

文章编号: 0258-7025(2001)01-0007-03

# 温控高纯 KTP 内腔倍频 Nd:YAG 激光器

孙渝明 侯学元 李宇飞 徐士华 刘恩泉

(山东大学光学系 济南 250100)

**摘要** 将高纯 KTP 晶体置于一温控炉内,利用温度调谐,在声光调  $Q$  直腔式 Nd:YAG 激光器中获得了高功率、高效率倍频绿光输出。最高倍频绿光输出功率超过 38 W,倍频光输出功率的转换效率大于 0.91%,不稳定度为  $\pm 2.3\%$ 。高纯 KTP 与一般 KTP 相比,倍频效率提高了 18.8%。

**关键词** 高纯 KTP, 温度调谐, 内腔倍频, 声光  $Q$  开关

中图分类号: TN 248.1+3 文献标识码: A

## Intracavity Frequency Doubling Nd:YAG Laser with Temperature Controlling and High-pure KTP

SUN Yu-ming HOU Xue-yuan LI Yu-fei XU Shi-hua LIU En-quan

(Optical Department of Shandong University, Jinan 250100)

**Abstract** The high-power and the high-efficiency green laser output was obtained in an AOQ switch straight cavity Nd:YAG laser. The high-pure KTP was placed in a temperature controlling stove and tuned by the temperature. The highest green laser output power was more than 38W. The conversion efficiency of the input electric power to the green laser output power was 0.91%. The unstable degree was  $\pm 2.3\%$ . The frequency doubling efficiency for the high-pure KTP was improved by 18.8% compared with that for the conventional KTP.

**Key words** high-pure KTP, temperature tuning, intracavity frequency doubling, AOQ switch

### 1 引言

高功率绿色激光在抽运染料、钛宝石激光器、激光海底探潜、激光医疗等领域有着广泛的应用前景。利用非线性晶体 KTP 将 Nd:YAG 1.06  $\mu\text{m}$  基频光倍频,是获得这种光源的主要途径。天津大学胡国峰等利用四镜折叠腔和声光  $Q$  开关技术获得了 32 W 的准连续绿光输出<sup>[1]</sup>。P. E. Perkins 等在 1987 年已获得 20 W 准连续绿光输出<sup>[2]</sup>, Tetsuo Kojima 等利用三镜折叠腔获得了 24 W 连续绿光输出<sup>[3]</sup>。研究发现,传统的直腔倍频激光器,易调整、稳定和体积小,更利于形成整机,缺点是光束质量差。原因之一是 KTP 倍频效率不高,要提高绿光输出必须在 YAG 热透镜效应允许的稳态腔范围内尽量提高灯的输入功率,这势必造成大量高阶模起振;二是 KTP 本身杂质比较多,对光的吸收较强,进一步造成光束发散角的增大。

我们利用山东大学晶体材料研究所最新研制的高纯 KTP,将其置于一控温炉内,利用温度调谐相位匹配方向,在一直腔倍频器件中获得了 38 W 的高功率绿光输出,运转 30 min,不稳定度为  $\pm 2.3\%$ 。其光束发散度为 7.5 mrad。

### 2 实验

#### 2.1 谐振腔参数选择

对氩灯抽运的连续激光器, YAG 被看作类透镜介质,令其热焦距为  $f_T$ 。在中小功率激光器中, YAG 棒的热焦距通常在几米到几十厘米之间<sup>[4]</sup>。对图 1 所示的平-平腔,采用薄透镜近似,按照 ABCD 矩阵法,很容易得到谐振腔稳定参数  $g_1$  和  $g_2$ 。

$$g_1 = 1 - L_2/f_T \quad (1)$$

$$g_2 = 1 - L_1/f_T \quad (2)$$

谐振腔的稳定条件为

$$0 < (1 - L_1/f_T)(1 - L_2/f_T) < 1 \quad (3)$$

(3)式说明,  $L_1, L_2$  的大小不是任意的,只能在一定范围内变动,否则腔内损耗增大,激光振荡有可能停止。对平-凹腔,谐振腔的稳定区不单和晶体的热焦距  $f_T$  及  $L_1, L_2$  的大小有关,还与凹面镜的曲率半径  $R$  有关。我们分别对平-平腔和平-凹腔进行了实验,实验结果表明,平-平腔阈值功率最高,倍频绿光输出功率也比较高,但功率超过 20 W 后极不稳定。对平-凹腔,我们分别实验了  $R = 1 \text{ m}, R = 1.5 \text{ m}, R = 2 \text{ m}$  的三种腔型,其中  $R = 1 \text{ m}$  的阈值最低,但稳定范围小,极易跑到非稳区;  $R = 1.5 \text{ m}$  的稳定区比较大,故能得到较高的输出功率(32 W);  $R = 2 \text{ m}$  的稳定区最大,得到 38 W 的绿光输出。

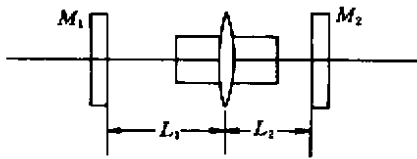


图1 平-平谐振腔

Fig.1 Plane-plane resonator

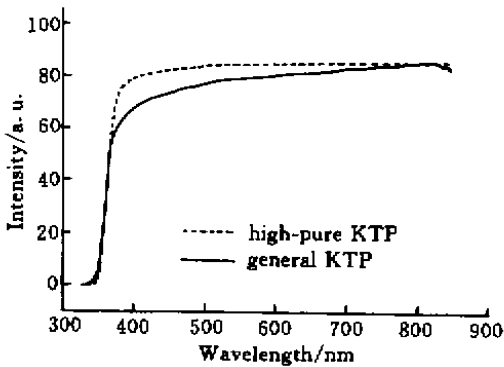


图2 普通KTP与高纯KTP的透射光谱

Fig.2 Transmission spectrum of high-pure KTP and conventional KTP

### 2.2 高纯KTP与普通KTP的比较

普通KTP含杂质离子较多(如  $\text{Fe}^{3+}$ ),宏观观察略呈淡黄色,这使晶体的均匀性变差,增加了对光的吸收,加大了腔内的插入损耗,同时使输出倍频光的光束发散角增大(测量为  $15.6 \text{ mrad}$ )。而高纯KTP含杂质离子极少,宏观上无色透明,使输出倍频光的发散度大为减少(测量为  $7.5 \text{ mrad}$ )。我们按 II 类相位匹配方向分别制作了两块样品,高纯KTP和普通KTP尺寸均为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,通

光面未镀增透膜,利用 HITACHI U-3500 光度计分别测量了这两块晶体样品室温下的透过光谱曲线,结果如图 2 所示。由图可看出,高纯KTP和普通KTP对波长较长的波段吸收基本一致,当波长小于  $600 \text{ nm}$  时,普通KTP的吸收明显加大,且随着波长的减小,两者吸收的差距也越大,因而普通KTP对  $530 \text{ nm}$  倍频光的自吸收要比高纯KTP大得多,从而导致了更为明显的热透镜效应,输出光束的发散角比较大。

### 2.3 温度调谐倍频晶体KTP

KTP晶体是 Nd:YAG/KTP 倍频激光器中的一个关键元件,只有  $\Delta K = 0$  (相位匹配)时才能获得最大的二次谐波功率。晶体按 II 类相位匹配方向切割,但由于晶体的折射率是光波长、光偏振态和温度的函数,限于加工精度,激光束的光强分布造成  $\Delta K \neq 0$ ,使  $\Delta K$  在一定范围内波动。晶体加工都是在一定温度下满足相位匹配方向的,然而在激光运转中,尽管对KTP进行强制冷却,但往往冷却温度与加工时温度并不一样,这就导致了相位失配。传统方法是机械调整KTP,满足  $\Delta K = 0$  的条件,但这导致了KTP晶体的倾斜,激光通过KTP晶体时不是正入射,增加了腔内插入损耗,降低了倍频效率。

将KTP晶体置于一控温炉内,一旦将KTP晶体准直后不再机械调整,此时依靠调谐KTP晶体的温度满足相位匹配方向。分别对两块KTP晶体做了实验,一块最佳温度为  $19^\circ\text{C}$ ,另一块为  $13^\circ\text{C}$ 。实验中选用最佳温度为  $19^\circ\text{C}$  的晶体,尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。

### 2.4 倍频实验

Nd:YAG/KTP腔内倍频激光器的光路如图3所示。

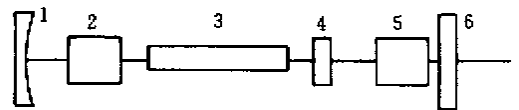


图3 腔内倍频装置

- 1:凹面镜 2:大功率声光Q开关 3:Nd:YAG;
- 4:介质膜片 5:KTP晶体 6:输出镜

Fig.3 Setup of intracavity frequency doubling  
1: concave mirror; 2: high power AOQ switch; 3: Nd:YAG;  
4: medium film; 5: crystal KTP; 6: output mirror

实验中采用双椭圆柱镀金腔,双灯抽运,Nd:

YAG 棒尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 高纯 KTP 晶体尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。图中凹面镜曲率半径  $R = 2 \text{ m}$ , 对  $1.064 \mu\text{m}$  高反; 介质膜片对  $1.064 \mu\text{m}$   $T = 98.2\%$ ,  $0.53 \mu\text{m}$  高反; 输出镜对  $1.064 \mu\text{m}$  为高反,  $0.532 \mu\text{m}$   $T = 98\%$ 。声光  $Q$  开关调制频率为  $5.7 \text{ kHz}$ 。声光  $Q$  开关尽量靠近凹面镜, 因为此处腔内功率密度最低; 而 KTP 尽量靠近平面输出镜, 因此处为束腰的位置, 可提高通过 KTP 基频光的功率密度。利用该装置, 测得高纯 KTP 晶体的倍频阈值小于  $1.4 \text{ kW}$  (低于该值氦灯已不能点燃), 当输入电功率为  $4.12 \text{ kW}$  时, 测得倍频光输出为  $38 \text{ W}$ , 此时的转换效率大于  $0.91\%$ 。图 4 中上部曲线描述了绿光输出与输入电功率的关系。为将输出光中的基频光滤掉, 在功率计前面加了一块对  $1.06 \mu\text{m}$  全反的介质膜片。此实验装置还与同样尺寸的普通 KTP 进行了比较, 实验结果见图 4。

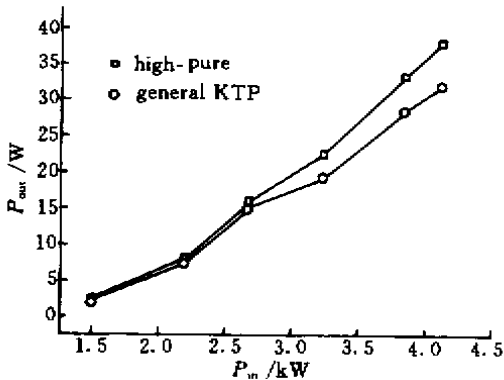


图 4 高纯 KTP 晶体与普通 KTP 晶体的  $P_{out}^2 - P_{in}$  关系曲线

Fig. 4  $P_{out}^2 - P_{in}$  of high-pure KTP and general KTP

由图 4 可看出, 我们设计的这种腔型仅适合于低抽运功率下使用。由于 YAG, 声光晶体, KTP 晶体热透镜效应的共同作用, 当输入电功率超过  $4.12 \text{ kW}$  时, 该腔已成为非稳腔, 输出的倍频光功率急剧下降。

高纯 KTP 与普通 KTP 都置于控温炉内, 进行温度调谐, 故在激光运转过程中不需再机械调整相

位匹配方向。但这两种晶体的倍频效率存在比较大的差异。抽运功率较低时, 倍频的差异不大, 随着抽运功率的增加, 差异逐渐拉大。这说明强激光下普通 KTP 对  $0.53 \mu\text{m}$  光的吸收增强, 增加了晶体的折射率梯度, 导致热透镜效应加剧。当输入功率为  $4.12 \text{ kW}$  时, 高纯 KTP 的倍频效率比普通 KTP 晶体高  $18.8\%$ 。采用温控装置情况下, 实验  $30 \text{ min}$  输出绿光不稳定性为  $\pm 2.3\%$ 。

### 3 结 论

为将高功率腔内倍频激光器整机化, 我们设计了低抽运功率的直腔激光器。该激光器首先选用了高纯 KTP 晶体, 并进行温度调谐, 结果得到了  $38 \text{ W}$  的倍频绿光输出功率, 倍频光与抽运功率的转换效率大于  $0.91\%$ , 不稳定性仅为  $\pm 2.3\%$ 。实验中我们将高纯 KTP 晶体与普通 KTP 晶体进行了比较, 高纯 KTP 晶体的倍频效率比普通 KTP 晶体提高了  $18.8\%$ , 发散度仅为  $7.5 \text{ mrad}$ 。KTP 晶体在  $38 \text{ W}$  绿光输出下运转了  $30 \text{ min}$  未见损伤。相信高纯 KTP 晶体可将该类激光器提高到一个新水平。

### 参 考 文 献

- Hu Guojiang, Wang Dongmei, Yang Tianxing *et al.*. Intracavity frequency doubled Nd:YAG laser with high frequency conversion efficiency. *Chinese J. Laser* (中国激光), 1996, **A24**(5) 391 ~ 396 (in Chinese)
- P. E. Perkins, T. S. Fahlen. 20-W average-power KTP intracavity-doubled Nd:YAG laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1987, **4**(7):1066 ~ 1071
- Tetsuo Kojima, Koji Yasui. High-power green-beam generation in continuous-wave modes by use of long  $\text{KTiOPO}_4$  crystal with a Nd:YAG Laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10): 713 ~ 715
- W. Koehnner. *Solid-state-laser Engineering*. New York: Springer-verlag, 1976
- J. K. Tyminski. Photorefractive damage in KTP used as second-harmonic generator. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(10): 5570 ~ 5576