

文章编号: 1007-6654(2005)02-0088-05 (2)

激光二极管泵浦的高效、单频 Nd:YVO₄ 激光器

郑耀辉, 张宽收

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 对激光二极管端面泵浦的单频 Nd:YVO₄ 激光器进行了研究, 研究了不同输出耦合率情况下输出功率随泵浦功率的变化曲线及光-光转化效率随输出耦合率的变化曲线, 实验结果与理论分析结果基本一致。当泵浦功率为 2.2 W 时, 得到瓦级单频 1064 nm 激光输出, 最高光-光转化效率为 47.2%。

关键词: 激光二极管泵浦; 高效率; 单频激光

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

激光二极管泵浦的全固化激光器, 具有高效率、长寿命、体积小、频率稳定、光束质量好等优点。特别是全固化单频激光器在相干信息处理、频率计量、量子信息、引力波测量、激光雷达、参量振荡及压缩态光场产生等领域有广泛应用^[1-4]。2000 年山东大学用 20 W 半导体二极管泵浦 Nd:YVO₄ 晶体获得 11 W 的 TEM₀₀ 模 1064 nm 激光输出^[5], 最大斜效率达 64%。但是单纵模激光器由于内腔损耗较大, 转化效率普遍比单横模激光器低, 现已有多种方法能使激光器达到单纵模运转。例如用扭转模腔^[6]、短腔谐振^[7]、用标准具选模^[8]等。但只有使用环形谐振腔, 通过在谐振腔中插入光学单向器使激光器单向运转, 才可以实现精密的选模^[9]。目前单频激光器的研究主要集中在提高输出功率, 提高转换效率和提高光束质量三个方向。K. I. Martin^[10]采用环形行腔得以 5.4 W 单频输出, 光-光转化效率达

25.2%。山西大学光电研究所^[11]用类似的方法获得了最大输出功率为 2 W, 光-光转换效率为 33.3% 的单频 1064 nm 激光器。

本文在估算出 Nd:YVO₄ 激光器内腔损耗和小信号增益系数的基础上, 理论上分析了激光器输出耦合镜的最佳透射率, 实验研究了在不同输出耦合镜透射率下, 激光器的输出功率和光光转换效率。当激光器输出镜透射率为 4.9% 时, 用 2.2 W 的激光二极管泵浦源产生了瓦级单频 1064 nm 激光输出, 最大光-光转化效率为 47.2%。

1 理论分析

激光二极管泵浦的固体激光器由于其泵浦波长一般位于增益介质的吸收带内, 具有较高的转换效率, 决定激光效率的参数有泵浦光束与激光模式在增益介质中的交叠度, 腔的内腔损耗及光功率输出耦合率。本文主要从腔的内腔损耗和输出镜透射率

(2) 收稿日期: 2005-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(No.: 60478007); 山西省青年科学基金(No.: 20031005); 回国留学人员基金项目
作者简介: 郑耀辉(1979-)男, 山西石楼人, 山西大学光电研究所教师, 研究方向: 激光技术。

通讯联系人: kuanshou@sxu.edu.cn

入手,分析激光器的转化效率。根据激光器的一般理论,内腔损耗越小,激光器的光-光转化效率越高,在内腔损耗和激光器的泵浦功率一定的情况下,激光器的输出耦合镜在最佳透射率时,该激光器达到最大光-光转化效率。

光学谐振腔的内腔损耗主要包括由腔镜的不完全反射引起的损耗、非激活介质吸收、散射、几何偏折损耗、衍射等的损耗。前两者是激光器件本身的原因引起的损耗,是固定的。而后两者是不固定的,需通过谐振腔的设计和调整来优化。我们选用“8”字形四镜环行谐振腔结构,尽量减小了光在各个腔镜表面的入射角度,来达到减小内腔损耗的目的。为了确定激光器的小信号增益系数 g_0 和内腔损耗 L 我们分别选用对 $1.064 \mu\text{m}$ 的透射率为 4%、6%、8.9% 的部分反射镜作为激光器的输出耦合镜,测量激光器的泵浦阈值功率,测量结果如图 1 所示。利用图 1 和 Findly-Clay 关系

$$g_0 l = K P_{in} \quad (1)$$

其中: l 激光增益介质的长度, K 是图 1 中拟合直线的斜率, P_{in} 是激光器的泵浦功率。可以推算出激光器的内腔损耗为 1.05%, 在泵浦功率 2.2 W 下的小信号增益为 0.1998。

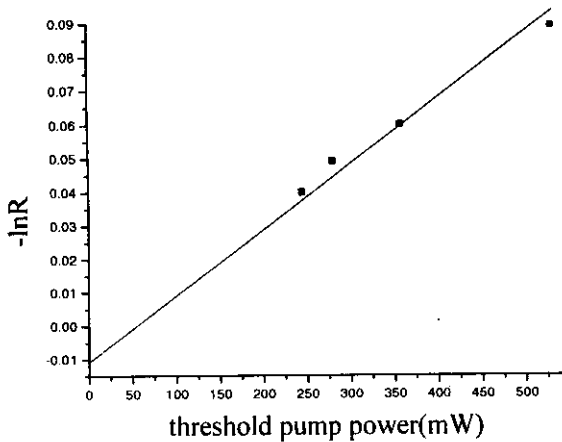


图 1 阈值泵浦功率随输出镜透射率的变化曲线

Fig. 1 Transmission rate of output mirror versus the threshold

$$P_{out} = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{L - \ln R} - 1 \right) = A \left(\frac{1-R}{1+R} \right) I_s \left(\frac{2K P_{in}}{L - \ln R} - 1 \right) \quad (2)$$

其中: I_s 激光增益介质的饱和光强,为材料参量, A 为激光介质的横截面, R 为输出耦合镜的反射率, P_{in} 是泵浦功率。

由公式(2)可以推算出,激光器输出耦合镜的最佳透射率为:

$$(1-R)_{opt} = (\sqrt{2g_0 l / L} - 1)L \quad (3)$$

由公式(3),可以得到在泵浦功率 2.2 W 下,激光器输出耦合镜的最佳透射为 $T=5.2\%$ 时,此时激光器的光-光转化效率最高。

2 实验装置

激光二极管泵浦的单频 Nd :YVO₄ 激光器的实验装置如图 2 所示。泵浦源采用相干公司生产的半导体激光器最大输出功率 2.5 W, 25℃ 下中心波长为 808 nm。从半导体激光器发出的光束经整形、聚焦系统后入射在激光晶体 Nd :YVO₄ 上, M_1 、 M_2 为平面镜、 M_3 、 M_4 为凹面镜, M_1 为输入耦合腔镜同时对 $1.064 \mu\text{m}$ 高反 ($R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$)、808 nm 高透 ($T_{808 \text{ nm}} > 90\%$), M_3 、 M_4 分别是高反射率腔镜 ($R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$)、 M_2 为输出耦合腔镜、对 $1.064 \mu\text{m}$ 透射率分别为 4%、4.9%、6%、8.9%。Nd :YVO₄ 晶体的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、掺杂浓度为 0.5 at%。Nd :YVO₄ 晶体的两个端面分别镀对 1064 nm 减反介质膜以减少插入损耗,输入端同时镀对 808 nm 减反膜以减少泵浦光的传输损耗。由于 Nd :YVO₄ 晶体是单轴晶体,平行于光轴方向的激光发射截面是垂直于光轴方向的 4 倍^[9],激光器的输出光是线偏振光,由置入磁铁中的 TGG 晶体和 $\lambda/2$ 波片组成光学单向器,使激光器单频运转。利用自制的控温仪(控温精度为 0.01℃)控制激光二极管的温度,使它的输出波长与在 Nd :YVO₄ 晶体的吸收带严格匹配。

激光器输出功率的一般表达式为^[12]:

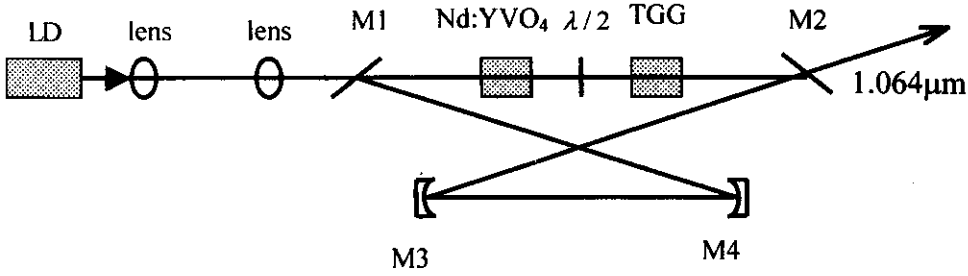


图 2 实验装置图

Fig. 2 Setup of the experiment

3 实验结果和分析

图 3-6 为在不同输出镜透射率下得到的输出功率随输入功率的变化曲线,图 7 为激光器的光-光转化效率随输出镜透射率的变化曲线。图中离散点为实验测量值,实线为根据公式(2)计算得出的理论曲线,实验结果与理论预测基本吻合。当输出耦合镜的透射率为 4% 时,激光器的阈值泵浦功率为 245 mW,在 2.2 W 泵浦功率下激光器的最大输出功率为 1.01 W,光光转换效率为 45.9%;当输出耦合镜的透射率为 4.9% 时,激光器的阈值泵浦功率为 280 mW,在 2.2 W 泵浦功率下激光器的最大输出功率为 1.04 W,光光转换效率为 47.3%;当输出耦合镜的透射率为 6% 时,激光器的阈值泵浦功率为 357 mW,在 2.2 W 泵浦功率下激光器的最大输出功率为 1.01 W,光光转换效率为 45.9%;当输出耦合镜的透射率为 8.9% 时,激光器的阈值泵浦功率为 530 mW,在 2.2 W 泵浦功率下激光器的最大输出功率为 0.9 W,光光转换效率为 40.9%。由实验结果可以看出激光器的阈值泵浦功率和斜效率都随输出镜透射率的增大而增大,但光光转换效率存在一最大值,即激光器存在最佳输出镜透射率。由理论分析可以得到我们研制的激光器的输出镜的最佳透射率为 5.2%,但由于腔镜镀膜中的困难,不容易得到理想的定点反射率,在实验中,在输出镜的透射率为 4.9% 时,激光器实现最高的光-光转化效率。

在激光器输出功率为 1 W 时,我们用自由光谱范围为 750 MHz、精细度为 200 的共焦 F-P 参考腔

监视输出激光的纵模模式,得到如图 8 所示的透射曲线,可以看出激光器单频运转。用 NI 公司生产的采集卡结合 Labview 编写的采集程序记录了激光器的长期功率稳定性,如图 9 所示,激光器在 8 小时内功率稳定性优于 0.46%。

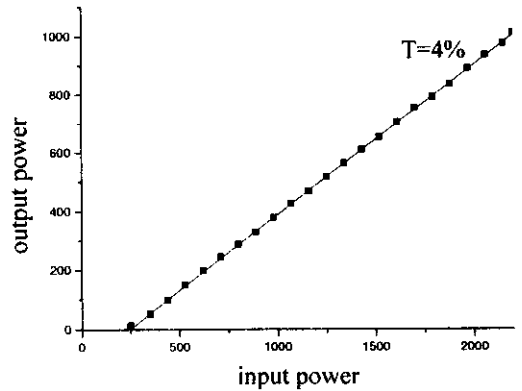


图 3 T = 4% 时输出功率随输入功率的变化曲线

Fig. 3 Output power versus input power of T = 4%

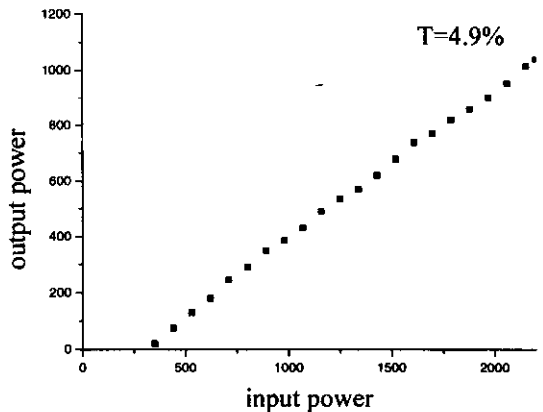


图 4 T = 4.9% 时输出功率随输入功率的变化曲线

Fig. 4 Output power versus input power of T = 4.9%

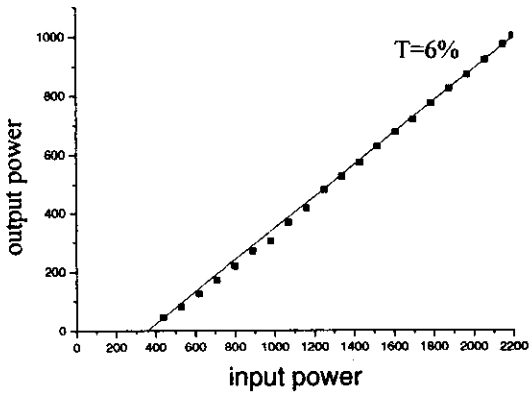


图 5 T=6%时输出功率随输入功率的变化曲线

Fig.5 Output power versus input power of T = 6%

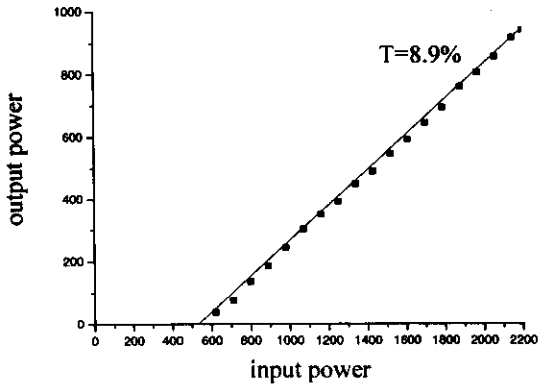


图 6 T=8.9%时输出功率随输入功率的变化曲线

Fig.6 Output power versus input power of T = 8.95%

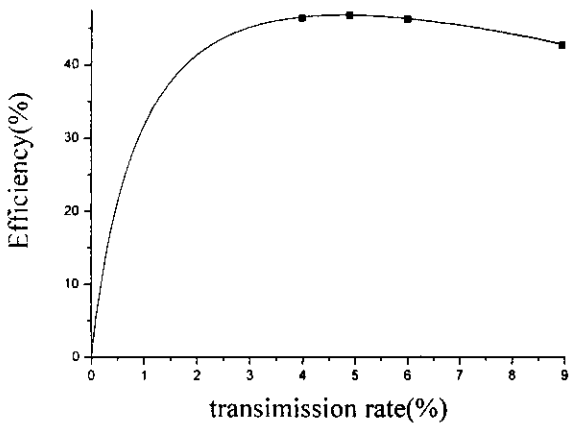


图 7 光-光转化效率随输出镜透射率的变化曲线

Fig.7 Opto-opto conversion efficiency versus transmission rate of output mirror versus the threshold

4 结论

我们对激光二极管端面泵浦的单频 Nd:YVO₄ 激光器进行了研究。在估算出 Nd:YVO₄ 激光器内腔损耗和小信号增益系数的基础上,实验研究了在不同输出耦合镜透射率下,激光器的输出功率和光光转换效率,实验结果与理论分析结果基本一致。当激光器输出镜透射率为 4.9% 时,用 2.2 W 的激光二极管泵浦源产生了瓦级单频 1064 nm 激光输出,最大光-光转化效率为 47.2%,斜效率为 54.1%。

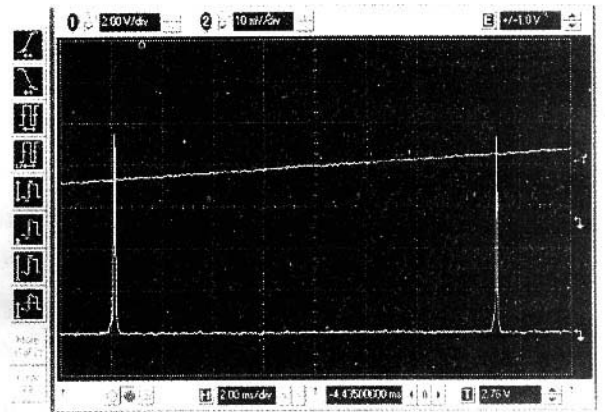


图 8 扫描共焦腔的透射曲线

Fig.8 Spectrum of scanning F-P cavity

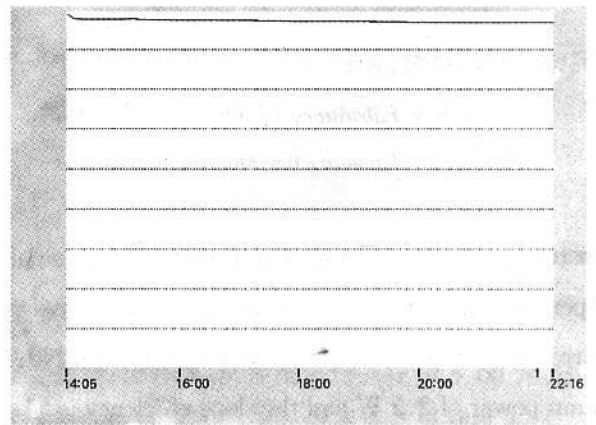


图 9 功率稳定性曲线

Fig.9 Stability of the output power

参考文献:

[1] WONG N C. Optical frequency division using an optical parametric oscillator[J]. *Opt Lett*, 1990, **15**(20):1129-1131.
 [2] SCHNEIDER K, BRUCKMEIER R, et al. Bright squeezed-light generation by a continuous-wave semimonoparametric amplifier[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(17):1396-1398.

- [3] BRUCKMEIER R , *et al.* Quantum nondemolition measurements improved by a squeezed meter input [J]. *Phys Rev Lett* , 1997 , **78** (7) : 1243-1246.
- [4] 张宽收,张靖,谢常德,等. 利用二次谐波过程产生 532 nm 强度差压缩光的实验研究 [J]. *物理学报* , 2000 , **49** (1) : 80-84.
- [5] 刘均海,卢建仁,吕军华,等. 半导体激光器端面泵浦高功率高效 Nd :YVO₄ 激光器 [J]. *中国激光* , 2000 , **27** (2) : 110-112.
- [6] WALLMEROOTH K , PEUSER P. High power cw single-frequency TEM₀₀ diode-laser-pumped Nd :YAG laser [J]. *Electr Lett* , 1988 , **24** (17) : 1086-1088.
- [7] ZAYHOWSKI J J , MOORADIAN A. Frequency-modulated Nd :YAG microchip lasers [J]. *Opt Lett* , 1989 , **14** (12) : 618-620.
- [8] NACHMAN P , MUNCH J , YEE R. Diode-pumped frequency-stable tunable continuous-wave Nd :glass laser [J]. *IEEE J Quantum Electron* , 1990 , **26** (9) : 1457-1459.
- [9] 张靖,张宽收,王润林,等. 全固化单频 Nd :YVO₄ 环行激光器 [J]. *中国激光* , 2000 , **27** (8) : 694-696.
- [10] MARTIN K I , CLARKSON W A , HANNA D C. High-power single-frequency operation , at 1064 nm and 1061.4 nm of a Nd :YAG ring laser end-pumped by a beam-shaped diode bar [J]. *Optics Communications* , 1997 , **135** (2) : 89-92.
- [11] 崔芙云,王海波,马艳,等. 激光二极管泵浦的高输出单频稳频 Nd :YVO₄ 激光器 [J]. *光学学报* , 2001 , **21** (3) : 271-273.
- [12] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 孙文,江泽文,程国祥译. 北京:科学出版社,2002.90.

Diode End-pumped , High-efficiency Nd :YVO₄ Laser of Single-frequency Operation

ZHENG Yaohui , ZHANG Kuanshou

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Devices , Institute of Opto-Electronics , Shanxi University , Taiyuan , 030006 , P. R. China*)

Abstract: A LD-pumped Nd :YVO₄ laser of single-frequency is investigated. Based on the analysis of the dependence of output power on input power and optical conversion efficiency on transmission of the output mirror , a watt level output power at 1064 nm Nd :YVO₄ laser of single-frequency operation is obtained at the pump power of 2.2 W and the slope efficiency is 54.1% . The experiment results are basically in agreement with the theoretical predictions.

Key words : laser diode pumped ; high efficiency ; single-frequency laser