

全固态连续波 Yb:YGG 激光器的理论与实验

吕亮¹, 张永东², 王军利¹, 张治国², 魏志义^{1,2}, 张怀金³

- (1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710126 ;
2. 中国科学院物理研究所 光物理重点实验室, 北京 100190 ;
3. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要: Yb:Y₃Ga₅O₁₂(Yb:YGG)晶体是具有优异光谱特性和热力学性能的一种新型激光增益介质。利用准三能级系统速率方程,对激光二极管纵向泵浦的全固态连续波 Yb:YGG 激光的输出特性进行了理论分析和数值计算。在此基础上设计并进行了该激光的实验研究,采用最佳透过率 6%的输出镜,在 6.8 W 泵浦下得到了 2.3 W 的最大功率,实验结果与理论分析结果吻合,对应中心波长为 1 037 nm,最大斜效率达 71.8%。

关键词: 激光二极管泵浦; Yb:YGG 激光器; 准三能级系统

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)03-0596-05

Theory and experiment of all solid-state CW Yb:YGG lasers

Lv Liang¹, Zhang Yongdong², Wang Junli¹, Zhang Zhiguo², Wei Zhiyi^{1,2}, Zhang Huaijin³

- (1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. State Key Laboratory of Crystal Material and Institute of Crystal Material, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Laser diodes have attracted great attention in all solid state lasers because they guarantee a compact, cost-efficient, and reliable system. Ytterbium (Yb) doped rare-earth garnet Y₃Ga₅O₁₂(Yb:YGG) crystal is one of the ideal new laser gain materials because of the wide emission band and excellent thermal conductivity. According to the rate equation of quasi-three-level system, the output characteristic of longitudinally pumped continuous wave(CW) Yb:YGG solid state laser was theoretically analyzed. The relationship between incident pump power and output power based on output coupler(OC) was numerically calculated without considering the re-absorption loss. Based on this work, a LD pumped Yb:YGG CW laser was experimental carried out with three different OC. With the optimum transmission 6%(OC), laser average output power up to 2.3 W was obtained with the incident power 6.8 W, which was well agreement with the numerical result. The laser operated at central wavelength of 1 037 nm with maximum slope efficiency of 71.8%.

Key words: laser diode pumped; Yb:YGG laser; quasi-three-level system

收稿日期:2011-07-16; 修订日期:2011-08-19

基金项目:国家自然科学基金(10874237)

作者简介:吕亮(1988-),男,硕士生,主要从事二极管泵浦的新型全固态超快激光的产生研究。Email:lvrongliang1988@gmail.com

导师简介:魏志义(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事超强超短脉冲激光及新型全固态激光方面的研究。

Email:zywei@aphy.iphy.ac.cn

0 引言

在固体激光研究中,相对于掺 Nd³⁺的激光介质^[1],以 Yb³⁺作为激活离子的激光介质具有明显的优点:无交叉弛豫振荡和激发态的吸收、高的量子效率和低的量子缺陷、长的荧光寿命、较宽的发射带宽、支持高浓度的掺杂。由于上述特性,掺 Yb³⁺的激光介质得到广泛的研究^[2-4],典型的 Yb:YAG 晶体已被用来获得高的输出功率和超短脉冲。与 Yb:YAG 类似,Yb:Y₃Ga₅O₁₂ (Yb:YGG)作为这类激光晶体介质家族中的一种新晶体,同样表现出良好的光谱性能、优异的光学、热力学和机械性能^[5],其在 970 nm 主吸收峰的半宽为 2 nm, 适合半导体激光泵浦,并具有大的吸收截面。所不同的是,Yb:YGG 受激辐射跃迁中心波长 1 025 nm 处的带宽近 22 nm,是 Yb:YAG 的 4 倍,支持亚百飞秒的激光输出,是理想的超短脉冲激光晶体,并已实现了 245 fs 的全固态 Yb:YGG 锁模激光输出^[6],光光转化效率为 10%。

Yb³⁺离子基态 ²F_{7/2} 和激发态 ²F_{5/2} 在晶格场作用下,分别分裂为 4 个和 3 个子能级,形成准三能级激光运行机制。对于准三能级机制,人们在建立模型方面做了大量的工作^[7-10],而且进一步优化了激光器参数,如激光晶体掺杂浓度和长度^[11]、泵浦光光强分布^[12]、温度对阈值和效率的影响^[13]等。为了更全面地研究 Yb:YGG 晶体的激光特性,优化全固态 Yb:YGG 激光器参数设计,文中从准三能级系统速率方程出发,利用 Yb:YGG 晶体的光谱数据对纵向泵浦连续波 Yb:YGG 激光器的输出功率进行理论计算,并参考计算结果开展了相应的实验研究。结果表明:Yb:YGG 是一种理想的激光晶体,且理论分析与实验结果符合地很好。

1 准三能级运行机制的理论分析

图 1 是 Yb³⁺离子跃迁示意图。Yb³⁺的电子构型为 4f¹³, 仅有两个电子态,即基态 ²F_{7/2} 和激发态 ²F_{5/2}。晶体中强的晶体场作用导致 Yb³⁺离子的 Stark 能级分裂,激发态分裂为 3 个子能级,其中 u₁ 作为激光的上能级;基态分裂形成 4 个子能级,总分裂能级仅为 1 007 cm⁻¹,其中 l₃ 作为激光下能级,形成准三能级激光运行机制。

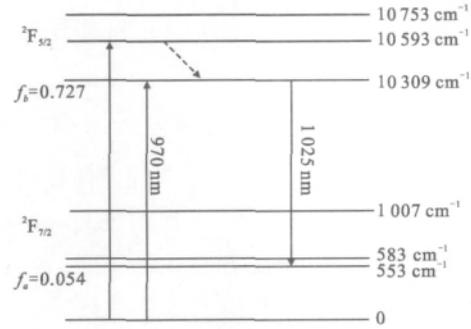


图 1 Yb³⁺离子跃迁示意图
Fig.1 Energy level diagram of Yb³⁺ ion

假定泵浦光和腔内激光均为基模高斯光束并忽略其在晶体内的发散损耗及晶体内的空间烧空效应的影响,在泵浦光两次通过晶体的情况下,连续激光器的反转粒子数速率方程^[7]为:

$$\frac{d\Delta N(r, z)}{dt} = fRr_p(r, z) - \frac{\Delta N(r, z) - \Delta N^0}{\tau} - \frac{fc\sigma\Delta N(r, z)}{n} \Phi\phi_0(r, z) = 0 \quad (1)$$

式中: $\Delta N(r, z) = N_b(r, z) - N_a(r, z)$ 为上下能级粒子数密度之差,当泵浦功率为零时, $\Delta N^0 = N_b^0 - N_a^0$, 在热平衡条件下, $\Delta N^0 \approx -N_a^0 (N_b^0 \ll N_a^0)$; $f = f_a + f_b$, f_a, f_b 为下子能级 l₃ 和上子能级 u₁ 上的粒子数分别占多重态 ²F_{7/2} 和 ²F_{5/2} 上总粒子数的比例; τ 为激光上能级的荧光寿命; c 为真空中的光速; σ 为受激发射截面; $R = P_p \eta_a \eta_l / (h\nu_p)$ 为泵浦速率,其中 η_l 为被吸收的光子数转换为激光上能级粒子数的效率, $P_p \eta_a = P_p [1 - \exp(-\alpha l)] [1 + (1 - T) \exp(-\alpha l)]$ 为考虑泵浦光两次通过晶体时激光晶体吸收泵浦光的功率, h 为普朗克常数;若 $T \approx 1$, 即为 Fan^[8]和 Risk^[9]讨论的泵浦光单次通过激光晶体的情况; $\Phi = 2nlP_l / (ch\nu_l)$ 为腔内激光光子数。其速率方程为^[9]:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iint \Delta N(r, z) \Phi\phi_0(r, z) dV - \frac{\Phi}{\tau_c} = 0 \quad (2)$$

式中: $\tau_c = 2nl / (c\delta)$ 为腔内激光光子寿命,其中 $\delta = 2L + T$ 为光在腔内往返一次的损耗, L, T 分别为谐振腔的单程衍射损耗和输出镜的透过率。定义 $F = \frac{4f_b\sigma\tau\eta_l}{h\nu_p\pi\omega_l\delta} P_p \eta_a$,

$S = \frac{4f_b\sigma\tau}{h\nu_p\pi\omega_l} P_l$ ^[8], 联立公式(1)、(2), 对 z 积分可得:

$$F = \frac{2 + \frac{B}{fS} \ln(1 + fS)}{f \int_0^\infty \frac{\exp[-(a^2 + 1)x]}{1 + fS \exp(-a^2 x)} dx} \quad (3)$$

式中:参数 $x = \frac{2r^2}{\omega_p^2}$ 、 $a = \frac{\omega_p}{\omega_l}$ 为泵浦光和激光束腰半径比; $B = \frac{\delta_s}{\delta} = \frac{2N_1^0 \sigma l}{\delta}$ 为晶体重吸收损耗 δ_s (${}^3F_{7/2}$ 子能级上热分布粒子数引起)和谐振腔损耗 δ 的比值。由公式(3)可以得到泵浦功率阈值。 F 、 S 的定义由 Moulton^[7] 引入,并讨论了不同 a 下 F 与 S 的关系;Fan^[8] 在考虑了重吸收损耗之后,利用 F 、 S 的关系讨论了谐振腔损耗 δ 和最佳晶体长度 l_{opt} 的关系,并给出了阈值表达式;Risk^[9] 又引入了参数 B ,讨论了 $B=0$ 和 $B \neq 0$ 的情况。文中考虑不同 a 下的情况:当 $a \leq 1$ 时,在一定透过率下不同 a 值的输入输出功率曲线基本重合,斜率效率基本保持恒定;当 $a > 1$ 时,输出功率和斜率效率曲线明显降低^[9]。取 $a=1$,则由公式(3)可得 F 、 S 的关系^[13]为:

$$1 + \frac{B}{fS} \ln(1+fS) = fF \left[\frac{1}{fS} - \frac{1}{(fS)^2} \ln(1+fS) \right] \quad (4)$$

取 $B=0$,则公式(4)简化为:

$$F = \frac{1}{f \left[\frac{1}{fS} - \frac{1}{(fS)^2} \ln(1+fS) \right]} \quad (5)$$

可得考虑强泵浦光两次通过晶体时的输出功率为:

$$P_{out} = P_l \cdot T = \frac{\pi \omega_l^2 h \nu_l S}{4 \sigma \tau} \cdot T \quad (6)$$

由公式(3)~(6)可以计算出在强泵浦时输出功率随输出镜透射率的变化,如图 2 所示($\sigma = 2.56 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\tau = 1.1 \text{ ms}$, $\eta_q = 1$, $L = 0.001$, $P_p = 6.8 \text{ W}$)。可以看出,当 $T_{out} = 6.3\%$ 时,输出功率有最大值 3.37 W。

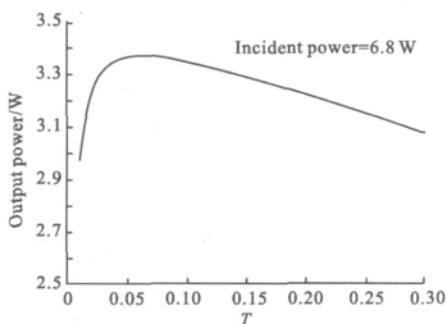


图 2 强泵浦时输出功率随输出镜透射率的变化

Fig.2 Output power versus output coupler transmission with strong pumping

2 连续运转 Yb:YGG 激光器实验及结果分析

实验采用如图 3 所示的 Z 型折叠腔结构。选用

Jenoptik 公司的商用半导体激光器 (JOLD-7.5-BAFC-105) 作为泵浦源,中心波长 970 nm,用光纤(芯径 50 μm , 数值孔径 0.22)导出,经 1:1 的耦合头对激光束进行准直后聚焦到 10% 的 Yb:YGG 晶体上,光斑半径约为 30 μm 。晶体尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm,端面镀有泵浦光波段和激光波段的增透膜。M1 为双色镜,对 970 nm 泵浦光透过率大于 95%,对 1 020~1 100 nm 波段反射率大于 99%;M2、M3 为曲率半径分别为 300、200 的凹面反射镜;M4 为平面高反镜,M2、M3 和 M4 对 1 000~1 100 nm 波段反射率大于 99%;将具有 2.5%、6%、10% 透过率的平面镜作为输出镜(OC),以进行实验比较,所用腔长约为 1.2 m。实验中,用铝箔侧面包裹 Yb:YGG 晶体并夹持在紫铜的热沉上,利用水冷系统进行循环冷却,水温维持在 7℃ 左右。利用 ABCD 矩阵对腔内光线进行追迹分析,激光束腰半径 $\omega_l = 34 \mu\text{m}$,泵浦光和激光束腰比值 $a = \omega_p / \omega_l \approx 1$ 。

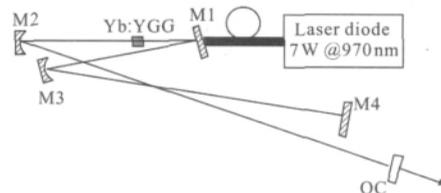


图 3 连续波 Yb:YGG 激光装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of CW performance of Yb:YGG laser equipment

图 4 为不同输出镜透过率下,实验测得的激光输出功率随泵浦功率变化的情况,并根据理论计算

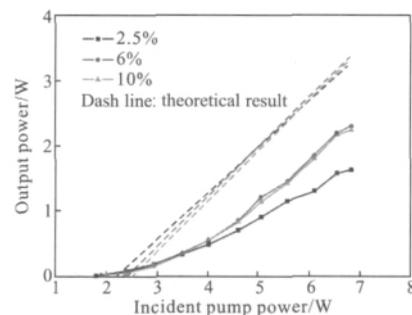


图 4 不同输出镜下连续激光输出功率随泵浦功率的变化

Fig.4 CW laser output power versus pump power with different OC

进行拟合。可以看出,相对理论计算,实验得到的输出功率曲线有所降低。因为 Yb:YGG 晶体在 1 030 nm 附近的吸收光谱和发射光谱存在部分重叠,导致激发态发出的光子被基态离子吸收,产生重吸收损耗^[14],理论模型中用参数 B 来描述。克服重吸收损耗,激光

输出功率小于理论计算值。高功率泵浦时,6%和10%输出镜输出曲线斜率效率与理论计算输出线斜率近似,说明了理论分析的正确性。

选用2.5%、6%、10%的输出镜时,在最大泵浦功率6.8 W下得到输出激光功率的实验值分别为1.63 W、2.3 W、2.24 W,对应理论值分别为3.26 W、3.37 W、3.33 W。在采用透过率为6%的输出镜时,得到最大输出功率为2.3 W,光光转化效率为51.1%,对应的斜率效率为71.8%,与理论数值模拟的最佳透射率一致,此时输出的激光光斑如图5所示。可以看出,光斑质量非常好,近TEM₀₀模,光谱如图6所示,中心波长为1037 nm。高功率输出和高斜率效率表明Yb:YGG激光晶体是一种理想的激光晶体,且输出曲线并没有明显的饱和趋势,因此进一步增大泵浦功率,可以期望获得更高功率的连续激光输出。在透过率为10%的情况下,输出功率略有降低,为2.24 W,与理论数值计算比较接近,且变化趋势吻合。当输出镜透过率为2.5%时,得到的输出功率与理论值3.26 W差别较大。笔者认为是因为此时腔内束缚光强过大,热饱和效应使得对泵浦光吸收效率减小,从而输出曲线斜率相对6%和10%输出镜的要小,说明选择合适的输出镜是非常重要的。

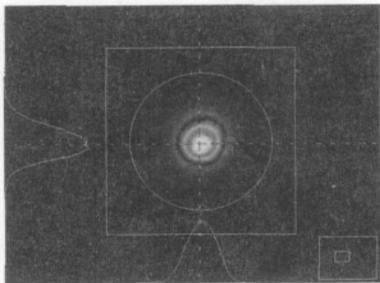


图5 最大输出功率时的光斑图

Fig.5 Spot diagram of maximum output power

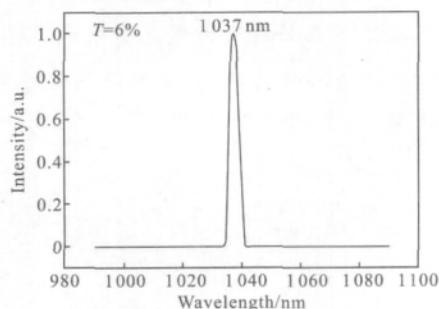


图6 最大输出功率时的光谱曲线

Fig.6 Spectrum curve of maximum output power

3 结论

文中介绍了一种适合于纵向泵浦Yb:YGG全固态激光器连续运转输出功率的理论计算方法,结果表明在选择合适透过率的情况下可以获得最大输出功率。实验中利用970 nm的半导体激光器作为泵浦源,实现了高效率连续波Yb:YGG激光器运转,并根据理论计算的结果,选用2.5%、6%和10%3种不同透过率的输出镜比较研究了激光输出特性,在泵浦功率为6.8 W时,透过率6%的输出镜获得了2.3 W的最大输出功率,光光转化效率约为51.1%,对应的斜率效率为71.8%;而在透过率为2.5%的情况下,输出功率减小了0.6 W,说明了选择合适的输出镜透过率的重要性。比较理论计算和实验结果,两者吻合的非常好,验证了理论分析的合理性。通过进一步优化Yb³⁺离子掺杂浓度、激光晶体长度以及选用凹面输出镜以减小衍射损耗、优化腔型等措施,期望获得更大的输出功率。

参考文献:

- [1] Huang Feng, Wang Yuefeng, Niu Yanxiong. Study on thermal effects of LD end-pumped high-repetition-rate Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33 (4): 358-361. (in Chinese)
黄峰, 汪岳峰, 牛燕雄. LD端面泵浦的高重频Nd:YAG激光器的热效应研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 358-361.
- [2] Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua, et al. Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, 36 (7): 1806-1809. (in Chinese)
周斌斌, 邹育婉, 李德华, 等. 连续锁模皮秒Yb:LSO激光实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1806-1809.
- [3] You Xiali, Wang Yonggang, Xue Yinghong, et al. Passively Q-switched mode-locking in a Yb³⁺ doped double-clas fiber laser with transmission type SESAM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(6): 673-675. (in Chinese)
游小丽, 王勇刚, 薛迎红, 等. 透射式SESAM实现掺Yb³⁺光纤激光器被动调Q锁模[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 673-675.
- [4] Xue Yinghong, Wang Qingyue, Chai Lu, et al. Computation of optical characteristic on a novel all-solid-state Yb:YAB laser of LD pumped [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 125-128. (in Chinese)

- 薛迎红, 王清月, 柴路, 等. LD 泵浦的新型全固态 Yb:YAB 激光器光学特性的计算[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(2): 125-128.
- [5] Yu Haohai, Wu Kui, Yao Bin, et al. Growth and characteristics of Yb doped $Y_3Ga_5O_{12}$ laser crystal [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(12): 1689-1695.
- [6] Zhang Yongdong, Wei Zhiyi, Zhou Binbin, et al. Diode-pumped passively mode-locked Yb:Y₃Ga₅O₁₂[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3316-3318.
- [7] Moulton P F. An investigation of the Co:MgF₂ laser system [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1985, 21: 1582-1595.
- [8] Fan T Y, Byer R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, 23(5): 605-612.
- [9] Risk W P. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting re-absorption losses [J]. *J Opt Soc Am B*, 1988, 5(7): 1412-1423.
- [10] Sato A, Asai K, Itabe T. Double-pass-pumped Tm:YAG laser with a simple cavity configuration [J]. *Applied Optics*, 1988, 37: 6395-6400.
- [11] Maldonado E P, Vieira N D. Optimization of the active medium length in longitudinally pumped continuous-wave laser [J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, 12(12): 2482-2485.
- [12] Taira T, Tulloch W M. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers [J]. *Applied optics*, 1997, 36(9): 1867-1874.
- [13] Li Cheng, Huo Yujing, He Shufang, et al. Theoretical study on longitudinally pumped Tm:YAG lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(11): 1473-478. (in Chinese)
李成, 霍玉晶, 何淑芳, 等. 纵向泵浦 Tm:YAG 激光器的理论研究[J]. 光学学报, 1998, 18(11): 1473-478.
- [14] Zhang Xinlu, Wang Yuezhu, Li Li, et al. Theoretical and experimental investigation of optical bistability in end-pumped Tm, Ho:YLF lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 964-969. (in Chinese)
张新陆, 王月珠, 李立, 等. 端面抽运 Tm, Ho:YLF 激光器双稳特性的理论分析与实验研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(2): 964-969.

下期预览

自由空间光通信中的空时网格码

柯熙政, 解孟其, 高海涛

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 讨论了无线激光通信中的空时网格码(Space Time Trellis Code, STTC)。首先设计了带有两副发射天线的 4PPM-空时网格码的编码器, 介绍了其设计原理和编译码方法; 其次对多输入多输出 (multiple-input and multiple-output, MIMO) 大气光信道的信道容量进行了理论分析, 最后通过蒙特卡罗算法对光信道容量和误码率进行了仿真验证。结果表明: 基于空时网格码的自由空间光通信能够减小闪烁效应对大气光通信中误码率的影响; 当发射天线数目固定不变时, 系统误码率随着接收天线数目的增加而得到改善; 当收发天线数目可变时, 系统信道容量随着收发天线数目的增加而增大。