

文章编号: 1001-5078(2004)06-0439-03

LD 泵浦腔内和频连续 589nm 黄光激光器

贾富强^{1,2}, 卜轶坤^{1,2}, 郑 权¹, 薛庆华^{1,2}, 谭成桥^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:在理论上分析和计算了 Nd:YAG 激光器双波长同时运转时输出镜的透过率, 提出在双波长共同运转的前提下适当减小输出镜对增益较大谱线的透过率, 可以获得更高的腔内和频效率, 并从实验上加以证实。实验中利用 2W 激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 的方式, 得到 1064nm 和 1319nm 连续的双波长运转, 在优化输出镜透过率以后, 在腔内加入 一类临界相位匹配切割的 LBO 和频晶体得到 20mW 的 589nm 黄光输出。

关键词: LD 泵浦; 双波长激光器; 腔内和频; 黄光激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

LD-pumped Intracavity Sum-frequency Mixing CW 589nm Yellow Laser

JIA Fu-qiang^{1,2}, BU Yi-kun^{1,2}, ZHENG Quan¹, XUE Qing-hua^{1,2}, TAN Cheng-qiao^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130022, China;

2. Graduate Student School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: The transmission of the output coupler is analyzed and calculated when the Nd:YAG is operating in dual-wavelength simultaneously. It is proposed that decreasing the transmission of the output coupler at the wavelength with larger gain properly contributes to the increasing of the output power of the intracavity sum-frequency mixing. A dual-wavelength continuous wave (CW) diode-end-pumped Nd:YAG laser that operates at 1064nm and 1319nm simultaneously is demonstrated. By using of the intracavity sum-frequency mixing in type I critical phase-matching LBO crystal and optimizing the transmission of the output coupler, the maximum output power of the 589nm yellow laser is 20mW.

Key words: LD-pumped; dual-wavelength laser; intracavity sum-frequency mixing; yellow laser

1 引言

通过对激光二极管泵浦的掺 Nd 离子激光器腔内倍频, 已获得了红、绿、蓝三色激光输出^[1-3], 但是在 550nm-650nm 范围内的激光辐射由于缺少相应的基频光输出, 还不能通过倍频的方式获得, 而处于这一波段的黄光由于在医疗、生物、天文以及显示技术等方面有特殊用途, 人们一直以来只能用普通的钠黄光作为光源, 所以寻求跟钠黄光波长接近的激光相干辐射便一直是人们研究的热点。Y. F. Chen 等通过对 Nd:YVO₄ 中的 1064nm 和 1342nm 两条谱线腔外单程和频已经获得了 593.5nm 的连续黄光输出^[4], 而对于 Nd:YAG 而言, 因为 4F_{3/2}-4F_{11/2} 和 4F_{3/2}-4F_{13/2} 这两条谱线的受激发射截面的比值在 Nd:YAG 中比在 Nd:YVO₄ 中大, 所以在 Nd:YAG 中更难以实现连续双波长运转, 相关的报道也比较少。本文利用最大输出功率是 2W 的 LD 泵浦 Nd:YAG, 在单工作物质, 单谐振腔的实验设置下, 获得了约 20mW 的连续黄光输出。

2 理论分析

Nd:YAG 中存在 1064nm, 1319nm, 946nm 这三条主要的谱线, 对于 Nd:YAG 的 1064nm 和 1319nm 这两条谱线而言, 它们具有相同的激光上能级 4F_{3/2} 和不同的激光下能级 4F_{11/2}, 4F_{13/2}, 要想实现这两条谱线的双波长同时运转, 根据多波长激光器同时运转的条件^[5]可知, 这两条谱线的激光辐射必须具有相同的阈值。1064nm 和 1319nm 这两条激光谱线都属于四能级激光系统, 根据四能级激光器的阈值表达式^[6]

$$P_{th} = \frac{h \nu (\frac{2}{\tau_u} + \frac{2}{\tau_l}) (L + T)}{4 \eta f} \quad (1)$$

式中 P_{th} 为激光阈值, ν 为激光的上能级 τ_u 光寿命, τ_l 为受激辐射截面, L 为腔内的往返损耗 (假设它对

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2002AA311141)资助项目。

作者简介: 贾富强(1980-), 男, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士学位, 研究方向, 全固体激光器件与非线性频率变换技术。

收稿日期: 2004-04-12

1319nm 和 1064nm 这两条谱线是一样的), T 为输出镜的透过率, η_p 为泵浦能被转换到激光上能级的转换效率, h_p 为泵浦光的光子能量, L 和 P 分别是工作物质中泵浦光光斑和腔内基模光斑的半径。实验中 1064nm 和 1319nm 两条谱线在表达式 (1) 中各参数值如表 1 所示。

表 1 实验中 1064nm 和 1319nm 两条谱线各参数值

谱线 (nm)	h_p	L^2 (m ²)	P^2 (m ²)	η_p (m ⁻²)	T	$f(s)$
1064	1.87×10^{-19}	1.3×10^{-8}	1.0×10^{-8}	2.8×10^{-23}	待求	2.43×10^{-4}
1319	1.5×10^{-19}	1.63×10^{-8}	1.0×10^{-8}	0.56×10^{-23}	0.1%	2.43×10^{-4}

把上面的参数值带入表达式 (1) 中, 可以分别得到 1064nm 和 1319nm 两条谱线的阈值表达式

$$P_{th1064} = 1.37(L + T_{1064}) \quad (2)$$

$$P_{th1319} = 7.79(L + 0.001) \quad (3)$$

联立 (2), (3) 可以得到双波长运转时 1064nm 和 1319nm 这两条谱线同时达到阈值时输出镜对 1064nm 的透过率 T_{1064} 跟腔内的往返损耗 L 之间的解析表达式

$$T_{1064} = 4.686L + 0.0057 \quad (4)$$

我们利用实验中测得的阈值 (约 40mW) 和激光器的阈值与内部损耗 L 的关系式 (4) 可以近似的估算出双波长运转时腔内损耗为 $L = 0.5\%$ (严格的讲应该根据 Findlay-Clay^[7] 原理求取内部损耗), 此时根据 (4) 式可以算出输出镜对 1064nm 的透过率约为 3.1%。在双波长运转以后, 在腔内放入和频晶体, 把黄光的输出折算成输出镜对基频光的线性损耗, 此时的 $L = 1\%$, 包括没有放入和频晶体时的腔内往返损耗 (0.5%) 和因黄光输出折算到基频光的线性损耗 (0.5%, 假设对 1064nm 和 1319nm 是一样的), 将 $L = 1\%$ 带入 (4) 式中, 求得腔内有 LBO 时双波长同时起振条件下的 $T_{1064} = 5.3\%$ 。

在双波长运转以后, 为了得到更高的腔内和频效率, 我们应尽量让 1064nm 和 1319nm 这两条谱线在腔内的光子数之比为 11, 此时两者相应的腔内光功率密度之比为两者的光子能量之比即 1.231。根据腔内光功率与泵浦光功率以及阈值功率之间的关系表达式^[8], 我们得到

$$P_{INT} = \frac{2}{L - \ln R} \text{其它 } s(P_{in} - P_{th}) \quad (5)$$

表达式 (5) 中 P_{INT} 表示腔内光功率, P_{in} 为泵浦光功率, P_{th} 为阈值光功率, R 为谐振腔两腔镜对激光辐射的反射率之乘积 (由于实验中谐振腔的左端镜对这两条谱线都是全反射, 所以 R 实际上也就代表了输出镜对相应激光辐射的反射率), L 为腔内的往返损耗和黄光输出折算到基频光的线性损耗之和, 计算时取 1%, s 表示斯托克斯因子, 其它表示除去斯托克斯因子以外在激光产生过程中泵浦光转换到激光上能级的其它的能量传输效率的乘积, 通过计算我们

可以近似的认为它不随波长的改变而改变。由 (5) 式可以把双波长运转时 1064nm 和 1319nm 两条谱线腔内光子数比为 11 时两者腔内功率之比表示为:

$$\frac{P_{IN1064}}{P_{IN1320}} = \frac{P_{in1064} - P_{th1064}}{P_{in1320} - P_{th1320}} \frac{L - \ln R_{1320}}{L - \ln R_{1064}} \frac{s_{1064}}{s_{1320}} = 1.23 \quad (6)$$

由于 1064nm 和 1319nm 的斯托克斯因子之比正好是 1.231, 所以为了得到优化的和频效率, 满足腔内两者的光子数之比为 11, 只需满足

$$\frac{P_{in1064} - P_{th1064}}{P_{in1320} - P_{th1320}} \frac{L - \ln R_{1320}}{L - \ln R_{1064}} = 1 \quad (7)$$

在双波长同时起振的条件下, 1064nm 和 1319nm 同时达到阈值, 在相同的泵浦功率条件下, 由于输出镜对 1064nm 的反射率比对 1319nm 的反射率更低, 所以在这两条谱线同时起振的条件下 (7) 式是不能成立的, 也即是说在两者同时达到阈值的情况下, 两者腔内光子数之比是不能达到 11。从 (7) 式左端我们可以看出, 在输出镜对 1319nm 的反射率 ($R_{1319} = 99.9\%$) 固定的情况下, 把 R_{1064} 在双波长同时起振条件下所求得输出镜对 1064nm 反射率 ($R_{1064} = 94.7\%$) 的基础上适当的增加一些, 也即是说让输出镜对 1064nm 透射率在 $T_{1064} = 5.3\%$ 的基础上适当的减小一些, 当减少到某一个优化的 T_{1064} 值处, 腔内光子数之比是可以满足 11。通过计算, 在泵浦功率 (1400mW) 和输出镜对 1319nm 的透射率 ($T_{1319} = 0.1\%$) 固定的情况下, 腔内光子数之比 n_{1064}/n_{1319} 随 T_{1064} 的变化曲线如图 1 所示。

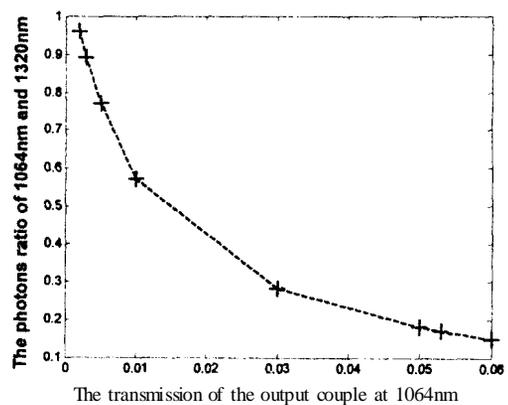


图 1 腔内 1064 和 1319 光子数比随输出镜对 1064nm 透过率的变化曲线

从图 1 可以看出, 当选取的输出镜对 1064nm 的透过率与输出镜对 1319nm 的透过率 0.1% 相比略微大一些的时候, 两者腔内光子数之比可以达到 11, 具体的数值还需要考虑两条谱线之间的增益比。如果两者的增益比接近 1, 谱线间的竞争就没有那么的激烈, 也不用对增益稍大的谱线进行太多的抑制, 此时输出镜对两者的透过率可以尽量低, 以满足

腔内光强最大,同时两者的透过率选取可以尽可能的接近让腔内光子数之比更接近1,所以在腔内和频激光器的设计的时候,需要权衡双波长同时运转时对增益较大谱线的抑制程度和腔内两条谱线光子数比的关系。

3 实验装置与结果

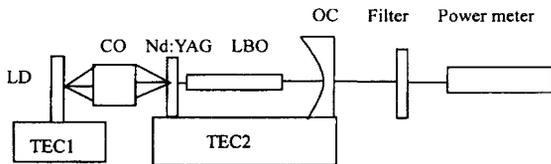


图2 589nm NdYAG/LBO 激光器实验原理图

实验装置如图2所示,LD由中科院半导体所提供,最大输出功率为2W,中心发射波长为807.5nm。泵浦光经耦合光学系统CO(Couple Optics)准直,扩束,聚焦以后光斑半径变为 $100\mu\text{m}$ 左右,泵浦光入射到NdYAG的左端面,NdYAG的尺寸为 $3\times 3\times 1.5\text{mm}^3$,掺杂浓度为1.0at%,NdYAG的左端面对808nm增透,对1064nm和1319nm全反,右端面镀制1064nm和1319nm的增透膜。输出镜采用平凹镜(实验中可以更换透过率5%,3%,1%,0.5%),曲率半径是50mm,其中 $T_{1064}=0.5\%$ 输出镜凹面的透过率曲线如图3所示,凹面对1319nm的透过率为0.1%,对589nm增透,平面对589nm高透。实验中的谐振腔由工作物质的左端面和输出镜的凹面共同构成,腔长约为40mm。LBO的尺寸为 $2\times 2\times 10\text{mm}^3$,按类临界相位匹配角切割, $\theta=90^\circ$, $\phi=4.3^\circ$ 。TEC1和TEC2都是半导体制冷器,TEC1用来调节LD的发射波长,TEC2用来对谐振腔和工作物质进行整体温控。Filter滤光片,是用来将输出激光中的红外部分滤掉,便于测黄光的输出功率。Power meter为相干公司的LabMaster Ultima P540功率计。

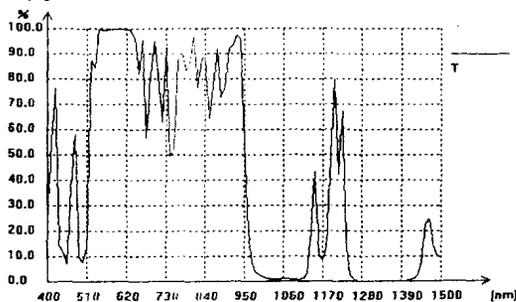
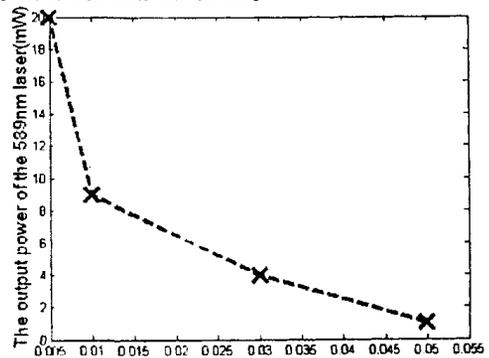


图3 输出镜的透过率曲线图

实验时首先调节TEC1的温度控制,让LD的发射峰与NdYAG的吸收峰808.5nm重合(LD的发射波长随温度改变大约为 $0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$),然后仔细调节输出镜的位置和TEC2温度,直到红外输出光斑和功率到最佳状态,然后在腔内放入LBO,再调节LBO的角度直到黄光输出功率为最大。实验中由于没有合适的滤光片,没有能够准确的测量出输出红外当中1064nm和1319nm两者的功率值。我们分别使用

了对1064nm透射率不一样的输出镜($T_{1064}=5\%$, 3% , 1% , 0.5%),发现黄光的输出功率随输出镜对1064nm透射率减小而增加,其变化关系如图4所示,跟理论估计符合得比较好。在泵浦功率为1400mW的情况下,当我们选取对1064nm透射率为0.5%的输出镜时,获得了最大功率为20mW的和频黄光输出,由于没有更低透射率的输出镜,我们没能进一步从实验上加以验证。



The transmission of the output coupler at 1064nm

图4 589nm 黄光输出功率随输出镜在1064nm处的透过率的变化曲线

4 结论

通过对双波长激光器运转条件的分析和计算,以双波长同时起振时输出镜对增益较大谱线的透射率为基准,选择略小于此值的输出镜的透射率来优化腔内1064nm和1319nm两条谱线的光子数之比以达到更高的腔内和频黄光输出,并从实验上加以证实。实验利用2W LD泵浦NdYAG,在最大泵浦功率为1400mW的情况下,优化输出镜对1064nm的透射率,已经获得20mW的589nm黄光输出。

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] Y F Chen, Ting-Ming Huang, et al. Compact and efficient 3.2W diode-pumped NdYAG/KIP green Laser[J]. Applied Optics, 1998, 37(24): 5727-5730.
- [3] 刘伟仁,钱龙生,檀慧明,等.LD泵浦的946nm NdYAG激光器及腔内倍频473nm蓝光输出[J].激光杂志,2000, 21(3):12-13.
- [4] Y F Chen, S W Tai, S C Wang, et al. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped NdYVO₄ dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate[J]. Optics Letters, 2002, 27(20):1809-1891.
- [5] Shen Hong-yuan. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing[J]. Chinese Phys. Lett., 1990, 7(4): 174-176.
- [6] T Y Fan. Modeling and CW operation of a Quasi-Three-level 946nm NdYAG laser[J]. IEEE. J. Quant. Electron, 1987, 23(5): 605-611.
- [7] D Findlay, R A Clay, [J]. Phys. Lett. 20(1966), 277.
- [8] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 科学出版社, 2002, 第五版, 85, 91.