

文章编号 1004-924X(2008)01-0011-05

LD 泵浦腔内倍频 Nd:YAG/LBO 蓝光 473 nm 激光器的低噪声运转

李义民^{1,2}, 檀慧明¹, 付喜宏^{1,2}, 田玉冰^{1,2}, 王保山^{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 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 激光二极管(LD)泵浦腔内倍频 Nd:YAG/LBO 蓝光 473 nm 激光器在不加入腔内特殊元件的情况下, 倍频输出功率往往具有很大的高频噪声, 即所谓的“蓝光问题”, 这很大程度上限制了 473 nm 蓝色激光的应用。为了降低该激光器件倍频输出功率的高频噪声, 采用了提高腔内基频光循环强度和缩短激光晶体以减小准三能级激光系统再吸收损耗的方法来实现 473 nm 激光器的低噪声运转。实验中利用两个 2 WLD 耦合作为泵浦源及 1.0 mm 厚的 Nd:YAG 材料作为激光晶体, 在利用 10 mm 长 LBO 材料作为倍频晶体的情况下, 获得了输出功率为 195 mW 的具有低噪声特性的 473 nm 蓝光激光运转。实验结果表明, 倍频输出功率(峰-峰)/平均值 $<1\%$, 激光输出在 1 h 内没有激光跳变现象, 并且无需在腔内引入其它元件。

关键词: 蓝光激光器; 腔内倍频; 噪声; 准三能级; 再吸收损耗

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

LD pumped intracavity frequency doubling 473 nm Nd:YAG/LBO laser with low noise operation

LI Yi-min^{1,2}, TAN Hui-ming¹, FU Xi-hong^{1,2}, TIAN Yu-bing^{1,2}, WANG Bao-shan^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The larger amplitude fluctuations of high-frequency output power in a laser-diode pumped intracavity frequency doubled 473 nm Nd:YAG/LBO blue laser are observed without special intracavity elements, which is called the "blue problem", and it seriously restricts the development and applications of the 473 nm blue laser in many fields. To reduce the high-frequency noise of frequency doubling output of the blue laser, a method of decreasing reabsorption losses in quasi-three-level laser system was presented by increasing intracavity circulating intensity of fundamental wave and by decreasing length of laser crystal. In experiment, using two 2 W LD as pumped source and a 1.0 mm Nd:YAG crystal as laser crystal, the blue laser with output power of 195 mW and low noise operation was obtained by intracavity doubling with a 10 mm LBO. The experimental results show that the (peak-peak)/mean value of frequency doubling output power of the blue laser is less than 1%. The laser output is no hopping in 1 h and also no any intracavity elements are introduced to control the longi-

收稿日期:2007-04-19; 修订日期:2007-07-05.

基金项目:国家 863 高技术计划资助项目(No. 2002AA311140)

tudinal mode.

Key words: blue laser; intracavity frequency doubling; noise; quasi-three-level; reabsorption loss

1 引言

激光二极管(LD)泵浦腔内倍频全固态激光器以其体积小、功率高、光束质量好、光子能量大等优点在高密度存储、打印、显示、荧光激发、喇曼光谱学等方面具有广泛的应用^[1-3]。但在 LD 泵浦腔内倍频全固态激光器中,当光学谐振腔内不引入任何选频元件和偏振元件时,由于激光谐振腔内基频光光场的驻波效应造成了激光的多纵模起振,而众多的激光纵模在非线性晶体内的相互耦合导致了激光器件倍频输出功率的高频抖动,即激光噪声问题^[4],很大程度上限制了全固态激光器在很多领域内的应用。LD 泵浦腔内倍频全固态 Nd:YAG/LBO 蓝光 473 nm 激光器的此类问题与同条件下的腔内倍频绿光激光器相比更为突出,输出的噪声也更大,被人们称为“蓝光问题”^[5]。

对于解决腔内倍频准三能级 473 nm 激光器的“蓝光问题”,人们大多仍采用与解决四能级腔内倍频绿光类似的研究路线:从控制腔内基频光纵模个数和偏振状态两个方面来降低输出的倍频光功率的高频抖动^[6-7]。在绿光 Nd:YAG/KTP 激光器中所使用的倍频晶体 KTP 是 II 类相位匹配倍频晶体,而在蓝光 473 nm 激光器中,一般所采用的 LBO、BIBO、KN 等皆是 I 类相位匹配倍频晶体,这导致很多可以应用到腔内倍频 Nd:YAG/KTP 绿光激光器中降低噪声的方法在蓝光 473 nm 激光器中并不适用。就很多用于降低蓝光 473 nm 激光器噪声的方法而言,由于其腔内所加元件对加工工艺要求严格和装调困难,从而导致其并不能广泛地推广到实际的生产应用领域。而所有解决蓝光倍频噪声问题的方法几乎都是围绕着腔内基频光的状态(包括纵模的个数和偏振状态)展开的,很少注意到蓝光准三能级与绿光四能级系统的差别。

本文通过提高腔内基频光循环强度和缩短激光晶体长度来减小准三能级激光系统的再吸收损耗,使准三能级激光运转特性接近四能级激光系统,实现蓝光 473 nm 激光器的低噪声运转。实

验中使用两个输出功率为 2 W 的 LD 耦合作为泵浦源和 1.0 mm 厚的 Nd:YAG 材料作为激光晶体,在利用 10 mm 长 LBO 材料作为倍频晶体的情况下,获得了具有低噪声特性的蓝光 473 nm 激光运转,最大输出功率为 195 mW。

2 理论分析与实验

2.1 蓝光激光器低噪声运转机理分析

对于 LD 泵浦全固态腔内倍频激光器的噪声运转机理,早在 1986 年,已被美国科学家 T. Baer 引入一耦合微分方程组所描述^[4]。该方程组分析了腔内激光模式强度和增益随时间的动态变化关系。后来此方程组经 James 等引入偏振模耦合的因素得以进一步的完善^[8]。通过此方程组与李德华提出的用于处理激光谐振腔内含有两个双折射元件的双波片模型结合可以得出:在 LD 泵浦的腔内倍频四能级绿光激光器中,如果将 II 类相位匹配倍频晶体 KTP 换作 I 类相位匹配倍频晶体 LBO 或者 BIBO,则在倍频光输出功率中,将获得具有低噪声运转特性的绿光^[9]。

然而,腔内倍频绿光激光器中表现出来的这种良好的输出特性,在使用同样相位匹配类型倍频晶体 LBO 的腔内倍频准三能级蓝光 473 nm 激光器中却未被发现。这种差异显然不是由于倍频晶体本身造成的。回顾描述激光噪声行为的耦合微分方程组,发现蓝光 473 nm 激光器系统与四能级绿光激光系统的差别仅仅在于准三能级激光系统中存在着较强的再吸收损耗,这是由准三能级的激光跃迁下能级粒子数不为零造成的^[10-11]。可以预计,如果能够合理地控制再吸收损耗大小,腔内倍频准三能级激光器的噪声必然会得到良好的改观。

准三能级激光系统中再吸收损耗的大小为下式:

$$\delta_{\text{rea}} = \sigma f_1 N_{\text{ion}} L I_{\text{sat}} \ln(1 + 2I/I_{\text{sat}}) / I, \quad (1)$$

其中, σ 为激光器所利用的基频 946 nm 谱线的受激发射截面, f_1 为 946 nm 激光跃迁下能级的布居百分比, N_{ion} 为激光晶体中稀土离子的掺杂浓度, L 为激光晶体长度, I 为激光谐振腔内基频光

的循环强度, I_{sat} 为腔内基频光饱和光强, 它由 $I_{\text{sat}} = h\gamma / [(f_i + f_u)\sigma\tau]$ 得出, 其中 $h\gamma$ 为基频光光子能量, f_u 为激光上能级布居百分比。

由式(1)可知, 准三能级激光系统中的再吸收损耗可以从两个方面来降低: (1) 通过提高泵浦功率来增大激光谐振腔内的基频光循环强度。(2) 减小激光晶体的长度, 使再吸收损耗线性减小, 通过增加腔内基频光循环强度来控制再吸收损耗实现降低激光器倍频噪声, 该方法的可行性已经被本课题组证实^[12]。

2.2 腔内倍频 473 nm 蓝光激光器低噪声实验

2.2.1 低噪声激光器实验装置设计

为进一步降低腔内倍频 473 nm 蓝光激光器的噪声, 实验中采取了结合上述两个方法的新方案。即利用两个标称功率为 2 W 的 LD 耦合后的能量来提高泵浦强度并利用厚度为 1.0 mm 的 Nd:YAG 材料作为激光晶体进行实验。厚度仅为 1.0 mm 的激光晶体 Nd:YAG, 比一般激光实验中为追求最大输出功率情况下的最佳长度要小, 从而可导致泵浦光不能被完全充分吸收利用, 但这对于通过减小准三能级系统中的再吸收损耗来降低倍频光的输出噪声却具有很重要的意义。

实验装置如图 1 所示, 两个发射中心波长为 808 nm 的 2 W LD 通过紫铜热沉由电子致冷器进行严格温度控制, 以使其发射波长严格与激光晶体 Nd:YAG 的吸收峰相吻合。

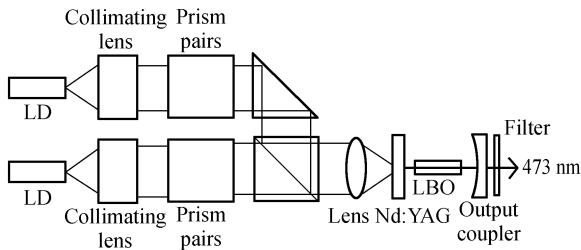


图 1 腔内倍频 473 nm 蓝光低噪声激光器装置图

Fig. 1 Setup of 473 nm intracavity frequency doubling blue laser in low noise operation

两个 LD 经过一系列耦合光学系统后将能量共同聚焦在掺杂浓度为 1.0% 的激光晶体 Nd:YAG 上, 光斑半径约为 $90 \mu\text{m}$ 。激光晶体左侧端面镀制 808 nm 增透膜和 946 nm 高反膜, 作为谐振腔腔镜。激光晶体右侧镀制 946 nm 增透膜。输出镜曲率半径为 50 mm, 镀制 946 nm 高

反膜和 473 nm 增透膜, 除此外, 还镀制 1 064 nm 和 1 319 nm 增透膜以抑制强烈的四能级激光振荡。整个谐振腔长约 20 mm, 便于激光器的小型化。

实验中, LBO 材料因其抗损伤阈值大、倍频效率高、走离角小、光束质量好等优点被选作腔内倍频晶体。对于 946 nm 波长 I 类临界相位匹配, 该晶体的切割方向为 $\Theta = 90^\circ$; $\Phi = 19.4^\circ$, 尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 晶体两端镀制 946 nm 和 473 nm 增透膜。整个谐振腔及倍频晶体被固定在精度为 0.1°C 的电子致冷器上, 便于精密控制激光器件温度。

2.2.2 实验现象及结果

2.2.2.1 激光输出功率特性曲线

利用滤光片滤掉从输出镜透出的 946 nm 红外基频光, 由高精度量子探头测定蓝光的输出功率。图 2 给出了测得蓝光 473 nm 输出功率随泵浦光功率变化的关系曲线。从图中可以看出, 此激光器的蓝光阈值约为 310 mW, 当泵浦功率为 2.8 W 时, 获得了 195 mW 的最大功率蓝光输出。光-光转换效率为 7%, 并未出现饱和现象。光-光转化效率偏低, 如前所述, 这主要是由于实验中所使用的激光晶体 Nd:YAG 的长度与其它蓝光实验中所使用的激光晶体相比较短。通过输出功率曲线还发现, 当泵浦光功率超过一定量以后, 斜率效率有增大的趋势, 这主要源于泵浦功率增加导致了腔内基频光循环强度增大, 再吸收损耗迅速减小, 激光的运行情况更接近四能级激光系统^[10]。

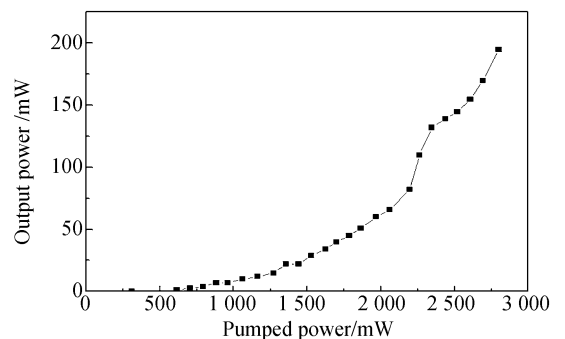


图 2 腔内倍频 473 nm 蓝光激光器输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 2 Output power of 473 nm intracavity frequency doubling blue laser as a function of pumped power

2.2.2.2 激光输出噪声特性

为考察蓝光 473 nm 输出功率噪声特性, 实验中将蓝光中红外光滤掉并衰减后, 经快速硅光电二极管将光信号转化为电信号, 送入 LeCroy9361C 型示波器内观察其噪声情况。实验结果表明, 当两个 LD 两路耦合功率总和超过一定数值时, 在激光输出中非常容易获得具有低噪声特性的蓝光。这是由于当泵浦功率增加时, 腔内的基频光循环强度增大, 使得准三能级激光系统的再吸收损耗减小很多, 此时的激光动力学行为十分类似于腔内运用 I 类相位匹配倍频晶体 LBO 或 BIBO 的四能级绿光激光系统, 故而蓝光 473 nm 激光倍频输出功率抖动变得十分低。

由于本实验在调节过程中始终保持开放状态, 没有对激光谐振腔进行很好的对外界隔热处理, 环境温度对激光系统的扰动没有完全消除, 达到低噪声的临界状态的泵浦功率不是十分确定, 所以在图 2 中没有给出清晰的低噪声运转范围。但一般来说, 激光器开始出现低噪声运转特性时, 恰恰为激光输出功率的斜率效率有明显增加处。说明了在腔内倍频准三能级激光器中再吸收损耗因素对于其倍频光噪声行为的影响。

本实验获得了最大输出功率为 195 mW, 具有良好低噪声特性的 473 nm 蓝光激光运转。如图 3 为示波器观察到的激光输出功率抖动情况。实验数据显示: 蓝光倍频光输出十分稳定, 倍频激光高频抖动(峰-峰)/平均值 < 1%, 并且该稳定输出在 1 h 内没有发生功率跳变现象。

值得指出的是, 该低噪声蓝光激光器与以往报道的蓝光低噪声激光器相比, 在光学谐振腔中没有引入任何控制激光纵模个数或控制纵模偏振

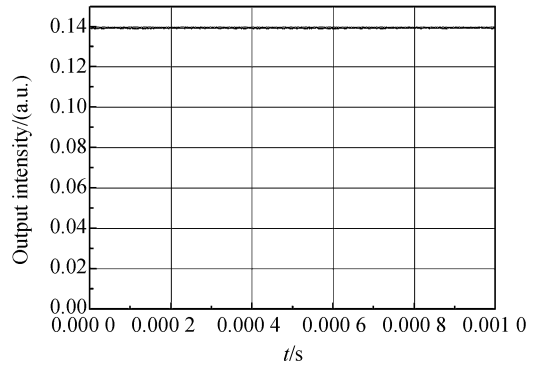


图 3 腔内倍频 473 nm 蓝光激光器低噪声输出
Fig. 3 Oscilloscope traces of the high-frequency noise of 473 nm blue laser

状态的元件, 这无疑减少了对腔内基频光的损耗, 使其更有效地向蓝光转化, 有利于提高蓝光的输出功率。同时, 这也给激光器件的调节带来极大的方便和好处, 有利于该类型激光器件的产业化。

3 结 论

本文提出了控制激光器的再吸收损耗来减小腔内倍频 473 nm 激光器噪声的方法。实验中利用两个标称功率为 2 W 的 LD 耦合作为泵浦源, 1.0 mm 厚的 Nd:YAG 材料作为激光晶体, 在利用 10 mm 长 LBO 材料作为倍频晶体的情况下, 获得了输出功率为 195 mW 的具有低噪声特性的 473 nm 蓝光激光运转, 倍频输出功率抖动(峰-峰)/平均值 < 1%, 激光输出功率非常稳定, 在 1 h 内无功率跳变现象, 并且无需在腔内引入其它元件, 易于调节。

参考文献:

- [1] 申高, 檀慧明, 刘飞. 全固态 355 nm 连续紫外激光器的优化设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 731-735. SHEN G, TAN H M, LIU F. Optimization design for all-solid-state 355nm continuous-wave ultraviolet laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 731-735. (in Chinese)
- [2] 张岳, 郝丽, 柳华, 等. 激光显示的原理与实现[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 402-405. ZHANG Y, HAO L, LIU H, et al.. Principle and realization of laser display technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 402-405. (in Chinese)
- [3] 吕彦飞, 张喜和, 姚治海, 等. 1.1 W 内腔和频连续波橙黄光 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 736-739. LV Y F, ZHANG X H, YAO ZH H, et al.. 1.1 W continuous-wave orange-yellow light Nd:YVO₄ laser with intracavity sum-frequency generation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 736-739. (in Chinese)
- [4] BAER T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:

YAG lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(9): 1175-1180.

- [5] CZERANOWSKY C, BAEV V, HUBER G. Stabilization of intracavity frequency-doubled lasers with type I phase matching [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(21): 2100-2102.
- [6] 郑权, 赵岭, 钱龙生. LD 泵浦 Nd: YAG/LBO 蓝光激光器的低噪声运转[J]. 光子学报, 2003, 32(11): 1291-1293. ZHENG Q, ZHAO L, QIAN L SH. Low Noise Operation of a LD-pumped Nd: YAG/LBO Blue Laser[J]. *Acta Photo. Sin.*, 2003, 32(11): 1291-1293. (in Chinese)
- [7] USTYUGOV V I, ORLOY O A, KHALEEV M M, *et al.*. Self-stabilization of a continuous wave multimode green laser due to antiphase dynamics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(2): 154-156.
- [8] JAMES G E, HARRELL E M, ROY R. Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers. II [J]. *Physical Review A*, 1990, 41(5): 2778-2790.
- [9] LI D H, ZHU CH H, GAEBLER V, *et al.*. Theoretical and experimental studies of noise suppression for intracavity frequency doubled lasers with phase matching type I or II [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 189(4-6): 357-364.
- [10] FAN T, BYER R. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd: YAG laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(5): 605-612.
- [11] RISK W. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(7): 1412-1423.
- [12] 李义民, 檀慧明, 付喜宏, 等. 腔内倍频准三能级与四能级激光器噪声特性的比较分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 628-632. LI Y M, TAN H M, FU X H, *et al.*. Compare and analyse for the noise properties in intracavity-doubling quasi-three and four-level solid state laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 628-632. (in chinese)

作者简介:李义民(1979—),男,在读博士研究生,主要从事 LD 泵浦全固态激光器及光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: lym79hsd@163.com

檀慧明(1954—),男,研究员,主要从事非线性光学、全固态激光器的研究。E-mail: hmtan1@mail.jl.cn

下期预告

干涉法实时测量浅度非球面技术

王孝坤^{1,2}, 王丽辉^{1,2}, 张学军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种实时干涉检测非球面的新方法,该方法无需补偿器、计算全息图等辅助元件就能实现对浅度非球面的测量。对非球面度较小的非球面,直接利用标准球面镜作为参考表面,通过数字干涉仪可以测得全孔径位相分布,将所得的数据剔除参考球面波相对理论非球面的偏差,并运用最小二乘拟合求得机构定位误差,消去此误差,从而能够获得真实的面形信息。利用该方法对一口径为 350 mm 的浅度双曲面进行了测量,通过数据分析和处理得到面形误差的 PV 值和 RMS 值分别为 0.387 λ 和 0.048 λ ($\lambda=632.8$ nm),并将该结果与零位补偿的检测结果相比较,两面形分布是一致的,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.033 λ 和 0.006 λ 。说明该技术对检测浅度非球面是切实可行的。

关键词:光学检测;非球面;干涉术;非球面度;最小二乘拟合