

文章编号: 0258-7025(2005)04-0453-04

全固态高平均功率宽调谐掺钛蓝宝石激光器

石朝辉¹, 樊仲维¹, 张鸿博², 潘树志¹, 崔建丰¹, 毕 勇², 李瑞宁², 许祖彦²

(¹北京国科世纪激光技术有限责任公司, 北京 100085)
²中国科学院物理研究所, 北京 100080

摘要 介绍了以激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体的倍频激光器为抽运源, 高平均功率准连续运转的全固态宽调谐掺钛蓝宝石(Ti:sapphire)激光器。自由运转时, 在抽运光功率为 16 W, 透过率为 30% 时, 获得了最高 6.44 W 的掺钛蓝宝石激光输出, 相应光-光转换效率大于 40%。为了获得宽波段可调谐激光输出, 采用石英布氏棱镜对腔内色散元件, 通过调节输出镜获得了调谐范围 740~880 nm, 线宽约 1 nm 的宽波段输出。在抽运光功率为 11.5 W 时, 最高输出功率为 2.87 W, 相应的光-光转换效率为 25%。作为对比, 又研究了重火石棱镜作为腔内色散元件时, 掺钛蓝宝石激光器的调谐输出特性, 实验表明输出激光的线宽明显变窄, 但输出功率却显著下降。

关键词 激光技术; 全固态掺钛蓝宝石激光器; 色散; 高平均功率; 准连续; 宽调谐

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Broadly Tunable High-Average-Power of an All-Solid-State Ti:Sapphire Laser System

SHI Zhao-hui¹, FAN Zhong-wei¹, ZHANG Hong-bo², PAN Shu-zhi¹,

CUI Jian-feng¹, BI Yong², LI Rui-ning², XU Zu-yan²

(¹ Beijing Gk Laser Technology Co. Ltd, Beijing 100085, China)
² Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An all solid state broadly tunable high-average-power laser source based on the Ti:sapphire crystal pumped by a frequency-doubled laser diode pumped Nd:YAG laser is reported in this paper. Without any dispersion elements in cavity, 6.44 W of Ti:sapphire laser output is obtained when the pump power is 16 W and the transmissivity of output mirror is 30%, the optical-to-optical conversion efficiency is higher than 40%. With the use of two intracavity quartz Brewster prisms, the Ti:sapphire laser is tunable from 740 nm to 880 nm and the linewidth is about 1nm. The maximum average output power is 2.87 W at 11.5 W pump power, and the optical-to-optical conversion efficiency is about 25%. For comparison, tunable characteristic of two flint-glass prism using as dispersion elements is studied, and the experiment demonstrates that the linewidth of the tunable laser is narrow down notably, but the output power is falled obviously.

Key words laser technique; all-solid-state Ti:sapphire laser; dispersion; high average power; quasi-continuous-wave; broadly tunable

1 引 言

近年来,随着激光二极管产业的迅猛发展,由其抽运的全固态激光器(DPSSL)研究取得了巨大的进展^[1,2]。高平均功率全固态可调谐掺钛蓝宝石激光器由于具有峰值功率高、调谐范围宽、效率高、寿命长、工作可靠等优点,在激光光谱学、非线性光学、

光刻技术、大气监测、激光医疗和科研等领域有着广泛的应用。全固态可调谐掺钛蓝宝石激光通过频率变换可将调谐范围扩展到蓝光、紫外和深紫外波段,是紫外动态光谱学和纳米级微机械加工中的重要调谐光源,其倍频产生的193 nm激光将成为最新一代光刻机使用的对准光源。

收稿日期: 2004-04-02; 收到修改稿日期: 2004-06-04

基金项目: 国家 863 计划(2002AA311040)、中国科学院创新工程重要方向性项目(KJCXZ-XW-W09-4)和北京市科技计划(H020420060011)资助项目。

作者简介: 石朝辉(1980—),男,河南洛阳人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事固体激光技术及可调谐激光技术研究。E-mail: shizh@126.com

自 Maker 等^[3]首次报道激光二极管抽运的掺钛蓝宝石激光器(Ti:sapphire)以来,以各种方式运转的掺钛蓝宝石激光二极管抽运的全固态激光器一直成为激光领域的研究热点,我国在此领域研究起步较晚,2002 年才首次实现准连续掺钛蓝宝石激光器的全固态运转^[4]。

我们自行研制了高平均功率、高光束质量全固态绿光激光器,以其作抽运源抽运掺钛蓝宝石晶体,实现 6.44 W 高平均功率激光输出,光-光转换效率大于 40%,利用石英布氏棱镜对作为腔内色散元件,获得了 740~880 nm,线宽 1 nm 的宽调谐激光输出,最大输出功率 2.87 W。腔内使用重火石布氏棱镜对,输出激光线宽可压窄至 0.3 nm。

2 实验装置

2.1 抽运源

图 1 是高平均功率高光束质量全固态绿光激光器抽运的可调谐掺钛蓝宝石激光器示意图。基频 1064 nm 抽运源包括两个激光头(Laser head),每个激光头由三列互呈 120° 放置的连续激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒组成,晶体棒尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}$,Nd 离子质量分数为 0.6%,在两个激光头中间放置一片 90° 石英旋光晶体以对高功率激光二极管抽运下晶体棒产生的热致应力双折射进行补偿,基频振荡谐振腔内使用声光调制器产生调 Q 输出,腔内插入起偏器以使基频输出为水平线偏振光。后腔镜 M_2 是 1064 nm 全反的平面镜,输出镜 M_1 是 1064 nm 透过率为 30% 的平面镜,腔外

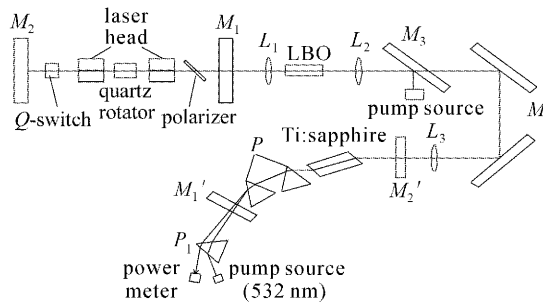


图 1 全固态倍频 Nd:YAG 绿光激光器抽运的可调谐掺钛蓝宝石激光器示意图

L_1, L_3 : 聚焦透镜; L_2 : 准直透镜; M_3 : 分光平镜;
 M : 532 nm 全反镜

Fig. 1 Sketch map of tunable Ti:sapphire laser pumped with frequency-doubling Nd:YAG laser

L_1, L_3 : focusing lens; L_2 : collimating lens; M_3 : dichroic flat mirror; M : totally reflecting mirror at 532 nm

倍频晶体采用 I 类非临界相位匹配 LBO 晶体,使用热近非稳腔的谐振腔优化设计方法^[5],研制成功了高平均功率基频和倍频 532 nm 绿光激光器,当重复频率为 10 kHz,532 nm 绿光的最大输出平均功率高于 20 W,使用 Spiricon 公司型号为 M^2 -200 的光束质量分析仪和 DET-210 型快速光电二极管,测得绿光光束质量因子 M^2 小于 6,脉宽约 60 ns,为下一步进行高效率抽运掺钛蓝宝石晶体的实验提供了条件。

2.2 掺钛蓝宝石激光器系统

实验中使用中国科学院上海光学精密机械研究所生产的掺钛蓝宝石激光晶体,尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,品质因数(FOM)大于 250,吸收系数 $\alpha = 0.9 \text{ cm}^{-1}$,晶体的两个通光面切成布儒斯特角。532 nm 激光以布儒斯特角入射并以 π 偏振方式抽运掺钛蓝宝石晶体。为减少热效应影响,使用循环水对晶体进行冷却。

掺钛蓝宝石激光器采用腔长为 160 mm 的平-平腔结构^[6],掺钛蓝宝石晶体置于腔中间(见图 1),焦距为 200 mm 的平凸透镜 L_3 将抽运光耦合入谐振腔内,为避免高功率密度抽运光损伤掺钛蓝宝石晶体,抽运光焦点置于晶体后约 15 mm 处,晶体内抽运光光斑半径约 $130 \mu\text{m}$ 。输入镜 M'_2 镀对 532 nm 激光透过率为 90% 和 740~880 nm 宽带高反膜,输出镜 M'_1 在 740~880 nm 波段的透过率为 20%。石英布氏棱镜对 P 作为色散元件压窄激光线宽,调节输出镜 M'_1 进行波长调谐。输出激光经布氏棱镜 P_1 分光后,使用中国计量科学院生产的 LM-20A 型功率计和 Anritsu Corporation MS9710B 型光谱仪分别测量了掺钛蓝宝石激光器的激光功率、波长和线宽。

3 实验结果与分析

3.1 自由运转掺钛蓝宝石激光器

自由运转情况下,采用 800 nm 波长透过率为 30% 的输出镜,测得的掺钛蓝宝石激光器输出功率曲线如图 2 所示。此掺钛蓝宝石激光器的阈值在 4 W 左右,随着抽运光功率加大,掺钛蓝宝石激光器的激光输出功率逐渐变大,光-光转换效率提高。当抽运光的功率增加到 16 W 时,获得了最大 6.44 W 的输出,掺钛蓝宝石激光器的最高光-光转换效率大于 40%。

当继续提高抽运光功率时,掺钛蓝宝石激光器的输出功率趋于不稳定并且急剧下降,主要原因是当抽运光功率比较大时,掺钛蓝宝石的热透镜效应

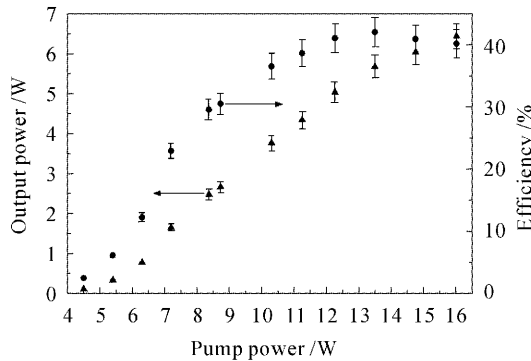


图2 掺钛蓝宝石激光器的输出功率与抽运光功率变化关系及相应的光-光转换效率曲线

Fig. 2 Output power of Ti:sapphire laser and optical-to-optical conversion efficiency versus pump power

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = 2 \cdot \sum_{i=1}^2 \left\{ \left[\frac{\sin A}{\cos(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_4)} \right] \cdot \left[\frac{d}{d\lambda} n(\lambda) \right] \cdot \prod_{j=1}^i M^j \right\}, \quad (3)$$

A 为等腰布氏棱镜顶角(此处 $A = 69^\circ$), α_2 为光线在棱镜入射面的折射角, α_4 为光线出射棱镜的折射角, $n(\lambda)$ 为棱镜材料折射率, M^j 为第 j 个棱镜的放大倍数(此处 $M^j = 1$)。

石英棱镜折射率方程如下:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0.6961661 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 0.11624143^2} + \frac{0.8974794 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}}, \quad (4)$$

由谐振腔 $ABCD$ 矩阵, 可计算出掺钛蓝宝石振荡激光的 $\omega_0 = 200 \mu\text{m}$ 。

当激光波长 $\lambda = 800 \text{ nm}$ 时, 由(4)式计算得, 腔内激光束发散角 $\Delta\theta \approx 4 \text{ mrad}$, 棱镜对单程角色散 $d\theta/d\lambda = -0.138$, 激光往返振荡一次的单程理论线宽约为 28 nm 。在激光产生过程中, 激光脉冲在谐振腔内需经多次往返振荡, 由于棱镜对的色散作用, 除中心振荡波长附近的轴向模, 其他模式的光经过数次振荡后将移出增益区, 该增益竞争效应会使输出激光的线宽比理论单程线宽窄得多。

在图 1 所示的实验光路中, 我们首先在腔内插入一块石英布氏棱镜, 当抽运光功率为 11.5 W 时, 在输出波长 800 nm 处, 测得输出激光线宽约 7 nm , 随之在腔内插入相同的第二块棱镜, 测得激光线宽约 1 nm , 同时, 还测量了掺钛蓝宝石激光器的输出功率与 532 nm 抽运光功率变化关系及相应的光-光转换效率曲线(见图 3)。由图 3 可见, 掺钛蓝宝石激光器的阈值在 4.6 W 左右, 最大输出功率 2.87 W , 相应的光-光转换效率约 25% 。

保持抽运光功率为 11 W , 通过调节输出镜 M_1 获得了连续宽调谐掺钛蓝宝石激光输出, 测得的激光输出功率、激光线宽与输出波长之间的关系曲线

非常严重, 热焦距变短, 掺钛蓝宝石激光器的谐振腔进入了稳区的边缘。

3.2 调谐压窄线宽掺钛蓝宝石激光器

谐振腔内使用石英布氏棱镜对作为色散元件, 当光线以布氏角入射并往返一次通过等腰布氏棱镜对时, 激光单程线宽 $\Delta\lambda$ 可估算如下^[7,8]:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\theta}{d\theta/d\lambda}, \quad (1)$$

其中 $\Delta\theta$ 为腔内振荡激光发散角, $d\theta/d\lambda$ 为棱镜对的单程角色散^[8~10]。

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot \tau\omega_0} \cdot \left[1 + \left(\frac{Lr}{L} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

L 为棱镜距束腰的距离, Lr 为振荡激光瑞利长度, $\tau\omega_0$ 为束腰半径。

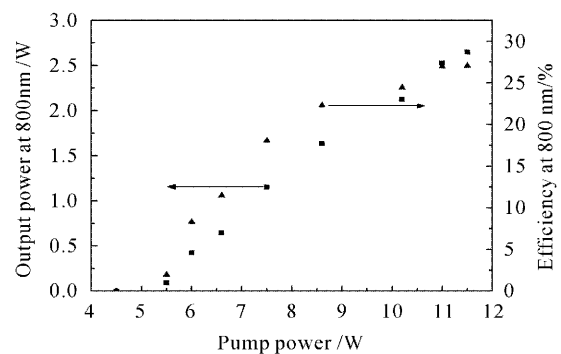


图3 当输出波长为 800 nm 时, 掺钛蓝宝石激光器的输出功率与抽运光功率及相应的光-光转换效率关系

Fig. 3 Output power of Ti:sapphire laser and optical-to-optical conversion efficiency versus pump power at the 800 nm

如图 4 所示, 该激光器的调谐波段为 $740 \sim 880 \text{ nm}$, 在大部分调谐波长范围内, 掺钛蓝宝石激光器的输出功率大于 1.5 W 。在中心波长 800 nm 附近, 激光输出功率最大为 2.7 W , 线宽最窄约 1.05 nm 。

我们使用两块重火石材料布氏棱镜作色散元件, 在同样的抽运功率和腔型结构条件下, 获得的输出激光线宽约 0.3 nm , 最大输出功率 1.6 W 。

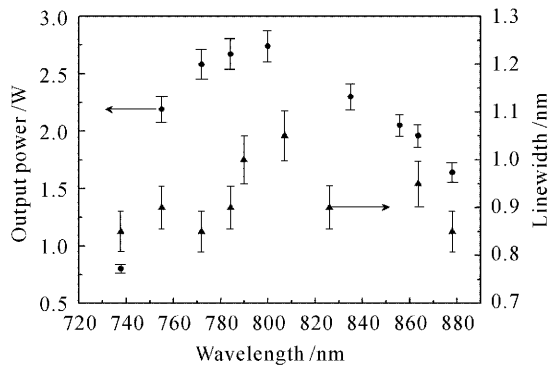


图4 抽运光功率11 W时,掺钛蓝宝石激光器的调谐输出功率和线宽与输出波长的关系

Fig.4 Tunable output power of Ti:sapphire laser and linewidth versus the wavelength when the pump power is 11 W

4 结 论

使用自行研制的全固态高平均功率、高光束质量532 nm绿光激光器抽运掺钛蓝宝石激光晶体,自由运转时,获得6.44 W的高平均功率掺钛蓝宝石激光输出,光-光转换效率大于40%。腔内插入布氏棱镜对,使用一组谐振腔镜,获得波长范围740~880 nm,线宽约1 nm的连续宽调谐激光输出,最大输出功率2.87 W,光-光转换效率25%。这种高平均功率的全固态宽调谐掺钛蓝宝石激光器,将会在激光生物学、激光医学、大气环境污染探测等领域具有巨大的应用价值。

参 考 文 献

- Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi *et al.*. High power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 19~21
张红瑞,高明义,郑义等. 大功率激光二极管端面抽运的Nd:YVO₄激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 19~21
- Liu Yuanyuan, Fang Gaozhan, Liu Bin *et al.*. Laser diode side-pumped CW Nd:YAG lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 577~580
刘媛媛,方高瞻,刘斌等. 侧面抽运Nd:YAG连续激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 577~580
- G. T. Maker, A. I. Ferguson. Ti:sapphire laser pumped by a frequency-doubled diode-pumped Nd:YLF laser [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7): 375~377
- Zhang Hongbo, Feng Yan, Xu Guichang *et al.*. All-solid-state QCW Ti:sapphire laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 666
张鸿博,冯衍,徐贵昌等. 全固态准连续掺钛蓝宝石激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 666
- Yan Feng, Yong Bi, Zuyan Xu *et al.*. Thermally-near-unstable cavity design for solid state lasers [C]. *SPIE*, 2003, **4969**: 227~232
- Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Tunable Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 1995. 348~350
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 348~350
- Xu Zuyan, Deng Daoqun, Guo Dongsheng *et al.*. A flashlamp pumped wide-band tunable dye laser with a dispersive Brewster prism expander [J]. *Chinese J. Lasers*, 1984, **11**(11): 662~664
许祖彦,邓道群,郭东升等. 使用色散型布儒斯特棱镜扩束的宽调谐染料激光器[J]. *中国激光*, 1984, **11**(11): 662~664
- Zhang Guowei. Tunable Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 174
张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 174
- Richard Wyatt. On the dispersion of a prism used as a beam expander in a nitrogen-laser pumped dye laser [J]. *Opt. Commun.*, 1978, **26**(1): 9~11
- F. J. Duarte. Ray transfer matrix analysis of multiple-prism dye laser oscillators [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1989, **21**: 47~54