

文章编号: 0258-7025(2004)04-0385-05

85 W 高稳定全固态绿光激光器的研究

徐德刚, 姚建铨, 陈 进, 张百钢, 于意仲, 温午麒, 郭 丽, 周 睿, 王 鹏

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072)

摘要 研究了平均功率达 85 W 高功率高稳定性全固态绿光激光器, 从理论上分析了全固态内腔倍频晶体热效应相位失配对输出功率的影响; 数值模拟了倍频晶体内部的热量分布, 计算了倍频晶体相位匹配角随温度变化的失配量。在实验中, 采用 80 个 20 W 的高功率半导体激光器侧面抽运单 Nd:YAG 棒, 采用双声光 Q 开关、高效平凹谐振腔结构, 对大尺寸 KTP 晶体进行角度偏离法补偿相位失配并配合强冷却等技术, 实现高功率内腔倍频激光器的稳定运转; 在抽运电流为 17.3 A 时, 实现了重复频率为 20.4 kHz, 脉冲宽度 230 ns, 输出功率为 85 W 的高功率、高重复频率绿光(532 nm)输出, 不稳定性为 $\pm 1.03\%$, 光-光转换效率为 9.7%。

关键词 激光技术; 全固态绿光激光器; 角度偏离补偿相位失配法; 双声光 Q 开关; KTP 倍频晶体

中图分类号 TN 248.1⁺3 **文献标识码** A

High-Stabilization 85 W All-Solid-State Green Laser Operation

XU De-gang, YAO Jian-quan, CHEN Jin, ZHANG Bai-gang,

YU Yi-zhong, WEN Wu-qi, GUO Li, ZHOU Rui, WANG Peng

(*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China*)
(*Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract This paper reported high power high stabilization 85 W all-solid-state green laser operation, which was pumped by 80×20 W high power laser arrays. The theoretical analysis of the influence of thermal effect and phase mismatching about frequency-doubling crystal on output was presented. The calorific power distribution is numerically simulated and the values of frequency-doubling crystal phase mismatching varying with the change of temperature were given. In experiment, double acousto-optic Q-switching were employed inside single Nd:YAG rod, high efficiency flat-concave intracavity-frequency-doubled resonance structure. A maximum green power of 85 W was generated at 20.4 kHz repetition rate and 230 ns pulse width when pumped current of laser diodes was 17.3 A with compensating phase mismatch by angle departing and strong cooling big KTP crystal, leading to $\pm 1.03\%$ instability and 9.7% of optical-optical conversion efficiency.

Key words laser technique; all-solid-state green laser; compensating phase mismatch by angle departing; double acousto-optic Q-switching; KTP frequency-doubled crystal

1 引 言

全固态绿光激光器由于具有效率高、激光输出光束质量好、运转可靠、体积小以及寿命长等优点, 使其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, 特别是受控热核聚变的驱动器、铀同位素分离的抽运源, 以及大功率大能量的激光加工及激光医疗设备、激光微加工、激光的军事应用(激光雷达、激光制导等)等科学和工业领域中得到了广泛的应用。为了满足上述应用, 全固态内

收稿日期: 2002-12-19; 收到修改稿日期: 2003-03-27

基金项目: 国家科技部“863 计划”项目(2002AA11190), 天津市光电子联合科学研究中心项目(013184011)和教育部南开大学、天津大学科技合作基金项目资助, 天津大学优秀博士学位论文基金项目资助。

作者简介: 徐德刚(1974—), 男, 山东省青岛市胶南人, 博士生, 主要从事全固态激光器及非线性频率变换技术的研究。
E-mail: xudegang@eyou.com

腔倍频激光器是获得高效高功率稳定绿光光源的重要途径之一。1996年法国的 B. J. Le Garrec 等采用 30 个连续二极管激光器侧面抽运单棒,在 Z 型腔中采用内腔 KTP 晶体倍频结构,双端输出 27 kHz, 106 W 的高功率绿光^[1];1998 年日本的 Susumu Konno 等采用双棒三镜折叠腔获得 20 kHz,平均功率 68 W 的绿光输出^[2];1999 年他们改为四镜 Z 型谐振腔获得光束质量较好的连续稳定的 27 W 绿光输出^[3];同年, Korea 的 Hee-Jong Moon 等采用激光二极管侧面抽运单棒三镜折叠腔实现 13 kHz,平均功率为 30 W 的绿光输出^[4];2000 年 Susumu Konno 等又改进谐振腔结构,采用双棒 L 型腔单端输出 136 W 的绿光输出^[5]。近年来,随着国产半导体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得到了极大的进展,电子部 11 所的姜东升等采用国产半导体激光器组件,利用三镜 L 型腔,实现平均功率 68 W 的绿光输出^[6];上述文献中大多采用散射紧耦合抽运、双棒补偿 Nd:YAG 棒热致双折射的谐振腔。

高功率激光器谐振腔内器件的热效应以及声光 Q 开关的关断性能一直是阻碍高功率高重复频率激光器功率提高的难点,尤其是全固态内腔倍频谐振腔内基波的功率密度高,虽然有利于提高倍频效率,但同时过高的功率密度会导致倍频晶体的热效应,引起倍频晶体的相位失配,降低倍频效率。针对倍频晶体的相位失配,文献[7]在绿光输出功率为 40 W 的情况下做了详细的分析;在此基础上,我们研究了高功率输出的情况下倍频晶体热效应以及声光 Q 开关对倍频效率的影响。

2 倍频晶体热效应的研究

双轴晶体在高功率下运转时,晶体内部激光光束细、功率密度高,晶体的热效应比较严重。

为了提高倍频效率,通常在内腔倍频 Nd:YAG 激光器中的倍频晶体沿轴向比较长,这样,对晶体内部的温度分布分析可以忽略轴向的温度变化。假设倍频晶体是端面边长为 a 的正方形,长度为 l ,通过晶体的激光光束为高斯光束,其束腰半径为 r_0 ,功率为 P ,晶体的吸收系数为 α ,基波光束通过晶体后,晶体的吸收功率 P_a 为

$$P_a = l\alpha P \quad (1)$$

而通过晶体的光功率为

$$P = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu_0}} \int |E(x, y, 0)|^2 dx dy =$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu_0}} E_0^2 \frac{\pi r_0^2}{2} = S_0 \frac{\pi r_0^2}{2} \quad (2)$$

ϵ 为倍频晶体的介电常数, μ_0 为真空中的磁导率, S_0 为高斯光束中心处的功率密度

$$S_0 = \frac{2P}{\pi r_0^2} \quad (3)$$

高斯光束其余各点的功率密度为

$$S = S_0 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] \quad (4)$$

导热方程中的热容量 Q 可表示为

$$Q = \frac{2P_a}{\pi r_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] = \frac{2Pal}{\pi r_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] \quad (5)$$

实验中采用长度为 8 mm 的 KTP 晶体,其吸收系数 α 为 0.8%/cm,则根据(5)式可以得到在基波功率为 200 W 时 KTP 晶体内部热量沉积分布曲线,如图 1 所示。从图中可以看出晶体中心的热量沉积最大,而边缘的热量沉积很少,这样导致晶体的中心和边缘的温度梯度很大,并且随着基波功率密度增加而变大。而倍频 KTP 双轴晶体是按常温下计算的最佳匹配角切割的 ($\phi = 23.6^\circ, \theta = 90^\circ$),晶体中温升会改变光波在晶体中的主折射率,从而造成晶体相位匹配角的改变,导致晶体中三波相互作用产生相位失配,倍频效率降低。

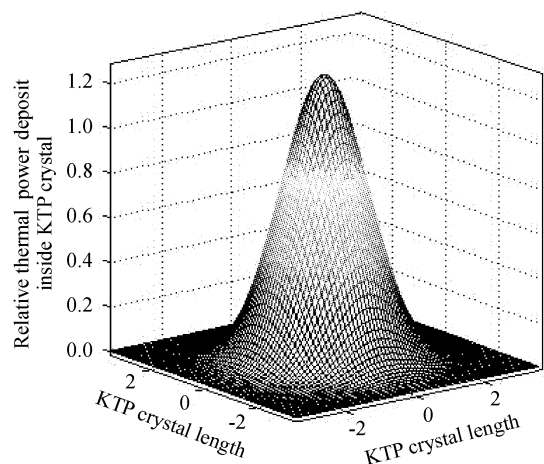


图 1 晶体内部的沉积热量分布图

Fig. 1 Distribution of the thermal power deposit inside KTP crystal

为了减少倍频晶体内部的热沉积,在实验中通常采用冷却晶体的方法,通过热传递将晶体内部的热量尽快传递到外表面的热沉上。根据晶体材料传热学原理可知,晶体的热传导系数 κ 具有随温度降

低而增大的特性,因此我们设计了倍频晶体的冷却系统,降低晶体的温度,增大晶体的热传导系数,减少热量在晶体内部的沉积,从而改善晶体的热效应对相位匹配角失配的影响。

倍频晶体的相位匹配角度通常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[8]提供的计算公式,计算出相位匹配角随温度变化的曲线如图 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。

实验通过一套冷却装置来大幅度地降低KTP

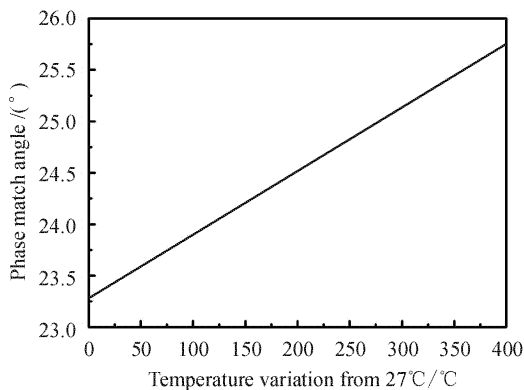


图 2 晶体相位匹配角随温度的变化曲线

Fig. 2 Curve of phase matched angles vs temperature of the crystal

晶体表面温度,增大了热传导系数 κ ,有利于晶体内部沉积热量的提取,减少 KTP 晶体内部与边缘的温度梯度。尽管采取冷却措施,但降低 KTP 晶体温度的范围是有限的,温度过低会导致晶体的结露现象,增大损耗,失去实用性,所以倍频晶体的平均温度还是高于常温。为了补偿倍频晶体温度升高带来的相位失配,适当调整晶体在谐振腔内的角度,使基波斜入射到倍频晶体内,致使倍频晶体内部三个光波波矢之间的角度发生变化,在一定程度上补偿了相位的失配问题。强冷却倍频晶体以及调整晶体在谐振腔内的角度两种措施共同作用,在很大程度上减少了倍频晶体的相位失配,实现在高功率下提高倍频效率输出。

3 实验研究

实验装置如图 3 所示,其中 Nd:YAG 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,结构示意图如图 4。

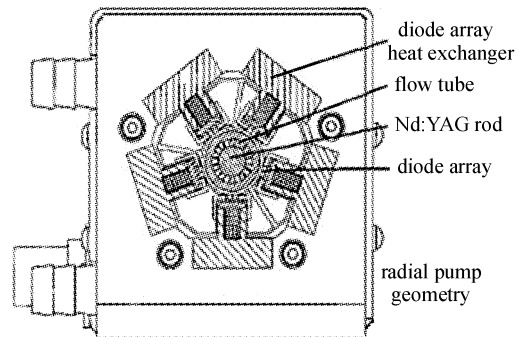


图 3 抽运组件剖面图

Fig. 3 Cross section of pumping module

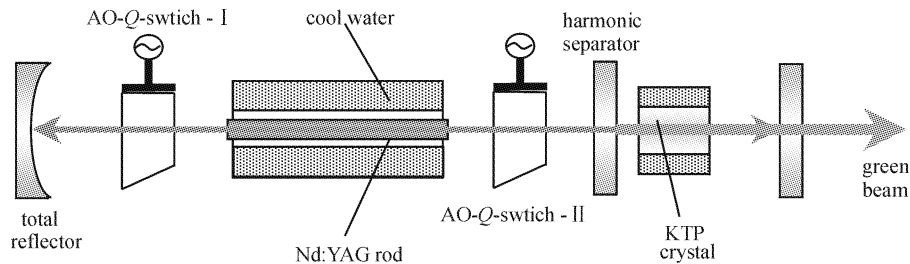


图 4 高功率内腔倍频谐振腔结构示意图

Fig. 4 Resonator structure of high power intracavity-frequency-doubled laser

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 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,两面镀

1064 nm 和 532 nm 的增透膜;激光谐振腔采用直通式平-凹稳定腔,腔长为 530 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;两套声光器件参数为:驱动功率为 100 W,工作频率为 27 MHz,静态透过率为 98%(对 1064 nm),衍射效率为 20%,其调制频率为 1~50 kHz。

采用两套声光 Q 开关是为了实现在高功率激光运转下声光具有较高的关断能力,增大基波脉冲的峰值功率,减少倍频晶体的热效应,提高倍频效率;通过调整控制两套声光 Q 开关的外调制器(DG535 信号发生器)的脉冲同步时间和调制频率,可实现最大功率的调 Q 激光输出;将谐振腔中的声光调到关断状态,激光输出为零时的最大抽运电流为声光的最大关断抽运电流,在上述装置的实验中,分别采用单声光 Q 开关和双声光 Q 开关,得到最大关断抽运电流分别为 14.6 A 和 16.3 A;图 5 是在重复频率为 15 kHz, KTP 倍频晶体冷却温度为 6.3℃ 情况下,分别采用双声光 Q 开关和单声光 Q 开关时倍频激光输出功率随抽运电流变化的曲线,从图中可以看出,在低抽运功率下,倍频激光的输出功率基本相同,说明在低抽运功率下在谐振腔中无论采用单 Q 开关还是采用双 Q 开关都具有良好的关断能力,而且双声光 Q 开关的损耗几乎和单声光相同;在高抽运功率下,明显看出采用双声光 Q 开关具有更好的关断能力,输出功率有所提高。

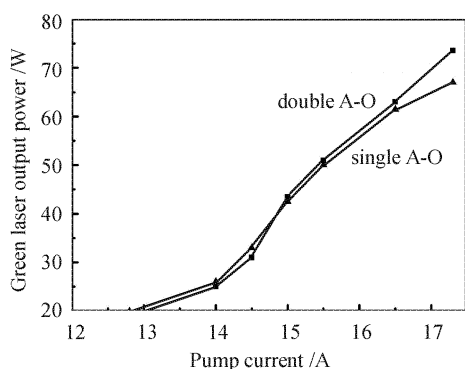


图 5 采用双调 Q 开关和单调 Q 开关时倍频激光输出功率随抽运电流变化的曲线

Fig. 5 Curve of output power vs pumping current when applying double A-O or single A-O

实验中,通过改变倍频晶体的冷却温度,来研究倍频晶体热效应对输出激光功率的影响。图 6 是倍频晶体在不同的冷却温度下,532 nm 倍频激光功率随半导体激光器组件注入电流变化的曲线。由图可

见,在同一抽运电流下,随着倍频晶体冷却温度的降低,倍频激光输出的功率在增长,实现最大输出的抽运电流也在提高,显然倍频晶体的冷却措施增大了晶体的热传导系数,提高晶体传热速度,减少了晶体吸收功率在内部的沉积,相位失配在一定程度上得到缓解;当继续增大抽运电流到 17.3 A 时,倍频激光输出功率迅速降低,将倍频晶体冷却到 6.3℃,同时调整倍频晶体在谐振腔内的角度(大约 0.8°),此时输出功率又上升,调整声光调制器的调制频率和脉冲同步时间,获得重复频率为 20.4 kHz,脉冲宽度 230 ns,平均功率为 85 W 的高功率、高重复频率绿光(532 nm)输出。在此状态中,调整 KTP 晶体在谐振腔内与激光介质 Nd:YAG 棒的位置,发现倍频激光的输出功率在变化,当将倍频晶体放置在距离 Nd:YAG 棒 115 mm 时,激光的输出功率最大。由此可以看出,虽然倍频晶体被强冷却,但倍频晶体内部还残留吸收功率的热量沉积,会导致热透镜效应。由于倍频晶体相对 Nd:YAG 棒比较短,可以将其近似认为是薄透镜,而 Nd:YAG 棒近似为类透镜,移动倍频晶体相当于移动两个透镜之间的距离,使谐振腔形成一个望远镜稳定腔,从而实现激光的稳定运转。为了实现高功率激光器高稳定运转,将激光器内的器件调整在最佳状态(如倍频晶体冷却为 6.3℃,并调整其在谐振腔内的角度为 0.8°等),使激光器处于一种动态平衡状态,并在输出功率为 80 W 时连续运转 5 h,每 10 min 记录一次,将输出功率结果取均方值,计算出不稳定性为 1.03%。

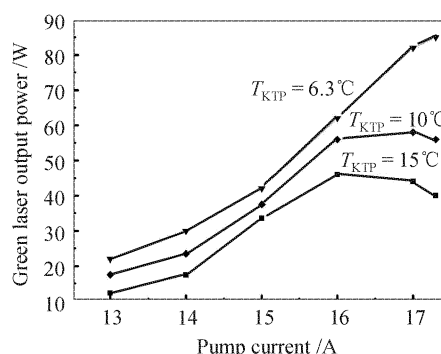


图 6 KTP 晶体在不同冷却温度下,倍频激光输出功率与抽运电流的关系曲线

Fig. 6 Curve of output power vs pumping current under different temperature of the KTP crystal

4 结 论

研究了全固态内腔倍频谐振腔中倍频晶体热效

应以及声光 Q 开关对输出功率的影响,采用了双声光 Q 开关,高效平凹谐振腔结构,对大尺寸 KTP 晶体进行角度偏离法补偿相位失配并配合强冷却等技术,实现高功率内腔倍频激光器的稳定运转。在抽运电流为 17.3 A 时,实现了重复频率为 20.4 kHz,脉冲宽度 230 ns,输出功率为 85 W 的高功率、高重复频率绿光(532 nm)输出,不稳定性为 1.03%,光-光转换效率为 9.7%。若进一步改善谐振腔结构并进行热敏双折补偿将对倍频输出功率的提高具有重要作用,这方面的研究工作正在进行中。

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 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
- 3 T. Kojima, S. Fujikawa, K. 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
- 4 Hee-Jong Moon, Jonghoon Yi, Yongjoo Rhee *et al.*. Efficient intracavity frequency doubling from a diffusive reflector type diode side-pumped Nd:YAG laser using a KTP crystal [C]. *Lasers and Electro-Optics*, 1999. CLEO/Pacific Rim '99. The Pacific Rim Conference on, 1999, **2**:461~462
- 5 Susumu Konno, Tonno Kojima, Shuichi Fujikawa. Highly-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
- 6 Jiang Dong-sheng, Zhao Hong, Wang Jian-jun *et al.*. 68 W green-beam operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):102~104
姜东升,赵 鸿,王建军等. 平均功率达 68 W 的 LD 抽运倍频 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):102~104
- 7 Yao Jian-quan, Yu Yi-zhong, Chen Jin *et al.*. Thermal effect in KTP crystal during high power laser operation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(10):1356~1359
- 8 Yao Jianquan Edited. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Tunable Laser Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995. 59~62
姚建铨 编著. *非线性光学频率变换和激光调谐技术*[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 59~62

华中科技大学激光技术与工程研究院研究生招生启事

华中科技大学激光技术与工程研究院是我国“六·五”至“九·五”国家重点科技攻关计划“激光技术”项目的主要牵头单位之一。1986 年和 1995 年国家计委先后批准在华中科技大学建设了从事应用基础研究的“激光技术国家重点实验室”和从事产品研究开发的“激光加工国家工程研究中心”。经过 30 多年的艰苦奋斗,激光研究院现拥有物理电子学与光学工程硕士点、博士点、博士后流动站、国家级重点学科,已成为我国高功率激光器、激光加工系统和工艺、激光医疗设备的主要研究开发基地和高层次人才培养基地。

为了适应现代经济建设和社会发展对高层次人才的需要,加速培养一批国家急需的从事物理电子学与光电子学领域工作的高层次工程技术和工程管理人才,华中科技大学激光技术与工程研究院正在积极开展电子与信息工程领域的各类研究生的培养工作,包括:在职人员攻读工程硕士学位、高等学校教师在职攻读硕士学位、同等学力人员攻读硕士学位、在职博士、全日制硕士和博士研究生。热烈欢迎相关单位集体报名办班和个人报名深造。欢迎垂询和报名,招生简章备索。

联系人:许德胜(副教授,院长助理)

地 址:湖北武汉市珞瑜路 1037 号;邮政编码:430074

电 话:027-87541782(兼传真);E-mail:xuds@hust.edu.cn

网 站:http://laser.hust.edu.cn