

文章编号: 0258-7025(2009)01-0015-04

63 W 灯抽运声光调 Q 腔内 KTP 倍频 Nd : YAG 激光器

刘学胜¹ 夏皎贞² 鄢 歆¹ 王智勇¹

(¹ 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124; ² 浙江树人大学基础科学部, 浙江 杭州 310015)

摘要 报道了输出 532 nm 平均功率为 63 W 的灯抽运声光(A-O)调 Q 腔内 KTP 倍频 Nd : YAG 固体激光器。分析双灯抽运金属镀金腔结构、抽运均匀性以及 KTP 倍频晶体的冷却均匀性及可靠性,并设计一种可靠性高的倍频晶体冷却装置。激光谐振腔采用 L 型腔结构,通过对声光调制器频率和倍频晶体温度对输出倍频激光功率影响的实验研究,得到激光器工作的最佳几何腔长为 549 mm。在抽运功率为 4.9 kW,声光调制频率为 4 kHz 时,532 nm 倍频激光最大输出 44 W,脉宽为 80 ns;声光调制频率为 10 kHz 时,532 nm 倍频激光最大输出为 63 W,脉宽为 140 ns,倍频效率为 64%,总电-光效率为 1.2%,光束质量为 $M^2 = 11.1$ 。

关键词 激光技术;固体激光器;L 型腔;腔内倍频;平均功率;光束质量

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093601.0015

63W Green Laser Based on an Intracavity-Frequency-Doubled Lamp-Pumped Acousto-Optic Q-Switched Nd : YAG Laser

Liu Xuesheng¹ Xia Jiaozhen² Yan Xing¹ Wang Zhiyong¹

(¹College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
(²Physics Department, Zhejiang Shuren University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract 532 nm green laser with an average power of 63 W based on an intracavity-frequency-doubled lamp-pumped acousto-optic(A-O) Q-switched Nd : YAG laser is reported. The structure of dual-lamp-pumped gold-plated metal cavity, pumping uniformity and the cooling uniformity and reliability of KTP frequency-doubled crystal are analyzed and a highly reliable set for cooling frequency-doubled crystal is developed. The optimum geometric cavity length of 549 mm is got through studying the influence of the frequency of A-O modulator and the temperature of frequency-doubled crystal on the output power of frequency-doubled laser with L-shaped cavity. When the pumping power is 4.9 kW and A-O modulating frequency is 4 kHz, the 532nm output power is 44 W with the pulse width of 80 ns; When the A-O modulating frequency is 10 kHz, the 532 nm output power is 63 W with the pulse width of 140 ns, frequency-doubled efficiency is 64%, total electrical-optics efficiency is 1.2% and beam quality is $M^2 = 11.1$.

Key words laser technique; solid-state laser; L-shaped cavity; intracavity-frequency-doubling; average power; beam quality

1 引言

在工业加工中通常用的固体激光器大多为输出 1 本 μm 左右的近红外波长,而很多金属和非金属对这种波长的反射率较高,例如铜和金等金属材料,

其反射率高达 98%,而铜对 0.532 μm 波长的吸收系数大于 30%^[1],所以绿光激光器非常适合材料加工和半导体工业加工。另外它还广泛用于可调谐激光器的抽运源、流场显示、全息照相、非线性光学、海

收稿日期:2008-05-06;收到修改稿日期:2008-05-19

作者简介:刘学胜(1980-),男,博士研究生,主要从事大功率固体激光器的研究。

E-mail: xueshengl@emails.bjut.edu.cn

导师简介:王智勇(1970-),男,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体及固体激光器的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn

洋探测、污染检测、受控热核聚变的驱动器、铀同位素分离的抽运源,以及用于军事上的光电对抗、激光雷达、激光制导等。

国外灯抽运 KTP 绿光激光器的研究早在 1984 年美国纽约的总电子研究核发展中心的 Yung S. Liu 等^[2]采用在直腔中加一双色镜,在声光(A-O)调制器工作频率为 5 kHz 时,获得了耦合输出 5.6 W;1987 年美国加利福尼亚的 P. E. Perkins 等^[3]采用在 L 腔内加一聚焦镜,在灯抽运功率为 3.8 kW,声光调制器工作频率为 4 kHz 时,获得了最大输出 22 W。国内灯抽运 KTP 倍频研究主要是天津大学姚建铨院士等,1986 年报道了 8.9 W^[4]绿光,2002 年报道了直腔 KTP 倍频 20 W^[5]绿光,2000 年华东船舶工业学院张冰等也是采用直腔 KTP 腔内倍频获得 8 W^[6]绿光。国内外一直没有大于 50 W 的灯抽运倍频 Nd:YAG 固体激光器的报道。国内外大于 50 W 的半导体抽运固体倍频输出的固体激光器也屈指可数,典型的是 2000 年 Susumu Konno 等的^[7]双棒 L 腔单端输出 138 W 绿光;2004 年天津大学直腔输出 97 W^[8]绿光;2005 年电子部 11 所姜东升等^[9]采用 Z 型腔在 10 kHz 时输出 120 W 绿光,脉宽为 95 ns;2005 年中国工程物理研究院电子所的姚震宇等^[10]采用 L 腔在 10 kHz 时,获得 162 W 绿光,脉宽为 80 ns;2006 年北京理工大学的王暖让等^[11]采用 U 型腔在 10 kHz 时获得 138 W 绿光,脉宽为 49 ns。半导体激光抽运 YAG 倍频激光器的成本相对灯抽运激光器要高得多,高功率的灯抽运 YAG 倍频激光器研制也具有很大的价值。本文采用连续氪灯抽运方式,实现声光调 Q 腔内 KTP 倍频,在 10 kHz 时获得了最大平均功率达 63 W 的 532 nm 绿光输出。

2 KTP 倍频晶体冷却装置

基频波入射到 KTP 晶体上时,能量主要集中在晶体中心,导致中心温度远远高于边缘温度,当晶体内部温度差超过相位匹配的允许温度变化范围时,倍频效率降低。另外,晶体内部温度变化也会影响相位匹配角,当抽运功率增大时,晶体吸收会导致晶体内部温度升高,相位匹配角发生变化,当入射光方向与新相位匹配角差值大于相位允许角时,倍频效率也会显著下降。温度如何导致相位失配,倍频效率的降低以及腔内倍频激光产生的详细理论推导文献^[8,12~14]都有详细说明,这里就不再赘述。所以必须对倍频晶体采取有效、稳定的冷却。实验冷却

装置如图 1 所示。冷却装置采用导热率高的紫铜,1 放置被冷却的 8 mm×8 mm×10 mm 倍频晶体,2,4 分别为两路水的入水口,3,5 为对应的出水口,倍频晶体的四个侧面被一层薄铜箔包裹并被冷却装置压紧。该装置走水量大,受激光系统水路控制,温控精度在±0.5℃,保证了倍频晶体的稳定工作。

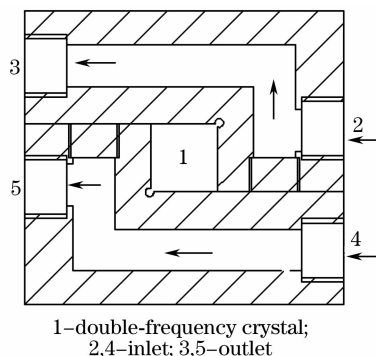


图 1 倍频晶体的冷却装置

Fig. 1 Cooling setup of double-frequency crystal

3 实验研究

实验中采用图 2(a)所示的抽运方式来获得高功率高稳定性的基频光。如图 2 所示,抽运灯和工作物质均套有滤紫外玻璃管,去离子水在抽运灯和工作物质与玻璃管间的环形空隙中快速流动,分别冷却激光晶体和抽运灯,抽运光通过直射和图 2(a)中镀金面 5 多次反射耦合到晶体棒中,其在双灯抽运功率为 5 kW 时产生的荧光分布如图 2(b)所示,经

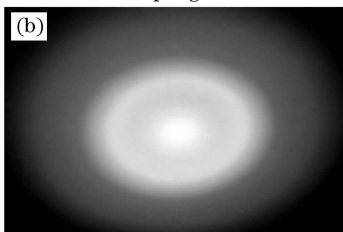
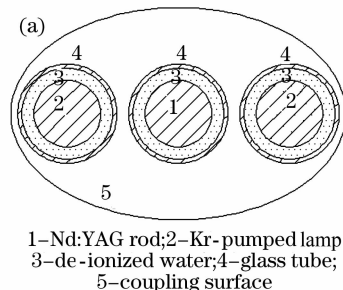


图 2 (a) 双灯抽运腔的侧视图;

(b) Nd:YAG 横截面内的荧光分布

Fig. 2 (a) Schematic edge view of the pump module;

(b) fluorescence profile integrated along the Nd:YAG rod axis

Nd:YAG 晶体吸收后,在其上形成一个较均匀的高斯分布,较均匀的增益,具有较好的空间模式匹配。

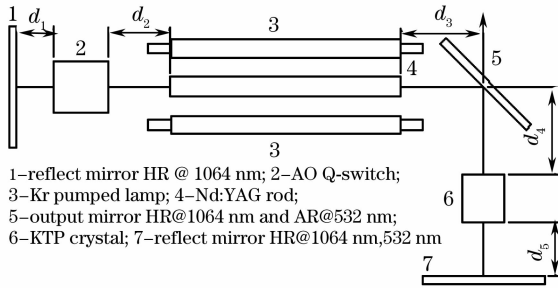


图 3 灯抽运 Nd:YAG 声光调 Q 腔内 KTP 倍频激光器的试验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the lamp-pumped Nd:YAG laser system

实验装置如图 3 所示。激光腔采用双灯连续激光电源抽运,连续电源的最大电流为 20 A,最高电压为 330 V。选择的优质激光晶体尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$,侧面打毛,两端面平行度 $\leq 10''$,光洁度: $10 \sim 5$,垂直度: $5'$,平面度: $\lambda/10$,且镀 1064 nm 的增透膜。抽运光耦合面为镀金反射面,其反射率 $> 97\%$ 。Q 开关器件是美国 NEOS 公司生产的,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。倍频晶体采用 II 类相位匹配角为 $\phi = 23.5^\circ$, $\theta = 90^\circ$ 的 KTP 晶体,晶体尺寸为: $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,两面镀 1064 nm 和 532 nm 的增透膜。谐振腔采用具有较大模体积、较好光束质量及能较好发挥声光调制能力的平行平面腔,为了提高倍频效率,实验采用三平面镜 L 型腔输出。谐振腔几何腔长为 549 mm。在大功率注入下,晶体由于吸收、量子亏损以及外界的强制冷却导致其折射率径向成抛物线变化,产生热透镜效应。实验中轴向移动声光调制器及 KTP 晶体,在相同注入功率下,输出的倍频光最大,即为最佳参数。通过实验最后选取 $d_1 = 10 \text{ mm}$, $d_2 = 150 \text{ mm}$, $d_3 = 100 \text{ mm}$, $d_4 = 100 \text{ mm}$, $d_5 = 9 \text{ mm}$ 。当抽运电流为 15.7 A,注入电功率为 4.9 kW 时,声光调制 10 kHz 输出 532 nm 绿光 63 W,脉冲宽度为 140 ns。由于声光调制器频率及倍频晶体温度会影响相位匹配角的变化,从而影响倍频效率,最终导致 532 nm 的输出功率变化,如图 4~6 所示。图 4 是 532 nm 倍频激光的输出平均功率在声光调 Q 重复频率分别为 4 kHz, 5 kHz, 7 kHz, 10 kHz 时,随抽运灯注入电流的变化曲线。图 5 是电流为 15 A 时,输出倍频激光脉宽随重复频率(4~15 kHz)的变化情况。图 6 是重复频率为 10 kHz,冷却水温度控制在 $23 \pm 0.5^\circ \text{C}$

时,倍频晶体在不同冷却装置中的 532 nm 输出功率曲线。由图可见随着注入电流的增加,倍频激光的输出平均功率也随着提高,输出激光的脉宽随重复频率的增加而加宽,重复频率为 4 kHz 时,输出激光最小脉宽为 80 ns;但不同重复频率下,输出激光的最大平均功率也不同。当注入电流为 16 A,重复频率为 10 kHz 时,输出 532 nm 激光功率为 63 W,脉冲宽度为 140 ns;当注入电流为 15 A,重复频率为 4 kHz 时,输出 532 nm 激光功率为 44 W,脉冲宽度为 80 ns。图 1 中优化的冷却装置大大改善 KTP 倍频晶体的冷却均匀性及稳定性,从而使输出功率大幅度提高。图 6 中不同冷却装置中的冷却水温均为 $23 \pm 0.5^\circ \text{C}$ 。

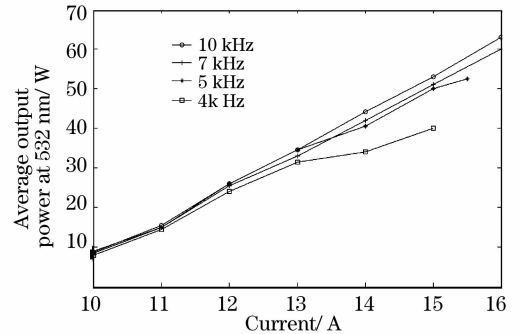


图 4 倍频输出平均功率随抽运灯注入电流和重复频率的变化曲线

Fig. 4 Average output power at 532 nm versus pumping-lamp drive current and A-O modulating frequency

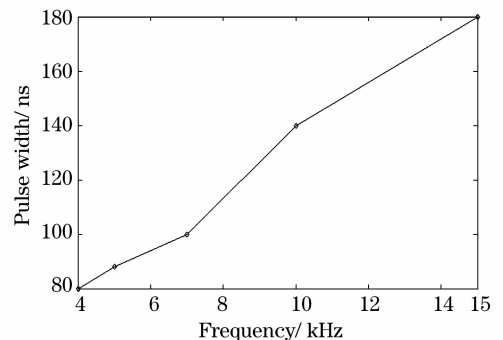


图 5 倍频输出激光脉宽随重复频率的变化曲线
Fig. 5 Pulse width at 532 nm versus the A-O modulating frequency

拆除倍频晶体,将 L 型腔改为直腔,且直腔和 L 腔光学长度相同,并选取最佳透过率,当抽运功率为 4.9 kW 时,输出 1064 nm 静态激光 120.8 W,当加上 10 kHz 声光调制器时,输出 1064 nm 动态激光为 98 W。若倍频激光的转换效率定义为 532 nm 倍频激光的输出平均功率除以相同注入电流和重复频

率下所能获得最大 1064 nm 基频激光的输出平均功率时,则倍频效率为 64%,总电-光效率为 1.2%。

当注入电流为 15.5 A,声光调制器工作频率为 10 kHz 时,输出 532 nm 倍频激光 58 W,在此状态下连续工作 8 h,测量其不稳定性小于 $\pm 1.06\%$ 。

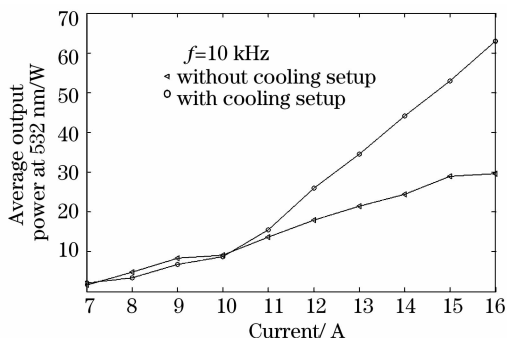


图 6 倍频晶体水冷装置对输出功率的影响

Fig. 6 Influence of double frequency crystal cooling structure on output power

采用相纸成像法测量多模 532 nm 激光光束质量。输出 532 nm 激光功率为 63 W,声光调制器频率为 10 kHz 时,测得近场光斑直径 $D_1 = 5$ mm,以及距离该位置 $L = 0.5$ m 处的光斑直径 $D_2 = 8$ mm,根据公式 $K_f = (D_2 - D_1) \times D_1 / 4L$ 计算出 $K_f = 1.9$ mm · mrad, $M^2 = 11.1$ 。

4 结 论

采用双灯抽运 L 型金属谐振腔,声光调制器以及 KTP 晶体实现平均功率达 63 W,重复频率为 10 kHz,脉宽为 140 ns, M^2 值为 11.1 的 532 nm 倍频激光输出,激光器的倍频转换效率为 64%,总电-光效率为 1.2%。改善灯抽运 Nd:YAG 固体激光的抽运均匀性以及抽运强度,比如采用双棒串接,在棒与棒之间加一 90° 旋光片,可获得更高功率及更高光束质量的倍频激光输出,该实验正在进一步研究中。

参 考 文 献

- 1 Cao Shansong. TEM₀₀ mode frequency-doubled green laser and its application[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(3):249
曹三松. TEM₀₀ 模连续倍频绿光激光器及应用[J]. 激光技术, 2007, **31**(3):249

- 2 Yung S. Liu, D. Dentz, R. Belt. High-average-power intracavity second-harmonic generation using KTiOPO₄ in an acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser oscillator at 5 kHz[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(3):76~78
- 3 P. E. Perkins, T. S. Fahlen. 20-W average-power KTP intracavity-doubled Nd:YAG laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1987, **4**(7):1066~1071
- 4 Yao Jianquan, Li Yu, Xue Bin *et al.*. Analysis of a quasi-cw pumped intracavity frequency doubling YAG laser and its thermal effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 1986, **6**(4):326~331
姚建铨,李昱,薛彬等.准连续泵浦 KTP 内腔倍频 YAG 激光及其热效应分析[J]. 光学学报,1986, **6**(4):326~331
- 5 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. The study on quasi-cw Nd:YAG intracavity frequency-doubled green lasers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(6):575~577
王涛,姚建铨,李喜福等.准连续 Nd:YAG 倍频大功率绿光激光器的研究[J]. 光电子·激光,2002, **13**(6):575~577
- 6 Zhang Bin, Liu Weiting, Xu Rongqing *et al.*. Research of intercavity frequency laser Nd:YAG[J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2000, **3**(3):52~54
张冰,刘维亭,徐荣青等.腔内倍频 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2000, **3**(3):52~54
- 7 Susumu Konno, Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa *et al.*. High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):105~107
- 8 Guo Li, Yao Jianquan, Yu Guojun *et al.*. Study on all-solid state green laser with hundred watt level[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1025~1028
郭丽,姚建铨,禹国俊等.百瓦级全固态绿光激光器的实验研究[J]. 光子学报,2004, **33**(9):1025~1028
- 9 Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun *et al.*. 120W diode-pumped green Nd:YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0):8~10
姜东升,赵鸿,王建军等.120W 的二级光泵浦 Nd:YAG 绿光激光器[J]. 强激光与粒子束,2005, **17**(S0):8~10
- 10 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 162W 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.162W 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
- 11 Wang Nuanrang, Wang Canzhaoh, Yuan Ligang *et al.*. 138W narrow pulse-width solid-state green laser operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1017~1020
王暖让,王灿召,苑利钢等.138W 窄脉宽全固态绿光激光器[J]. 中国激光,2006, **33**(8):1017~1020
- 12 W. Koechner. Solid State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 519~520
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社,2002,519~520
- 13 Xu Degang, Yao Jianquan, Chen Jin *et al.*. High-stabilization 85W all-solid-state green laser operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):385~389
徐德刚,姚建铨,陈进等.85W 高稳定全固态绿光激光器的研究[J]. 中国激光,2004, **31**(4):385~389
- 14 Richard G. Smith. Theory of intracavity optical second-harmonic generation[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, **QE-6**(4):215~223