

文章编号: 0253-2239(2004)07-925-4

104 W 内腔倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器*

徐德刚 姚建铨 郭丽 周睿 张百钢 丁欣 温午麒 王鹏

(天津大学精仪学院激光与光电子研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 报道了一台高功率内腔倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器, 针对 KTP 晶体热效应和激光热稳定腔, 采取了对 KTP 晶体进行低温冷却的优化措施, 以便减少 KTP 晶体的热效应导致的相位失配, 同时兼顾了 Nd:YAG 棒的热致双折射效应和 KTP 晶体热透镜效应, 设计了热稳定谐振腔; 实验中采用 80 个 20 W 激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 棒和 II 类相位匹配 KTP 晶体(在 27 °C 时相位匹配角为 $\phi=23.6^\circ; \theta=90^\circ$, 尺寸为 7 mm×7 mm×10 mm) 内腔倍频技术, 谐振腔腔长为 530 mm, KTP 晶体的冷却温度为 4.3 °C, 抽运电流为 18.3 A 时, 实现平均功率达 104 W、脉冲宽度为 130 ns 的 532 nm 激光输出; 其重复频率为 20.7 kHz。光-光转换效率为 10.2%。

关键词: 激光器; Nd:YAG 激光器; 532 nm 绿光; KTP 晶体; 内腔倍频; 低温冷却

中图分类号: TN248.13 文献标识码: A

104 W Laser Diode-Pumped Intracavity Frequency-Doubled Nd:YAG Green Light Laser

Xu Degang Yao Jianquan Guo Li Zhou Rui Zhang Baigang
Ding Xin Wen Wuqi Wang Peng

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science Ministry of Education, Institute of Lasers and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 2 July 2003; revised 2 December 2003)

Abstract: An average 104 W green beam operation by intracavity frequency doubling of Nd:YAG laser, which is pumped by eighty 20 W high-power laser diodes is reported. A type II phase matched KTP crystal ($\phi=23.6^\circ, \theta=90^\circ$ under the condition of 27 °C, its size is 7 mm×7 mm×10 mm) is applied for frequency doubling of Nd:YAG laser. The length of resonator is 530 mm. The KTP crystal is placed in the special cooling device. Under the pumping current of 18.3 A, KTP crystal is cooled to 4.5 °C. A maximum green power of 104 W was generated at 20.7 kHz repetition rate and 132 ns pulse width when pumping current of laser diodes is 18.3 A, leading to 10.2% of optical-optical conversion efficiency.

Key words: lasers; Nd:YAG laser; green beam at 532 nm; KTP crystal; intracavity frequency doubling; strong cooling

1 引 言

高功率绿光激光器在可调谐激光器的抽运源、

流场显示、海洋探测、光电对抗、污染检测、大功率大能量的激光加工以及军事应用(激光雷达, 激光制导等)等科研和工业领域中得到了广泛的应用。利用激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体棒内腔倍频技术是获得高效高功率稳定绿光光源的重要途径之一。发达国家在这方面已经进行了很多的研究^[1~5], 国内由于国外高功率半导体激光器禁运、价格等条件限制, 一直落后于发达国家。近年来, 随着国产半导体

* 国家 863 计划(2002AA311190)、教育部天津大学、南开大学科技合作项目、天津市光电子联合科学研究中心项目(013184011)资助课题。

E-mail: xudegang@eyou.com

收稿日期: 2003-07-02; 收到修改稿日期: 2003-12-02

激光器质量的提高以及国外半导体激光器价格的降低,全固态高功率绿光光源的研究也有了极大的进展,我们课题组曾实现双端输出 40 W 绿光光源^[6];电子部 11 所的姜东升等人采用两个激光二极管抽运组件,中间加上 90°旋转器,利用三镜 L 型腔实现平均功率 68 W 的绿光输出^[7];中国科学院物理研究所采用同样的抽运结构,利用腔外倍频获得 20 W 的绿光^[8]。但由于倍频晶体 KTP 的热效应导致的相位失配以及声光器件在高功率下难以关断等原因,一直限制着高功率绿光激光的输出。

在高功率激光二极管抽运的内腔倍频激光器中,由于谐振腔中基波的功率密度比较大,倍频晶体吸收部分基波会产生热效应,导致晶体内部的温度升高,而常温下晶体切割的相位匹配角会发生偏移,引起倍频晶体的相位失配;另外,随着抽运功率的增

加晶体的热透镜焦距也在发生变化,引起谐振腔的不稳定,从而限制了倍频光输出功率的提高。本文在以前工作的基础上,针对 KTP 晶体热效应和激光热稳定腔,采取了对 KTP 晶体进行低温冷却的优化措施,以便减少 KTP 晶体的热效应引起的相位失配,同时在谐振腔设计中同时兼顾了 Nd:YAG 棒的热致双折射效应和 KTP 晶体热透镜效应的补偿,实验中利用 80 个 20 W 的高功率半导体激光器侧面抽运单个 Nd:YAG 棒、平凹谐振腔结构、大尺寸 KTP 晶体内腔倍频,实现平均功率达 104 W、重复频率为 20.7 kHz、脉冲宽度 130 ns、内腔倍频绿光激光器的稳定运转,光-光转换效率为 10.2%。

2 实 验

实验装置如图 1。

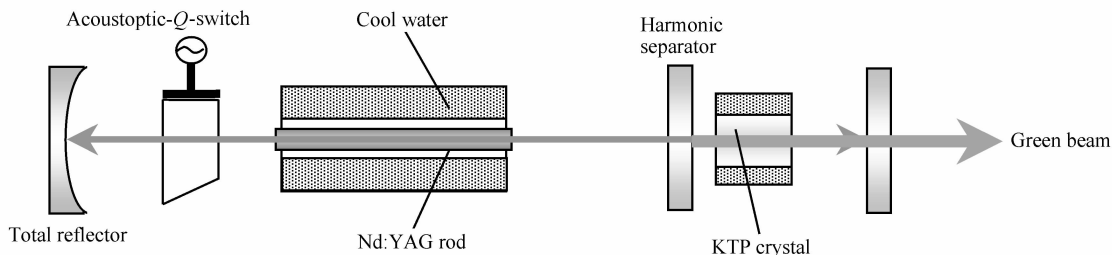


Fig. 1 The experimental setup

在实验中我们采用美国 CEO 公司生产的半导体激光器组件,它由 80 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 1600 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 ($\phi = 23.6^\circ$, $\theta = 90^\circ$),其尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,两面镀 1064 nm 和 532 nm 的增透膜;考虑到高功率下激光介质 Nd:YAG 棒的热致双折射和倍频晶体的热透镜等热效应因素,通过计算机数值分析,激光谐振腔采用平-凹结构,合理选择倍频晶体和 Nd:YAG 棒在谐振腔中的位置,实现在 Nd:YAG 棒中热致双折射导致的径向偏振振荡光和切向偏振振荡光共同处在一个稳区内,从而实现激光输出的稳定;另外,由于倍频晶体的热透镜效应的存在,对谐振腔内的基波模式分布有很大的影响,通过调整倍频晶体在谐振腔中的位置,获得适当大小的热透镜焦距可以有效的补偿 Nd:YAG 棒的热透镜效应。腔长为 530 mm, KTP 晶体距离输出镜 113 mm,平凹全反镜的曲率半径为 2 m;谐波反射镜采用镀 1064 nm 高透和 532 nm 高反膜层的石英镜片;采用 Gooch &

Housego 公司生产的 Q 开关器件,其中心频率为 27.12 MHz,驱动功率为 100 W,调制频率为 1~100 kHz 可调;利用美国 Molectron 公司生产的功率计,测量在抽运电流为 18.3 A 时,532 nm 最大输出功率为 104 W,脉冲宽度小于 130 ns,重复频率为 20.7 kHz。

3 结果与讨论

倍频晶体的相位配角度通常是是根据室温条件下计算出来的,但是在内腔倍频谐振腔中基波功率密度比较集中,一部分基波功率被倍频晶体吸收在内部产生热量沉积,从而导致倍频晶体的温升、相位匹配角的漂移,而且倍频晶体的平均温度随着抽运功率的变化而变化,所以很难确定晶体相位匹配角具体数值,实验中需要对其进行调整。根据文献[9]的提供的计算公式,我们计算出相位匹配角随温度的变化曲线,如图 2 所示。其中有效非线性系数主极大的方向仍然位于 X-Y 面上,而 ϕ 角随温度的升高而接近线性变化。变化率大致为每升高 100 °C,角度增加 1.2°。图中给出的数值是相对于 27 °C 时的

温度变化相对值。

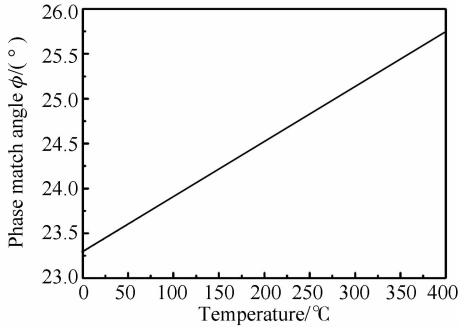


Fig. 2 The curve of phase matched angles ϕ versus temperature of KTP crystal

在实验中将 KTP 倍频晶体放置在一个低温冷却器中,使 KTP 的边界处于低温状态,这样既可以减少晶体的热透镜效应,又可以增大晶体的热传导系数,加快热传递,减少晶体内部的热沉积,在一定程度上补偿晶体的相位失配。图 3 是在 KTP 晶体不同冷却温度下绿光输出功率随抽运功率变化曲线。从图中可以看出,在一定的抽运电流下,随着 KTP 晶体的边界冷却温度的降低,绿光输出功率增大。当冷却温度为 15 °C 时,随着抽运功率的增大,绿光输出功率在升高,但当增大到 16 A 时,输出功率开始下降,这是因为此时晶体内部的温度开始升高,倍频晶体的相位开始失配,导致倍频效率的降低。

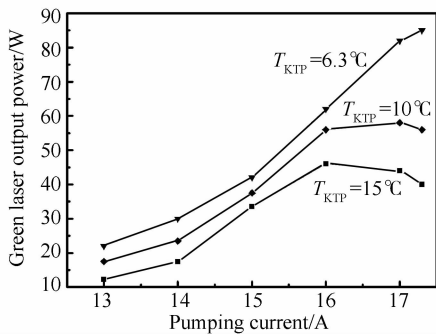


Fig. 3 The curve of output power versus pumping current under different cooling temperature of the KTP crystal

图 4 是在不同抽运电流的情况下,绿光的输出功率和脉冲宽度随抽运电流的变化曲线。当抽运电流为 18.3 A,调制频率为 20.7 kHz 时,绿光最大输出平均功率为 104 W,脉冲宽度为 130 ns,此时 KTP 晶体的冷却温度为 4.3 °C。从图中也可以看出,脉冲宽度随抽运功率的增加而增大,这是因为随着抽运功率的增加,谐振腔中的基波功率密度增强,光束半径也随之增大,声光 Q 开关中声光场渡越光束的时间增长,导致少量基波在谐振腔处于高损耗

状态下仍能谐振,从而展宽了脉冲宽度。

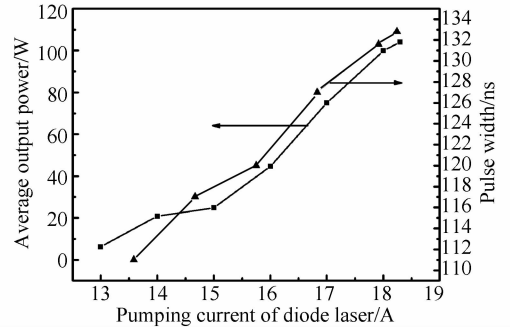


Fig. 4 532 nm output power at different pumping current of diode laser

图 5 是用美国 Spiricon 公司生产的 LBA-300PC 光斑测试仪测量的最大允许抽运电流时 532 nm 输出光束的空间强度分布,从图中可以看出,绿光输出光束为近高斯光束。

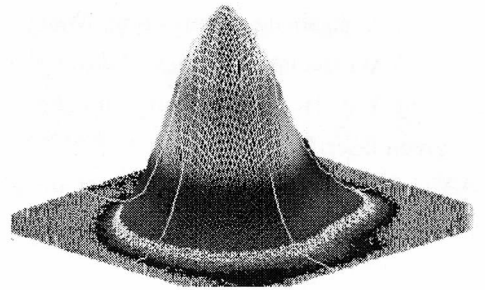


Fig. 5 Intensity distribution of 532 nm laser beam at maximum input current

结论 实验表明,在高功率内腔倍频激光器中,针对倍频晶体热效应,采取的 KTP 倍频晶体低温冷却等优化措施对于提高绿光输出功率是非常有效的。我们课题组正在进行对倍频晶体热效应的进一步研究,相信随着研究的进行,会实现更高功率的绿光输出。

参 考 文 献

- 1 Le Garrec B J, Raze G J, Thro P Y *et al.*. High-average-power diode-array-pumped frequency-doubled YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1990~1992
- 2 Susumu Konno, Shuichi Fujikawa, Koji Yasui *et al.*. Highly efficient 68-W green beam generation by use of an intracavity frequency-doubled diode side-pumped Q-switched Nd:YAG rod laser. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6401~6404
- 3 Sojima T, Fujikawa S, Yasui K. 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. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(3):377~380
- 4 Moon Hee-Jong, Yi Jonghoon, Rhee Yongjoo *et al.*. Efficient intracavity frequency doubling from diffusive

- reflector type diode side pumped Nd:YAG laser using a KTP crystal. *Lasers and Electro-Optics*, 1999. CLEO/Pacific Rim '99. The Pacific Rim Conference, Seoul, south Korea. 30 August~3 September 1999. 461~462
- 5 Susumu Konno, Tonno Kojima, Shuichi Fujikawa *et al.*. Highly-brightness 138-W green laser based on an intracavity frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):105~107
- 6 Yao Jianquan, Yu Yizhong, Chen Jin *et al.*. Thermal effect in KTP crystal during high power laser operation. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(10):1356~1359
- 7 Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun *et al.*. 68 W

- green-beam operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(Suppl.): 102~104 (in Chinese)
- 8 Feng Yan, Bi Yong, Zhang Hongbo *et al.*. 20 W diode pumped external frequency-doubled Nd:YAG green laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4):469~471 (in Chinese)
- 9 Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Tunable Laser Technology* (非线性光学频率变换及可调谐激光技术). Beijing: Science Press, 1995. 59~62 (in Chinese)

征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开, 1541页, 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部
2004 年 4 月