

文章编号 : 1001-3806(2004)01-0091-03

## 加固型人眼安全 OPO 激光器的设计

陈 波<sup>1</sup> 程 勇<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 ,合肥 230031 ;2. 武汉军械士官学校 ,武汉 430075 )

**摘要 :** 考虑到军用激光器对可靠性的特殊要求 ,设计了一种加固型的内腔式人眼安全 OPO 激光器。采用双向棱镜折叠谐振腔、Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 晶体、Ce:Nd:YAG 激光棒、非临界相位匹配 KTP 光参量振荡晶体 ,获得 5.3mJ/pulse 1.57 $\mu$ m OPO 激光输出 ,脉冲宽度约为 6ns ,发散角约为 5mrad ,重复频率为 3Hz ,连续工作时间为 1min ,且输出能量和光轴指向稳定的结果。该激光器具有结构紧凑、可靠性高的特点。

**关键词 :** 光参量振荡器(OPO) ;人眼安全 ;加固设计 ;双向棱镜折叠谐振腔

中图分类号 : TN248.1 文献标识码 : A

## Consolidated design of eye-safe OPO laser

CHEN Bo<sup>1</sup> ,CHENG Yong<sup>2</sup>

(1. Anhui Institute of Optical Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China ; 2. Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School , Wuhan 430075 , China )

**Abstract :** Considering the specific requirement of reliability of military lasers , a consolidated intracavity eye-safe optical parametric oscillator ( OPO ) is designed. By using double-directional-prism resonator , Cr<sup>4+</sup>:YAG passive Q-switch , Ce:Nd:YAG laser rod , noncritical phase matching KTP crystal , 1.57 $\mu$ m OPO laser is obtained with 5.3mJ/pulse of energy ,  $\approx$ 6 ns of pulse width and  $\approx$ 5mrad of divergence. After continuously working for 1min at the repetition rate of 3Hz , the output energy and optical axis is still stable. It had the characteristics of compact structure and high reliability.

**Key words :** optical parametric oscillator ( OPO ) ; eye-safe ; consolidated design ; double-directional-prism resonator

## 引 言

近年来 ,由于优质高效非线性晶体材料的突破 ,光参量振荡器 OPO ( optical parametric oscillators ) 已成为工程应用中获得人眼安全激光波长的主要途径之一<sup>[1-3]</sup>。OPO 激光器从概念和技术上来讲都是简单的 ,但小型 OPO 激光器在实际系统中 ( 如人眼安全的激光测距机和激光雷达 ) ,却遇到一些致命的困难 : 光束发散角大 ,强泵浦引起非线性晶体及腔膜的光学损伤 ,器件环境适应性差 ,难以满足在振动、冲击、温度变化等环境使用的需要 ; 结构复杂 ,重复频率运行时 ,需要采取附加冷却方式<sup>[4,5]</sup> ,且光轴漂移严重 ,对测程和小目标测距能力不理想。

对于军用激光器的设计 ,系统的可靠运转比最佳性能显得更为重要。因此 ,对 OPO 激光器可靠性 ( 包括机械稳定性、热稳定性、光轴稳定性等 ) 的加

固 ,是人眼安全激光装备满足严峻环境使用的关键技术。传统的加固措施有粘接固化强化镜架机械结构、用 Porro 棱镜或逆反射镜<sup>[6]</sup>的自对准特性等保证激光器的稳定性和可靠性。在本文中 ,首次采用双向棱镜折叠腔对 OPO 激光器进行加固设计和实验 ,在冲击、振动和大的温度变化条件下 ,1.57 $\mu$ m OPO 激光器获得了工程实用的理想效果 : 能量 5.3mJ/pulse ,脉宽约为 6ns ,发散角约为 5mrad ,重复频率为 3Hz ,传导冷却下连续工作时间 1min 时光轴及输出能量均保持稳定。

## 1 加固型设计

对于 OPO 器件的设计 ,通常人们感兴趣的是阈值、增益、相位匹配、转换效率等问题的研究。作者在考虑优化上述参数的基础上 ,着重考虑 OPO 激光器的泵浦光强度和谐振腔结构这两个设计因素 ,目的是提高器件的稳定性和改善光束质量。

### 1.1 泵浦光强度

OPO 器件最佳结构的关键取决于非线性晶体中的泵浦光强度。泵浦光强度偏高 ,对应的信号光

作者简介 : 陈 波 (1980- ) ,男 ,硕士研究生 ,主要从事光电子技术与军用激光器件的研究与设计。

E-mail : obnehc@263.net

收稿日期 2003-05-23 ;收到修改稿日期 2003-07-09

转换效率高<sup>[7]</sup>,但随着 OPO 腔内泵浦功率密度增大,极易导致非线性晶体和腔镜的光学损伤。KTP 是为设计 Nd:YAG 激光器的 1.064 μm 泵浦 OPO 器件而选择的常用材料,当 KTP 用于 OPO 器件时,与倍频器相比,其损伤阈值低得多。因此,设计军用

Table 1 Common crystals employed in OPOs

	LBO	BBO	KTP	KTA	AgGaS <sub>2</sub>	LiNbO <sub>3</sub>	PPLN
$d_{\text{eff}}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	1.16	1.94	3.64	4.47	13.5	5.1	17.2
transparency/μm	0.16~2.6	0.19~2.5	0.4~3.5	0.4~4.0	0.5~12	0.5~5	0.5~5
damage threshold/(GW·cm <sup>-2</sup> )	2.5	1.5	0.5	0.5	0.03	0.2	0.2
typical length/cm	0.5~1	0.5~1	1~2	1~2	2~4	2~5	2~6

降低腔内阈值泵浦功率密度,是避免晶体和腔镜的光学损伤的重要措施;根据“经验法则”,泵浦光强度  $I_p$  应不小于 4 倍阈值泵浦强度  $I_{\text{th}}$ 。即数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$I_p \geq 4I_{\text{th}} = \frac{6\lambda_s \lambda_i n_i n_p \epsilon_0 c}{\pi^2 d_{\text{eff}}^2 g_s l_{\text{eff}}^2} \times \left( \frac{L}{t_p c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2\alpha \cdot l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 2 \right)^2 \quad (1)$$

对上式考察表明,设计时选择高的有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  和长的有效晶体长度  $l_{\text{eff}}$ ,是获得 OPO 激光器低阈值输入功率的关键;长的泵浦脉冲宽度  $t_p$ 、短的腔长  $L$ 、高的输出镜反射率  $R$  和匹配的腔型结构  $g_s$  都有助于降低泵浦阈值、减少因腔内功率密度增大出现光学损伤。但是,腔长太短也会导致信号光发散角大的弊端。发散角大是 OPO 激光器相对普通 Nd:YAG 激光器的主要缺点之一,设计时要综合考虑。

OPO 腔型设计是加固系统稳定性和抗光学损伤的有效措施,值得研究与推广。

## 1.2 谐振腔

OPO 激光器的谐振腔包括泵浦光谐振腔和光参量振荡谐振腔两部分。结构上分为外腔式和内腔式,其中外腔式泵浦光谐振腔和光参量谐振腔相互独立,较为常用,但效率较低。内腔式效率较高,但其结构和动力学过程均较复杂,由于激光器腔镜多、结构复杂,对温度和对准非常敏感,容易失调。因此,谐振腔加固设计的目的是探索如何在不增加几何尺寸和重量的前提下,改善内腔式 OPO 激光器的光束质量和失调稳定性(包括机械稳定性、热稳定性、光轴稳定性等),满足小型军用 OPO 激光器在严峻环境下可靠运行。

由于棱镜腔可以提高光腔选模能力,增强对失

OPO 激光器泵浦光强度时,应优先考虑避免光学损伤。

选择具有高损伤阈值的非线性晶体(参见表 1),是避免晶体光学损伤的基本措施。

调的不灵敏性和环境适应性<sup>[8]</sup>。因此,本设计中采用双向棱镜折叠腔对内腔式 OPO 进行加固,如图 1 所示。其中,定向棱镜  $M_1$ 、Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 晶

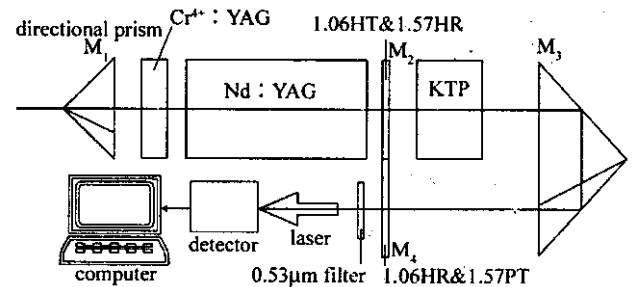


Fig. 1 Schematic of the reinforced OPO cavity and experiment setup

体、Nd:YAG 工作物质(与金属传导冷却)和平面输出镜  $M_4$  构成免调试激光器<sup>[9]</sup>,作为 OPO 激光器所需优质光束质量的泵浦源;平面输出镜  $M_2$ 、非线性晶体 KTP、起折转作用的定向棱镜  $M_3$ (用于增大腔长和压缩轴向几何尺寸)和平面输出镜  $M_4$ (与  $M_2$  在同一基片上镀不同的膜系)构成抗失调光参量振荡器<sup>[10]</sup>。设计要求  $M_1$  为泵浦光全反射镜, $M_2$  应镀对泵浦光高透和对信号光全反的复合膜; $M_3$  为折转棱镜; $M_4$  应镀对泵浦光半反或全反(70%~99%)、信号光半反(70%~90%)和对闲频光全反或半反复合膜。并要求  $M_1$  与  $M_4$  构成免调试谐振腔结构一; $M_2$  与  $M_4$  构成免调试谐振腔结构二。该加固型激光器具有如下效果与特点(1)各元件装配后不经调试就能稳定输出高质量光束,能适应振动、冲击、温度大幅度变化等使用环境;(2)激光器可以不采取附加冷却措施,在一定重复频率和一定连续工作时间内输出能量稳定且光轴不漂移;(3)定向棱镜对振荡光线有翻转和匀光作用,明显提高调 Q 晶体、光参量振荡晶体和腔膜的光学损伤阈值和光束质量,外形几何尺寸不变,发散角压缩近 1 倍。

## 2 实验

### 2.1 实验装置

实验装置用脉冲闪光灯抽运,如图1所示。实验中采用尺寸为 $\varnothing 4\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的 Ce-Nd:YAG 晶体作为激光工作物质,激光棒装在热沉尺寸为 $8\text{mm} \times 30\text{mm} \times 65\text{mm}$ 的金属散热凹槽上,用于自然热传导冷却;初始透过率为25.4%(尺寸为 $\varnothing 8\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ )的  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体作为被动调Q元件;尺寸为 $\varnothing 8\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的定向棱镜  $M_1$  作为全反射镜,尺寸为 $8\text{mm} \times 24\text{mm}$ 的平面输出镜在同一基板上镀二向色介质膜,其中  $M_2$  对  $1.064\mu\text{m}$  高透、对  $1.57\mu\text{m}$  高反,  $M_4$  对  $1.064\mu\text{m}$  高反、对  $1.57\mu\text{m}$  80% 反射;选择尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 30\text{mm}$  KTP 晶体作为频率下转换增益介质;  $M_3$  为折转棱镜,由 $\varnothing 25\text{mm}$  定向棱镜切割而成;  $M_1 \sim M_4$  构成内腔式自准直折叠腔 OPO 结构。实验中,采用自制的小型重复频率激光电源(储能电容  $20\mu\text{F}$ ),用 OPHIR-DGX 型激光功率/能量计监测激光输出,脉宽用 TEK-P6701A 型光电探头和 TEK-TDS544A 型 500MHz 示波器进行测量,光束发散角用  $f-\theta$  法( $f=1\text{m}$  的透镜)进行测量。

### 2.2 实验结果

在传导冷却、重复频率为 3Hz 运行条件下,连续工作 1min,测得  $1.57\mu\text{m}$  输出能量稳定(如图2所示)测量时每隔 6s 抽取 1 个激光脉冲。

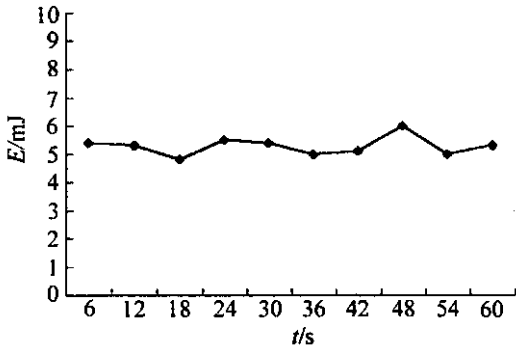


Fig. 2 Energy fluctuation of eye-safe OPO laser

当注入电能量在  $4.9\text{J} \sim 6.4\text{J}$  时,单脉冲输出能量的平均值为  $5.3\text{mJ/pulse}$ ;实验观察 1min 内的前 5s 和后 5s 时间光斑偏移情况,经 TXY-04 读数显微镜观察,几乎看不到光轴偏移现象;在重复频率为 1Hz 运行条件下,用  $f-\theta$  法感光 10 个脉冲激光(由于发散角大,单脉冲能量小不易感光),粗略测得 OPO 激光器  $1.57\mu\text{m}$  光束发散角为约为  $5\text{mrad}$ 。

实验测得 OPO 激光器  $1.57\mu\text{m}$  信号输出波形如图3所示,脉宽为  $5.9\text{ns}$ 。

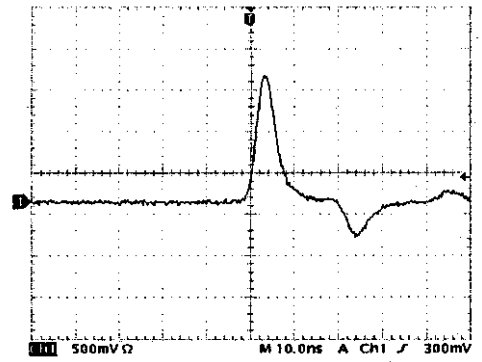


Fig. 3 Width of eye-safe OPO output laser

实验测得在高温  $+55^\circ\text{C}$  环境下激光输出能量为  $5.7\text{mJ}$ ,在低温  $-40^\circ\text{C}$  环境下激光输出能量为  $5.0\text{mJ}$ 。当工作电压为  $750\text{V}$  时,在  $-40^\circ\text{C} \sim +55^\circ\text{C}$  温度变化范围内均能获得稳定的单脉冲输出。实验观察到输出的  $1.57\mu\text{m}$  信号光中有绿光成分,加  $0.53\mu\text{m}$  滤光片前后测得输出能量无明显变化。

## 3 结论

采用定向棱镜对 OPO 内腔式激光器进行了加固设计和实验。通过定向棱镜折叠光路、在同一基片上镀不同膜系和传导冷却等措施,不但简化了谐振腔结构,减小了尺寸,而且大大提高了机械稳定性和温度稳定性。实验测得  $1.57\mu\text{m}$  脉冲输出能量为  $5.3\text{mJ/pulse}$ ,脉冲宽度约为  $6\text{ns}$ ,发散角约为  $5\text{mrad}$ ,在传导冷却条件下,重复频率 3Hz,连续工作时间 1min,输出能量和光轴指向稳定。该激光器具有结构紧凑、可靠性高的特点,能满足严峻环境使用的需要。

### 参考文献

- [1] 金锋,翟刚,李晶 *et al.* 激光技术, 2002, 26(3): 201 ~ 203.
- [2] JOHNSON B C, NEWELL V J, CLARK J B *et al.* J O S A, 1995, B12(11): 2111 ~ 2127.
- [3] BRÜGGEMANN D, HERTZBERG J, WIES B *et al.* Appl Phys, 1992, B55(4): 378 ~ 380.
- [4] 时顺森,金锋,翟刚 *et al.* 激光技术, 2000, 24(5): 262 ~ 264.
- [5] 李绍育. 激光杂志, 1996, 17(2): 53 ~ 61.
- [6] KOECHNER W. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 2002. 233 ~ 237.
- [7] KOECHNER W. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 2002. 541 ~ 559.
- [8] 程勇,王晓兵,孙斌 *et al.* 中国激光, 2000, A27(6): 537 ~ 541.
- [9] 程勇,毛少卿,王志怀 *et al.* 激光技术, 1999, 23(2): 68 ~ 70.
- [10] 范琦康,陆国贤,陆祖康 *et al.* 稳定准直的线偏振输出激光器. 中国专利号: CN87219562 U, 1989-09-13.