

二极管端泵浦连续激光器激活介质长度与透过率的优化

邵怀宗 吕百达 翟 群

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 从准三能级系统的速率方程出发, 推导出了二极管(LD)端泵浦连续工作端面泵浦固体激光器的速率方程, 提出了计算连续 LD 端面泵浦激光器输出功率的方法, 并表示成激活介质长度和透过率的函数, 由此得到在泵浦功率一定情况时的优化设计步骤。数值计算结果与我们的实验结果和文献[3],[4]的实验数据符合甚好。

关键词: 速率方程 二极管泵浦固体激光器(DPL) 优化设计

Optimization of the medium length and transmissivity in longitudinally diode-pumped CW lasers

Shao Huaizong, L Baida, Zhai Qun

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: In this paper, starting from the rate equation of a quasi-three-level system, the rate equation of diode pumped solid-state lasers has been derived. A method for calculating the output power in longitudinally diode-pumped CW lasers has been proposed, which is represented as a function of the two parameters: the active medium length and transmissivity. The optimal design procedure has been found. Numerical calculations have shown a good consistency with our experimental result and the data in Refs. [3] and [4].

Key words: rate equation diode-pumped solid-state laser optimal design

引 言

二极管泵浦固体激光(DPL)是近十年来快速发展的固体激光技术。LD 的电光效率高, 寿命长, 其发射光谱与固体激光介质的吸收光谱可实现很好的匹配。因此, 用 LD 作泵浦源能使固体激光器效率高、体积小、重量轻、寿命长、光束质量好、易通过阵列化、模块化来实现高功率激光输出等优点, 因而 DPL 具有广阔的发展前景。但是, 激光参数的不同选择对激光功率的输出影响很大, 为了探索 DPL 的最佳输出, 我们从速率方程出发对端面泵浦的连续激光器的激活介质长度和透过率进行了优化模拟和数值计算, 并进行了实验研究和比较。

一、计 算 模 型

如图 1 所示, 设能级粒子处于准热平衡状态, 准三能级上、下能级粒子数方程可表示如下^[1]:

$$dN_{up}(r, z)/dt = f_{up}Rr_p(r, z) - \{[N_{up}(r, z) - N_{up}^0]/\tau\} - \{f_{up}c\sigma[N_{up}(r, z) - N_{down}(r, z)]/n\}Ss_0(r, z) \quad (1a)$$

$$dN_{down}(r, z)/dt = -f_{down}Rr_p(r, z) - \{[N_{down}(r, z) - N_{down}^0]/\tau\} + \{f_{down}c\sigma[N_{up}(r, z) - N_{down}(r, z)]/n\}Ss_0(r, z) \quad (1b)$$

腔内光子数方程^[1]:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iiint \Delta N(r, z) S s_0(r, z) dV - \frac{c\delta}{2nL} S \quad (1c)$$

式中, $N_{up}(r, z)$, $N_{down}(r, z)$ 分别为稳态时上下能级粒子数, f_{up}, f_{down} 分别是上下能级粒子数中对激光输出起作用的部分, R 为泵浦速率, σ 为受激发射截面, c 为光速, n 为折射率, τ 为能级寿命, S 为腔内光子数, N_{up}^0 , N_{down}^0 分别为热平衡时上下能级的粒子数, δ 为往返损耗, 包括输出、元件界面散射和菲涅耳衍射等。与输出有关的部分为 T , 与输出无关的部分为 $2sL$, 包括杂质吸收和体散射, s 为损耗因子。则 δ 可表示如下:

$$\delta = T + 2sL \quad (1d)$$

$r_p(r, z)$ 和 $s_0(r, z)$ 分别为泵浦光经耦合系统后的空间分布和腔内光子数密度的空间分布。这里用高斯光束近似表示^[1]:

$$r_p(r, z) = 2\alpha / \{\pi \omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha L)]\} \cdot \exp(-\alpha z) \exp(-2r^2 / \omega_p^2) \quad (2a)$$

$$s_0(r, z) = 2 / (\pi \omega_0^2 L) \cdot \exp(-2r^2 / \omega_0^2) \quad (2b)$$

且 $s_0(r, z)$ 和 $r_p(r, z)$ 是空间归一化的, 即: $\iiint r_p(r, z) dV = \iiint s_0(r, z) dV = 1$ (2c)

(2) 式中, α 为介质的吸收系数, L 为介质激活长度, ω_p, ω_0 分别为泵浦光经耦合系统后和出射光的束腰半径。由(1a)和(1b)可得:

$$\begin{aligned} d\Delta N(r, z)/dt = & (f_{up} + f_{down}) R r_p(r, z) - [\Delta N(r, z) - \Delta N^0] / \tau \\ & - [(f_{up} + f_{down}) c \sigma \Delta N(r, z) / n] S s_0(r, z) \end{aligned} \quad (3)$$

$\Delta N(r, z) = N_{up}(r, z) - N_{down}(r, z)$ 为反转粒子数, ΔN^0 为热平衡时的反转粒子数。

现讨论稳态, 有: $d\Delta N(r, z)/dt = 0$ 和 $dS/dt = 0$ (4)

由(3)和(4)式可得: $\Delta N(r, z) = \frac{(f_{up} + f_{down}) R r_p(r, z) + \Delta N^0}{1 + [(f_{up} + f_{down}) / n] c \sigma \tau S s_0(r, z)}$ (5)

对四能级系统有: $\Delta N^0 = 0$ $f_{down} = 0$ (6)

将(5)式和(6)式代入(1c)式化简为: $\frac{\delta}{2\sigma L} = f_{up} R \tau \iiint \frac{r_p(r, z) s_0(r, z)}{1 + (f_{up} c \sigma \tau / n) S s_0(r, z)} \cdot dV$ (7)

(2)式代入(7)式化简为: $\frac{T + 2sL}{2\sigma} = \frac{2f_{up} R \tau}{\pi \omega_p^2} \int_0^1 \frac{x^q}{1 + ex} dx$ (8)

式中, $R = P_p [1 - \exp(-\alpha L)] \eta V / (h \nu_p)$, $q = \omega_0^2 / \omega_p^2$, $e = f_{up} c \sigma \tau S / (n \pi \omega_0^2 L)$, P_p 为泵浦功率, η 为量子效率, h 为普朗克恒量, ν_p 为泵浦光频率。设棒的两端镀膜, 其输出透过率为 η 那么光在腔内往返一次输出光子数为 $\eta \times S$, 光在腔内往返一次的时间为:

$$t = 2Ln/c \quad (9)$$

L 为腔长即介质的长度, n 为折射率, c 为光速。输出功率可表示为:

$$P_{out} = TS \times h \nu_e / t = TSch \nu_e / (2Ln) \quad (10)$$

ν_e 为输出激光的频率。

二、计算结果与讨论

从(8)式可知: 考虑叠积分后, 腔内光子数 S 没有解析解, 使计算变得复杂, 为此, 须采用逐次迭代法进行数值计算, 我们成功地解决了这一问题。表 1 给出了所计算的三种晶体的

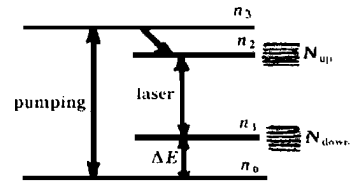


Fig. 1 Diagram of the quasi-three level system

Table 1 Parameters of Nd:YAG, Nd:YLF and Nd:YVO₄ crystals

kinds of crystal	λ_p (nm)	λ_{out} (nm)	τ (μ s)	α (m^{-1})	σ ($10^{-20} cm^2$)	f_{up}	P_{pump} (W)	ω_{pe} (μ m)	n	s (m^{-1})
YAG	808	1064	230	490	40	0.6	3.0	70	1.82	0.3
YLF	808	1053	520	250	27	0.43	3.0	70	1.631	0.3
YVO ₄	808	1064	98	1300	107	0.52	3.0	70	1.88	0.3

* 一般情况下 f_{down} 很小, 我们的计算中计为 0

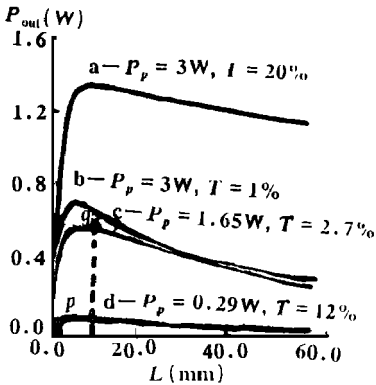


Fig. 2 The output power P_{out} of a YAG laser as function of the medium length, the calculation parameters are pumping power and transmissivity, p —out experimental output power when $P_p = 0.29W$, $T = 3\%$ and $L = 5mm$ q —the output power of [3] when $P_p = 1.65W$, $T = 2.7\%$ and $L = 10mm$

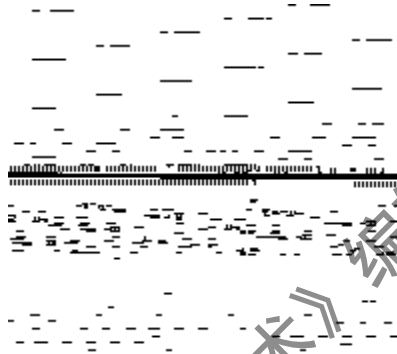


Fig.3 The output power P_{out} of a YLF laser as function of the medium length, the calculation parameters are pumping power and transmissivity

计算参数。对 Nd:YAG 分别计算了泵浦功率为 3W, 透过率分别为 0.01, 0.20 和泵浦功率为 1.65W, 透过率为 0.027 共 3 组激活长度与输出功率的关系如图 2 所示。对 Nd:YLF 计算了泵浦功率为 3W, 透过率为 0.20 和 0.01 共 2 组, 其激活长度与输出功率的关系如图 3 所示。图 4 给出了 YVO₄ 的计算结果, 其泵浦功率为 3W, 透过率为 0.01 和泵浦功率为 1.5W, 透过率为 0.20。计算结果表明:

出了 YVO₄ 的计算结果, 其泵浦功率为 3W, 透过率为 0.01 和泵浦功率为 1.5W, 透过率为 0.20。计算结果表明:

1. 对于连续端面泵浦来说, 在泵浦功率一定时, 激活介质的长度有一最佳值。介质长度没有达到最佳值时, 则对泵浦能量吸收不充分, 超过最佳值时又由于对激光的散射和吸收损耗反而使输出功率降低, 透过率超过最佳时, 泵浦阈值增大, 效率降低。

一般而言, 输出功率是透过率和泵浦长度的函数, 即:

$$P_{out} = f(L, \eta) \quad (11)$$

当泵浦功率一定时, 最佳的输出透过率 η_{opt} 和最佳泵浦长度 L_{opt} 分别由下式决定:

$$\frac{\partial P_{out}}{\partial \eta} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial P_{out}}{\partial L} = 0 \quad (12)$$

或等价地有(8), (9) 和(10) 式进行数值求解, 通过作图法得出。

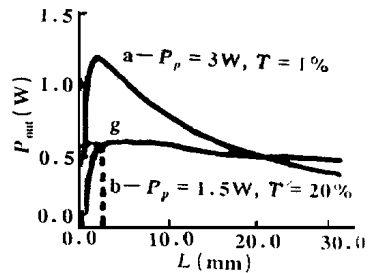


Fig. 4 The output power P_{out} of a Nd:YVO₄ laser as function of the medium length, the calculation parameters are pumping power and transmissivity, g —the output power of [4] when $P_p = 1.5W$, $T = 12\%$ and $L = 2.5mm$

2. Nd:YVO₄ 的最佳激活长度比 Nd:YLF 和 Nd:YAG 都要短, 在透过率较小时(0.01~0.05) 当泵浦长度超过最佳值时其输出功率降低速率比 Nd:YAG 和 Nd:YLF 要快。这主要是

由于 Nd:YVO₄ 晶体基质自身有敏化作用和本身的吸收系数较大,因此,可以在很短的介质中充分吸收泵浦能量而达到最佳泵浦。

Table 2 A comparison between the numerical calculations and experimental results of Nd:YAG and Nd:YVO₄

medium	medium length	transmissivity	pumping power	experimental results	calculational data
YAG ^[3]	10mm	0.027	1.63W	0.65W	0.58W
YAG ^{**}	5mm	0.03	0.29W	0.098W	0.08W
YVO ₄ ^[4]	2.5mm	0.12	1.5W	0.837W	0.738W

** 我们自己的实验参数

3. 当泵浦功率一定时,随透过率的增大,输出功率与激活长度的关系曲线随透过率的增大而变得平坦。为了便于比较,将文献[3],[4]中的参数代入进行计算,得到图2中c和图4中b两条曲线,q,g为文献中的数据。图2中曲线d为代入我们在最佳化情况下的实验参数所得的计算结果,p为实验测定点,实验采用了国产LD,当输出功率为0.29W时,通过数值孔径为0.6的自聚焦光纤耦合后,泵浦一端镀808μm增透、1064μm的高反膜,另一端镀808μm高反、而1064μm的透过率为0.03的f5mm×5mm Nd:YAG晶体,得到0.105W的激光输出。图2中的a和b、图3和图4中的a是代入表1的参数在不同的透过率的情况下所得到的。其参数、实验值与理论计算值列入表2中。从表2可知,理论计算值和实验值之间有一定的误差(约12%),产生误差的主要原因有:从文献中查出的参数有误差;实验条件不同所测得的实验结果也有一定的差别;计算迭代中取值精度的不同也要产生误差。但在总体上来看,在误差范围内符合甚好。

三、结 束 语

作者建立了激光二极管固态激光器的两个重要参数:激活介质长度和透过率的优化模拟设计模型,理论值与实验值进行了对比,虽有一定的误差,但在误差范围内符合甚好,这说明计算模型是正确的,计算结果是可行的。

参 考 文 献

- 1 Fan T Y, Byer R L. IEEE J Q E, 1987; QE23(5): 605
- 2 Edison P M, Nilson D Y Jr. J O S A, 1995; B12(12): 2482
- 3 巩马理,万作文,金峰 *et al.* 光学学报, 1994; 14(2): 143
- 4 金天峰,袁谦,缪同群 *et al.* 光学学报, 1996; 16(5): 598

作者简介:邵怀宗,男,1969年出生。硕士。现主要从事激光物理和激光技术的研究工作。

收稿日期:1997-06-12

• 产品简讯 •

二极管激光器

美国加利福尼亚州的 Mesh Tel 公司推出一种激光二极管组件,在热稳定隔离壳中置易调整光束整形元件。这种“Aoptics”组件,包括有发射指示器,完全校准的二极管驱动元件,调焦元件和反向输入电压极性保护等标准特性。可选配强度或频率调制和防护玻璃窗。

中尧 马理 供稿