

文章编号: 1007-6654(2006)04-0231-03

LD 端面泵浦 Nd:YAG/BIBO 单模蓝光激光器

李凤琴, 孙越, 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: 从理论上分析了准三能级系统 946 nm Nd:YAG 全固态激光器运转的条件, 并比较了几种不同的倍频晶体的特性, 给出内腔倍频获得 473 nm 蓝光发射的方案。用波长 808 nm、输出功率为 2.2 W 的半导体激光器泵浦 Nd:YAG, 采用内腔倍频的方法, 在一定的温度下, 用 I 类临界相位匹配 BIBO 晶体倍频获得了 473 nm 26.5 mW 的单模连续蓝色激光输出, 功率波动小于 $\pm 5\%$ 。

关键词: 准三能级; LD 泵浦; 内腔倍频; 473 nm 全固态蓝光激光器

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

二极管泵浦的全固态激光器具有结构紧凑、光-光转化效率高、稳定性能好等优点, 在光通讯、激光医学、激光打印、显示和光量子学等方面具有重要应用。通过倍频产生 532 nm 波长的全固态绿光激光器技术已发展成熟, 我们所已经有大、中、小功率的全固态单模单频绿光激光器走向市场^[1-3]。全固态蓝光激光器由于技术难度大等原因目前商品化程度还不高, 但是它作为一种新的相干光源, 在高密度存储、数字视频技术及彩色激光显示等领域中需求迫切。目前, 获得全固态蓝光激光器最有效的手段之一就是利用激光二极管泵浦固体激光介质, 再利用非线性光学频率转换获得。本文对准三能级系统固体激光器的特点做了具体分析, 比较了不同的非线性晶体的倍频特性, 设计了结构简单紧凑、易于调整的 473 nm 稳定运转的全固态蓝光激光器。

1 理论分析

1.1 Nd:YAG 晶体

Nd:YAG 晶体是一种性能优良的激光晶体, 它主要有 946 nm、1 064 nm、1 319 nm 三条谱线, 其中 1 064 nm、1 319 nm 是人们熟悉的激光谱线, 采用传统的方法可以获得, 但用于倍频产生蓝色激光的 946 nm 波长激光谱线属于准三能级 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 之间的

跃迁, 下能级粒子数占基态总粒子数的 0.74%, 存在严重的再吸收损耗^[4-5], 要想实现该谱线振荡比较困难, 必须有很高的泵浦功率密度才能克服这种下能级的再吸收损耗, 使增益介质实现粒子数反转, 产生 946 nm 激光谱线振荡, 因此, 准三能级激光系统比四能级激光系统的阈值高了很多。同时, 由于 946 nm 激光谱线的受激发射截面约为 $4.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 是 1 064 nm 波长激光发射截面的 1/10, 存在强烈的谱线竞争。因此, 采用传统闪光灯泵浦的方法无法在常温下实现 946 nm 准三能级激光的输出。但是激光二极管的出现, 使得 946 nm 的准三能级激光输出得以实现, 而且采用端面泵浦, 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。对于端面泵浦, 准三能级的激光阈值为^[6]:

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p}{4f\sigma\tau[1 - \exp(-\alpha l)]} \times (\omega_0^2 + \omega_p^2)(L + T + 2f_1\sigma N_0 l) \quad (1)$$

其中, T 为输出镜的透射率, L 为腔的内部损耗, N_0 为掺杂浓度, l 为晶体长度, ω_0 为激光束腰半径, ω_p 为抽运光的束腰半径, α 为吸收系数, σ 为发射截面, τ 为能级寿命, f_1 为激光的下能级占基态粒子总数的比例 (0.74%)。

从上式中可以看出, 优化增益介质的长度可以降低阈值, 对于掺杂浓度为 1.1 atm% 的 Nd:YAG 晶

收稿日期: 2006-06-15

作者简介: 李凤琴(1977-), 女, 山西交城人, 现为山西大学光电研究所助教, 从事激光技术方面的研究。

体,我们把阈值公式中的值用下面的常数 ($\sigma = 4.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $L + T = 0.01$, $\alpha = 0.95 \text{ mm}^{-1}$)来代替,对(1)式中长度 l 求导得到:

$$\frac{f_1 N_0 \sigma}{\alpha} = \frac{\exp(-\alpha l)}{1 - \exp(-\alpha l)} \left(f_1 N_0 \sigma l + \frac{L}{2} + \frac{T}{2} \right) \quad (2)$$

计算可得,在阈值最小时,最佳增益介质长度约 2 mm。

1.2 倍频晶体的选择

当前,常用于 946 nm 倍频得到 473 nm 激光的非线性晶体有: KNbO_3 、BBO、LBO、BIBO。其中, KNbO_3 晶体的有效非线性系数最大、走离角小,原则上讲是首选晶体,但它的温度接受角度窄,使用中易出现晶畴,而且价格昂贵;BBO 的有效非线性系数较大,但相位匹配角度范围窄,走离效应严重,激光输出呈椭圆形;LBO 晶体有良好的物理化学性质,损伤阈值很高,接收角大,走离角小,但有效非线性系数和倍频效率较低。而偏硼酸铋(BIBO)是一种新的性能非常优秀的非线性光学晶体,除了具有物理化学性能稳定、不潮解、光损伤阈值高等特点外,其突出优点是有效非线性系数较大,甚至高于 KTP 晶体,BIBO 晶体的双折射率差较大,相位匹配波长随角度的变化灵敏,因此,不仅可用做高效的倍频、和频器件,而且在光参量领域具有一定的应用前景。表 1 为 BBO、LBO 和 BIBO 三种非线性晶体在 I 类临界位相匹配条件下对 946 nm 波段的倍频参数,可以看出 BIBO 晶体作为全固态蓝光激光器腔内倍频器件的产业化前景已相当可观。

表 1 BBO, LBO 和 BIBO 晶体对 946 nm 波段的倍频特性
Tab. 1 properties of BBO, LBO and BIBO for frequency doubling at 946 nm

晶体	BBO	LBO	BIBO
相位匹配方式	I 类临界	I 类临界	I 类临界
相位匹配角	24.9°, 0°	90°, 19.4°	18.3°, 90°
deff (pm/V)	2.08	0.92	3.3
走离角	3.5°	0.7°	2.3°
$\Delta T L$ (K·cm)	23	8	*
$\Delta \theta L$ (mrad·cm)	0.42	2.29	0.65
$\Delta \lambda L$ (nm·cm)	0.43	0.63	*

2 实验装置及结果

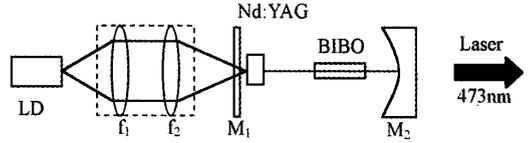


图 1 实验装置图
Fig. 1 Experiment setup

实验装置如图 1 所示,我们采用结构简单紧凑、易于调整、稳定区域大的平凹驻波腔结构,避免了在 V 型或 Z 型折叠腔中由于折叠角的存在带来的象散现象及损耗,总的腔长在稳区内选为 35 mm,输入耦合镜前表面镀 808 nmHT, 946 nmHR, 后表面镀 808 nmAR 膜,输出耦合镜为曲率半径为 100 mm 的平凹镜,凹面镀 946 nmHR 473 nmHT, 平面镀 473 nmAR,为了抑制 1 064 nm、1 342 nm 的激光起振,我们考虑提高 473 nm 激光输出效率的同时,在镀膜上要求 1 064 nm 的透射率大于 50%, 1 342 nm 的透射率大于 20%;泵浦源是最大输出功率为 2.2 W 的激光二极管,采用端面泵浦的方式,经过由焦距分别为 30 mm 和 50 mm 的整形聚焦系统(传输效率约 85%)后,聚焦到激光晶体 Nd:YAG 上,激光的束腰半径约 80 μm ;激光晶体的掺杂浓度为 1.1%,尺寸为 $\phi 5 \times 2 \text{ mm}^3$,一面镀 808 nmAR、946 AR,一面镀 946 nmAR,为了降低激光阈值,降低激光下能级的粒子集居数,有利于减缓准三能级系统在激光运转过程中的温度问题,我们采用水冷和 TEC 冷却相结合的方式,将激光晶体的温度控制在大约 20℃;采用 I 类临界相位匹配的 BIBO 做为倍频晶体,尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 5 mm,两端镀 946 nm 和 473 nm 的双增透膜,表面温度控制在大约 30℃。当泵浦功率为 2.2 W 时得到了 26.5 mw 的单模 473 nm 蓝光输出,考虑泵浦聚焦系统的传输效率,激光器的光-光转化效率约 1.4%,三个小时内功率波动小于 $\pm 5\%$ 。图 2、图 3 分别为激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线及激光器输出功率的长期功率稳定性曲线,从图 2 中可以看出激光器的阈值为 1.04 W,而且随着激光器连续运行时间的增长,激光输出功率趋于更加稳定。

3 结论

本文通过分析实现 946 nm 起振的条件以及比较几种不同的非线性晶体的特性,选择了简单易操

作的平-凹谐振腔结构,在泵浦功率为 2.2 W 的情况下,得到了 26.5 mw 的 473 nm 稳定单模蓝光输出,光光转化效率约 1.4%,三个小时内功率波动小于

$\pm 5\%$,为下一步蓝光激光器的产品化提供了理论依据,我们将进一步分析影响输出效率的因素,提高蓝光激光器的输出功率及长期工作稳定性。

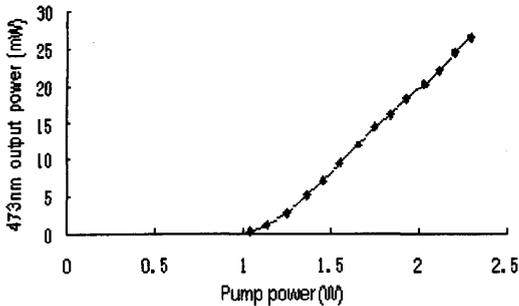


图2 蓝光输出随泵浦功率的变化曲线

Fig.2 Output power of 473 nm as a function of LD pump power

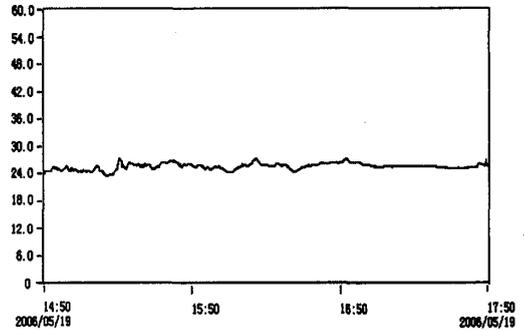


图3 长期功率稳定性曲线

Fig.3 Long-term stability of output power(3 hours)

参考文献:

- [1] 彭堃堦,李瑞宁,黄茂全,等. 稳频环形 Nd:YAG 激光器 [J]. 中国激光, 1989, 16(8): 449.
- [2] 张宽收,谢常德,彭堃堦,等. 全固 Nd:YVO₄单频绿光激光器 [J]. 中国激光, 1994, A21(8): 617.
- [3] 李凤琴,郑耀辉,张宽收. 全固态高功率连续单横模 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器 [J]. 量子光学学报, 2006, 12(3): 176-179.
- [4] 刘伟仁,霍玉晶,何淑芳,等. Nd³⁺:YAG 的 946 nm 准三能级激光系统理论分析 [J]. 光学技术, 2002, 28(4): 319-321.
- [5] BARNES N P, WALSH B M, HUTCHESON R L, et al. Pulsed 4F3/2 to 4I9/2 operation of Nd lasers [J]. J Opt Soc Am (B), 1999, 16(12): 2169-2177.
- [6] 郑耀辉. LD 端面泵浦的全固化单频蓝光激光器 [D]. 太原:山西大学,2004.

LD End-pumped Nd:YAG/BIBO TEM₀₀ Mode Blue Laser

LI Feng-qin, SUN-Yue, ZHANG Kuan-shou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, People's Republic of China)

Abstract: In this paper, the authors design and build a LD end-pumped Nd:YAG/BIBO TEM₀₀ mode blue laser. Considering the theory of Nd:YAG 946 nm quasi-three-level laser system and Comparing the properties of BBO、LBO and BIBO for frequency doubling at 946 nm, the authors present the way to realize the operation of 473 nm all-solid-state blue laser. With incident pump power of 2.2 W, output power of 26.5 mW at 473 nm can be obtained using an intra-cavity doubling crystal of BIBO. The longtime stability of the output is $\pm 5\%$.

Key words: quasi-three-level; LD pumped; intra-cavity doubling; 473 nm all-solid-state blue laser

LD端面泵浦Nd:YAG/BIBO单模蓝光激光器

作者: [李凤琴](#), [孙越](#), [张宽收](#), [LI Feng-qin](#), [SUNYue](#), [ZHANG Kuan-shou](#)
作者单位: [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](#)
刊名: [量子光学学报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [ACTA SINICA QUANTUM OPTICA](#)
年, 卷(期): 2006, 12(4)
被引用次数: 1次

参考文献(6条)

1. [彭堃堃](#); [李瑞宁](#); [黄茂全](#) [稳频环形Nd:YAG激光器](#) [期刊论文] - [中国激光](#) 1989(08)
2. [张宽收](#); [谢常德](#); [彭堃堃](#) [全固Nd:YVO4单频绿光激光器](#) [期刊论文] - [中国激光](#) 1994(08)
3. [李凤琴](#); [郑耀辉](#); [张宽收](#) [全固态高功率连续单横模Nd:YVO4/LBO绿光激光器](#) [期刊论文] - [量子光学学报](#) 2006(03)
4. [刘伟仁](#); [霍玉晶](#); [何淑芳](#) [Nd³⁺:YAG的946 nm准三能级激光系统理论分析](#) [期刊论文] - [光学技术](#) 2002(04)
5. BARNES N P; WALSH B M; HUTCHESON R L [Pulsed 4F3/2 to 4I9/2 operation of Nd lasers](#) 1999(12)
6. [郑耀辉](#) [LD端面泵浦的全固化单频蓝光激光器](#) [学位论文] 2004

引证文献(1条)

1. [张峻诚](#), [王加贤](#), [熊刚强](#), [苏培林](#), [王娟娟](#) [LD抽运Nd:YVO4/KTP复合腔和频黄光激光器](#) [期刊论文] - [量子光学学报](#) 2008(4)

引用本文格式: [李凤琴](#), [孙越](#), [张宽收](#), [LI Feng-qin](#), [SUNYue](#), [ZHANG Kuan-shou](#) [LD端面泵浦Nd:YAG/BIBO单模蓝光激光器](#) [期刊论文] - [量子光学学报](#) 2006(4)