

文章编号: 1007-5461(2003)04-0415-04

二极管端面泵浦 Nd:YAG 946 nm 激光器理论分析

杜建新¹, 张风传², 何京良¹

(1 山东师范大学物理系现代光学实验室, 济南 250014);

(2 临沂师范学院计算机科学系, 临沂 276000)

摘要: 利用激光谐振腔处于稳态时的速率方程导出了准三能级 Nd:YAG 946 nm 起振时透射损耗与最佳激光晶体长度的关系, 直观地给出了其计算机模拟。在与 1064 nm 透射损耗相比较的基础上, 形象给出了一系列情况下的最低镀膜要求, 并且模拟了激光阈值、输出功率和各种损耗及泵光光斑大小的关系, 为设计室温下高效运转的 946 nm 激光器提供了必要的理论数值参照。这种分析方法对研究此类低增益, 准三能级或三能级激光系统输出特性有借鉴意义。

关键词: 准三能级; 最佳激光晶体长度; 阈值比较

中图分类号: TN248.1+3; O439 **文献标识码:** A

1 引言

结构紧凑、性能稳定的蓝色激光器在光存储、彩色显示、水下通讯和光测量方面有重要应用。在红、绿、蓝三种激光器中, 蓝色激光器特别是全固态蓝色激光器的发展比较缓慢, 其主要原因是用在倍频产生全固态蓝色激光的 Nd^{3+} 发射谱线 ${}^4\text{F}_{3/2} - > {}^4\text{I}_{9/2}$ 在 946 nm 附近, 它的增益较低, 且又是准三能级结构, 故激光器的效率较低, 阈值较高。最近有报导利用 LBO 和 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 作为倍频晶体腔内倍频 Nd:YAG 946 nm 获得高功率的蓝光输出^[1~3]。但相对红绿激光器来说, 全固态蓝光激光器的技术并不十分成熟。为设计更佳方案获得更高功率、更高效率的蓝光输出, 本文对产生 946 nm 激光的其中几个关键环节进行了讨论: 最佳激光晶体长度、最低镀膜要求、阈值和输出功率大小, 并进行了直观的数值模拟。

2 理论分析

Nd:YAG 是一种性能优良的激光晶体。它主要有 946 nm、1.064 nm、1319 nm 三条发射谱线, 分别对应从 ${}^4\text{F}_{3/2} - > {}^4\text{I}_{9/2}$ 、 ${}^4\text{F}_{3/2} - > {}^4\text{I}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{3/2} - > {}^4\text{I}_{13/2}$ 的跃迁。对于 ${}^4\text{F}_{3/2} - > {}^4\text{I}_{9/2}$ 跃迁, 它的谱线相应能级结构^[4]如图 1 所示, 其中 f_i 为室温下低能级或高能级上的粒子数分别占所在的多重态上总粒子数的比例, 由玻耳兹曼分布决定。

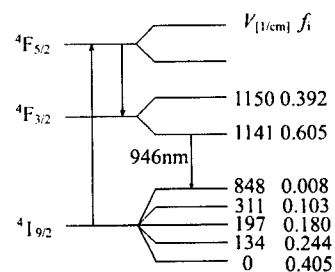


Fig.1 Energy-level of Nd:YAG at 946 nm

基金项目: 山东省教育厅科技应用项目。

收稿日期: 2002-12-02; 修改日期: 2002-12-18

E-mail: jianxindu999@hotmail.com

由二极管激光端泵 Nd:YAG 且激光谐振腔处稳态时的速度方程为可导出准三能级和四能级的阈值公式^[5]:

$$P_{th3} = \frac{\pi h\nu_P(w_L^2 + w_P^2)(L + T_3 + 2N_1^0\sigma_3l)}{4\sigma_3\tau_f\eta_{P3}\eta_a(f_1 + f_2)}, \quad (1)$$

$$P_{th4} = \frac{\pi h\nu_P(w_L^2 + w_P^2)(L + T_4)}{4\sigma_4\tau_f\eta_{P4}\eta_a}, \quad (2)$$

其中各物理量的意义如下: P_{th3} 为泵浦准三能级的阈值, P_{th4} 为泵浦四能级的阈值. τ_f 为增益介质上能级荧光寿命, σ_3 为 964 nm 受激发射截面, σ_4 为 1064 nm 受激发射截面, L 为腔内除透射损耗以外完成一次循环的总损耗, l 为激光晶体的长度; T_3 和 T_4 为透射总损耗, f_1 和 f_2 分别为 946 nm 能级上室温下低能级和高能级上的粒子数分别占所在的多重态上总粒子数的比例. N_1^0 为泵浦光为零时, 低能级上粒子数密度, $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_P l)$, η_P 为量子效率, P_P 为入射到增益介质表面的泵浦功率, α_P 为增益介质对泵浦光的吸收系数, $h\nu_P$ 为泵浦光的光子能量, $h\nu_L$ 为振荡光的光子能量. W_L 为介质内振荡光的束腰半径, w_P 为介质内泵浦光的光斑半径. 利用 (1) 式得出三能级阈值最小时的晶体长度满足:

$$\alpha \exp(-\alpha l) \left(\frac{2\sigma_{946}N_1^0}{\alpha} + L + T_3 + 2\sigma_3N_1^0l \right) - 2\sigma_3N_1^0 = 0. \quad (3)$$

我们称此时的晶体长度为最佳激光晶体长度. 为了抑制 1064 nm 的振荡必须有 $P_{th4} > P_{th3}$, 则 T_4 的最小值:

$$T_{4min} = \frac{\sigma_4\eta_{P4}(L + T_3 + 2N_1^0\sigma_3l)}{\sigma_3\eta_{P3}(f_2 + f_1)} - L. \quad (4)$$

由腔内基模振荡光所满足的稳态方程^[5], 我们进一步给出了积分后的表达式:

$$fFS - F\ln(1 + fS) - BS\ln(1 + fS) - fS^2 = 0. \quad (5)$$

上式各量含义: $B = \frac{2N_1^0\sigma_3l}{L + T_3}$, $F = \frac{4P_P\tau_f\sigma_3\eta_a}{\pi h\nu_P w_L^2(L + T_3)}$, $S = \frac{2c\sigma_3\tau_f\Phi}{n\pi w_L^2 l}$, $f = f_1 + f_2$, $\Phi = \frac{2nlP_L}{ch\nu_L}$, $P_{out} = P_L T_3^0$, n 为激光晶体的折射率, c 为真空中的光速, Φ 为腔内振荡光的光子数, P_L 为单向的激光功率, P_{out} 为 946 nm 的输出功率, T_3^0 为输出镜上 946 nm 透过率.

3 计算机模拟 946 nm 激光起振条件

以下的讨论中总条件不变:

它取: $f_2 = 0.605$, $f_1 = 0.008$, σ_3 ^[6] = $3.8 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, σ_4 ^[6] = $2.7744 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, $\tau_f = 2.43 \times 10^{-8} \text{s}$, 当掺杂浓度为 1% 时, $N_1^0 = 1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $\alpha_P = 5 \text{cm}^{-1}$.

1) 对透射总损耗 T_3 、最低透射总损耗 T_{4min} 和最佳激光晶体长度的关系进行模拟, 图 2、图 3 和图 4 的 L 分别设为 0.01、0.02、0.03.

2) 取 $W_P = W_L$, 且光腰分别取 500 μm 、600 μm 、700 μm . 对准三能级的阈值 P_{th3} 和最佳激光晶体长度的关系进行模拟, 损耗 L 设为 0.01 时, 得图 5.

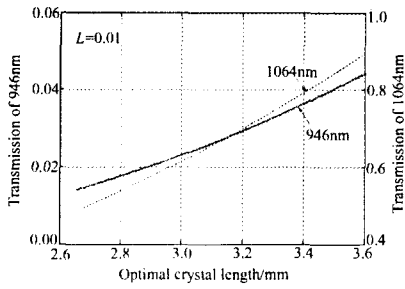


Fig.2 The relation between optimal crystal length and total output transmission when L is equal to 0.01

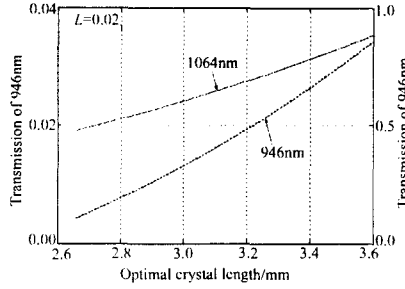


Fig.3 The relation between optimal crystal length and total output transmission when L is equal to 0.02

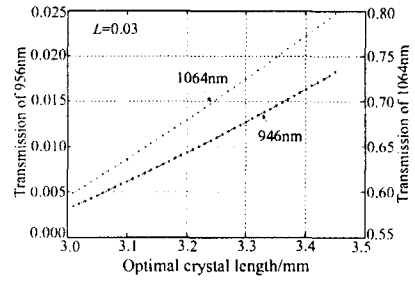


Fig.4 The relation between optimal crystal length and total output transmission when L is equal to 0.03

4 计算机对输出功率及其相关量的数值关系模拟

利用 (5) 式, 且 n 设定为 1.5, $W_P = W_L$, T_3^0 近似取为 T_3 时进行讨论:

损耗参数 L 设为 0.02, 由图 3 在最佳晶体长度为 2.8 mm、3 mm、3.2 mm 时, 946 nm 的总透过率分别为 0.008、0.015、0.02, 相应的 1064 nm 的总透过率至少应分别为 0.51、0.61、0.70, 并取 $W_L = 600 \mu\text{m}$, 在此条件下对泵浦功率和输出功率关系进行讨论得图 6, 其中 a 、 b 、 c 分别对应最佳晶体长度为 2.8 mm、3 mm、3.2 mm 时。

损耗参数 L 设定为 0.03, 由图 4 在最佳晶体长度为 3 mm、3.2 mm、3.4 mm 时, 946 nm 的总透过率分别为 0.004、0.01、0.016, 相应的 1064 nm 的总透过率至少应分别为 0.6、0.65、0.77, 并取 $W_L = 600 \mu\text{m}$, 在此条件下对泵浦功率和输出功率关系进行讨论得图 6, 其中 a 、 b 、 c 分别对应最佳晶体长度为 3 mm、3.2 mm、3.4 mm 时。

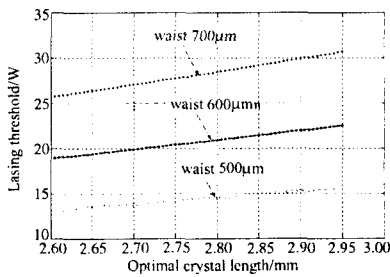


Fig.5 The relation between optimal crystal length and lasing threshold of 946 nm when L is equal to 0.01

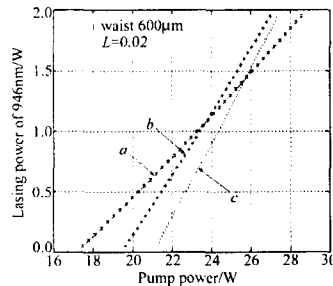


Fig.6 The relation between pump power and laser output power with different optimal crystal length

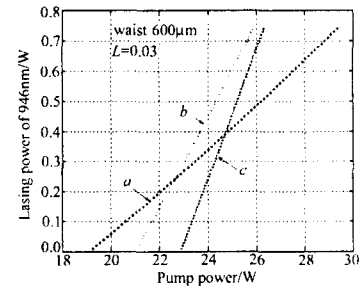


Fig.7 The relation between pump power and laser output power with different optimal crystal length

5 结 论

除了直接提供理论数值参考外, 对以上几个图的分析可以得到以下几个结论:

- 1) 减小腔损耗参数 L 可以较大地降低对镀膜的要求。
- 2) 单从降低阈值的角度分析, 应选择最佳激光晶体长度, 但是最佳激光晶体长度却不一定有最高的光学斜效率。选择激光晶体长度时, 要兼顾降低阈值和提高光学斜效率两个因素。
- 3) 不同最佳激光晶体长度之间相比较, 它们对应的光学斜效率以及阈值的大小有较大差异。最佳激光晶体长度较小时阈值较小, 但是光学斜效率也较小。

我们拟就腔损耗参数 $L=0.02$, 最佳激光晶体长度为 3 mm, 946 nm 透射总损耗为 1.5%, 这时对 1064 nm 的透射总损耗至少超过 70% 进行实验, 可望得到高效的 946 nm 激光输出。

上述各图数据只提供类比参照, 由于实际问题可能与本论文模拟的前提条件不一样, 各个参数最终选择必须依照具体的情况进行具体运算。

参 考 文 献

- 1 Pierrou M, Laurell F. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(4): 205-208
- 2 Wang C Q, Reekie L. Efficient blue light generation from a diode laser pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt. Comm.*, 1999, 167: 155-158
- 3 Zeller P, Peuser P. Efficient multiwatt continuous-wave laser operation on the $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$ transition of Nd:YVO₄ and Nd:YAG [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(1): 34-35
- 4 Fan T Y, Byer R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, 23(5): 605-611
- 5 Risk W P. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting resorption losses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, 5(7): 1412-1423
- 6 Barness N P, Walsh B M. Spectroscopy and lasing characteristics of Nd-doped Y₃Ga_xAl_(5-x)O₁₂ materials: application toward a compositionally tuned 0.94 μm laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, 15(11): 2794-2801

Theoretical Analysis of the Operation at 946 nm of Nd:YAG Longitudinally Pumped with Diode Laser

Du Jianxin¹, Zhang Fengchuan², He Jingliang¹

(1 Modern Optical Laboratory, Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014 China);

(2 Department of Computer, Linyi Teachers University, Linyi 276000 China)

Abstract: Numerical modeling has been given to describe the relation between optimal crystal length and the transmission of 946 nm output. The equation had been derived of the laser rate formula of the steady-state case in the laser cavity. By comparison of the output transmission between 946 nm and 1064 nm, we give a series of diagrams which describe the minimized claims to coat in many cases. How the concerned factors influence the 946 nm lasing threshold and its output power has also been given. All the results will be useful for more efficient operation at 946 nm of Nd:YAG. The methods adopted to deal with the low gain and quasi-three-level or three-level system will be enlightening.

Key words: quasi-three-level; optimal crystal length; contrasting threshold

杜建新 (1972 -), 男, 硕士生。主要从事二极管泵浦的固体激光器与激光频率变换研究。