

半导体激光端面泵浦 Nd:YVO₄/KTP 固体激光的实验研究

裴世鑫¹ 孙淑丹¹ 崔芬萍¹

摘要

搭建了一套以中心输出波长为 808.5 nm 的半导体激光端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体产生 1 064 nm 红外激光,然后以腔内 KTP 晶体倍频的方法将红外激光倍频为 532 nm 绿光激光的固体激光实验系统,研究了 808.5 nm 的泵浦半导体激光的输出功率与注入电流的关系及与 532 nm 绿光输出功率的关系,以及 KTP 倍频晶体的相位匹配角、泵浦光的聚焦位置和固体激光器的腔长等因素对 532 nm 绿光输出功率的影响.实验结果表明:提高泵浦半导体激光的泵浦功率、缩短固体激光器的腔长、将泵浦光聚焦到 Nd:YVO₄ 晶体内部以及正确选择 KTP 晶体的相位匹配角能够提高 532 nm 绿光的输出功率.

关键词

非线性光学;端面泵浦;Nd:YVO₄ 晶体;KTP 倍频晶体

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

收稿日期 2011-12-27

资助项目 江苏省自然科学基金(BK2011829);江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象(2010-2013)

作者简介

裴世鑫,男,副教授,硕士生导师,主要从事环境光谱学与光谱技术和原子与分子物理学领域的研究. peishixin@nuist.edu.cn

0 引言

全固化固体激光器是伴随激光技术的发展而发展起来的.早在半导体激光器出现不久,1963年,Newman^[1]就提出了基于半导体激光器泵浦的全固化固体激光器的思想,并得到了 1.06 μm 的荧光输出.1964年,Keyes等^[2]用液氮冷却的激光二极管泵浦固体激光工作介质,实现了真正意义上的全固化固体激光器.此后 10 余年,受半导体生产工艺的限制,全固化固体激光技术的发展处于停滞状态,直到 20 世纪 80 年代后期,半导体激光技术和非线性频率变换技术都获得了突破性进展^[3],使全固化固体激光技术进入了新的发展时期^[4-5].20 世纪 90 年代以后,全固化固体激光技术日趋成熟,具有高输出功率的全固化固体激光器陆续出现^[6-7].

目前,基于半导体激光泵浦的全固化固体激光器呈现出小型化、集成化和实用化的特点,激光器的输出功率和输出能量都得到了很大的提高,光束质量得到了进一步改善,出现了很多商品化的全固化固体激光器.同时,随着高输出功率半导体激光技术和非线性光学材料的进一步发展,人们将非线性光学频率变换技术与半导体泵浦固体激光技术相结合^[8-9],实现了全固化固体激光器从深紫外到远红外的全波长运转.

基于半导体激光泵浦的全固化固体激光器具有很高的能量转换效率,最大限度地缩小了固体激光器的体积,从而在通讯、医疗、激光显示、舞台表演、城市景观、精密加工、国防军事、光电集成、科学研究等领域都获得了广泛的应用.因此,发展基于半导体激光泵浦的全固化固体激光器具有广阔的市场前景.

1 实验装置

基于半导体激光泵浦固体激光的实验装置如图 1 所示,主要由光学系统、半导体激光器电源和能量测量 3 个部分组成.其中光学系统依次由中心输出波长为 808.5 nm 的半导体激光器、聚焦透镜 1、平凹镜 1、Nd:YVO₄ 晶体、KTP 晶体、平凹镜 2 和聚焦透镜 2 组成;能量测量部分由光电探测器和能量计组成.2 块平凹镜组成一个稳定的光学谐振腔,平凹镜 1 的凹面镀有对 1 064 和 532 nm 的高反膜和对 808.5 nm 的增

¹ 南京信息工程大学 物理与光电工程学院,南京,210044

透膜,平凹镜 2 的凹面镀有对 808.5 和 1 064 nm 的高反膜和对 532 nm 的增透膜. Nd:YVO₄ 晶体是固体激光的工作物质,几何尺寸为 3 mm × 3 mm × 1 mm,掺杂 Nd³⁺ 3% (质量分数),沿 α 轴向切割. KTP 晶体的几何尺寸为 2 mm × 2 mm × 5 mm,对 1 064 nm 的近红外光起倍频作用,其通光面同时对 1 064 nm 红外光和 532 nm 绿光高透. 激光工作晶体 Nd:YVO₄ 和 KTP 倍频晶体都置于由 2 块平凹镜所组成的稳定的光学谐振腔内.

本实验系统的工作原理为:半导体激光器由其电源控制,发出中心输出波长为 808.5 nm 的红光,红光光束先经透镜 1 汇聚,再经过腔镜 1 进入光学谐振腔,聚焦到 Nd:YVO₄ 晶体内部,端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体产生 1 064 nm 的红外光,并在光学谐振腔内振荡放大形成 1 064 nm 的红外激光. 当 1 064 nm 的红外激光在光学谐振腔内振荡,每经过 KTP 晶体时,部分 1 064 nm 的红外光被 KTP 晶体倍频为 532 nm 的绿光,并透过腔镜 2 逸出谐振腔,将通过谐振腔的绿光用透镜 2 聚焦到光电探测器的光敏面上,以此研究半导体激光器的泵浦功率、光学谐振腔的腔长、泵浦光的聚焦位置以及 KTP 晶体的相位匹配角等因素对 532 nm 绿光输出功率的影响.

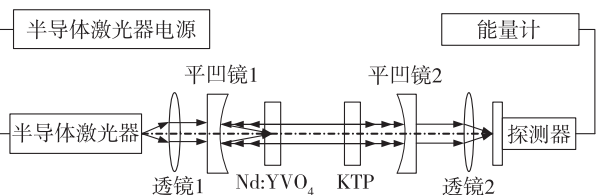


图 1 半导体激光端面泵浦 Nd:YVO₄/KTP 固体激光的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental system sketch of diode laser end pump Nd:YVO₄/KTP solid laser

2 实验结果与分析

2.1 泵浦半导体激光器的输出特性

采用中心输出波长为 808.5 nm 的半导体激光器为泵浦光源,泵浦光源的输出功率通过调节半导体激光器的注入电流改变,以步长 20 mA 改变半导体激光器的注入电流,在 0 ~ 500 mA 的范围内,泵浦半导体激光器的输出功率和注入电流的对应关系如图 2 所示.

从图 2 可以看出,中心输出波长为 808.5 nm 的泵浦半导体激光器注入电流的阈值为 100 mA,因

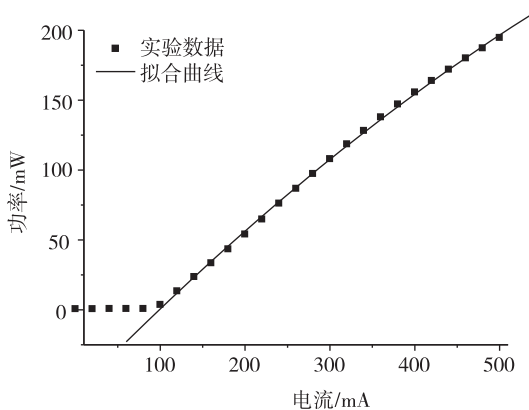


图 2 808.5 nm 半导体激光器注入电流与输出功率关系
Fig. 2 Relationship between 808.5 nm diode laser output power and the corresponding injection current

此,在选择半导体激光泵浦固体激光时,一定要使半导体激光器的注入电流高于半导体激光器的阈值电流. 注入电流高于阈值电流后,输出功率随注入电流的增加呈近似线性增加. 用最小二乘法对实验数据的拟合结果表明,注入电流与对应的输出功率之间呈二次多项式形式变化,二次项的贡献相对较小,在要求不很严格的情况下,输出功率与注入电流之间的关系可近似认为是线性关系.

2.2 泵浦功率对 532 nm 绿光输出功率的影响

图 3 和图 4 是在固体激光器的光学谐振腔的腔长固定,KTP 倍频晶体的相位匹配角不变以及半导体激光的聚焦位置相对于 Nd:YVO₄ 晶体的位置固定的条件下,只改变泵浦半导体激光器注入电流的情况下,532 nm 绿光输出功率与泵浦半导体激光器注入电流之间的关系曲线.

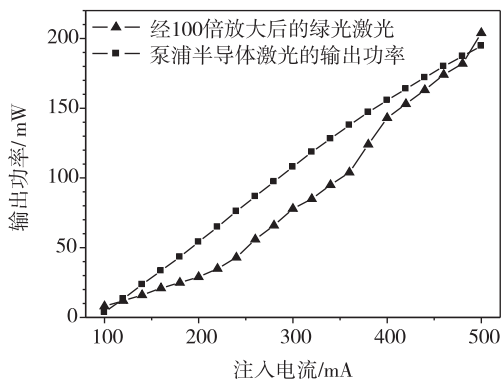


图 3 532 nm 绿光输出功率和半导体泵浦激光输出功率与泵浦半导体激光器注入电流之间的关系
Fig. 3 Relationship between 532 nm green laser/diode laser output power and the diode laser injection current

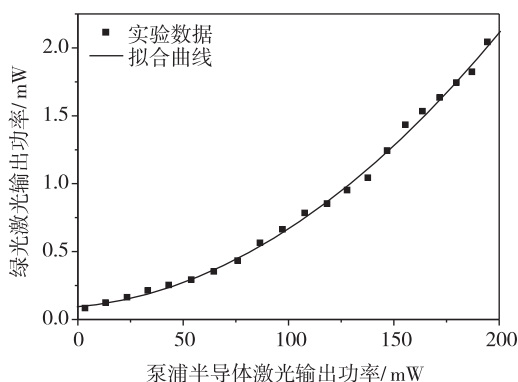
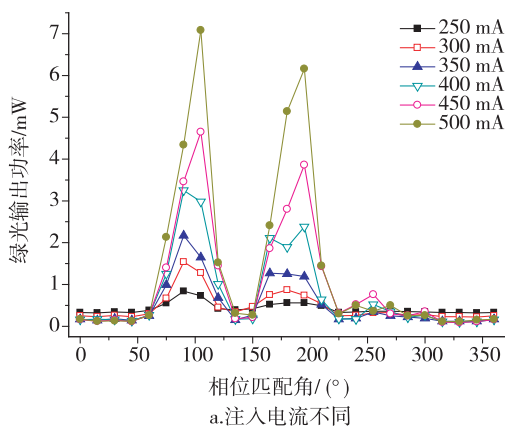


图4 532 nm 绿光输出功率与泵浦半导体激光输出功率之间的关系

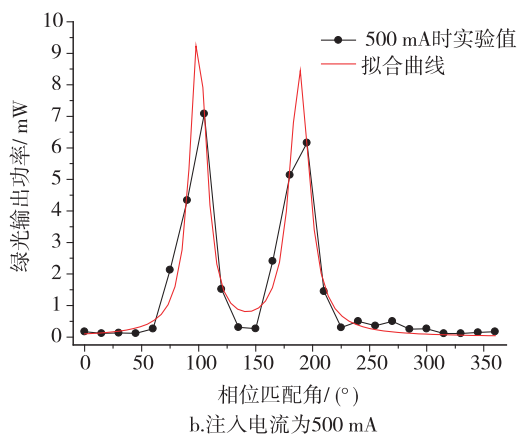
Fig. 4 Relationship between 532 nm green laser output power and pump diode laser output power

图3是泵浦半导体激光器的输出功率与532 nm 绿光输出功率随半导体激光器注入电流的变化曲线。因为绿光输出功率较低,为便于比较,将相同注入电流条件下,532 nm 绿光输出功率值放大100倍,再与同样电流条件下的808.5 nm 半导体激光器的直接输出功率作比较。图4是将半导体激光器的注入电流转化为输出功率后,以所得到的半导体激光器的输出功率与532 nm 绿光激光输出功率之间的关系曲线。

从图3可以看出,半导体泵浦Nd:YVO₄晶体并经KTP晶体倍频所产生的绿光激光输出功率随泵浦半导体激光器注入电流之间的变化曲线和泵浦半导体激光器输出功率随注入电流之间的变化曲线有一定差异,尤其是在注入电流在200~400 mA时,二者的变化趋势差异较为明显。



a. 注入电流不同



b. 注入电流为500 mA

图5 532 nm 绿光激光的输出功率与KTP倍频晶体相位匹配角之间的关系

Fig. 5 Relationship between 532 nm green laser output power and phase-matching angle of KTP frequency-doubling crystal

从图4可以看出,532 nm 绿光激光的输出功率与半导体激光的泵浦功率之间呈明显的二阶多项式关系,在泵浦半导体激光器的输出功率超过100 mW后,绿光输出功率与泵浦半导体激光器的输出功率之间呈较好的线性关系,因此,在半导体激光端面泵浦Nd:YVO₄/KTP固体激光系统中,应该尽可能使泵浦半导体激光器的注入电流高一些,使其尽可能处于泵浦光能量与绿光激光输出能量之间呈线性变化的区间。

2.3 影响532 nm 激光输出功率的因素

2.3.1 相位匹配角对532 nm 绿光输出功率的影响

将KTP倍频晶体固定在一个可沿光轴转动的带有刻度盘的晶体架上,沿光轴转动KTP倍频晶体的相位匹配角,以15°为步长,分别考察泵浦半导体激光器的注入电流为250、300、350、400、450和500 mA的情况下,532 nm 激光的输出功率与KTP倍频晶体的相位匹配角之间的关系。图5a是实验测得的泵浦半导体激光器在不同注入电流的条件下,532 nm 激光的输出功率与KTP倍频晶体的相位匹配角之间的关系;图5b是泵浦半导体激光器的注入电流为500 mA时,532 nm 绿光激光的输出功率与KTP倍频晶体相位匹配角之间的关系及其拟合曲线。

根据实验中对KTP倍频晶体相位匹配角的角度标定方法和图5b的拟合结果,KTP倍频晶体的2个最佳相位匹配角分别为99°和188°,前者的匹配效果为后者匹配效果的1.1倍,因此,在半导体激光端面泵浦Nd:YVO₄/KTP固体激光系统中,为最大限度提高532 nm 激光的输出功率,在选择KTP倍频

晶体的相位匹配角时,需要将 KTP 倍频晶体的相位匹配角调至 99°附近.

2.3.2 泵浦光聚焦位置对 532 nm 激光输出功率的影响

图 6 是改变泵浦光的聚焦位置所引起 532 nm 激光输出功率变化的曲线,横坐标是聚焦透镜的位置到 Nd:YVO₄ 晶体之间的距离,纵坐标是 532 nm 激光的输出功率.

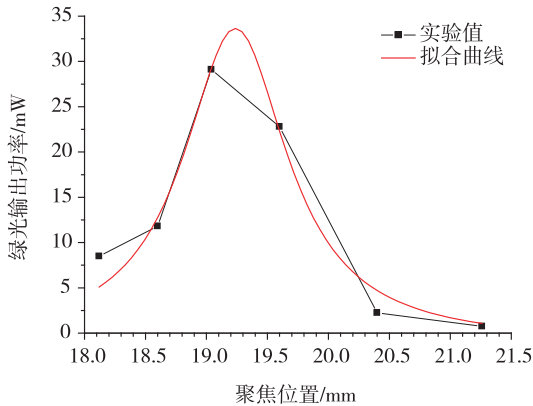


图 6 泵浦光的聚焦位置对 532 nm 激光输出功率的影响

Fig. 6 Effect of pump light focus position on 532 nm green laser output power

由图 6 可以看出,泵浦半导体激光的聚焦位置对 532 nm 激光的输出功率有很大的影响.用 Lorentze 线型对实验测量结果做了线型拟合,得到 532 nm 激光的最大输出功率所对应的透镜到 Nd:YVO₄ 晶体之间的距离为 19.24 mm.根据厂家提供的参数,实验所用的泵浦半导体激光的聚焦透镜 1 的焦距为 20 mm,因此,比较实验测得的最佳聚焦距离和厂家提供的聚焦透镜 1 的焦距可以看出,将泵浦激光聚焦到 Nd:YVO₄ 激光晶体内部能最大限度地提高 532 nm 激光的输出功率.

2.3.3 腔长对 532 nm 激光输出功率的影响

图 7 是在注入电流为 400 mA 的条件下,以 2 mm 为步长,在 130 ~ 146 mm 的范围内,改变光学谐振腔的长度时所得到的固体激光器的腔长与 532 nm 绿光输出功率之间的关系.

从图 7 中可以看出,内置 Nd:YVO₄ 激光工作介质和 KTP 倍频晶体的激光谐振腔的长度与激光器的输出功率密切相关,输出功率随激光谐振腔的长度的增加而降低.当腔长在 130 ~ 144 mm 范围内变化时,绿光的输出功率与腔长之间呈二阶多项式的形式变化,而当腔长从 144 mm 变化为 146 mm 时,

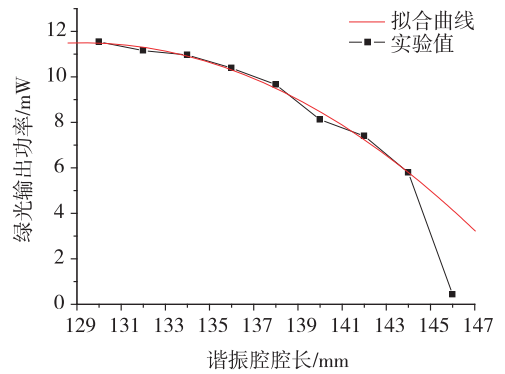


图 7 激光谐振腔的长度对 532 nm 激光输出功率的影响

Fig. 7 Effect of optical resonant cavity length on 532 nm green laser output power

绿光的输出功率严重偏离拟合曲线.因此,对于这种类型的激光器,单从提高 532 nm 激光输出功率的角度来说,要尽可能缩短激光谐振腔的腔长.

3 总结

高功率绿光激光器因在材料加工、彩色显示、激光医疗、激光指示以及激光同位素分离等领域的重要应用而成为全固化激光器的研究热点,而内腔倍频技术则是实现高功率绿光激光输出的最常用的方法.本文在以单管半导体激光端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体并经腔内 KTP 晶体倍频产生 532 nm 激光的实验装置上,研究了影响 532 nm 激光输出的各种因素,结果表明,泵浦功率、激光谐振腔的腔长、泵浦光的焦点与 Nd:YVO₄ 晶体的相对位置以及 KTP 晶体的相位匹配角等因素对 532 nm 输出功率有重要影响.研究结果对基于单管半导体激光端面泵浦 Nd:YVO₄/KTP 固体激光系统的小型化和提高绿光输出功率具有指导意义.

参考文献

References

- [1] Newman R. Excitation of the Nd³⁺ fluorescence in CaWO₄ by recombination radiation in GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(2): 437-437
- [2] Keyes R J, Quist T M. Injection luminescent pumping of CaF₂:U³⁺ with GaAs diode lasers[J]. Applied Physics Letter, 1964, 4(3): 50-52
- [3] 刘跃岗,徐斌,韩建儒,等. 高效激光倍频晶体 KTP 的生长及主要性能[J]. 中国激光, 1986, 13(7): 433-441
LIU Yuegang, XU Bin, HAN Jianru, et al. Efficient laser frequency doubling KTP crystal growth and key performance[J]. Chinese Journal of Lasers, 1986, 13(7): 433-441

- [4] Liu Y S, Deniz D, Belt R. High-average-power intracavity second-harmonic generation using KTiPO_4 in an acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser oscillator at 5 kHz [J]. *Optics Letters*, 1984, 9(3): 76-78
- [5] 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
- [6] Le Garrec B J, Raz G J, Thro P Y, et al. High average power diode array pumped frequency doubled YAG laser [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(24): 1990-1992
- [7] Honea E C, Ebberts C A, Beach R J, et al. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(15): 1203-1205
- [8] 林洪沂, 檀慧明, 南楠, 等. LD 端面泵浦腔内倍频 Yb:YAG 绿光激光器 [J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 22-25
LIN Hongyi, TAN Huiming, NAN Nan, et al. LD end-pumped intracavity frequency doubled Yb:YAG green laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 22-25
- [9] 陈虹竹, 贾光辉, 董磊, 等. 高重频窄脉冲 LD 端面泵浦 Nd:YAG/LBO 绿光激光器 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 35-37
CHEN Hongzhu, JIA Guanghui, DONG Lei, et al. LD end pumped Nd:YAG/LBO green laser with high frequency short pulse width [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 35-37

Experimental study of diode laser end-pump Nd:YVO₄/KTP solid laser

PEI Shixin¹ SUN Shudan¹ CUI Fenping¹

1 School of Physics & Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A diode laser end-pumped Nd:YVO₄/KTP solid laser experimental system is built. The system starts from a single diode laser with center output wavelength at 808.5 nm to end-pump Nd:YVO₄ laser crystal and produce 1064 nm infrared laser, which is then switched to 532 nm green laser through intracavity frequency-doubling by a KTP crystal inside the laser cavity. The relationship between 808.5 nm diode laser output power and the injection current, and the relationship between diode laser pump power and 532 nm green laser output power is studied by experiments. The influencing factors of the 532 nm green laser output power, including the phase-matching angle of KTP frequency-doubling crystal, the pump laser focus to the Nd:YVO₄ laser crystal position, and the length of solid-state laser cavity are also studied and analyzed. The experimental results demonstrate that the output power of 532 nm green light can be enhanced through increasing the pump diode laser output power, or decreasing the length of solid laser cavity, or turning the pump diode laser focus into the Nd:YVO₄ laser crystal, or adjusting the KTP crystal phase-matching angle correctly.

Key words nonlinear optical; end-pump; Nd:YVO₄ crystal; KTP frequency-doubling crystal