

文章编号: 0258-7025(2004)12-1409-04

高功率、高效率、全固态准连续 钛宝石激光器

邹 雷^{1,2,3}, 丁 欣^{1,2,3}, 魏权夫^{1,2,3}, 于意仲^{1,2,3}, 温午麒^{1,2,3},
张百钢^{1,2,3}, 徐德刚^{1,2,3}, 陆 颖^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2,3}, 姚建铨^{1,2,3}

¹ 天津大学精仪学院激光与光电子研究所,
² 光电信息技术科学教育部重点实验室, ³ 南开大学、天津大学联合研究院, ^{1,2,3} 天津 300072

摘要 以激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 内腔倍频激光器作为抽运源, 实现了全固态准连续钛宝石激光器的高功率、高效率运转。当 532 nm 的抽运光为 24 W 时, 得到了 4.7 W 输出功率及 19.6% 的高转换效率。为了获得钛宝石激光器理想的宽带输出, 分别使用了两组膜片。第一组是 750~850 nm, 第二组是 850~950 nm, 每组膜片都有三种透过率, 分别为 5%, 10%, 15%。由于钛宝石荧光谱线的中心波长在 795 nm 附近, 使用第一组膜片在透过率为 10% 的情况下获得了最大 4.7 W 的输出功率。使用第二组膜片也获得了 3 W 左右的输出功率, 为将要进行的宽带调谐提供了必要的前提。

关键词 激光技术; 钛宝石激光器; 全固态; 准连续; 高功率; 高效率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

High Power, High Efficiency, All-Solid-State Quasi-Continuous-Wave Ti:Sapphire Laser System

ZOU Lei^{1,2,3}, DING Xin^{1,2,3}, WEI Quan-fu^{1,2,3},
YU Yi-zhong^{1,2,3}, WEN Wu-qi^{1,2,3}, ZHANG Bai-gang^{1,2,3},
XU De-gang^{1,2,3}, LU Ying^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3}, YAO Jian-quan^{1,2,3}

¹ Institute of Laser and Opto-electronics, College of Precision Instrument
and Opto-electronics Engineering, Tianjin University,
² Key Laboratory of Opto-electronics Information Science and Technology, Ministry of Education,
³ Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, ^{1,2,3} Tianjin 300072, China

Abstract Using frequency-doubled Nd:YAG laser pumped by laser-diode-array as pump source, a high output power, high conversion efficiency, all-solid-state, quasi-continuous-wave Ti:sapphire laser system is achieved. The maximum of the Ti:sapphire laser output power of 4.7 W and the conversion efficiency of 19.6% are obtained at 532-nm pump power of 24 W. To ensure the ideal broadband output of Ti:sapphire laser, two sets of Ti:sapphire resonator mirrors were used, respectively. One is from 750 to 850 nm, the other is from 850 to 950 nm. And the transmissivity is 5%, 10%, 15% respectively for two sets. Because the centric wavelength of the resonator laser is nearly 795 nm, the maximum of the Ti:sapphire laser output power is 4.7 W with the first set of mirror and the transmissivity of the output mirror is 10%. The second set of mirror can generate the output power of 3 W, which is high enough to achieve broadband tuning for the future.

Key words laser technique; Ti:sapphire laser; all-solid-state; quasi-continuous-wave; high-power; high-efficiency

收稿日期: 2004-01-08; 收到修改稿日期: 2004-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(60278001)和教育部天津大学、南开大学科技合作项目资助课题。

作者简介: 邹 雷(1980—), 天津大学物理电子学专业博士研究生, 目前从事全固态激光器、频率变换技术、可调谐激光器及钛宝石激光器的研究工作。E-mail: zoulei@126.com

1 引 言

掺钛蓝宝石激光器($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$, 简称钛宝石)除了具有结构简单、性能稳定、寿命长、室温运转、增益高等一般固体激光器的特点外,由于钛宝石晶体中三价钛离子的电子能级与周围晶格的振动能级之间的耦合,决定了钛宝石激光器最重要的特点就是具有很宽的光谱调谐范围(可调谐范围 660~1200 nm,相当于多组染料所能覆盖的激光波段的总和)。钛宝石激光器在激光光谱、激光化学、激光遥感、光雷达、激光抽运、激光放大、激光冷却、超导研究、非线性光学、大气光学及医学等方面有广泛的应用价值。近年来飞秒钛宝石激光器也成了该领域发展的一个热门方向^[1,2]。

全固态是钛宝石激光器的一个重要发展方向,这种系统结构紧凑、体积小、效率高、寿命长、传输光束质量好,有着广泛应用前景。目前对于用全固态准连续倍频 Nd:YAG 激光器抽运钛宝石激光器的研究相对较少。在这一领域中最近的报道文章包括中国科学院物理研究所的输出功率为 660 mW,转

换效率为 9.4% 的钛宝石激光器^[3];北京工业大学所做的输出功率为 0.94 W,转换效率为 13.6% 的钛宝石激光器^[4]以及天津大学激光与光电子研究所的输出功率为 2.5 W,转换效率为 15.7% 的钛宝石激光器^[5,6]。这些工作都显示了全固态钛宝石激光器还有很大的上升潜力。

本文采用高功率高效率激光二极管(LD)抽运的声光调 Q 内腔倍频 Nd:YAG 激光器作为钛宝石谐振腔的抽运源。其中作为原始抽运源的连续波二极管阵列的功率为 240 W,最终实现准连续全固态运转的钛宝石激光的最大输出功率为 4.7 W,转换效率为 19.6%。

2 实验装置及结果分析

实验装置如图 1 所示,LD 为二极管阵列;KTP 倍频腔的输入镜是对 532 nm 高反,1064 nm 增透的谐波反射镜,输出镜镀以 1064 nm 高反,532 nm 增透膜; P 为钛宝石激光器的抽运源; L 为聚焦透镜; M_1, M_2 为钛宝石腔镜。

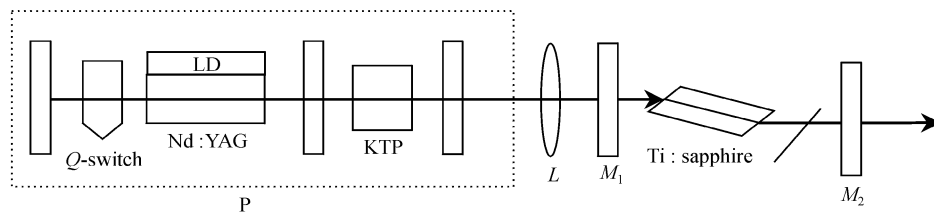


图 1 全固态准连续钛宝石激光器系统

Fig. 1 All-solid-state quasi-continuous Ti:sapphire laser system

实验中采用的半导体激光器组件由 12 个 20 W 二极管激光器组成,按照五角形等间距侧面抽运 Nd:YAG 棒,其总抽运功率为 240 W,激光介质的尺寸为 $\phi 6.36 \text{ mm} \times 146 \text{ mm}$,侧面打毛,两端磨成平面,镀 1064 nm 的增透膜;倍频晶体采用 II 类相位匹配的 KTP 晶体($\phi = 23.6^\circ; \theta = 90^\circ$),尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,两面镀 1064 nm 和 532 nm 的增透膜;产生 532 nm 的激光腔长为 340 mm;声光 Q 开关器件由英国 NEOS 公司生产,调制频率为 2~30 kHz;利用美国 Molelectron 公司生产的功率计,测量在抽运电流为 23 A 时,532 nm 最大输出功率为 24 W,此时脉冲宽度为 80 ns,重复频率为 9 kHz。

为了使抽运光与振荡光模式更好地匹配,获得更高的功率密度,使用一个焦距为 50 mm 的聚焦透镜把抽运光汇聚到钛宝石腔中,而钛宝石晶体放在抽运光光束的焦点处。为了抵消热沉积,晶体与铜

质的水冷片相连;钛宝石晶体由中国科学院上海光学精密机械研究所提供,尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$,品质因数 $\text{FOM} = 300$,使钛宝石棒的中心轴线垂直于晶轴 c ,两通光端面以布儒斯特角切割,且使两通光表面的法线与晶轴 c 处于同一平面内(如图 2)。在布儒斯特入射面内的抽运光的偏振方向与 c 轴一致。这种情况下,钛宝石腔吸收了 85% 的 532 nm 入射光。

由于抽运光多模运转并且发散角很大,因此即使经过抽运透镜聚焦后,在钛宝石晶体内的光斑半径仍比较大(约 $200 \mu\text{m}$),即抽运体积比较大。而流行的四镜折叠腔中,振荡激光在钛宝石晶体中的光斑半径很小(一般小于 $50 \mu\text{m}$),模体积很小,这样只有部分反转粒子数被利用,故激光转换效率很低。而在两镜直腔中,振荡光的模体积比较大,可以充分利用整个抽运区。所以,为了改善抽运光束与振荡

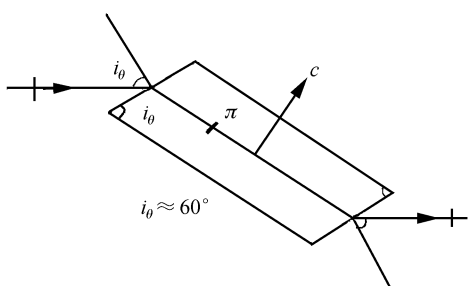


图 2 钛宝石晶棒剖面图

Fig. 2 Ti:sapphire crystal cutaway

光束在增益区内的匹配,提高激光转换效率,我们决定采用两镜直腔的腔型。

实验中采用两个平镜组成钛宝石激光器的谐振腔,腔长为 60 mm,晶体放在腔的中心。谐振腔的输入镜镀以 532 nm 增透和 750~850 nm 高反膜,输出镜镀膜在 750~850 nm,透过率分别为 5%, 10%, 15%。对于准连续运转激光器输出激光平均功率 P_L 的一般解析表达式为 $P_L = \frac{\nu_c \eta T}{2\nu_p \delta} (P_0 - P_{ot})(1 - e^{-\alpha_p l})$, 式中 P_0 为抽运平均功率, P_{ot} 为抽运阈值平均功率, α_p 为激光晶体对抽运光的吸收系数, δ 为谐振腔单程损耗因子, l 为工作物质长度, η 为量子效率, ν_p 为抽运光频率, ν_c 为振荡光频率, T 为温度。从该公式理论上可以算出,在抽运功率确定的情况下,有一个最佳透过率约为 15%,使得输出功率最大。而实验测得的结果与理论符合,在所使用的三组镜片中,利用 15% 透过率的镜片得到了 4.7 W 功率输出(如图 3 所示)。

利用美国 Agilent Technologies 公司的光谱分析仪,测得输出光谱如图 4 所示。由图 4 可以看出,

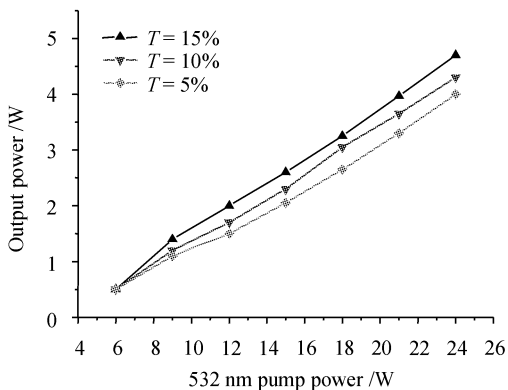


图 3 不同输出镜透过率下输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Output power versus pump power with different transmissivity

钛宝石的荧光谱线很宽,在 750~850 nm 腔镜下仍能得到 770~830 nm 的宽带光谱,其脉冲峰值为 797 nm。

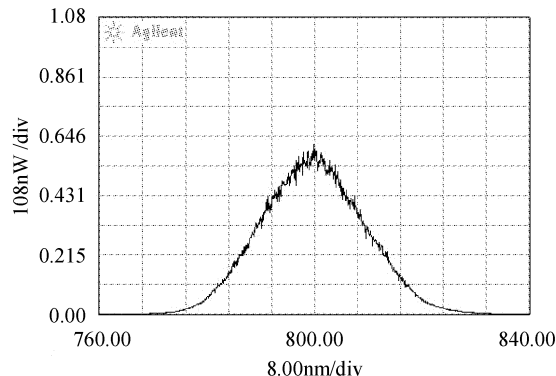


图 4 钛宝石激光器输出光谱图

Fig. 4 Ti:sapphire laser output spectrum

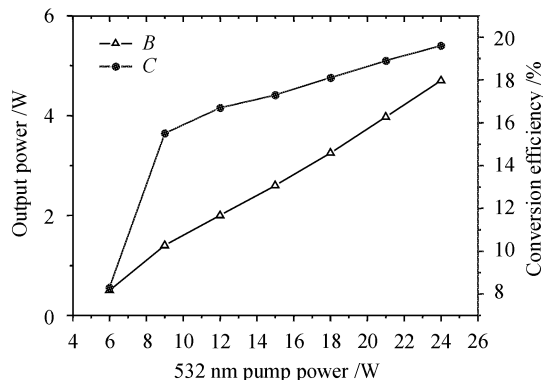


图 5 输出功率、转换效率随 532 nm 抽运功率的变化关系图

Fig. 5 Variation of output power and conversion efficiency with 532-nm pump power

钛宝石激光器的输出功率、转换效率随 532 nm 抽运功率的变化关系如图 5 所示。钛宝石激光的阈值抽运功率为 4 W,当 532 nm 抽运功率达到 24 W 时可得到 4.7 W 的输出功率(图中 B),很容易计算出钛宝石激光器的转换效率(图中 C)为 19.6%,并测得此时输出脉冲宽度为 80 ns。实验发现,当提高抽运功率时,转换效率也随之提高。

实验表明,随着抽运功率的增加,振荡光的脉冲宽度变窄,峰值功率提高,从 200 ns 降到 80 ns(如图 6)。这是由于抽运能量越高,反转粒子数 n 所能达到的极大值越大,当然输出脉宽变窄,峰值功率提高,这与调 Q 的原理类似。而如果单纯改变抽运光的脉宽,输出的功率及脉宽均无明显变化。这是因为宽脉冲抽运时只是使抽运能量全部被钛宝石吸收而转化成上能级粒子所需的时间比短脉冲抽运要长,产

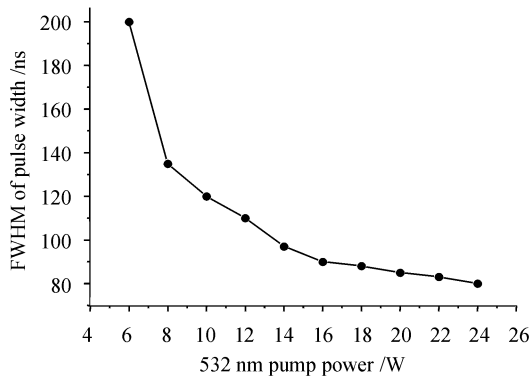


图6 振荡光半峰全宽(FWHM)随532 nm抽运光功率的变化关系图

Fig. 6 Variation of FWHM with 532 nm pump power

生强烈受激辐射的时刻也会晚一些,即输出脉冲相对于抽运脉冲的时间延迟增大。结合前面的分析可知输出脉宽及幅度主要取决于抽运单脉冲能量,而非抽运脉宽。这是因为在抽运作用期间,并无激光脉冲输出,而只使反转粒子数密度 n 达到一定水平。尽管抽运脉冲宽度不同,但只要抽运脉冲能量相等,则激发到激光上能级的粒子数就相同,这些相等的上能级粒子数在产生强烈受激辐射时形成的激光脉冲的形状和宽度几乎是相同的,所以只要抽运脉冲的能量相同,则输出的脉冲几乎不随抽运脉宽而变^[7]。

3 结 论

本实验采用了由连续激光二极管阵列抽运的具有更高输出功率的 Q 开关 Nd:YAG 激光器以获得 KTP 晶体更高的倍频转换效率和对钛宝石晶体更高的抽运功率,最终得到钛宝石激光的最大输出功率为 4.7 W,这是以前所能达到的最高水平的 2 倍,而且得到了 19.6% 的转换效率。还测得此时脉宽

为 80 nm,输出光谱在 770~830 nm 之间连续变化,峰值落在 797 nm 处。

由于实验仪器的水平所限,实验并没有达到其所能达到的最理想结果,如果换用具有更高功率的 Nd:YAG 激光器,使得作为钛宝石抽运光源的 532 nm 激光的功率提高,那么将会产生更高的输出功率以及更高的转换效率;另外,在现有功率基础上加调谐,将会较容易地产生钛宝石激光的宽带调谐。

参 考 文 献

- Zheng Wei, Wang Qingyue, Zhao Jiangshan *et al.*. Self-starting Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser at repetition rates of 20 MHz [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):481~484
郑 玮,王清月,赵江山等. 20 MHz 自启动克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):481~484
- Zhang Zhigang, Chai Lu, Zhao Jiangshan *et al.*. Semiconductor saturable-absorber for self-starting mode-locked Ti:sapphire lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9):1151~1152
张志刚,柴 路,赵江山等. 用于钛宝石激光器自启动锁模的半导体可饱和吸收镜[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9):1151~1152
- Zhang Hongbo, Feng Yan, Xu Guichang *et al.*. All-solid-state, quasi-cw, 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
- Wang Lixin, Li Gang, Wang Weixiang. Study on the quasi-cw, Ti:sapphire laser [J]. *Applied Lasers*, 1999, **19**(3):101~102/132
王立新,李 港,王伟祥. 准连续波掺钛蓝宝石激光器的研究[J]. *应用激光*, 1999, **19**(3):101~102/132
- Ding Xin, Yao Jianquan, Yu Yizhong *et al.*. Tunable sum frequency mixing of Ti:sapphire laser and Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(6):407~410
- Wei Quan-fu, Ding Xin, Wen Wuqi *et al.*. High-power and high-efficiency operation of an all-solid-state quasi-continuous-wave titanium sapphire laser system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):34~35
- Xu Rongqing, Li Jun, Oi Xiaowu. A study on the dynamic characteristics of a quasi-continuous wave Ti:sapphire [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(6):512~515
徐荣青,李 军,倪晓武. 准连续钛蓝宝石激光器动力学特性的研究[J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(6):512~515