

文章编号: 1001-5078(2004)06-0436-03

LD 泵浦腔内和频连续 500.8nm NdYAG/LBO 激光器

亓 岩, 卜轶坤, 郑 权, 薛庆华, 叶子青

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘 要: 讨论和分析了 NdYAG 激光器实现腔内和频及双波长运转的条件, 利用激光二极管端面泵浦 NdYAG 的方式, 得到 1064nm 和 946nm 连续双波长运转, 并利用 类相位匹配晶体 LBO, 实现了 1064nm 和 946nm 激光的腔内和频, 获得了连续 500.8nm 的青色激光输出。

关键词: 激光二极管; NdYAG; 连续; 双波长激光; 和频

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

LD Pumped Intracavity Sum-frequency CW 500.8nm NdYAG/LBO Laser

QI Yan, BU Yi-kun, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, YE Zi-qing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics, CAS, changchun 130022, China)

Abstract: The oscillation condition for the simultaneous dual-wavelength operation and sum-frequency mixing in a diode-end-pumped NdYAG solid-state laser is studied. A dual-wavelength continuous wave (CW) diode-end-pumped NdYAG laser that generates simultaneous laser action at the wavelength 1064nm and 946nm is demonstrated. Then by use of intracavity sum frequency mixing in LBO crystal, CW 500.8nm radiation is achieved.

Key words: LD-pumped; NdYAG laser; CW; dual-wavelength; sum-frequency mixing

1 引 言

近年来, 激光二极管泵浦的固体激光器因其结构紧凑, 效率高, 寿命长等优点, 得到了重要应用。通过对激光二极管泵浦的 Nd 离子激光器进行腔内倍频, 获得了红、绿、蓝激光输出^[1-3]。对于波长为 500.8nm 的青色激光, 由于缺少基频光, 不能通过倍频的方式获得。500.8nm 的青色激光在生物及激光演示方面引起了人们的兴趣, 而对 1064nm 和 946nm 连续双波长运转的 NdYAG 激光器进行腔内和频是一种获得连续 500.8nm 激光输出的有效方法。

NdYAG 是一种性能优良的激光晶体, 它主要有 946nm, 1064nm, 1319nm 三条发射谱线, 分别对应 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$, $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 的跃迁, 由于 946nm 发射谱线增益较低, 而且是准三能级结构, 故

效率较低, 阈值较高, 不易获得激光输出。而运转于 1064nm 和 1319nm 的双波长激光器较易实现^[4-7], 故已见报道的腔内和频 Nd YAG 激光器都是对 1064nm 和 1319nm 两个波长的激光进行和频从而获得 589nm 的橙色激光输出^[7]。为了获得内腔和频的最大值, 我们采用一种新的双波长运转方式, 利用结构简单的单腔, 用 2W 的激光二极管端面泵浦 Nd YAG, 先使其实现 1064nm 和 946nm 连续双波长运转, 再利用 类相位匹配晶体 LBO 进行腔内和频, 得到了 500.8nm 的青色激光输出。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2002AA311141)资助项目。

作者简介: 亓 岩(1980 -), 女, 现在长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位, 研究方向: 全固体激光器与非线性频率变换技术。E-mail: shuipingqy@sina.com

收稿日期: 2004-03-26

2 理论分析

对 NdYAG 激光器进行腔内和频获得连续 500.8nm 激光输出,首先要使激光器同时运转于 1064nm 和 946nm,在以往多波长同时运转激光器的报道中,提出了多波长同时振荡的条件^[8,9],对于双波长运转,即同时存在两条谱线的跃迁,这两种跃迁有共同的上能级和不同的下能级,则这两条谱线应该有相同的阈值,即满足双波长同时振荡条件:

$$\ln\left(\frac{1}{r_1}\right) = 2L\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{f_1} - 1\right] + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{r_2}\right) \quad (1)$$

式中 ν_1, ν_2 为两个跃迁的频率, r_1, r_2 为输出镜反射率, σ_1, σ_2 是相应受激跃迁的截面, α 为相应辐射的损耗, L 为工作物质的长度。先确定输出镜对其中一个波长的反射率,由方程(1)得出满足上述双波长同时振荡条件的输出镜对另一个波长的反射率,从而实现双波长同时运转。

我们为了获得 1064nm 和 946nm 连续双波长运转,并且得到内腔和频的最大值,采用另一种方式进行双波长同时振荡,由于 1064nm 发射谱线增益高于 946nm 发射谱线,令 946nm 先于 1064nm 谱线起振,在腔内两者光子数达到大致相同时,进行和频。由于 946nm 发射谱线增益较低,而且是准三能级结构, Nd 离子在基质晶格场的作用下发生斯塔克能级分裂,基态分裂成 5 个子能级 $Z_1 \sim Z_5$,各个子能级粒子数占基态总粒子数的比例遵从玻耳兹曼分布,其中 Z_5 子能级占基态粒子总数的 0.74%。946nm 激光的下能级便是存在一定粒子数的 Z_5 子能级。由于下能级粒子数的存在,要想实现粒子数反转,就必须有很强的泵浦功率密度。而采用激光二极管端面泵浦,光斑半径小,光束匹配好,有利于提高泵浦光的功率密度。因此采用这种泵浦方式,以克服准三能级阈值高的缺点。而 1064nm 发射谱线属四能级结构,受激跃迁的截面积大,发射谱线增益高,阈值较低,容易获得激光输出。

由激光二极管端面泵浦 NdYAG 且激光谐振腔处于稳态时的速率方程可导出准三能级和四能级的阈值公式^[10,11]:

$$P_{th3} = \frac{h\nu_p \left(\frac{2}{L} + \frac{2}{p} \right) (L + T_3 + 2N_1^0 \sigma_3 l)}{4 \sigma_3 f_p^3 \sigma_a (f_1 + f_2)} \quad (2)$$

$$P_{th4} = \frac{h\nu_p \left(\frac{2}{L} + \frac{2}{p} \right) (L + T_4)}{4 \sigma_4 f_p^3 \sigma_a} \quad (3)$$

其中, P_{th3} 为泵浦准三能级的阈值, P_{th4} 为泵浦四能级的阈值, f 为增益介质上能级荧光寿命, σ_3

为 946nm 受激发射截面, σ_4 为 1064nm 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 946nm 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, $\alpha = 1 - \exp(-l)$, η_p 为量子效率, σ_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, r 为介质内振荡光的光斑半径, r_p 为介质内泵浦光的光斑半径。

要使 946nm 谱线激光起振,必须对 1064nm 谱线进行一定的抑制。为了使激光二极管端面泵浦 NdYAG 激光器能够实现 1064nm 和 946nm 激光的双波长运转及最大程度的腔内双波长和频,需采取增加输出镜对 1064nm 谱线的透过率,令其阈值大于 946nm 激光谱线的阈值,使得 946nm 谱线激光先起振,当泵浦功率达到 1064nm 发射谱线的阈值时,1064nm 激光起振。由于 1064nm 发射谱线受激跃迁的截面积大,发射谱线增益高,在达到一定泵浦功率时,其相应的反转粒子数可达到与 946nm 谱线相应的反转粒子数大致相当,此时对这两个波长进行和频,可以获得 500.8nm 激光的最大输出。

实验中采用稳定度较高的平凹腔,则介质内振荡光的光斑半径等于腔内高斯光束的腰斑半径,谐振腔长 L 约为 20mm,输出镜对 946nm 波长高反,曲率半径 R 为 50mm。由谐振腔内高斯光束的腰斑半径公式(4)可得出介质内 1064nm 和 946nm 振荡光的光斑半径分别为 91 μ m 和 85.9 μ m。

$$\frac{2}{L} = -[L(R - L)]^{1/2} \quad (4)$$

选取激光晶体的长度 l 为 1.5mm, $f_1 = 0.605$, $f_2 = 0.008$, $\sigma_3 = 3.8 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, $\sigma_4 = 2.8 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, $\tau_f = 243 \times 10^{-6} \text{s}$, Nd 离子掺杂浓度为 1%, $N_1^0 = 1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $\sigma_p = 5 \text{cm}^{-1}$,由(2)式可得出 946nm 发射谱线的阈值为 210mW。

由光—光斜效率公式,得到激光器输出功率与泵浦功率的关系:

$$P_{out} = \frac{h\nu}{h\nu_p} (T) (P_{in} - P_{th}) \quad (5)$$

而激光器输出功率与谐振腔内的功率之间有:

$$P_{out} = P_{in} \frac{T}{\sqrt{(1 - T)}} \quad (6)$$

以上两式中 T 为透射率, α 为往返损耗率, P_{in} 为泵

浦功率, P_{IN} 为谐振腔内的功率值。当 1064nm 相应的反转粒子数与 946nm 相应的反转粒子数相当时, 由于 946nm 谱线频率高, 由单个光子能量为 $h\nu$ 知, 其能量与 1064nm 谱线能量比约为 1.121。联立 (5) (6) 式可得到激光器谐振腔内的功率与泵浦功率的关系。调整输出镜对 1064nm 波长的透射率, 令其阈值大于 210mW, 由于我们采用的泵浦源为连续输出最大功率为 2W 的 LD, 令泵浦功率为 1.5W 时, 谐振腔内 946nm 谱线与 1064nm 谱线的功率比约为 1.12:1, 通过计算得到输出镜对 1064nm 波长的透射率约为 10%。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示, 采用连续输出的最大功率为 2W 的 LD, 通过制冷器 TEC1 的严格温控措施, 使其波长调节为 808.5nm, 与 NdYAG 的吸收峰重合, 从而最大限度的利用泵浦光。从 LD 发出的光经耦合系统直接射到 NdYAG 晶体中, 采用 $3 \times 3 \times 1.5\text{mm}^3$ 尺寸的 NdYAG, 左端面镀 808nm 波长增透膜, 1064nm 和 946nm 波长高反膜作为一个腔镜, 另一端镀 1064nm 和 946nm 波长增透膜。采用凹面曲率半径为 50mm 的平凹镜作为输出镜, 凹面镀 500.8nm 波长的增透膜, 946nm 波长高反膜及对 1064nm 波长透射率为 10% 的部分透射膜, 平面镀 500.8nm 波长增透膜, $2 \times 2 \times 10\text{mm}^3$ 尺寸的类相位匹配晶体 LBO 置于铜基座上放在腔内进行和频, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 15.4^\circ$, 晶体两端均镀 1064nm, 946nm 和 500.8nm 波长增透膜, 整个谐振腔置于制冷器 TEC2 上, 腔长约为 20mm。

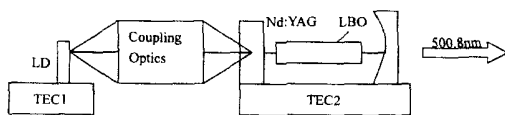


图1 NdYAG激光器的双波长运转及腔内倍频实验装置图

在泵浦功率为 1.4W 时, 不放和频晶体, 仔细调节各元件, 可以观察到红外输出, 将一块对 1064nm 进行倍频的 LBO 和一块对 946nm 进行倍频的 LBO 分别置于腔内, 获得了 30.2mW 的 473nm 蓝光输出和 20.1mW 的 532nm 绿光输出, 说明此时 NdYAG 激光器实现了 1064nm 和 946nm 激光双波长运转, 谐振腔内两者的光子数大致相当, 此时将对 1064nm 和 946nm 激光进行和频的类相位匹配晶体 LBO 晶体

置于腔内, 获得了 15.0mW 的连续 500.8nm 青色激光输出。

4 结论

利用激光二极管端面泵浦 NdYAG 的方式, 获得了 1064nm 和 946nm 连续双波长运转, 分析和实验说明, 对于激光二极管端面泵浦的 NdYAG 固体激光器, 在 1064nm 和 946nm 两个波长阈值不同时同样可以获得双波长运转, 并利用类相位匹配晶体 LBO, 实现了 1064nm 和 946nm 激光的腔内双波长和频, 获得了连续 500.8nm 的青色激光输出。

参考文献:

- [1] 郑权, 薛庆华, 等. LD 泵浦 1.2W 连续 NdYAG/LBO 红光激光器[J]. 激光与红外, 2004, 34(1): 24 - 26.
- [2] Yung-Fu Chen, Ting-Ming Huang, et al. Compact and efficient 3.2W diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser[J]. Applied Optics, 1998, 37(24): 5727 - 5730.
- [3] 高兰兰, 檀慧明. 利用复合 NdYAG 实现 600mW 高效紧凑型蓝光激光器[J]. 光子学报, 2004, 33(1): 8 - 10.
- [4] 林文雄, 沈鸿元, 等. 双波长 NdYAG 脉冲激光器的实验研究[J]. 中国激光, 1994, 21(2): 89 - 91.
- [5] George A Henderson. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser[J]. Appl. Phys., 1990, 68(11): 5451 - 5455.
- [6] V E Nadocheev, O E Nani. two-wave emission from a cw solid-state YAGNd³⁺ laser[J]. Sov. J. Quantum Electron., 1989, 19(4): 444 - 446.
- [7] R W Farley, P D Dao. development of an intracavity-summed multiple-wavelength Nd:YAG laser for a rugged, solid-state sodium lidar system[J]. Applied Optics, 1995, 34(21): 4269 - 4273.
- [8] H Y Shen, R R Zeng, Y P Zhou, et al. [J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56(20): 1937 - 1938.
- [9] Shen Hongyuan. oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing[J]. Chinese Phys. Lett., 1990, 7(4): 174 - 176.
- [10] 杜建新, 张风传, 等. 二极管端面泵浦 NdYAG 946nm 激光器理论分析[J]. 量子电子学报, 2003, 20(4): 415 - 418.
- [11] Tso Yee Fan. Modeling and CW Operation of a Quasi-Three-level 946nm Nd:YAG laser[J]. IEEE J. Quant. Electron., 1987, 23(5): 605 - 611.