

文章编号: 0258-702X(2002)04-0289-04

LBO I 类临界相位匹配倍频 671 nm 激光器

檀慧明, 郑 权, 陈颖新, 周立民, 叶子青

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

提要 采用 1 W 国产半导体激光二极管抽运 Nd:YVO₄ I 类临界相位匹配 LBO 晶体腔内倍频, 获得了 74 mW 的 671 nm 红激光输出的实验结果。分析和实验表明, LBO I 类临界相位匹配是获得高效率倍频红光输出的实用方法。

关键词 半导体激光抽运, LBO, I 类临界相位匹配, 高效率, 红光激光器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Double-frequency 671 nm Laser with Type-I Critical Phase-matching LBO

TAN Hui-ming, ZHENG Quan, CHEN Ying-xin, ZHOU Li-min, YE Zi-qing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract The experimental results of 74 mW red laser at 671 nm have been observed with 1 W diode pumped Nd:YVO₄ laser and type-I critical phase matching of LBO crystal. The analyses and experiment show that the double frequency by critical phase-matching is the useful method to obtain high efficiency solid-state red laser.

Key words LD-pumped, LBO, type-I critical phase-matching, high efficiency, red laser

1 引 言

采用大功率半导体激光抽运 Nd:YVO₄ 产生 1064 nm 的基频光, KTP 晶体的腔内倍频获得人眼灵敏的 532 nm 绿光固体激光器, 具有体积小、寿命长、效率高和低电压工作等优点, 已作为商品得到了广泛的应用。采用 Nd:YVO₄ 作为激光增益介质还可获得 1342 nm 波长的谱线发射。以该谱线作为基频光, 倍频后获得 671 nm 的红光固体激光器, 除了受激发射截面低外^[1], 具有与 532 nm 绿光激光器同样的优点。与半导体激光器单独产生 671 nm 波长的红光相比, 半导体激光抽运的红光固体激光器光束质量好得多。在对光束质量具有特殊要求的领域, 仍有广泛的应用前景。

目前对于半导体激光抽运腔内倍频 671 nm 固体激光器的研究主要集中在 KTP II 类^[2~4]和 LBO 非临界相位匹配等倍频方法^[5~7]。而对于 LBO I

类临界相位匹配的研究报道很少。本文报道了 1 W 808 nm 半导体激光抽运 Nd:YVO₄ 和 LBO I 类临界相位匹配, 获得了 74 mW 功率输出的研究结果, 并测量了 LBO I 类相位匹配的输出功率温度关系。与 LBO II 类相位匹配的比较表明, 由于 I 类相位匹配没有 II 类相位匹配那种双折射滤光片效应, 该激光器可在较宽的温度范围内获得稳定的功率输出。同时, LBO I 类相位匹配的走离角很小, 临界相位匹配避免了非临界温度匹配中需要在较大温差下控制温度, 并在温度控制时具有较大功耗的缺点, 是获得中小型 671 nm 固体激光器的一种实用的方法。

2 倍频晶体的选择

在半导体激光抽运 671 nm 固体激光器中可以选择的倍频晶体及临界相位匹配的主要参数如表 1 所示。由于走离角 ρ 的存在, 晶体中基频光与倍频

收稿日期 2000-12-25; 收到修改稿日期 2001-03-22

基金项目 国家自然科学基金(编号: 69678016)和国家“863”高科技计划(编号: 863-307-22-51)资助项目。

作者简介 檀慧明(1954.2—), 男, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 主要从事固体激光与非线性光学方面的研究与开发工作。E-mail: htan@cnlaser.com

光的最大相互作用长度为

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

通常半导体激光抽运 671 nm 固体激光器的结构紧凑,谐振腔内光束腰很小,可设腔内光束半径 $w =$

0.1 mm。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。把表 1 中计算获得 $d_{\text{eff}} \times L_{\max}$ 作为参数对不同晶体的不同相位匹配可获得最大倍频效率进行比较。

表 1 不同非线性晶体 1342 nm 临界相位匹配倍频的主要参数

Table 1 Parameters of 1342 nm CPM frequency doubling of different nonlinear crystals

Crystals	KTP	LBO	LBO	BBO
Critical phase-matching	Type- II	Type- I	Type- II	Type- I
Walk-off angle ρ /mrad	44.3	3.4	3.23	50.12
Nonlinear coefficient d_{eff} /pm/V	2.84	0.817	0.645	1.99
Maximum working length L_{\max} /mm	2.6	34.1	35.9	2.3
$d_{\text{eff}} \times L_{\max}$ /mm·pm/V	7.38	27.86	23.16	4.58

可以看出, KTP 和 BBO 虽然有大的 d_{eff} 值,但因 ρ 太大,有效作用长度很小,其最大的 $d_{\text{eff}} \times L$ 值亦小于 LBO 在晶体长度 L 为 10 mm 的情况。LBO 在 I 类相位匹配时的 d_{eff} 大于 II 类相位匹配,而且,双折射晶体 LBO 在 I 类相位匹配工作时不会改变基频光的偏振方向,基频光良好的偏振性易保证相位匹配条件,也有利于提高倍频效率。

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 w ,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。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。

根据文献报道, LBO 晶体 I 类和 II 类非临界相位匹配的温度分别为 5℃ 左右^[6,8]和 38℃ 左右^[5,8]。与临界相位匹配比较,尽管非临界相位匹配无走离效应,但需要对温控部分进行很好的温度控制和保温,增加了激光器结构的复杂性和功率损耗,难以在实际中应用。

3 实验装置

考虑到 Nd^{3+} 离子存在 1.064 μm , 1.342 μm 和 0.914 μm 三条荧光谱线,其中, 1.064 μm 比 1.342 μm 的发射截面大。因此,若想获得 1.342 μm 的激光振荡,必须首先抑制 1.064 μm 起振。我们采取了增加谐振腔对 1.064 μm 透射损耗的方法来实现。在系统对 1.064 μm 的透过率大于 90% 时,可以确保在相当高的抽运功率时也只有 1.342 μm 激光振荡。

为实现 1.342 μm 的高效振荡,合理地分配腔内各元件对 808 nm, 1.064 μm , 1.342 μm 以及倍频产生的 671 nm 的透射率和反射率要求很重要,直接影响

着激光器的总体效率。在同一元件各镀膜要求中,侧重满足了 1.342 μm 的要求。同时,耦合光学部分应形成高质量的抽运光斑,使入射至 YVO_4 上的抽运光斑椭圆度尽量接近 1,同时抽运光斑大小应略小于腔内基模在 YVO_4 上形成的光斑,以确保充分利用抽运光并实现单模振荡。

采用中国科学院半导体所生产的 808 nm 大功率半导体激光器,发出的抽运光经过耦合光学系统的准直、圆化、聚焦,最终成为椭圆度约为 0.90,束腰半径约 70 μm 的高质量抽运光束,入射到 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ (厚 1.15 mm,掺杂 3.0 at.-%)上。整个耦合系统的透过率约为 83%。

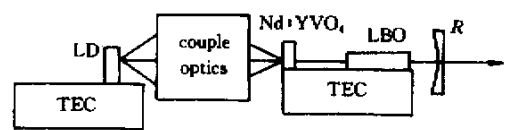


图 1 固体 671 nm 红光激光器的实验装置

Fig. 1 Setup of 671 nm diode pumped solid state red laser

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 的左端面镀 808 nm 增透和 1342 nm 高反膜作为一个腔镜, 808 nm 的透过率约为 90%。右端面镀 1342 nm 增透膜。输出平凹镜 R 的凹面曲率半径为 50 mm,凹面镀 1342 nm 高反膜和 671 nm/1064 nm 增透膜,平面镀 671 nm 增透膜。10 mm 长倍频晶体 LBO 以 I 类相位匹配切割,两端均镀 1342 nm 和 671 nm 双色增透膜。谐振腔长约 18 mm,机械结构稳定、抗震动。

对 LD, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 和 LBO 用半导体致冷器(TEC)进行严格的温控。调节 TEC 电流,使 LD 的发光波长与 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 的吸收峰重合,可最大限度地吸收利

用抽运光。Nd:YVO₄与 LBO 采用一个致冷器制冷,减少 Nd:YVO₄的热效应。为防止 LD 的发光波长和 LBO 晶体最佳匹配角随温度变化,要求致冷器的温控精度达 0.02℃。

4 实验结果

测量了 671 nm 红激光输出随入射抽运功率的变化情况。测量时采用棱镜分出 1342 nm 基频光和 808 nm 透射的抽运光,仅测量 671 nm 红激光。图 2 是 671 nm 红激光输出功率随入射到 Nd:YVO₄内 808 nm 抽运功率的变化。阈值功率为 100 mW。当入射至 Nd:YVO₄上的抽运功率为 1 W 时,获得的 671 nm 红激光输出功率为 74mW。光-光转换效率达 7.4%。在所能查到的文献中,这是目前所能获得的最高 671 nm 倍频光输出。

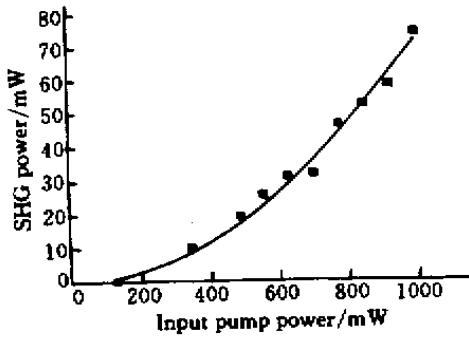


图 2 671 nm 倍频光输出功率随入射抽运功率的变化
Fig.2 SHG 671 nm output power via input pump power

图 2 中的拟合曲线是考虑到谐振腔内基频光功率随抽运光入射功率的变化为线性关系,LBO 晶体内倍频光功率密度随基频光功率密度的变化为平方关系的二次曲线。图 2 表明当抽运光到 1 W 时,倍频光输出功率仍以与入射抽运光输入功率的平方关系上升,未有任何的饱和现象发生。

图 3 是采用美国 Photon 公司生产的光束轮廓仪记录的激光远场光斑的照片,可见光斑为椭圆度好于 90%的 TEM₀₀模。

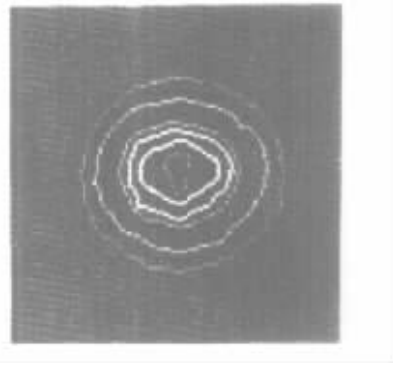


图 3 671 nm 红光的光束横模功率空间分布
Fig.3 Beam shape of phase-matching I LBO 671 nm red laser

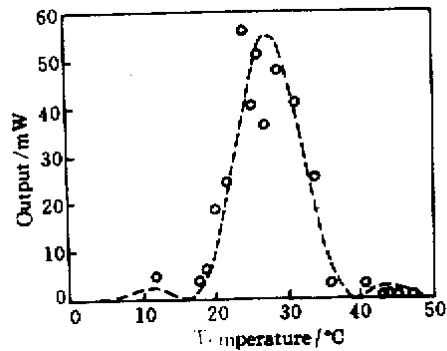


图 4 I 类相位匹配 LBO 倍频光输出随温度的变化
Fig.4 LBO SHG output via temperature change

图 4 是 671 nm 红激光器的输出功率随 LBO 温度的变化。在倍频中二次谐波输出功率随相位失配的变化为

$$P_{SH} = A \frac{\sin^2(\Delta kL/2)}{(\Delta kL/2)^2} \tag{1}$$

(1)式中

$$\Delta k = k_{SH} - k_{FM} \tag{2}$$

是二次谐波的波矢 k_{SH} 与基频光波矢 k_{FM} 的相位失配,由于 $k = 2\pi/\lambda$ (2)式可表示为

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{SH} - n_{FM}) \tag{3}$$

(3)式中,倍频光及基频光的折射率 n_{SH} 和 n_{FM} 为温度的函数, L 为倍频晶体的长度, A 与基频光功率、倍频晶体长度及有效非线性系数的平方有关。与具有双折射滤光片效应的 II 类相位匹配功率随温度变化相比^[7],I 类临界相位匹配 LBO 用于 1342 nm 的倍频红光 671 nm 具有较宽的工作温度范围和较好的稳定性,而具有较高的实际应用价值。用(1)式的 sinc 函数拟合图 4 中测量数据,表明该相位匹配具

有 10℃左右的温度带宽,与 7.9℃的理论计算结果接近^[8]。

为了对比,我们在同一结构中放置了具有同一膜系情况的 II 类临界相位匹配 KTP 和 LBO。结果为:同等抽运水平下,用 3 mm 长 KTP (KTP 相互作用长度很短,太长亦无价值)获得了 13 mW 的 671 nm 输出,而用 10 mm 长 II 类临界相位匹配 LBO,获得了 52 mW 的 671 nm 输出。这充分表明晶体选择的重要意义。

5 结 论

研究了采用 1 W 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 腔内 LBO I 类临界相位匹配获得了高达 74 mW 的 671 nm 红光输出,并有较宽的温度适用范围。根据可查文献,这个功率是在该抽运功率下获得的最高输出。由于避免了非临界相位匹配中对控温晶体的保温和温度控制的结构要求,本文中讨论的倍频方式是获得结构紧凑、简单和高效率的半导体激光抽运 671 nm 红光固体激光器的实用可行方法。

参 考 文 献

1 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher.

Stimulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd:YVO₄ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(12):4907~4911

- 2 WANG Changqing, SHEN Deyuan, LU Jianren *et al.*. 1.34 μm intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ laser pumped by a laser-diode. [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(7):577~580 (in Chinese)
- 3 ZHANG Hengli, HE Jingliang, HOU Wei *et al.*. Study of a LD pumped Nd:YVO₄ crystal 1.34 μm laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(6):481~484 (in Chinese)
- 4 J. J. Zondy, M. Abed, S. Khodja. Twin-crystal walk-off-compensated type-II second-harmonic generation: single-pass and cavity-enhanced experiment in KTP [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12):2368~2379
- 5 A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. 430-mW single-transverse-mode diode-pumped Nd:YVO₄ laser at 671 nm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1297~1300
- 6 ZHANG Hengli, HE Jingliang, CHEN Liuchuan *et al.*. Study of a LD-pumped Nd:YVO₄ crystal 1342 nm and 671 nm laser [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47**:1579~1584 (in Chinese)
- 7 Richard S. Conroy, Alan J. Kemp, Graham J. Friel *et al.*. Microchip Nd:vanadate lasers at 1342 and 671 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23):1781~1783
- 8 K. Kato. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB₃O₅ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(12):2950~2952