alpha_p z)}{\alpha_p^2(z) + \alpha_{0s}^2} dz. \quad (4)$$

定义重叠效率因子 $\eta_c = \frac{J_1^2}{J_2^2}$, 它决定了抽运光与振荡光的空间重叠程度.

定义平均抽运光斑半径

$$r_p = \left[\frac{1}{l} \int_0^l r_p^2(z) dz \right]^{1/2},$$

若用 r_p 代替 $r_p(z)$, 则 J_2 和 J_1 的表达式分别简化为

$$J_2 = \frac{4}{2r_{0s}^2 L^2 (2r_p^2 + r_{0s}^2)}, J_1 = \frac{2}{L(2r_p^2 + r_{0s}^2)}.$$

2131 等效抽运截面 $A_{p,mn}^3$ 的计算

TEM_{mn} 的等效抽运截面用 $A_{p,mn}^3$ 表示, $A_{p,mn}^3$ 的大小反映了各阶振荡模在一定耦合方式下抽运阈值的差别, 抽运阈值与 $A_{p,mn}^3$ 的大小成正比; $A_{p,mn}^3$ 在一定程度上决定了模匹配状况对激光器工作效率的影响.

针对 TEM₀₀ 模、TEM₀₁ 模和 TEM₁₁ 模, 它们的 $A_{p,mn}^3$ 分别为

$$A_{p,00}^3 = \left\{ \frac{2}{L} \cdot \frac{nl}{L} \cdot \frac{r_p}{[1 - \exp(-r_p l)]} \times \int_0^l \frac{\exp(-r_p z)}{r_s^2(z) + r_p^2(z)} dz \right\}^{-1}, \quad (5)$$

$$A_{p,01}^3 = \left\{ \frac{2}{L} \cdot \frac{nl}{L} \cdot \frac{r_p}{[1 - \exp(-r_p l)]} \times \int_0^l \frac{r_p^2(z) \exp(-r_p z)}{[r_s^2(z) + r_p^2(z)]^2} dz \right\}^{-1}, \quad (6)$$

$$A_{p,11}^3 = \left\{ \frac{2}{L} \cdot \frac{nl}{L} \cdot \frac{r_p}{[1 - \exp(-r_p l)]} \times \int_0^l \frac{r_p^4(z) \exp(-r_p z)}{[r_s^2(z) + r_p^2(z)]^3} dz \right\}^{-1}. \quad (7)$$

更高阶模的等效抽运截面 $A_{p,mn}^3$ 的积分表达式与此类似, 这里不再一一列出. 计算这些积分式时, 可以采用数值积分的方法.

31 腔模匹配分析

3111 抽运光模尺寸的选取

重叠效率 η_c 决定了抽运光与振荡光的空间重叠程度, 根据(2), (4)式和 η_c 的定义式, 图 1 给出了抽运腰斑 r_{0p} 的大小对重叠效率 η_c 的影响. 当 r_{0s} 一定时, r_{0p} 的取值要适当; 如果 r_{0p} 太小, 不但容易打坏激光晶体, 而且由于发散角大而导致耦合效率

较低; 如果 r_{0p} 太大, 重叠效率也将下降, 因为 r_{0p} 较大时, 抽运能量不能有效耦合到 TEM₀₀ 模体积内, 但基模腰斑 r_{0s} 越大, 这一影响越不显著; 另外, r_{0p} 太大时, 横模选择能力较差, 后面我们将作详细分析. 当 r_{0p} 一定时, r_{0s} 越大, 重叠效率就越高; 当 $r_{0s} \gg r_{0p}$ 时, η_c 的取值较大. 所以, 抽运模和振荡膜尺寸应满足的基本条件为 $r_s(z) \gg r_p(z)$, 其中 $r_s(z)$ 和 $r_p(z)$ 分别为振荡光和抽运光在增益介质长度上的平均模斑尺寸. 综上分析, 我们在确定抽运光的模尺寸时, 既要严格以图 1 所示的规律作为参考, 又要根据一定的实验经验来确定抽运光的模尺寸; 我们的实验经验表明, 选取 η_c 最大值的 50%—80% 范围内对应的抽运光模尺寸比较理想.

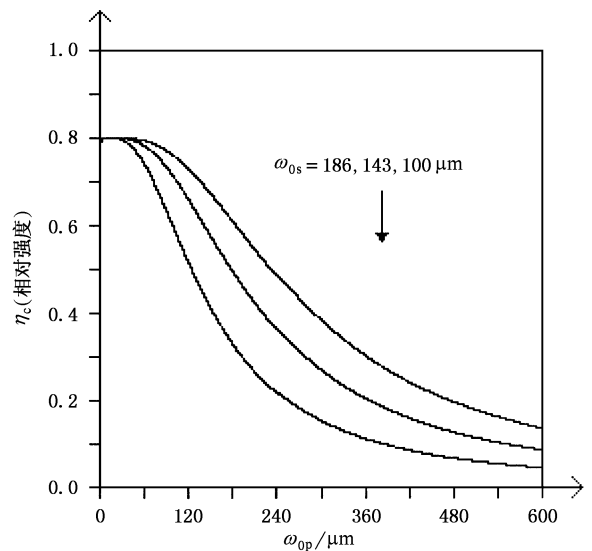


图 1 重叠效率 η_c 与抽运腰斑 r_{0p} 的关系曲线(计算时取 r_{0s} 分别为 100, 143, 186 μm , $z_{0p} = 0.7\text{mm}$)

为了保证激光器单横模运转(最好工作在 TEM₀₀ 模), 下面我们看一看 r_{0p} 对横模选择能力的影响. 由于激光器的小信号增益系数反比于等效抽运截面 $A_{p,mn}^3$, 根据(5), (6)和(7)式求解几个低阶模的等效抽运截面 $A_{p,mn}^3$, 如图 2 所示. 从图中可以看出, r_{0p} 越大, 三种模式靠的越近, 故横模选择能力越差; 而当 r_{0p} 选取适当的数值时, 端面抽运方式具有良好的横模选择特性.

3121 抽运光焦点在激光介质中最佳位置的确定

阈值公式(1)表明, 抽运光焦点在激光介质中的位置(焦点至前端面的距离)直接影响抽运阈值的大

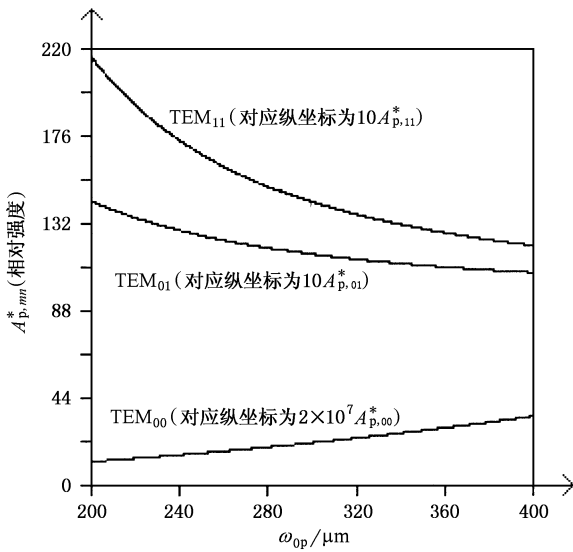


图2 低阶模等效抽运截面 $A_{p,mm}^3$ 随抽运腰斑 w_{0p} 的变化曲线(计算时取 $w_{0s} = 143\mu\text{m}$, 抽运腰斑位置 $z_{0p} = 0.7\text{mm}$)

小,从而影响激光器的输出功率与斜率效率.因此抽运光焦点位置存在一最佳值 $z_{0p,s}$,使得激光器的输出特性最佳.针对 TEM_{00} 模,根据(1)和(2)式,通过数值积分即可算出抽运光焦点位置 z_{0p} 对抽运阈值的影响,如图3所示.计算时取 Nd:YVO₄ 晶体长度为 5mm; $w_{0p} = 300\mu\text{m}$;腔长 $L = 65\text{mm}$.

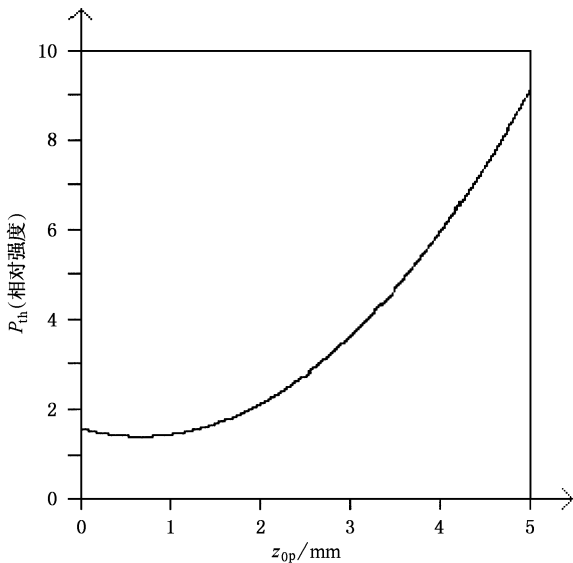


图3 抽运阈值 P_{th} 与抽运光腰斑位置 z_{0p} 的关系曲线

从图3可以看出,对于端面抽运方式,在其他条件一定时,存在一个使抽运阈值最低的 z_{0p} .在我们给定的具体参数下,通过数值计算可知,图3所示的

抽运光焦点最佳位置 $z_{0p,s}$ 的值为 0.17mm.

3131 振荡光模尺寸的选取和最佳输出耦合率的确定

在设计端面抽运的固体激光器时,为了实现最佳模式匹配、最大程度地提高器件的光2光转换效率,应该根据抽运光强度及其空间分布确定增益介质中合理的激光振荡模尺寸.

在 $s(z)$ 近似等于 s_0 的情况下,根据(1)式和简化后的 J_1 式可知,激光器阈值抽运功率正比于抽运光及振荡光在增益介质内的平均横截面积 $\frac{2}{s_0}$ 和 $\frac{2}{s_p}$.

谐振腔的往返损耗 由腔内的衍射、散射等固有损耗 和输出耦合率 T 两部分组成,即 $\alpha = \alpha_{in} + T$.

定义新参量 $\beta = (\frac{2}{s_0 P_p})^2$,为振荡光与抽运光在增益介质内平均光斑横截面积之比;定义 $T = TP$ 为器件的相对输出率.则简化后的 J_1 和 J_2 分别表示为

$$J_1 = \frac{2}{L(1 + \frac{2}{s_p})^{-2}}$$

$$J_2 = \frac{4}{2 \frac{2}{s_0} L^2 (2 + \frac{2}{s_p})^{-2}}$$

所以 $J_1^2 P J_2 = \frac{(2 + \frac{2}{s_p})}{(1 + \frac{2}{s_p})^2}$,把(3)式表示成变量 s 和 T 的形式,即

$$P_{out} = P_{in} \cdot \frac{h_s}{h_p} \cdot \frac{T}{1 + T} \cdot \frac{(2 + \frac{2}{s_p})}{(1 + \frac{2}{s_p})^2} (P_{in} - P_{th}) \tag{8}$$

(8)式表明, s 和 T 是相互关联的.对于一定的抽运功率,存在使 P_{out} 达到最大的 s 和 T_s .当 P_{out} 取最大值时应满足 $\frac{dP_{out}}{dT} = \frac{dP_{out}}{ds} = 0$,将此条件代入(8)式,得到关于 s 和 T_s 的方程组

$$(1 + s) (1 + T_s)^2 = \frac{4}{h_p n} \cdot \frac{P_{in}}{s^{-2}} \tag{9}$$

$$(\frac{3}{s} + 3 \frac{2}{s} + 4 s + 2) (1 + T_s) = \frac{8}{h_p n} \cdot \frac{P_{in}}{s^{-2}} \tag{10}$$

根据给定的输入功率 P_{in} 和抽运光斑半径 w_{0p} ,由(9)和(10)两式可求出 s 和 T_s ,从而确定振荡光光斑大小和最佳输出耦合率.利用以上两式通过数值计算可得 s, T_s 随输入功率 P_{in} 变化的关系曲线,计算结果如图4所示.

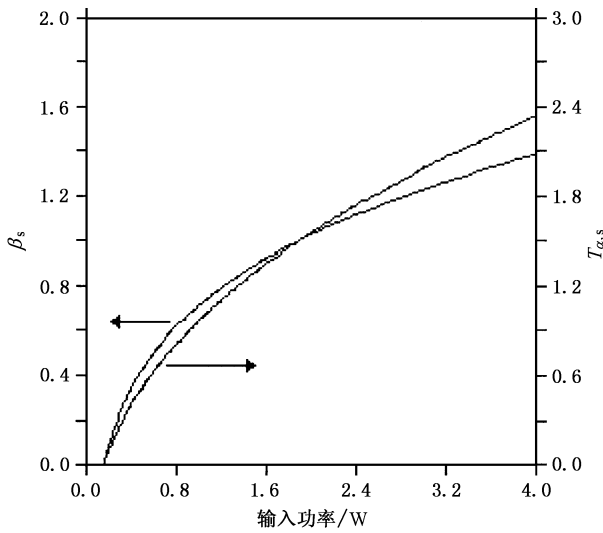


图4 β_s 和 $T_{0,s}$ 随输入功率 P_m 变化的关系曲线

41 结 论

设计端面抽运的固体激光器时,应综合考虑影响腔模匹配的各方面因素. 鉴于我们的实践经验,笔者提出以下具体步骤:1) 根据 3111 的分析,确定合理的抽运光腰斑尺寸 w_{0p} 的大小;2) 根据 3121 的分析,确定抽运光焦点在激光介质中的最佳位置,即 $z_{0p,s}$ 的数值;3) 对于给定的抽运功率,根据图 4 可得到相应的 β_s 和 $T_{0,s}$ 值,然后根据 β_s 和 $T_{0,s}$ 的值再进一步确定振荡光模尺寸和最佳输出耦合率;4) 选择合适的腔参数,以满足 β_s 的最佳值要求^[6]. 该步骤并不是一成不变的,仅供大家参考,关键是在考虑各方面因素时应做到前后呼应、综合考虑,而不应该孤立地考虑某方面的影响.

[1] Zhang H L *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1579 (in Chinese) [张恒利等 1998 物理学报 **47** 1579]
 [2] Zheng Y *et al* 2000 *Acta Optica Sinica* **20** 1141 (in Chinese) [郑义等 2000 光学学报 **20** 1141]
 [3] Shang L J *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2015 (in Chinese) [尚连聚等 2002 物理学报 **51** 2015]
 [4] He J L 1998 *Doctoral Dissertation* (in Chinese) [何京良 1998 博士

学位论文(中国科学院物理研究所)]
 [5] Feng Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 335 (in Chinese) [冯衍等 2001 物理学报 **50** 335]
 [6] Zhou B K, Gao Y Z and Chen J H 1995 *Principle of Laser* (Beijing: National Defense Industry Press) p65 (in Chinese) [周炳琨、高以智、陈家骅 1995 激光原理(北京:国防工业出版社)第 65 页]

Cavity mode matching analyses of end2pumped solid2state lasers

Shang Lian2Ju

(Department of Physics, Qufu Teachers' University, Qufu 273165, China)

(Received 16 September 2002; revised manuscript received 28 October 2002)

Abstract

Cavity mode matching principles of end2pumped solid2state lasers are analyzed theoretically. The analyses in this article can be important references for designing end2pumped solid2state lasers.

Keywords: cavity mode matching, end2pumped, solid2state lasers

PACC: 4255R, 4260B, 4260D