

文章编号: 0258-7025(2006)08-1017-04

# 138 W 窄脉宽全固态绿光激光器

王暖让<sup>1,3</sup>, 王灿召<sup>1</sup>, 苑利钢<sup>2</sup>, 姜东升<sup>2</sup>, 杨苏辉<sup>1</sup>, 赵长明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学光电工程系, 北京 100081  
<sup>2</sup> 华北光电技术研究所, 北京 100015; <sup>3</sup> 航天二院 203 所, 北京 100854)

**摘要** 报道了绿光平均功率达 138 W 的声光调 Q 内腔倍频全固态 Nd:YAG 绿光激光器。为了提高绿光激光器的输出功率以及压窄脉宽,通过倍频晶体相位匹配角随温度变化的分析以及腔型的研究,设计并优化了 U 型谐振腔。实验中采用两个聚光腔,每个聚光腔由 35 个 20 W 的高功率激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 棒,利用 II 类相位匹配 KTP 晶体腔内倍频,实现了高平均功率内腔倍频激光器的稳定运转。在两个聚光腔的激光二极管抽运电流分别为 18.5 A, 20.5 A 时,获得了重复频率为 10 kHz,脉冲宽度优于 49 ns,输出功率为 138 W 的高功率、高重复频率、窄脉宽绿光(532 nm)输出,光-光转换效率为 14.1%,不稳定性为  $\pm 2.8\%$ 。

**关键词** 激光技术; Nd:YAG 激光器; U 型谐振腔; 532 nm 绿光; 内腔倍频; 窄脉宽

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## 138 W Narrow Pulse-Width Solid-State Green Laser Operation

WANG Nuan-rang<sup>1,3</sup>, WANG Can-zhao<sup>1</sup>, YUAN Li-gang<sup>2</sup>,  
JIANG Dong-sheng<sup>2</sup>, YANG Su-hui<sup>1</sup>, ZHAO Chang-ming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China  
<sup>2</sup> North China Research Institute of Opto-Electronic, Beijing 100015, China  
<sup>3</sup> No. 203 Research Institute of the 2nd Academy of China Aerospace Science & Industry Corporation, Beijing 100854, China

**Abstract** An average power of 138 W green beam operation by intracavity frequency doubling of acousto-optic Q-switch solid-state Nd:YAG laser is reported. An U type resonator is designed and optimized in order to compress pulse-width and increase the average power. Two Nd:YAG rods were employed and a type II phase matched KTP crystal ( $\phi = 25^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  under the condition of 24 °C, the size is 7 mm×7 mm×7 mm) was applied for frequency doubling. Under the pumping currents of 18.5 A and 20.5 A, a maximum green power of 138 W was generated at 10 kHz repetition rate and 49 ns pulse-width, leading to 14.1% of optical-optical conversion efficiency and  $\pm 2.8\%$  instability.

**Key words** laser technique; Nd:YAG laser; U type cavity; green beam at 532 nm; intracavity frequency doubling; narrow pulse-width

## 1 引 言

全固态高重复频率、高平均功率、窄脉宽绿光激光器具有体积小、质量轻、结构紧凑、寿命长等优点,在分离同位素及军事方面都有广泛应用。近年来随

着国内半导体激光器的迅速发展,全固态绿光激光器的研究也有了很大进展<sup>[1~4]</sup>。在激光同位素分离、光电对抗等应用中,要求在保持高平均功率的同时,进一步压窄脉宽。本实验就是为了进一步提高

收稿日期:2006-01-10;收到修改稿日期:2006-02-14

基金项目:国防科技重点实验室基金(514380603BQ0102)资助项目。

作者简介:王暖让(1980—),男,山东青岛胶南人,北京理工大学硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail:lorious@bit.edu.cn

导师简介:赵长明(1960—),男,天津人,北京理工大学信息科学学院教授,博士生导师,目前主要从事新型激光器件与技术、光电子信息技术与系统方面的研究。E-mail:zhaochangming@bit.edu.cn

功率、压窄脉宽而进行的。

### 2 倍频晶体 KTP 及其水冷设计

倍频晶体选择了常用的 KTP 晶体,其参数设计的原则是:匹配角的选择要符合晶体的工作温度;晶体的横向尺寸要尽量接近光斑大小,以减小温度梯度;晶体纵向长度的选取要根据内腔倍频模型的要求,使倍频效率接近最佳耦合透过率。专门设计了 KTP 水冷,结构如图 1 所示。

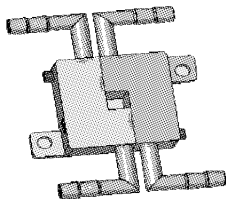


图 1 KTP 水冷结构

Fig. 1 Cooling structure of KTP crystal

将晶体侧面用铝箔包裹,压紧放置在图 1KTP 水冷装置中间,装置中间有循环冷却水路。由于水的流速很快,且材料为导热很好的无氧铜,可认为晶体的侧面边界条件是恒温的。同时由于晶体很小,端面的边界条件可以认为是绝热的。晶体的热源来自于对激光束的吸收,激光束的脉冲宽度一般为百纳秒,重复频率为 10 kHz,这相对热平衡的时间都是很小的。所以,可以将激光束的加热作用视为晶体内在的热源。由于激光束是高斯分布的,所以等效的内在热源的发热率空间分布也应符合高斯型分布。具体表示为

$$\rho(r) = (4P/\pi d) \times \exp(-4r^2/d^2),$$

$\rho(r)$  为功率沿晶体径向  $r$  的分布, $P$  为晶体吸收的功率, $d$  为光束直径。选用对 1064 nm 和 532 nm 的吸收系数分别为  $0.006 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.04 \text{ cm}^{-1}$ ,热导率为  $0.13 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$  的 KTP 晶体。对于  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  的晶体,在  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  的室温下,经过倍频模型中的计算可以得到 KTP 的 II 类匹配角为  $\theta = 90^\circ, \phi = 23.27^\circ$ 。显然当温度远离室温时,匹配角度不再是  $23.27^\circ$ ,按此角度切割的 KTP 也不能很好地实现相位匹配。应按照 KTP 晶体的热光系数方程进行修正。KTP 晶体的热光系数方程为

$$\begin{aligned} dn_x/dt &= (0.1323\lambda^{-3} - 0.4385\lambda^{-2} + \\ & 1.2307\lambda^{-1} + 0.7709) \times 10^{-5}, \\ dn_y/dt &= (0.5014\lambda^{-3} - 2.0030\lambda^{-2} + \\ & 3.3016\lambda^{-1} + 0.7498) \times 10^{-5}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dn_z/dt &= (0.3896\lambda^{-3} - 1.3332\lambda^{-2} + \\ & 2.2762\lambda^{-1} + 2.1151) \times 10^{-5}, \end{aligned}$$

按以上数据对主轴折射率进行修正,并通过计算机编程计算,得到了 KTP 晶体 II 类相位匹配时的匹配角  $\phi$  与晶体温度  $t$  的关系如图 2 所示<sup>[5]</sup>。

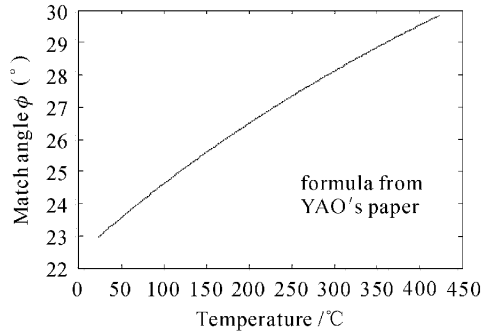


图 2 匹配角  $\phi$  与晶体温度  $t$  的关系

Fig. 2 Curve of KTP harmonic 2 class match angle versus temperature

可以看出温度每提高  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\phi$  角增加约  $1.2^\circ$ 。所以采用切割角度为  $25^\circ$  的晶体。根据以上因素, KTP 晶体设计参数应为  $\phi = 25^\circ, 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的结构,但是由于 KTP 商品的规格限制,实验采用了  $\phi = 25^\circ, 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  的结构。

### 3 U 型腔的设计

谐振腔腔型的不同设计,有着各自的特点。传统直腔的倍频激光器易于调整,比较稳定且非常紧凑,有利于形成整机,适合产品化,但是光束质量比较低并不易于实现大功率输出;三镜折叠腔的优点是把基频光和倍频光分开,减少了激光晶体对倍频光的吸收,即基频光两次通过倍频晶体再输出,使倍频效率有所提高,但是其光束质量也比较差;在此基础上设计了 U 型腔,把倍频晶体放在腔的中间,更大幅度地提高倍频效率。

图 3 所示的谐振腔为 U 型腔的等价腔型,U 型腔是一种对称的腔型。 $M_1, M_2$  为腔镜,其曲率半径

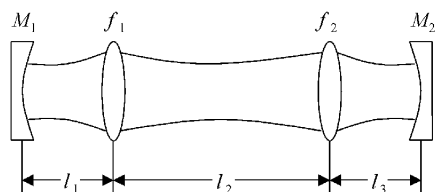


图 3 U 型腔等价腔型

Fig. 3 Equivalent resonator of U type

皆为  $R$ , 每个后镜到 Nd:YAG 棒中心的距离(用  $l_1$  表示)是相等的, 由于 Nd:YAG 棒尺寸比较小, 可以等效为一个焦距为  $f$  的透镜来处理, 通过实验测得两个聚光腔(1#, 2#)激光二极管(LD)的抽运电流分别为 18.5 A, 20.5 A 时, 其热透镜焦距  $f_1, f_2$  分别为 280 mm, 275 mm, 为了简化计算, 令  $f = f_1 = f_2$ . 两透镜之间的距离为  $l_2$ . 谐振腔内往返传播矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2/2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l_2}{2f} & l_1 + \frac{l_2}{2} - \frac{l_2 l_1}{2f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{l_1}{f} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d & b \\ c & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d & b \\ c & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

得

$$\begin{aligned} A &= d^2 a^2 + 6abcd - 12abd^2/R + b^2 c^2 - \\ &\quad 12cdb^2/R + 16d^2 b^2/R^2, \\ B &= 4db(da + bc) - 8d^2 b^2/R, \\ C &= -4(-2bd + bcR + Rad) \times \\ &\quad (ad + bc - acR)/R^2, \\ D &= 6abcd - 4abd^2/R - 4b^2 cd/R + b^2 c^2 + d^2 a^2. \end{aligned}$$

谐振腔的稳定性条件

$$|A + D| < 2. \quad (3)$$

在设计 U 型腔时尽量压缩激光器的腔长, 结构比较紧凑。选择  $R = 4 \text{ m}$ ,  $l_1 = 250 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 360 \text{ mm}$ , 代入式(1), (2), (3), 可以解得谐振腔处于稳态时, Nd:YAG 棒的热透镜焦距的取值范围为  $330 \text{ mm} < f < 415 \text{ mm}$ ; 通过测量不同电流下对应的热透镜曲率半径, 可以解得 1# 抽运电流范围为  $12.8 \text{ A} < I_1 < 17.1 \text{ A}$ ; 2# 抽运电流范围为  $14.1 \text{ A} < I_2 < 18.2 \text{ A}$ . 此电流下对应的抽运功率皆为  $334.5 \text{ W} < P < 436.8 \text{ W}$ ; 即在总抽运功率为  $669 \text{ W} < P_{\text{total}} < 873.6 \text{ W}$  时, 谐振腔处于稳态。与实验中最高总抽运功率为 990.4 W 比较接近。

腔镜  $M_1, M_2$  上的光斑半径为

$$\omega_{0i} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{2B}{\sqrt{4 - (A + D)^2}}, \quad (4)$$

其中  $\lambda$  为谐振腔介质中的光波长, 即  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ . 由于  $\omega_{0i} > 0$ , 即要求  $B > 0$ , 棒主平面上基模的光斑半径为

$$\omega_{0L} = \omega_{0i} \left[ 1 + \frac{(d_i - L_{oi})^2}{Z_{\text{Ri}}^2} \right], \quad (5)$$

其中  $d_i$  为棒的主平面到镜面的距离,  $L_{oi}$  为束腰到镜面的距离, 瑞利(Rayleigh)长度  $Z_{\text{Ri}} = \frac{n\pi\omega_{0i}^2}{\lambda_0}$ , 对于

Nd:YAG 晶体,  $n = 1.82$ ,  $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ . 模体积为

$$V = l_1 \pi \left( \frac{\omega_{0i} + \omega_{0L}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} l_2 \pi \left( \frac{\omega_{0i} + \omega_{0L}}{2} \right)^2, \quad (6)$$

把已知条件代入式(4), (5), (6), 可以解得抽运功率最大时的基模模体积

$$V = 0.835 \text{ mm}^3.$$

把倍频晶体 KTP 放在谐振腔的中间, 有利于增大倍频效率, 使输出激光功率达到最高; 适当选择抽运源驱动电流, 使两路输出基本一致, 有利于光路的合成。

## 4 实验与分析

实验装置如图 4 所示。

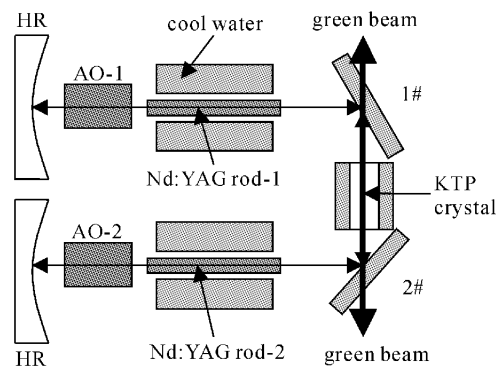


图 4 U 型腔实验装置图

Fig. 4 Resonator structure of U type

在实验中, 采用的是中国科学院半导体所生产的激光二极管, 其电-光转换效率为 40%, 每个聚光腔的抽运系统都由 35 个 20 W 的激光二极管组成, 按照五角形等间距侧面抽运 Nd:YAG 棒设计加工, 其抽运功率为 700 W, 结构如图 5 所示, Nd:YAG 棒的尺寸为  $\phi 4 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ , 侧面打毛, 两个端面分别镀有 532 nm 高反和 1064 nm 高透膜; 倍频晶体采用 II 类相位匹配 KTP 晶体 ( $24^\circ \text{C}$  时相位匹配角为  $\phi = 25^\circ, \theta = 90^\circ$ ), 尺寸为  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ , 两端通光面都镀有 532 nm 和 1064 nm 的增透膜; 后镜为凹镜, 其曲率半径为 4 m, 并且镀有 1064 nm 高反膜, 两个输出镜均为平镜, 镀有 1064 nm 高反, 532 nm 高透膜; 声光 Q 开关采用的是英国

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;激光腔采用 U 型腔结构,合理选择倍频晶体和 Nd:YAG 棒在腔内的位置,实现在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;由于 KTP 晶体也存在热透镜效应,适当选择 KTP 晶体在腔内的位置,可以补偿 Nd:YAG 棒的热透镜效应。

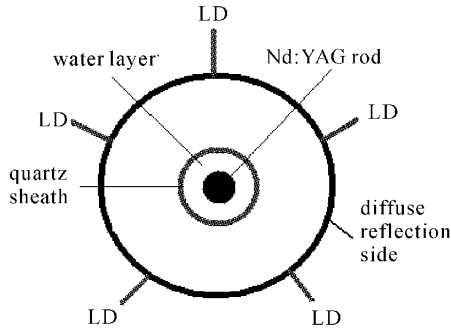


图 5 抽运组件剖面图

Fig. 5 Cross section of pumping module

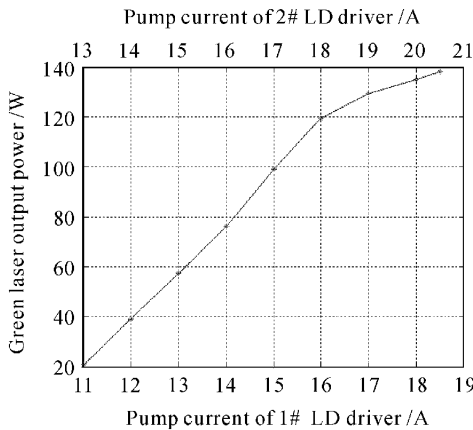


图 6 输出功率与抽运电流的关系示意图

Fig. 6 Curve of output power versus pump current

输出功率与抽运电流的关系如图 6 所示,可见两个聚光腔激光二极管抽运电流分别为 18.5 A, 20.5 A 时,最大输出功率为 138 W,实现了高平均功率输出。

图 7 是用示波器测量的绿光的脉冲宽度,可见此时的脉宽为 49 ns,实现了脉宽的压窄。

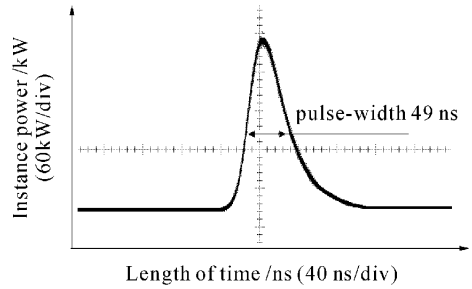


图 7 脉冲宽度示意图

Fig. 7 Curve of pulse-width

### 5 结 论

研究了全固态内腔倍频固体激光器倍频晶体冷却技术及 U 型腔的设计,在提高功率的基础上压窄脉宽,采用 U 型腔结构,实现了重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 49 ns,输出功率为 138 W 的高功率、高重复频率、窄脉宽绿光(532 nm)输出,进一步提高了其作为光源的应用范围。但是如果要进一步优化谐振腔结构并且采用四声光 Q 开关,可以进一步提高功率输出,这方面的研究正在继续。

### 参 考 文 献

- Jiang Dongsheng, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. High average power double frequency operation of Nd:YAG rod lasers side pumped by diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):301~303  
姜东升,周寿桓,赵 鸿等. 二极管侧面抽运的高平均功率倍频 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):301~303
- 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
- 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
- Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun *et al.*. 120 W diode-pumped green Nd:YAG laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(suppl.):7~10  
姜东升,赵 鸿,王建军等. 120 W 的二极管泵浦 Nd:YAG 绿光激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊):7~10
- Degang Xu, Jianquan Yao, Baigang Zhang *et al.*. Influence of the KTP crystal boundary temperature on conversion efficiency in high power green laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2):85~88