

纵向抽运激光器的优化设计与材料的质量参数*

郭 承 就

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(1994年1月18日收到)

用求极值方法得到激光介质最佳吸收密度的计算公式, 它是纵向抽运固体激光器获得最佳输出的极值条件. 由此可以计算相应的元件合适长度和输出镜合适透过率. 还讨论材料的吸收对激光性能的影响, 建议采用 α_p^2/α_i 为 Q 值, 作为纵向抽运激光材料的品质因素.

PACC: 4260B; 4255B; 4270

1 引 言

80年代以来, 纵向抽运固体激光器发展迅速, 成为新型激光器的一个重要发展方向. 最成功的代表是各种激光抽运的钛宝石可调谐激光器^[1]和二极管激光抽运的全固体化 Nd:YAG 激光器. 目前, 通行的新材料激光试验采用激光纵向抽运方法, 不再用灯抽运办法. 纵向激光抽运与横向灯抽运不同, 需要考虑一些新问题, 例如, 安全抽运功率密度问题, 各向异性晶体元件的偏振取向问题^[2]. 最重要的是要求新的理论. Moulton^[3]发展了纵向抽运理论, Sanchez 等^[4]曾将它用于估算钛宝石激光器的性能. 但是, 由于激光介质和其它光学元件的参数甚多, 激光性能与元件参数的现有关系式比较复杂, 不够明瞭, 使用不便. 本文报道用比较简单而明晰的关系式描述激光性能与元件参数的关系, 并且确立了纵向抽运激光器优化设计和元件优选的原则, 明确看出筛选优良新材料和提高材料质量的方向. 结果应用于钛宝石激光器已获得验证.

2 纵向抽运激光器的阈值、效率和输出

2.1 CW 激光器

考虑纵向抽运、驻波腔固体激光器, 阈值抽运功率为^[3]

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p \omega_1 (T + L)(1 + a')}{4\sigma_e \tau_i [1 - \exp(-\alpha_p l)]} \quad (1)$$

(对于环形腔, 式中系数乘2), 其中 h 为 Planck 常数, ν_p 为抽运光频率, ω_1 为激光模光

* 国家自然科学基金和“八·五”攻关项目资助的课题.

斑半径, σ_e 为激光跃迁峰值增益截面, τ_f 为上能态寿命, α_p 为抽运光波段吸收系数, l 为激光介质元件通光长度, T 为输出镜透过率, L 为腔内损耗, $a \equiv w_p/w_l$, w_p 为抽运束半径。

考虑低阈值器件, 用小光束腔模激光聚焦抽运, 产生的有效激光束截面积为^[4] $\pi w_l^2 = \lambda_l l/n$, 若激光元件端面磨成 Brewster 角, 考虑像散效应^[3], (1)式中 w_l^2 需用 $n w_l^2$ 代替, 从而 $\pi w_l^2 = \lambda_l l$, λ_l 为激光波长。为了分析材料质量的影响, 腔内损耗分为激光元件的吸收损耗 $\alpha_l l$ 和其它元件(如各种色散元件)的插入损耗 L_i , $L = \alpha_l l + L_i$, α_l 为材料在激光波段的吸收系数。阈值改写为

$$P_{th} = \frac{hc}{4\sigma_e \tau_f} \frac{\lambda_l}{\lambda_p} (1 + a^2) \frac{(T + L_i + \alpha_l l)l}{1 - \exp(-\alpha_p l)}. \quad (2)$$

定义与元件质量和通光长度有关的三个参数

$$\text{吸收密度 } x = \alpha_p l, \quad (3)$$

$$\text{材料优值 } F = \alpha_p / \alpha_l, \quad (4)$$

$$\text{品质因素 } Q = \alpha_p F = \alpha_p^2 / \alpha_l, \quad (5)$$

阈值功率为

$$P_{th} = \frac{K}{Q} \frac{[F(T + L_i) + x]x}{[1 - \exp(-x)]}, \quad (6)$$

其中

$$K = \frac{hc}{4\sigma_e \tau_f} \frac{\lambda_l}{\lambda_p} (1 + a^2). \quad (7)$$

显然, 阈值随 x , T 增大而单调上升。

纵向抽运激光器的斜率效率为^[4]

$$\eta_s = \eta_i A \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \frac{T}{(T + L)}, \quad (8)$$

其中 η_i 为内量子效率, A 为抽运光被激光元件吸收的份额, $A = 1 - \exp(-\alpha_p l)$ 。 (9)

考虑抽运束与激光束大小不同, 引入结构因子 f_i , 斜率效率改写为

$$\eta_s = \eta_i f_i \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \frac{T[1 - \exp(-\alpha_p l)]}{(T + L_i) + \alpha_p l/F} \quad (10)$$

或

$$\eta_s = BFT \frac{1 - \exp(-x)}{F(T + L_i) + x}, \quad (11)$$

其中

$$B = \eta_i f_i \lambda_p / \lambda_l. \quad (12)$$

分析可见, 斜率效率随着激光介质 F 值的提高、输出镜透过率的增加而提高, 随其它插入损耗增加而降低。它与激光介质吸收密度的关系比较复杂。元件长度由小变大, 增益开始增加, 后来减少, 损耗则不断增加。显然, 效率的变化呈有极大值的单峰曲线。由 $\partial \eta_s / \partial x = 0$ 求出极值条件——吸收密度最佳值 $x = x_0$ ——满足的方程为

$$e^{x_0} - x_0 = F(T + L_i) + 1, \quad (13)$$

相应的优化斜率效率为

$$\eta_{s0} = BFT / e^{x_0} = B(e^{x_0} - x_0 - FL_i - 1) / e^{x_0}, \quad (14)$$

斜率效率的极限值为 B .

在 $x = x_0$ 条件下, 阈值为

$$P_{th0} = \frac{K}{Q} x_0 e^{x_0}, \quad (15)$$

设抽运功率为 P_{in} , 激光器的输出功率为

$$P_{out} = \eta_s (P_{in} - P_{th}) = BFT \left[\frac{P_{in}(1 - e^{-x})}{F(T + L_i) + x} - \frac{K}{Q} x \right], \quad (16)$$

在选定激光介质和插入元件的情况下, 输出仅与 x, T 有关. 分析可见, 存在最大输出功率, 其条件 $x = x_{00}, T = T_{00}$, 由 $\partial P_{out}/\partial x = 0$ 和 $\partial P_{out}/\partial T = 0$ 联立方程求出, 分别为吸收密度和输出镜透过率的最佳值. 它们满足

$$\frac{(e^{x_{00}} - 1)e^{x_{00}}(FL_i + 2x_{00})^2}{x_{00}(FL_i + x_{00})} = \frac{Q P_{in}}{K}, \quad (17)$$

$$FT_{00} = \frac{(e^{x_{00}} - 1)(FL_i + 2x_{00})}{x_{00}} - (FL_i + x_{00}), \quad (18)$$

最大输出功率为

$$P_{outmax} = B \left\{ P_{in} \left[(1 - e^{-x_{00}}) - \frac{2(FL_i + x_{00})x_{00}}{(FL_i + 2x_{00})e^{x_{00}}} \right] + \frac{K}{Q} (FL_i + x_{00})x_{00} \right\}. \quad (19)$$

满足上述条件下的阈值和斜率效率为

$$P_{th00} = \frac{K}{Q} (FL_i + 2x_{00})e^{x_{00}}, \quad (20)$$

$$\eta_{s00} = B \left[(1 - e^{-x_{00}}) - \frac{(FL_i + x_{00})x_{00}}{(FL_i + 2x_{00})e^{x_{00}}} \right]. \quad (21)$$

若 $L_i = 0$, (17)–(21) 式简化为

$$4(e^{x_{00}} - 1)e^{x_{00}} = Q P_{in}/K, \quad (22)$$

$$FT_{00} = 2(e^{x_{00}} - 1) - x_{00}, \quad (23)$$

$$P_{outmax} = B \left\{ P_{in} [1 - (x_{00} + 1)e^{-x_{00}}] + \frac{K}{Q} x_{00}^2 \right\} \quad (24)$$

或

$$P_{outmax} = \frac{BK}{Q} [2(e^{x_{00}} - 1) - x_{00}]^2, \quad (24a)$$

$$P_{th00} = \frac{2K}{Q} x_{00} e^{x_{00}}, \quad (25)$$

$$\eta_{s00} = B[1 - (0.5x_{00} + 1)e^{-x_{00}}]. \quad (26)$$

2.2 脉冲激光器

假定抽运光在脉宽 τ_p 时间内功率不变, 阈值能量为^[3]

$$E_{th} = \frac{P_{th}\tau_p}{1 - \exp(-\tau_p/\tau_f)}. \quad (27)$$

若抽运光脉宽远小于介质的荧光寿命, $\tau_p \ll \tau_f$, 有 $E_{th} \approx P_{th}\tau_f$, 所以

$$E_{th} = K_p \frac{[F(T + L_i) + x]x}{Q(1 - \exp(-x))}, \quad (28)$$

$$\text{其中} \quad K_p = \frac{hc}{4\sigma_e} \frac{\lambda_1}{\lambda_p} (1 + a^2). \quad (29)$$

脉冲激光器的结构因子 $(1 + a^2)$ 与连续器件可能不同, 两类系数关系表示为

$$K_p = b\tau_i K, \quad (30)$$

b 为因子。斜率效率类似(11)式, 即

$$\eta_s = B_p FT \frac{[1 - \exp(-x)]}{[F(T + L_i) + x]}, \quad (31)$$

$$\text{其中} \quad B_p = \eta_{ip} f_{ip} \lambda_p / \lambda_1, \quad (32)$$

内量子效率为 η_{ip} , 结构因子为 f_{ip} , 它与连续器件可能不同。当吸收密度满足 $x = x_0$,

$$e^{x_0} - x_0 = F(T + L_i) + 1 \quad (33)$$

时, 优化的斜率效率为

$$\eta_{s0} = B_p FT / e^{x_0}. \quad (34)$$

最大输出的讨论在形式上与连续器件相同。若抽运能量为 E_{in} , 忽略其它插入损耗 ($L_i = 0$), 获得最大输出的条件、最大输出能量及该条件下的阈值、斜率效率分别为

$$4(e^{x_{00}} - 1)e^{x_{00}} = QE_{in}/K_p, \quad (35)$$

$$FT_{00} = 2(e^{x_{00}} - 1) - x_{00}, \quad (36)$$

$$E_{outmax} = \frac{B_p K_p}{Q} [2(e^{x_{00}} - 1) - x_{00}]^2, \quad (37)$$

$$E_{th00} = \frac{2K_p}{Q} x_{00} e^{x_{00}}, \quad (38)$$

$$\eta_{s00} = B_p [1 - (0.5x_{00} + 1)e^{-x_{00}}]. \quad (39)$$

3 优化设计

根据使用要求和条件, 激光器的设计目标分别追求低阈值、高斜率效率或高输出。诚然, 三者不可兼得。分析表明, 优化设计的关键参数是激光介质的吸收密度 (进而确定元件通光长度)。优化输出和优化效率的条件方程不同, 吸收密度的最佳值也不同。

以连续激光器的优化输出设计为例。一般问题属于两方面: 希望知道最大输出或询问所需条件。解题基础为条件方程和最大值方程。在选定激光材料和光学元件后, 方程组剩 $P_{in}, x_{00}, P_{outmax}$ 三个参数, 其中之一已知, 另两个即可求。设计程序有几种。

1. 求解高大输出。(1) $P_{in} \rightarrow x_{00} \rightarrow P_{outmax}$ 抽运功率设定, 计算最佳吸收密度 (及元件长度), 进而计算最大输出; (2) $x_{00} \rightarrow P_{in} \rightarrow P_{outmax}$ 若介质元件已选定, 可计算所需抽运功率及最大输出。

2. 求解所需条件。(1) $P_{outmax} + P_{in} \rightarrow x_{00}$ 若已设定输出功率目标, 抽运功率条件选定, 可计算最佳吸收密度和元件长度; (2) $P_{outmax} + x_{00} \rightarrow P_{in}$ 若已选定的是介质元件, 由测量获得其吸收密度值, 即可计算所需抽运功率。

$x_{00} - QP_{in}/K$ 的关系曲线示如图 1 曲线 a , 而 $P_{outmax} - x_{00}$ 的关系曲线示如图 1 曲线

b. x_{00} 随着 QP_{in}/K 的增加而增大, 而 P_{outmax} 随 x_{00} 增大而提高.

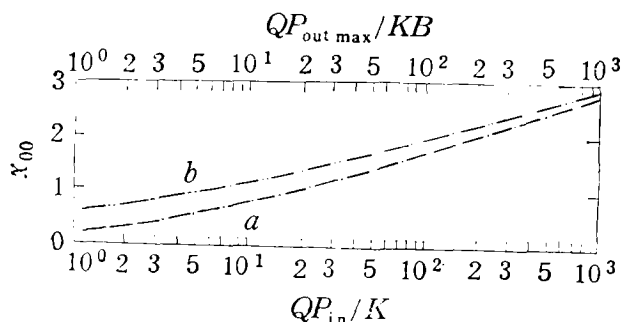


图1 曲线a为激光介质适于最大输出的最佳吸收密度 x_{00} 与抽运功率 P_{in} 和材料品质因素 Q 的关系; 曲线b为最大输出功率 P_{outmax} 与介质最佳吸收密度 x_{00} 的关系 $L_i = 0$

上述方法应用于钛宝石激光器已得到部分验证。用 Ar^+ 激光作抽运源, 有关参数取 $\sigma_e = 30 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, $\tau_i = 3.15 \mu\text{s}$, $\lambda_p = 488 \text{nm}$, $\lambda_l = 780 \text{nm}$, $(1 + a^2) = 3$, $\eta_i = 65\%$, $f_i = 1$, 算出 $K = 25.2 \text{W} \cdot \text{cm}^{-1}$, $B = 0.407$ 。抽运功率 $P_{in} = 12 \text{W}$, 不同优值、不同 α_p 钛宝石元件的最佳长度的计算结果表明, $F = 50-200$, $\alpha_p \geq 0.75 \text{cm}^{-1}$ 的一般钛宝石元件, 最佳长度在 $0.5-2 \text{cm}$ 之间。太长的元件阈值很高, 例如 $l = 3.5 \text{cm}$, $\alpha_p = 1.2 \text{cm}^{-1}$, $T = 4\%$, 若 $F = 100$, 计算阈值为 7.3W ; 若 $F = 50$, 则阈值为 11W 。许多单位有相应的实验结论。我们计算 $l = 1.14 \text{cm}$, $\alpha_p = 1.2 \text{cm}^{-1}$, $T_{00} = 4.5\%$ 的阈值为 2.3W , 实验结果^[7]为 2.4W 。我们对输出 1.6W 的条件数据^[6]进行计算, 条件为 $\alpha_p = 0.73 \text{cm}^{-1}$, $F = 100$, $l = 1.8 \text{cm}$, $T = 4.9\%$, $P_{in} = 12 \text{W}$, 理论输出为 1.9W 。以上结果表明, 理论与实验结果基本相符。

4 激光材料的质量参数

分析第二节结果可以看出, 材料的光谱性质对激光性能的影响。辐射增益截面和荧光寿命越大 (K 越小), 连续阈值越低, 输出越大。内量子效率影响激光效率和输出。分析表明, 用作纵向抽运的激光材料的诸多质量参数中, 光谱吸收系数最重要。抽运光波段吸收系数 α_p , 激光波段吸收系数 α_l , 由它们构成的 F 和 Q , 4 个参数中 2 个独立。1988 年, 国际上将 α_p/α_l 作为钛宝石的优值。从第二节可见, 灵敏值越高, 效率越高。分析表明, Q 值越大, 阈值越低, x_{00} 越大, 输出功率越高。高 Q 值晶体不但要求优值高, 还要求对抽运光的吸收大。为此要求晶体具有较高的激活离子浓度。但是, 增加掺杂浓度可能引起激光波段吸收增加而降低优值。所以, 高 Q 值晶体是高优值高浓度晶体, 能产生高性能激光。而单独优值不足以表达晶体的完整质量。作者建议, 将参数 $Q (= \alpha_p F = \alpha_p^2/\alpha_l)$ 作为纵向抽运激光材料的品质因素, 以引起材料研究和应用两方面重视。

5 结 论

1. 纵向抽运的固体激光器存在最佳斜率效率和最大输出功率(能量)。已推导出最大

值方程和条件方程。它们是优化设计的基础。从激光介质的质量参数、插入损耗、抽运功率等已知条件出发,可以计算介质元件的最佳吸收密度,进而计算最佳尺寸,并且可以计算可能的最大输出等性能。用于钛宝石激光器分析,计算结果与实验相符。

2. 激光介质的质量对性能影响很大。关键参数是两种吸收系数定义的 F 值和 Q 值: $F = \alpha_p / \alpha_i$, $Q = \alpha_p F$ 。高 Q 值材料的阈值低,可以做成吸收密度较大的元件,获得较高的最大输出。高 Q 值必须具备高掺杂浓度和高优值。 Q 值更全面地反映材料质量,可以称为纵向抽运激光材料的品质因素。

- [1] Chengjiu WU, *Proc. SPIE*, Vol. 1979 Lasers and Optoelectronics, (1992), 240
- [2] 邬承就,激光与红外,21(3)(1991),19.
- [3] P. F. Moulton, *IEEE J. Quant. Elect.*, QE-21 (1985), 1582.
- [4] A. Sanchez *et al.*, *IEEE J. Quant. Elect.*, QE-24 (1988), 995.
- [5] 谢建平等,量子电子学,10(1993),91.
- [6] A. Sanchez *et al.*, *Opt. Lett.*, 11 (1986), 363.

OPTIMUM DESIGNS FOR LONGITUDINALLY PUMPED LASERS AND QUALITY FACTOR OF LASER MATERIALS

WU CHENG-JIU

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031*)

(Received 18 January 1994)

ABSTRACT

The formulas for calculating the optimum absorption density of a laser medium, which is the condition for maximum output of longitudinally pumped lasers, have been obtained by means of maximizing the output and slope efficiency of them. The appropriate length of solid-state laser medium and suitable transmittance of the output mirror can be calculated as well. The material absorption effect on the laser performance is discussed and the Q -value ($=\alpha_p^2/\alpha_l$) as a quality factor for a material being used in a longitudinally pumped laser is suggested.

PACC: 4260B; 4255B; 4270