

文章编号: 0258-7025(2003)08-0673-04

Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器

郑 权^{1,2}, 赵 岭¹, 邵永红¹, 檀慧明¹, 钱龙生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 130022)
² 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了 LD 抽运, Cr:YAG 被动调 Q, Nd:YAG/LBO 结构的 473 nm 全固态蓝光激光器。在注入抽运功率为 1600 mW 时, 得到平均功率 9.1 mW, 脉冲宽度 14.5 ns, 重复频率 4.19 kHz, 峰值功率近 150 W 的被动调 Q 蓝光脉冲输出。

关键词 激光技术; 蓝光激光器; LD 抽运; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1+3 **文献标识码** A

Cr:YAG Passively Q-switched All-solid-state Blue Laser at 473 nm

ZHENG Quan^{1,2}, ZHAO Ling¹,

SHAO Yong-hong¹, TAN Hui-ming¹, QIAN Long-sheng¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China
² The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A LD-pumped, Cr:YAG passively Q-switched Nd:YAG/LBO blue laser was reported. With 1600 mW incident pump laser, Q-switched blue laser with average power of 9.1 mW, pulse duration of 14.5 ns, repetition rate of 4.19 kHz and peak power of nearly 150 W were obtained.

Key words laser technique; blue laser; LD-pumped; passive Q-switching

1 引言

众所周知, Nd:YAG 除了 1064 nm 和 1320 nm 的受激辐射跃迁外, 还可以产生 946 nm 波段的弱辐射, 经腔内倍频, 最终可获得波长为 473 nm 的蓝色激光。对于 473 nm 全固态蓝光激光器, 已有大量文献报道^[1,2], 其中多为采用 Nd:YAG/KN 组合结构。原因是 KN 晶体的有效非线性系数很大, 倍频效率高。但在实际应用中, KN 晶体易潮解, 而且目前 KN 晶体极化、定向和加工等工艺难度高, 价格昂贵, 这些因素都制约着全固态蓝光激光器产业化发展。

近几年来, 具有良好物化性能的慢饱和吸收体 Cr:YAG 的出现已引起了国内外学者的极大兴趣^[3]。Cr:YAG 被动调 Q 方式已经在 LD 抽运的 Nd:YAG 和 Nd:YLF 等激光器中成功地得到运用, 输出了高重复频率脉冲 1064 nm 激光^[4]。本课题组在这方面也进行了大量研究, 并报道了 LD 抽运, Cr:YAG 被动调 Q, KTP(或 LBO) 晶体腔内倍频的 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 被动调 Q 绿光激光器^[5]。

本文从激光产生和倍频理论出发, 采用 I 类界面位相匹配 LBO 代替 KN 晶体进行腔内倍频, 通过

收稿日期: 2002-04-22; 收到修改稿日期: 2002-05-30

基金项目: 国家 863 计划资助项目(No. 863-307-13-02, 863-Z35-2B)。

作者简介: 郑权(1973—), 男, 黑龙江省人, 理学博士, 现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室从事博士后研究, 主要研究方向为高性能及大功率全固态激光器。E-mail: zhengquanok@163.com

在腔内加入 Cr:YAG 晶片,获得了高峰值和高重复率的被动调 Q 脉冲 473 nm 蓝激光输出。该被动调 Q 蓝光激光器对于遥感、通讯、非线性光学,尤其是荧光光谱学有重要的应用价值。

2 分析与设计

2.1 946 nm 谱线选择与膜系设计

作为激光介质,Nd:YAG 存在三条荧光谱线(1064 nm,1320 nm 和 946 nm)。其中,1064 nm 和 1320 nm 发射截面都比 946 nm 大,因此,若想获得 946 nm 的激光振荡,必须首先抑制 1064 nm 和 1320 nm 起振,这可以采取增加谐振腔对 1064 nm 和 1320 nm 的透射损耗方法实现。计算得出,在系统对 1064 nm 和 1320 nm 的透过率大于 70% 时,可以确保在较大抽运功率时也只有 946 nm 形成激光振荡。

纵向抽运全固态蓝光激光器的膜系可以按图 1 所示的要求进行设计(注:在膜系设计中,对 1064 nm AR 的要求同时往往已经满足了 1320 nm AR 的要求)。

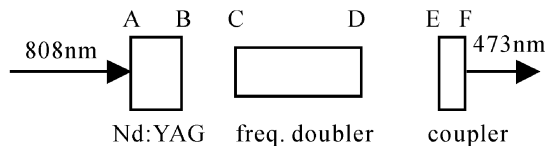


图 1 纵向抽运蓝光激光器膜系要求

Fig. 1 Coating requirements of a LD-pumped blue laser

A:808AR/946HR; B:946AR; C and D:946AR/473AR;
E:946HR/473AR/1064AR; F:473AR/1064AR

946 nm 高反膜的镀制一直是影响蓝光激光器输出效率的主要因素,由于 946 nm 谱线的振荡阈值高,增益系数小,谐振腔元件对 946 nm 的镀膜要求相当严格,以尽量减少基频光的损耗。另外,图 1 的 A 面既充当谐振腔的高反镜,又充当抽运光的入射窗口,要求 Nd:YAG 的端面镀制同时满足 946 nm 高反和 808 nm 抗反的膜系,又进一步增加了镀膜难度。在同一元件各镀膜要求出现不能避免的矛盾时,我们侧重满足了 946 nm 的要求。

2.2 抽运光学系统的设计

因为 LD 发出的光束是一个椭圆光锥,用这样的光束去抽运激光晶体势必造成反转粒子数在横截面上分布不均匀,在圆对称腔体内也就很难得到 TEM₀₀ 模。为此,设计了由准直镜-扩束镜-聚焦镜三部分组成的抽运光学系统,其结构如图 2 所示。

其中,准直镜把发散角很大的高斯光束准直成近似平行的光线;用棱镜对来对 LD 发散角小的方向进行扩束,也就是对 LD 光束进行圆化,最后用聚焦镜将抽运光聚成很小的光斑入射到激光晶体内。

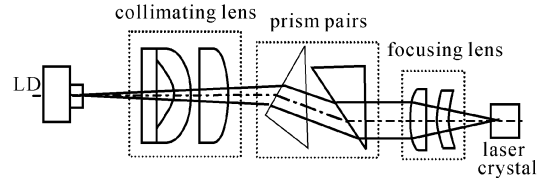


图 2 抽运光学系统

Fig. 2 Scheme of the pumping system

尽管该光学系统结构复杂,光路传输效率较低(约为 85%),但由于能够改变抽运光束的空间分布,增加激光晶体内抽运能量空间分布与激光腔模之间的重叠度,也能够实现较高的激光效率。实验中采用的 2 W LD 抽运,其发散角为 8.2 deg×34.5 deg,经耦合光学系统聚焦后形成椭圆度 0.93,束腰半径约 80 μm 的高质量抽运光。

2.3 激光晶体、倍频晶体、调 Q 晶体的考虑

1) 对 Nd:YAG 晶体,需要注意的是其 946 nm 激光谱线为准三能级系统^[6]。对准三能级系统,要求激光晶体工作在较低的温度环境下,因此需要对 Nd:YAG 单独强制冷。另一个值得注意的问题是 Nd:YAG 对 946 nm 波段存在较为强烈的自吸收现象,因此 Nd:YAG 不宜太厚。考虑到 946 nm 谱线增益较小,抽运光斑较小时会降低激光阈值。

2) 当前,人们多选用 KN 晶体实现 946 nm 倍频。KN 的有效非线性系数大、倍频效率高,但易潮解,并且加工难,价格高,这些因素制约着全固态蓝光激光器的实用化。为此,我们把目光转向了新型的 BBO 和 LBO 晶体。表 1 列出了在 I 类临界相位匹配条件下三种晶体对 946 nm 波段的倍频参数。

可见,BBO 晶体的非线性有效系数约是 LBO 的 1.5 倍,但走离角是 LBO 的 5 倍。根据由走离效应决定的倍频晶体中基频光与倍频光的最大相互作用长度 (L_{\max}) 公式

$$L_{\max} = 1.16w/\rho \quad (1)$$

其中, w 为倍频晶体中基频光的光束半径, ρ 为走离角。考虑到激光器的倍频光功率与有效非线性系数 d_{eff} 和晶体长度 L 乘积 ($d_{\text{eff}} \times L$) 的平方成正比。由 (1) 式知,虽然 LBO 的 d_{eff} 较小,但可以通过增加 LBO 的长度使倍频效率提高。另外,在 LBO 走离角 ρ 很小的情况下,适当减小 w 仍有较大的 L_{\max} 值。而

减小 ω , 会增加腔内经过 LBO 的基频光功率密度, 从而进一步提高倍频效率。

也可以选用较长的 I 类相位匹配 LBO, 优化设计出相对较小的光腰尺寸来获得较高的倍频转换效率。而 LBO 的走离角非常小、抗光损伤阈值高, 所以该措施是切实可行的。

3) 与传统的有机染料和色心晶体相比, 慢饱和吸收体 Cr:YAG 具有良好的物理化学性能, 其热导

性好、损伤阈值高、使用方便、寿命长。该晶体在 1000 nm(900~1100 nm)附近具有饱和吸收特性, 并且吸收截面大、饱和光强低, 适合对 946 nm 波段的 Nd:YAG 激光器进行被动调 Q。需要注意的是 Cr:YAG 存在一定的激发态吸收, 该吸收使材料的饱和透过率小于 100%, 增加了腔内的插入损耗, 因此 Cr:YAG 需要较强的制冷, 使大量处于激发态的离子及时回到基态。

表 1 KN, BBO 和 LBO 晶体在 946 nm 波段的倍频参数

Table 1 Properties of KN, BBO and LBO for frequency doubling at 946 nm

SHG crystal at 946 nm	KN	BBO	LBO
Phase matching-angle /deg	$\theta = 90^\circ, \phi = 59.9^\circ$	$\theta = 24.9^\circ, \phi = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ, \phi = 19.4^\circ$
Acceptance angle /mrad · cm	$\Delta\theta = 38.9^\circ, \Delta\phi = 0.45^\circ$	$\Delta\theta = 0.474^\circ, \Delta\phi = \text{large}$	$\Delta\theta = 39.1^\circ, \Delta\phi = 2.58^\circ$
Nonlinear coefficient (with respect to KDP)	27.36	3.74	2.53
Walk-off angle /deg	2.68°	3.44°	0.65°

3 实验装置

根据上面的分析, 设计了图 3 所示的实验装置。采用中国科学院半导体所生产的连续输出功率为 2 W 的 LD 作为抽运源; 采用中国科学院上海光机所生长的 Nd:YAG 和 Cr:YAG 作为激光介质和被动 Q 开关; 采用中国科学院福建物质结构研究所提供的 LBO 晶体作为倍频器; 采用中国科学院长春光机所提供的高稳定性驱动电源对 LD 提供稳定的电流, 并对 LD, Nd:YAG/Cr:YAG 和 LBO 等元件分别进行温度控制。这样, 整个器件实现了完全国产化。

LD 在 18°C 下中心发射波长为 807.5 nm, 其发散角为 8.2 deg × 34.5 deg。LD 发出的光经过耦合光学系统的准直、扩束、聚焦, 最终成为椭圆度 0.93, 束腰半径约 80 μm 的高质量抽运光, 入射到 Nd:YAG 上。激光晶体 Nd:YAG(厚 1.5mm, 掺杂浓度 1.1 at.-%)左端面镀 808 nm AR/946 nm HR 膜 ($R @ 808 < 5\%, R @ 946 > 99.8\%$), 右端面镀 946 nm AR 膜 ($R @ 946 < 0.02\%$); 调 Q 晶体 Cr:YAG(3 mm × 3 mm × 1.0 mm, 对 946 nm 的小信号

通过率 $T_0 = 87\%$) 两面均镀 946 nm AR 膜 ($R @ 946 < 0.02\%$); 倍频晶体 LBO(2 mm × 2 mm × 10 mm, I 类临界相位匹配) 两端均镀 946 nm 和 473 nm AR 膜 ($R @ 946 < 0.02\%, R @ 473 < 1\%$)。输出平凹耦合镜(OC)左凹面(曲率半径 50 mm)镀 946 nm HR 膜 ($R @ 946 > 99.8\%$) 和 473 nm/1064 nm/1320 nm AR 膜 ($R @ 473 < 1\%, R @ 1064 < 30\%, R @ 1320 < 20\%$), 右平面镀 473 nm/1064 nm/1320 nm AR 膜 ($R @ 473 < 1\%, R @ 1064 < 1\%, R @ 1320 < 1\%$)。

实验中使用的腔长约为 20 mm, 此时谐振腔内光腰约 85 μm, 略大于抽运光斑, 满足纵向抽运全固态激光器谐振腔设计的模式匹配条件^[7]。LD, Nd:YAG/Cr:YAG 和 LBO 分别用半导体制冷器 (TEC₁, TEC₂, TEC₃) 严格温控, 确保 LD 发光波长与 Nd:YAG 吸收峰重合, 消除 Nd:YAG 和 Cr:YAG 的热效应, 并使 LBO 处于最佳位相匹配状态。

4 实验结果

如图 3, 用滤光片滤去 808 nm 和 946 nm 后, 用 Coherent 公司的 LabMaster Ultima P540 功率计、重庆光电所产 GT-106 型 PIN 快速硅光电二极管和瑞士产 300MHz 带宽 LeCroy 9361C 型数字示波器分别对被动调 Q 脉冲蓝光输出的平均功率、脉冲宽度、脉冲周期(重复频率)和峰值功率等重要参数进行测量。

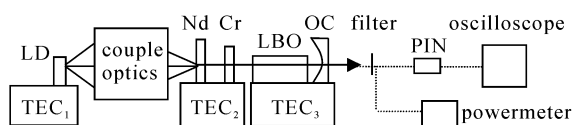


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Setup of Q-switched blue laser

Nd: Nd:YAG; Cr: Cr:YAG; OC: output coupler

测得抽运光阈值约为 760 mW。在注入抽运功率为 1600 mW 时,得到平均功率 9.1 mW,脉冲宽度 14.5 ns,重复频率 4.19 kHz,峰值功率近 150 W 的被动调 Q 脉冲蓝光输出,输出光束质量为 TEM₀₀ 模。图 4 和 5 分别给出了脉冲波形和脉冲序列图。

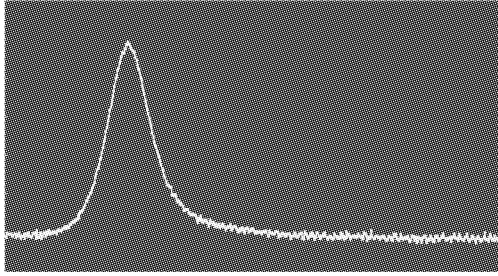


图 4 473 nm 调 Q 蓝光脉冲波形

Fig. 4 Shape of the 473 nm Q-switched pulse

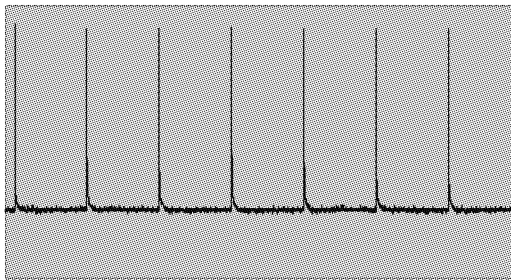


图 5 调 Q 蓝光脉冲序列

Fig. 5 Pulse series of Q-switched blue laser

5 结 论

以上实验结果证明,所采用的连续激光二极管

抽运 Nd:YAG 晶体,LBO 晶体腔内倍频,慢饱和吸收体 Cr:YAG 被动调 Q 全固态蓝光激光器结构紧凑,输出的调 Q 蓝光脉冲宽度窄、峰值功率大、重复频率高,适合产品化。该被动调 Q 蓝光激光器对于遥感、通讯、非线性光学,尤其是荧光光谱学有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 V. Pruneri, R. Koch, P. G. Kazansky *et al.*. 49 mW cw blue light generated by first-order quasi-phase-matched frequency doubling of a diode-pumped 946-nm Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23):2375~2377
- 2 David G. Matthews, Richard S. Conroy, Bruce D. Sinclair. Blue microchip laser fabricated from Nd:YAG and KNbO₃ [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3):198~200
- 3 Ren Yuxin, Lin Lihuang, Ouyang Bin *et al.*. Absorption of excited state of Cr⁴⁺:YAG crystal [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(2):225~227 (in Chinese)
- 4 Y. Shimony, Z. Burshtein, A. Ben-Amar Baranga *et al.*. Repetitive Q-switching of a CW Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG saturable absorbers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2):305~310
- 5 Q. Zheng. LD-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ infrared and green lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(5):355~357
- 6 I. Freitag, R. Henking, A. Tünnermann *et al.*. Quasi-three-level room-temperature Nd:YAG ring with high single-frequency output power at 946 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(24):2499~2501
- 7 Paolo Laporta, Marcello Brusaard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10):2319~2326