

文章编号:1004-4213(2010)10-1762-4

660 nm 单一波长 Nd : YAG 陶瓷激光器

谭雪春,武志超,梁柱

(长春理工大学 理学院, 长春 130022)

摘要:针对陶瓷晶体 1319 nm 的谱线设计了适合的谐振腔腔镜膜系参量,采用激光二极管阵列侧向抽运掺杂 1.1at%、 $\Phi 3 \times 50$ mm 的 Nd : YAG 陶瓷,利用色散棱镜及 KTP 晶体 II 类匹配腔内倍频,研制了一台 660 nm 单一波长输出的高重频 Nd : YAG 陶瓷红光激光器.根据陶瓷晶体的热透镜焦距设计了谐振腔的各个参量,在重复频率为 1000 Hz、单脉冲抽运能量约 144 mJ 时,获得了 3.9 mJ 的 660 nm 脉冲激光输出,总的光-光转换效率为 2.71%.为进一步研究大功率、高效率的陶瓷红光激光器奠定了基础.

关键词:激光器;660 nm 单一波长;腔内倍频;Nd : YAG 陶瓷

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103910.1762

0 引言

近年来,Nd : YAG 陶瓷晶体以其优越的性能逐渐引起人们的广泛关注,它具有容易制造、成本低、大尺寸生长、掺杂浓度高等优点,而且其热导率、吸收光谱、发射光谱、荧光寿命等都和单晶 Nd : YAG 相似.在多晶 Nd : YAG 陶瓷的荧光发射谱中,以 1 064 nm、1 319 nm 和 1 338 nm 最为突出,而 1 064 nm 的荧光强度比 1 319 nm 的荧光强度约强 4 倍,所以关于 Nd : YAG 陶瓷的研究主要集中在钕离子的 1 064 nm 谱线^[1-6],对陶瓷晶体 1 319 nm 波段的研究还比较少^[7-9],而对 1 319 nm 的倍频研究至今还未见报道.

本文设计了合适的谐振腔腔镜膜系,采用在腔内插入色散棱镜的方法,通过优化谐振腔参量,利用 KTP 晶体 II 类匹配腔内倍频,最终获得了单一波长 660 nm 的红光输出,是陶瓷晶体激光器波长研究的一个新拓展.

1 腔镜膜系设计与结构分析

1.1 谐振腔腔镜膜系的设计

要获得特定谱线跃迁的激光,必须使该谱线跃迁优先起振,从而抑制其它谱线跃迁.激光阈值公式为

$$P_{th} = \frac{h\nu_p V}{\eta\sigma\tau} \left[\alpha + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $h\nu_p$ 为抽运光的光子能量, V 为激光介质的体积, η 为抽运效率, σ 和 τ 分别为受激发射截面和上

能级粒子寿命, α 为腔内损耗, L 为激光介质的长度, R_1 和 R_2 分别为谐振腔两腔镜的反射率.要使 1 319 nm 单一谱线的激光起振,必须使其阈值小于其它谱线的阈值,同时,由双波长激光振荡理论^[10],双波长激光运转的条件为

$$\frac{2}{1 + P_{in}/P_{th}} \frac{\sigma_2 \nu_1}{\sigma_1 \nu_2} \left[\ln \left(\frac{1}{R_1} \right) + 2\alpha L \right] \leq \ln \left(\frac{1}{R_2} \right) + 2\alpha L \leq \frac{\sqrt{1 + 8P_{in}/P_{th}} + 1}{4} \frac{\sigma_2 \nu_1}{\sigma_1 \nu_2} \left[\ln \left(\frac{1}{R_1} \right) + 2\alpha L \right] \quad (2)$$

式中, P_{in} 为抽运功率, P_{th} 为阈值功率.满足此不等式时,系统将产生双波长激光振荡,在不等式两端以外,将产生单波长激光振荡.

1 319 nm 和 1 338 nm、1 064 nm 均属同一上能级的谱线,可以认为它们的 η 、 τ 相同,而且它们的受激发射截面^[11-12] 分别为 $0.92 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 、 $0.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 、 $4.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,单程损耗也可认为相同,均为 0.0198 cm^{-1} ^[11-12],并假定 $P_{in}/P_{th} = 2$ ^[13],由式(2)可以计算得到 1 319 nm 单一波长振荡时,输出镜反射率需满足的条件如图 1.

图 1 中,曲线 1 和 2 的纵坐标是 1 338 nm 谱线对应的输出镜反射率 R_{1338} ,它们包围的区域为 1 319 nm 与 1 338 nm 双波长运转时反射率需满足的条件;曲线 3 和 4 的纵坐标是 1 064 nm 对应的反射率 R_{1064} ,它们包围的区域为 1 319 nm 与 1 064 nm 共同运转时反射率需满足的条件.为使激光器只在 1 319 nm 及其倍频 660 nm 波长条件下工作,对于抑制 1 338 nm 而言,1 319 nm 输出镜反射率应在曲线 2 以下部分;对于抑制 1 064 nm 而言,1 319 nm 反射率应在曲线 4 以下部分.如果 $R_{1319} = 96.1\%$,则根据图 1 可知, $R_{1338} < 95\%$, $R_{1064} < 78\%$,此时,才

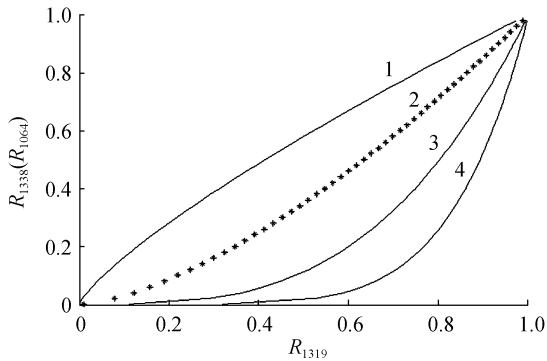


图 1 1 319 nm 谱线振荡时 R_{1319} 与 R_{1064} 、 R_{1338} 的关系
Fig. 1 The range of R_{1319} vs R_{1064} , R_{1338} according to the operating condition of the laser oscillation

有可能获得单一波长 1 319 nm 输出。

1.2 谐振腔参量设计

为确保获得单一波长的激光输出,在谐振腔的设计中,本文采用了腔内插入色散棱镜的方法,谐振腔结构示意图如图 2。在确定谐振腔各参量前,首先测量了陶瓷晶体的热透镜焦距^[14]。本文把 Nd:YAG 陶瓷晶体等效成一透镜并应用直接测定法,测得工作频率为 1 000 Hz 时不同注入能量的热焦距结果如表 1。

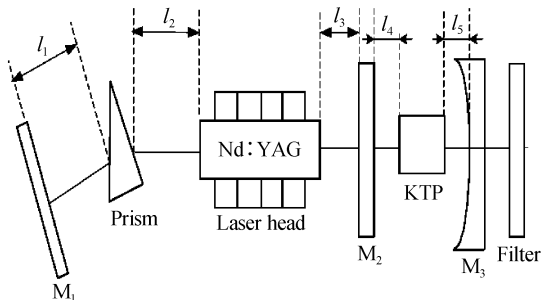


图 2 谐振腔参量示意图

Fig. 2 The schematic of cavity parameters

表 1 陶瓷晶体的热焦距

Table 1 focus length of ceramic crystal

Current / A	Power/W	Focus length/mm
55	78	1157
60	90	1015
65	103	817
70	117	665
75	132	495
78	144	450

激光器在频率 1 000 Hz 运转时,根据工作物质的热焦距,必须设计适当的腔结构克服热效应对激光输出的影响,即 G 因子应尽量满足由 J. Steffen 提出的热不灵敏条件 $G_1 G_2 = 0.5$ 。因此,对腔参量的设计非常重要,这里依据高斯光束的矩阵变换,使用 Matrixlaser 软件对腔参量进行了计算与优化。

图 2 中: $l_1 = 19$ mm; $l_2 = 20$ mm; $l_3 = 21$ mm; $l_4 = 20$ mm; $l_5 = 19$ mm; M_1 、 M_2 为平面镜; M_3 为平

凹镜,曲率半径为 1 500 mm。

根据设计的腔参量,分析陶瓷晶体的热焦距对陶瓷晶体内光斑半径的影响,如图 3。

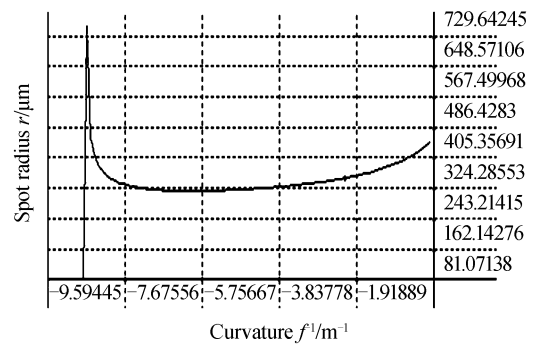


图 3 陶瓷晶体内光斑半径随热焦距的变化曲线

Fig. 3 Variation of the beam radius on the ceramic crystal with the thermal focal length

由图 3 可以看出,在重复频率 1 000 Hz 时,实验测得的陶瓷晶体热焦距范围在稳区 $f > 114$ mm 内,当激光器大功率、长时间工作时,陶瓷晶体内光斑半径受热焦距的变化影响不大,有利于激光器能量输出的稳定。

综上所述,本实验采用的谐振腔参量较为合理, $G_1 G_2 = 0.495$,相对失调灵敏度 $S/S_0 = 2.04$ 。

2 实验与结果分析

2.1 实验装置

采用的装置结构如图 2,其中激光晶体为日本 Baikowski 公司生产的 $\Phi 3$ mm \times 50 mm、掺杂 1.1 at% 的 Nd:YAG 陶瓷晶体,它的两个通光面为平行平面,都镀有 1 319 nm/660 nm 的高透膜($T > 95\%$)。抽运源由三个中心波长为 808.9 nm 的 LD 列阵组成,每个 LD 列阵的峰值功率为 240 W,发光面积为 $100 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。采用东莞泰捷公司生产的激光冷水机对激光器进行准确度优于 1°C 的温控,并使 LD 发射波长在 Nd:YAG 陶瓷晶体的吸收峰处。色散棱镜的尺寸为 $25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$;倍频晶体 KTP 的尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,切割角度为 $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 59.9^\circ$,两面均镀有 1 319 nm/660 nm 的双色增透膜;采用滤光片滤除基频光。

根据式(1)、(2)及图 1,实验采用谐振腔膜系参量为: $M_1: R_{1319 \text{ nm}} > 99.8\%$, $R_{1338 \text{ nm}} < 91\%$, $T_{1064 \text{ nm}} > 85\%$;谐波反射镜 $M_2: R_{660 \text{ nm}} > 97\%$, $T_{1319 \text{ nm}} > 99\%$, $T_{1064 \text{ nm}} > 80\%$, $T_{1338 \text{ nm}} > 60\%$;红光输出镜 $M_3: T_{660 \text{ nm}} > 95\%$, $R_{1319 \text{ nm}} > 99.5\%$, $R_{1338 \text{ nm}} < 91\%$, $T_{1064 \text{ nm}} > 80\%$ 。

2.2 实验结果

激光器运转时,通过微调色散棱镜,最终获得单一谱线的红光输出。当重复频率为 1 000 Hz 时,测

得的红光输出能量曲线如图4,测得的输出光谱如图5.由图4可见输出功率随着注入功率的增加而升高,当电流达到78 A时,即单脉冲抽运能量约144 mJ时,获得了3.9 mJ的660 nm红光输出,总的光-光转换效率为2.71%.

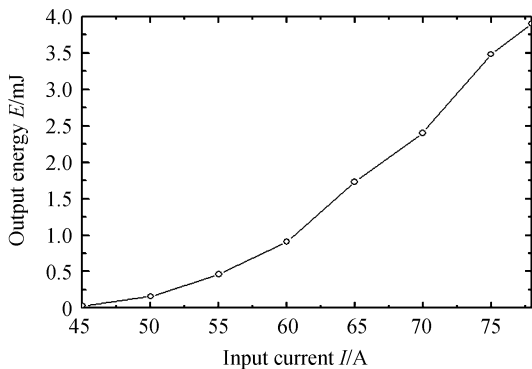


图4 红光输出能量与抽运电流关系曲线

Fig. 4 Red laser output energy versus the pump current

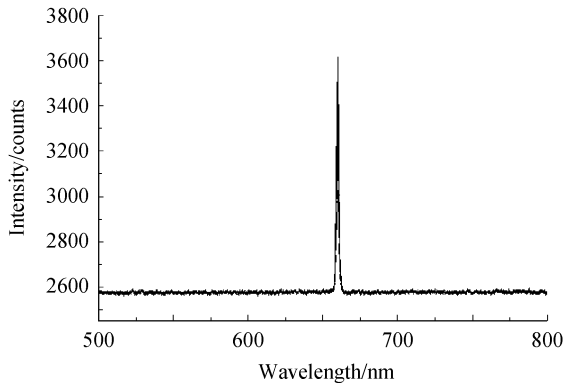


图5 红光光谱

Fig. 5 Spectrum of red laser

从光谱仪测得的光谱中未见其它谱线,很好的实现了660 nm的单一波长输出.

3 结论

本文根据Nd:YAG陶瓷晶体的热透镜焦距优化设计了谐振腔的各个参量,采用腔内插入色散棱镜的方法,利用KTP晶体II类匹配腔内倍频获得了660 nm的单一波长红光输出.在注入电流为78 A、重复频率1 000 Hz时,获得的红光输出能量为3.9 mJ,总的光-光转换效率为2.71%.本文是对陶瓷红光激光器的初步探索研究,为进一步研究大功率、高效率的Nd:YAG陶瓷激光器的红光输出奠定了基础,下一步重点的研究工作是通过提高Nd:YAG陶瓷晶体的质量、精确确定输出镜最佳透过率以及优化抽运系统的结构,来提高激光器的输出能量及转换效率.

参考文献

[1] RODRIGUEZ E M, MOLINA P, BENAYAS A, *et al.* Suppression of Q-switching instabilities in a passively mode-locked Nd:Y₃Al₅O₁₂ ceramic laser[J]. *Optical Materials*,

2009, **31**(5): 725-728.

- [2] CHEN Ya-hui, ZHOU Yong, PAN Yu-bai, *et al.* Domestic Nd:YAG ceramic laser emits 10.0 W[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, **34**(5): 660.
陈亚辉,周勇,潘裕柏,等.国产Nd:YAG透明陶瓷实现10.0 W激光输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 660.
- [3] SUNGMAN L, DAEWOOK C, CHEOL J K, *et al.* Highly efficient diode side-pumped Nd:YAG ceramic laser with 210 W output power[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(4): 705-709.
- [4] IKESUE A, AUNG Y L, YODA T, *et al.* Fabrication and laser performance of polycrystal and single crystal Nd:YAG by advanced ceramic processing[J]. *Optical Materials*, 2007, **29**(10): 1289-1294.
- [5] QI Yun-feng, LOU Qi-hong, MA Hai-xia, *et al.* Highly efficient Nd:YAG ceramic CW laser with 59.8% slope-efficiency[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, **3**(2): 89-91.
- [6] LU J, YAGI H, TA KAICHI K, *et al.* 110 W ceramic Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ laser[J]. *Applied Physics B*, 2004, **79**(1): 25-28.
- [7] YANG Lin, HUANG Wei-ling, QIU Jun-lin, *et al.* Diode-end-pumped Nd:YAG 1.32 μm CW ceramic laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(3): 301-303.
杨林,黄维玲,丘军林,等.激光二极管端面泵浦的多晶Nd:YAG 1.32 μm连续激光器[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(3): 301-303.
- [8] LU Jun-hua, LU Jian-ren, TOMOYO MURAI, *et al.* 36 W diode-pumped continuous-wave 1 319 nm Nd:YAG ceramic laser[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(13): 1120-1122.
- [9] ZHENG Quan, CHEN Ying-xin, QIAN Long-sheng. LD-pumped Nd:YAG/LBO Red Laser at 660 nm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1153-1155.
郑权,陈颖新,钱龙生. LD泵浦Nd:YAG/LBO结构660 nm红光激光器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1153-1155.
- [10] SHEN H Y, SU H. Operating conditions of continuous wave simultaneous dual wavelength laser in neodymium host crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **86**(12): 6647-6651.
- [11] WEI Yong, ZHANG Ge, HUANG Cheng-hui, *et al.* A 1 318.8 nm/1 338 nm simultaneous dual wavelength Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3): 165.
魏勇,张戈,黄呈辉,等.1 318.8 nm/1 338 nm同时振荡双波长Nd:YAG激光器[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(3): 165.
- [12] LIN Wen-xiong, SHEN Hong-yuan, ZENG Rui-rong, *et al.* Experimental research on dual wavelength Nd:YAG pulsed laser[J]. *Chinese J Lasers*, 1994, **21**(2): 90.
林文雄,沈鸿元,曾瑞荣,等.双波长Nd:YAG脉冲激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 1994, **21**(2): 90.
- [13] WEI Yong, ZHANG Ge, HUANG Cheng-hui, *et al.* A single wavelength 1 318.8 nm Nd:YAG laser[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 259.
魏勇,张戈,黄呈辉,等.1 318.8 nm单一谱线Nd:YAG激光器[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 259.
- [14] YANG Yong-ming, WEN Jian-guo, WANG Shi-yu, *et al.* The thermal lens focus of the end-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1769-1772.
杨永明,文建国,王石语,等. LD端面泵浦Nd:YAG激光器中的热透镜焦距[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1769-1772.

660 nm Single Wavelength Nd : YAG Ceramic Laser

TAN Xue-chun, WU Zhi-chao, LIANG Zhu

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Using dispersing prism and KTP crystal type II phase matching for intracavity frequency-doubling, the Nd : YAG ceramic laser at the wavelength of 660 nm is studied. Suitable film parameters of resonant cavity reflectors are designed according to 1 319 nm line of Nd : YAG ceramic, side-pumped Nd : YAG ceramic crystal with 1.1at% Nd doping and dimensions of $\Phi 3 \times 50$ mm. Cavity parameters are designed based on the ceramic thermal focal length. Under repetition rate of 1 000 Hz and single pulse pumped energy of 144 mJ, the output energy of 3.9 mJ at 660 nm is obtained. The optic-optic efficiency is 2.71%. The results form the basis for the further development of the high power high efficiency ceramic red laser.

Key words: Laser; 660 nm single wavelength; Intracavity frequency-doubling; Nd : YAG ceramic



TAN Xue-chun was born in 1978. She is pursuing the Ph. D. degree at Laser Technology Institute, Changchun University of Science and Technology. Her research interests focus on solid-state laser technology and optical information transmission.



LIANG Zhu was born in 1938. He is a professor of Changchun University of Science and Technology, and his research interests focus on laser theory, technology and applied research.