

文章编号: 0258-7025(2007)05-0623-05

梯度补偿法控温晶体的高功率绿光激光器

赵智亮^{1,3}, 朱健强¹, 陈立华², 王勇¹, 王宪涛^{1,3}, 崔俊文¹, 李永春¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800
² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 研究了平均功率超过 30 W 的稳定高效全固态绿光激光器, 分析得出影响全固态腔内倍频激光器倍频效率和输出稳定性的主要因素是倍频晶体局部温升造成的相位失配和热透镜效应, 采用温度梯度补偿控温法对大尺寸倍频晶体进行温度控制, 降低激光器工作中倍频晶体内外温度梯度从而有效地克服因晶体局部温升造成的倍频相位匹配角失配和热透镜效应。采用三条 60 W 的半导体激光二极管阵列板条侧面抽运 Nd:YAG 激光增益介质棒, 采用声光调 Q, 平凹直腔和腔内倍频结构配合温度梯度补偿控温法对大尺寸倍频晶体进行温度控制, 得到了稳定高效的 532 nm 绿光输出。在抽运电流 25 A, 抽运功率 174.6 W 时, 得到了脉冲宽度 110 ns, 重复频率 10 kHz, 输出平均功率 31.6 W 稳定高效的绿光输出, 光-光转换效率为 18.1%, 功率稳定性为 $\pm 0.66\%$, 绿光输出光束质量因子 $M^2 = 4.3$ 。

关键词 激光技术; Nd:YAG 激光器; 倍频晶体; 梯度补偿控温; 腔内倍频; 532 nm 绿光

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Grads-Compensating Temperature Control for Crystal in High Power Green Light Laser

ZHAO Zhi-liang^{1,3}, ZHU Jian-qiang¹, CHEN Li-hua², WANG Yong¹,
WANG Xian-tao^{1,3}, CUI Jun-wen¹, LI Yong-chun¹

¹ Joint Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A stable and efficient all solid-state green laser with average power over 30 W is studied. The phase mismatching and thermal lens effect induced by local temperature rise of doubling frequency crystal are the major reasons affecting frequency doubling efficiency and laser output power stability. The method of grads-compensating temperature controll is used to adjust the operating temperature of frequency doubling crystal with large size. This temperature control system debases the inside and outside temperature grads of crystal to compensate the phase mismatching and thermal lens effect of frequency doubling crystal. This laser that is side-pumped by three bars laser diode array of 60 W and adopts the high efficiency flat-concave cavity, intracavity frequency doubling resonance structure, and acoust-optic Q-switching generates a maximum green average power of 31.6 W with 110 ns pulse width and 10 kHz repetition rate when pumped current of laser diode was 25 A and pumped power was 174.6 W. The optic-optic transition efficiency is up to 18.1%, and power stability is up to $\pm 0.66\%$ with beam quality factor of green laser $M^2 = 4.3$.

Key words laser technique; Nd:YAG Laser; frequency-doubling crystal; grads-compensating temperature control; intracavity frequency doubling; 532 nm green laser

收稿日期: 2006-12-12; 收到修改稿日期: 2006-12-30

作者简介: 赵智亮(1974—), 男, 满族, 河北人, 博士研究生, 目前主要研究方向为半导体抽运固体激光器及其驱动源与高精度智能控温系统。E-mail: zzl_caep@163.com

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高功率激光驱动器总体光学设计、结构设计以及相关检测与测控技术。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

1 引 言

高功率绿光激光器在科研、医疗、通信、激光加工、娱乐表演以及国防军事等领域均有广泛应用。随着半导体激光技术的迅速发展,采用半导体激光抽运的高功率全固态绿光激光器以其效率高、体积小、运转稳定和寿命长等特点越来越受到人们的关注。近年来,国内外对于高平均功率高重复频率连续全固态绿光激光器的研究正在成为高功率激光技术领域的热点研究课题之一。国际上,1996年法国的 B. J. Le Garrec 等采用 Z 型谐振腔结构腔内倍频实现了 106 W 的高功率绿光输出^[1]。1998 年,美国利弗莫尔实验室采用 KTP 和 LBO 晶体腔内倍频获得了 315 W 绿光输出^[2],是迄今通过倍频获得绿光的最高平均功率的报道。日本等其他国家也报道了高功率绿光激光器的研究^[3,4]。随着半导体激光器质量的提高和价格的降低,国内对于高功率全固态绿光激光器的研究也取得了很大的进展。中国科学院物理研究所采用腔外倍频的方法得到了光束质量较高的 20 W 绿光输出^[5]。天津大学采用美国 CEO 公司生产的半导体激光器组件实现了 104 W 的高功率绿光输出^[6],另外,中国工程物理研究院和华北光电技术研究所等单位也报道了对于高功率全固态绿光激光器的研究^[7,8]。

影响高功率全固态绿光激光器输出特性的主要因素有腔内元件的热效应、声光 Q 开关的关断能力以及腔内功能元件的插入损耗。特别是因基波功率密度高导致倍频晶体局部升温使其产生相位失配和热透镜效应,因此如何减小高功率运转条件下倍频晶体匹配角失配和热透镜效应成为研究高功率绿光激光器的主要难点之一。本文采用温度梯度补偿控温法对大尺寸 KTP 倍频晶体进行高精度控温和工作温度调节,在提高了倍频效率和输出稳定性的同时还得到了高质量的输出光束。对高功率绿光晶体的腔内元件选择以及在腔内的安放进行了深入研究,结合稳定高效平凹谐振腔,得到了稳定高效的高功率 532 nm 绿光输出,且提高了输出光束质量。

2 温度梯度补偿法对倍频晶体控温

在高功率激光器运转中为提高倍频效率大多采用腔内倍频方式,通过倍频晶体的基波功率密度集中,一方面有利于提高倍频输出功率,另一方面被倍频晶体吸收的基波功率也会增加,造成晶体内部热量积聚,从而导致倍频晶体局部升温引起匹配角失

配和热透镜效应。倍频晶体相位匹配角通常是根据室温的温度条件计算出来的,文献[7]中计算表明倍频晶体匹配角 ϕ 随温度升高接近线性变化。对于高功率全固态绿光激光器,倍频晶体都采用大尺寸晶体,因此在高功率运转条件下倍频晶体内部升温使得晶体内部与晶体周边存在温度梯度,难以确定激光器运转过程中倍频晶体的内部温度。文献[9]采用角度调节配合强制冷的办法,通过调整基波入射角度来满足因温度变化造成的匹配角失配,得到了较高的倍频效率,但是由于基波入射角度的偏离,输出光束质量变差。同时由于倍频晶体局部升温导致的倍频晶体热透镜效应将影响激光器腔的稳定性从而降低激光器输出的稳定性,但是由于倍频晶体热透镜效应对输出稳定性的影响相对激光增益介质 Nd:YAG 热透镜效应对输出稳定性的影响小而往往被研究者忽略。

对于高功率腔内倍频激光器,倍频晶体沿基波通光轴向尺寸相对整个谐振腔腔长很短,可以认为沿轴向通过倍频晶体的基波功率密度处处相等,因此对于晶体内部的温度分析可以忽略轴向的温度变化。实验针对大尺寸倍频晶体设计了温度梯度补偿法对 KTP 倍频晶体进行控温,从而消除了晶体内部与周边的温度梯度,使倍频晶体具有有效非线性系数主极大方向 x - y 截面方向上内外温度平衡化,从而补偿了晶体的匹配角失配同时也降低了倍频晶体的热透镜效应。温度梯度补偿法倍频晶体控温装置结构截面示意图如图 1 所示。

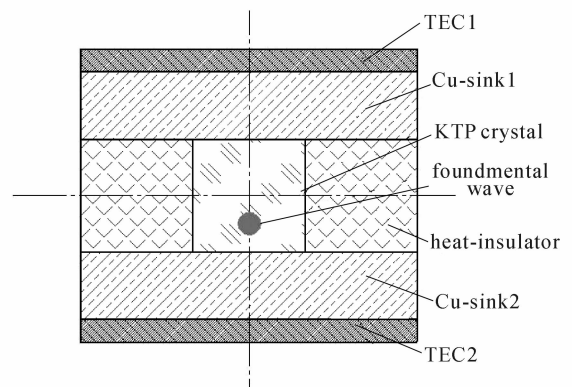


图 1 梯度补偿法控温装置结构

Fig. 1 Structure of grads-compensating temperature controller

图 1 中,对倍频晶体上下两侧分别与铜热沉 Cu-sink1, Cu-sink2 紧密接触,使得晶体上下两侧温度为所接触的铜热沉的温度。晶体左右两侧采用绝

热材料将上下两侧的铜热沉热绝缘同时使晶体沿左右两侧绝热,使热量传导只是上下的一维方向。对上下两侧铜热沉分别采用 TEC1, TEC2 半导体制冷器件进行温度调节,并采用高精度温度控制系统控制 TEC 半导体制冷器件输出功率,从而高精度调整上下两侧铜热沉温度,即高精度控制倍频晶体上下两侧面温度。实验中采用自行研制的高精度自适应控温系统,控温精度达到 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于晶体上下两侧分别控温,可以根据激光器运行条件,调节晶体上下两侧稳定在不同的温度,从而在该导热方向上使晶体整个截面内形成一个一维温度梯度。实验中通过调节控温系统调节晶体上侧面温度 T_1 高于晶体下侧面温度 T_2 ,使晶体内部自下而上形成一个温度逐渐升高的温度梯度。由于高功率激光运转中为了提高倍频效率,将倍频晶体放置在靠近基波光束束腰处,因此通过倍频晶体的基波光束直径相对大尺寸的倍频晶体截面尺寸较小,存在很大的调整范围。实验中调整倍频晶体位置使基波靠近晶体控制温度低的下侧面通过,使倍频晶体下侧面附近温度因吸收基波能量而升温,温度高于上侧面附近温度,在晶体内部形成自下而上温度逐渐降低的温度梯度与由晶体控温系统在晶体内部形成的自下而上形成的温度逐渐升高的温度梯度互相补偿。根据激光器运转条件调节控温系统使得这两个相反的温度梯度相互补偿达到平衡,使得晶体内外达到温度均匀化,有效地补偿因倍频晶体局部温升造成的激光器运转过程中的相位失配和热透镜效应。

3 实验装置

实验采用三条 60 W 激光二极管阵列成三角型等间距放置作为抽运源侧面抽运激光增益介质 Nd:YAG 棒,抽运总功率 180 W。抽运源激光二极管阵列和激光介质 Nd:YAG 棒均采用循环水冷却,水温控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。装置结构示意图如图 2 所示。

激光器整体结构示意图如图 3 所示。激光器采用稳定高效的平凹直腔结构,腔长 400 mm,平凹反射镜 M 的曲率半径为 500 mm,镀 1064 nm 全反射膜。平面输出耦合镜 OC 同时镀 1064 nm 全反膜,532 nm 增透膜作为绿光输出端。激光增益介质 Nd:YAG 棒长 60 mm,直径 3 mm,两端面镀 1064 nm 增透膜。根据腔结构几何参数计算表明基波束腰靠近输出平面腔镜,调整倍频晶体位置使基波束腰通过倍频晶体以提高倍频效率。倍频晶体为山东大学

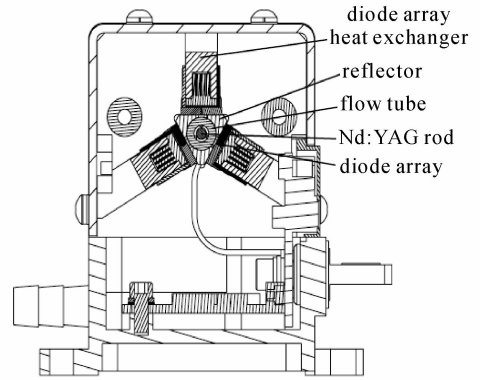


图 2 侧面抽运源结构示意图

Fig. 2 Structure of side-pump laser

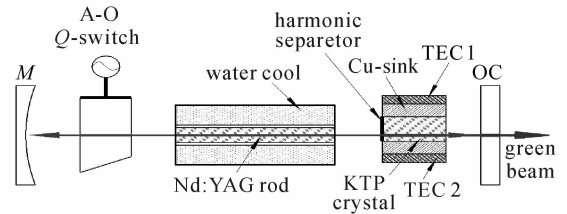


图 3 激光器结构示意图

Fig. 3 Structure of laser

长的 KTP 晶体,采用 II 类相位匹配,相位匹配角 $\phi = 23.5^{\circ}, \theta = 90^{\circ}$,其尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。为减少腔内插入损耗,采用镀膜的办法对谐波进行分离,即在倍频晶体 S_1 面上同时镀 1064 nm 增透膜和 532 nm 全反膜, S_2 面同时镀 1064 nm 和 532 nm 增透膜。调制器采用美国 NEOS 公司生产的驱动功率 50 W 的声光(A-O) Q 开关,其可接受的调制频率为 1~50 kHz。实验中为提高声光 Q 开关对基波的关断能力,增大基波峰值功率以便提高倍频效率,选择声光 Q 开关安放在基波光束直径最大而功率密度最低的靠近平凹反射镜的位置,得到最大关断抽运电流为 22.5 A。

4 结果与讨论

激光器 532 nm 绿光输出光束脉冲如图 4,图 5 所示。由图 4,图 5 可知,激光器绿光输出光束脉冲宽度 110 ns,重复频率 10 kHz,经测试光束质量因子 $M^2 = 4.3$ 。

抽运电流为 25 A,抽运总功率为 174.6 W 时,激光器绿光输出功率与倍频控制温度关系曲线如图 6 所示。采用自行设计的温度梯度补偿法对倍频 KTP 晶体进行控温条件下的实验曲线标记为“◆”,

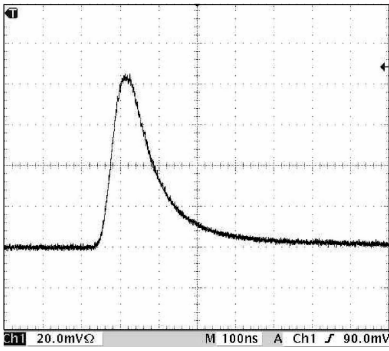


图 4 绿光输出脉冲宽度

Fig. 4 Pulse width of green laser

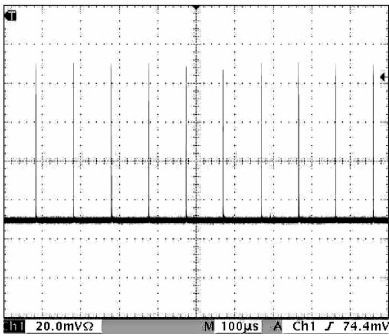


图 5 绿光输出重复频率

Fig. 5 Pulse frequency of green laser

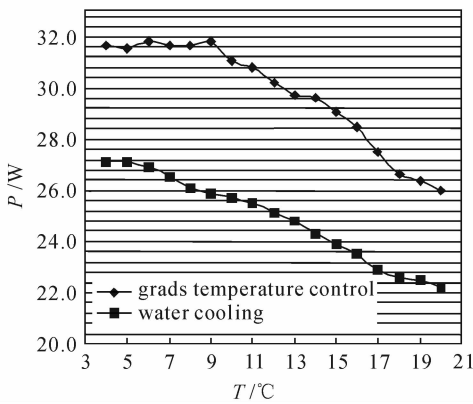


图 6 绿光输出功率与 KTP 温度曲线

Fig. 6 Curves of green laser power versus KTP temperature

采用通水强制降温法对倍频 KTP 晶体进行控温的实验曲线标记为“■”。

采用温度梯度补偿法对 KTP 晶体控温实验中依次调节晶体上侧面控制温度 T_1 在不同的温度点, 同时在每一个 T_1 温度点, 调节晶体下侧面控制温度 T_2 选择合适的温度梯度使得激光输出功率最高, 图 6 中实验曲线为晶体上侧面在每个控制温度 T 时, 调节下侧面温度得到的激光最高输出功率。从图 6

可以看出, 当晶体上侧面温度 T_1 调节到 $9\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 通过调节正确的温度梯度得到了最高绿光输出 31.8 W , 当继续下调温度 T_1 时激光输出基本保持不变。上述结果表明, 当温度 T_1 调节为 $9\text{ }^\circ\text{C}$ 并选择适当的温度梯度时, 温度梯度控温系统补偿了 174.6 W 抽运功率条件时倍频晶体因吸收基波而造成的相位失配和热透镜效应。从图 6 还可以看出, 采用通水强制制冷 KTP 晶体时, 水温与绿光输出功率的关系, 当水温降低到 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时得到了最高的激光输出功率 27.1 W , 但低于采用温度梯度补偿法对 KTP 晶体控温时得到的最高功率。

抽运电流与激光器绿光输出功率的关系如图 7 所示。结果表明, 激光输出功率随抽运电流基本成线性增长。图 8 所示为当抽运电流 25 A , 抽运总功率为 174.6 W 时, 采用温度梯度补偿法控温 KTP 晶体时, 激光器连续工作 180 min 的输出功率稳定性曲线, 激光器输出功率均值为 31.6 W , 按功率平均值

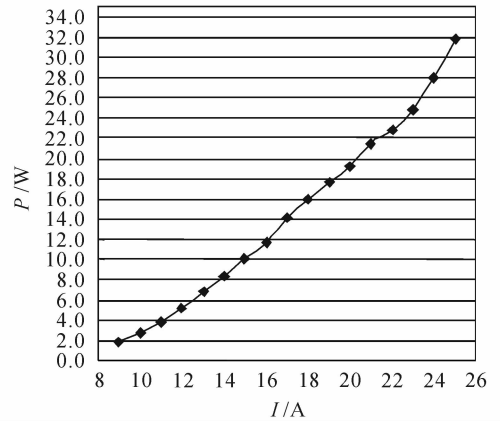


图 7 抽运电流与绿光输出功率曲线

Fig. 7 Curve of green laser power versus pumping current

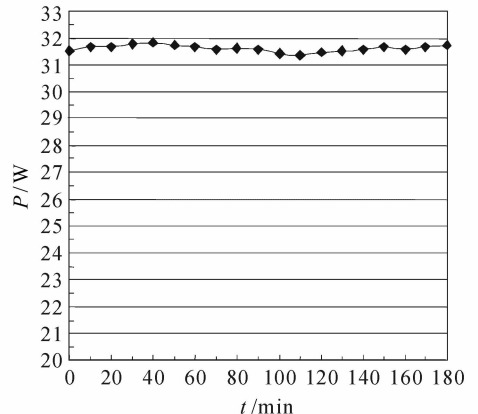


图 8 绿光输出功率稳定性

Fig. 8 Stability of green laser output power

计算其光-光转换效率为 18.1%, 按(1)式^[10]计算激光输出功率稳定性 δ 为 $\pm 0.66\%$ 。

$$\delta = \pm \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2\bar{P}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 P_{\max} , P_{\min} 分别为激光器稳定工作时间内最大输出功率和最小输出功率, \bar{P} 为激光器稳定工作时间的平均输出功率。

5 结 论

通过分析影响全固态腔内倍频激光器倍频效率和输出稳定性的主要因素, 研究了温度梯度补偿控温法对大尺寸倍频晶体进行温度控制, 降低激光器工作中倍频晶体内外温度梯度从而有效地克服因倍频晶体局部温升造成的倍频相位匹配角失配和热透镜效应, 提高了倍频效率和输出功率稳定性, 同时改善了光束输出质量。还研究了减小全固态高重复频率绿光激光器腔内损耗和提高声光 Q 开关关断能力的方法。采用上述措施, 研制了一台绿光输出功率达到 31.6 W 的全固态绿光激光器, 其输出激光脉冲宽度 110 ns, 重复频率 10 kHz, 光-光转换效率 18.1%, 功率稳定性为 $\pm 0.66\%$, 绿光输出光束质量因子 $M^2 = 4.3$ 。

参 考 文 献

- 1 B. J. Le Garrec, G. J. Raze, P. Y. Thro *et al.*. High-average-power diode-array-pumped frequency doubled YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1990~1992
- 2 J. J. Chang, E. P. Dragon, I. L. Bass. 315 W pumped-green

- generation with a diode-pumped Nd:YAG laser [C]. *CLEO98*, 1998, San Francisco, CPD-22
- 3 Susumu Konno, Shuichi Fujikawa, Koji Yasui. Highly efficient 68-W green-beam generation by use of an intracavity frequency-doubled diode side-pumped Q-switched Nd:YAG rod laser [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27):6401~6404
- 4 Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa, Koji Yasui. Stabilization of a high-power diode-side-pumped intracavity-frequency-doubled CW Nd:YAG laser by compensating for thermal lensing of a KTP crystal and Nd:YAG rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(3):377~380
- 5 Feng Yan, Bi Yong, Zhang Hongbo *et al.*. 20 W diode pumped external frequency-doubled Nd:YAG green laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):469~471
冯 衍, 毕 勇, 张鸿博等. 20 W 腔外倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):469~471
- 6 Xu Degang, Yao Jianquan, Guo Li *et al.*. 104 W laser diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG green light laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7):925~928
徐德刚, 姚建铨, 郭 丽等. 104 W 内腔倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7):925~928
- 7 Xu Degang, Yao Jianquan, Chen Jin *et al.*. High-stabilization 85 W all-solid-state green laser operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):385~389
徐德刚, 姚建铨, 陈 进等. 85 W 高稳定全固态绿光激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):385~389
- 8 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 162 W laser diode-pumped Nd:YAG intracavity-doubled laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1459~1462
姚震宇, 蒋建锋, 涂 波等. 162 W 激光二极管抽运 Nd:YAG 腔内倍频激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1459~1462
- 9 Guo Li, Yao Jianquan, Xu Degang *et al.*. Study on the thermal effect of KTP crystal for 85 W green laser [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(6):20~22
郭 丽, 姚建铨, 徐德刚等. 85 W 绿光激光器中的 KTP 晶体热效应研究[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(6):20~22
- 10 China Bureau of Technical Supervision. Testing method for laser radiant power stability [S]. Standardization of P. R. China GB/T 13864-92, 1992, 11
国家技术监督局. 激光辐射功率稳定度测试方法[S]. 中华人民共和国国家标准 GB/T 13864-92, 1992, 11