

内腔式 KTP 光学参量振荡器的实验研究

张凤娟¹, 王加贤², 王红华³

(1. 无锡科技职业学院尚德光伏学院, 江苏 无锡 214028; 2. 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021;

3. 烟台南山学院自动化工程学院, 山东 烟台 265706)

摘要:在脉冲氙灯抽运的 Nd:YAG 被动调 Q 激光器腔内, 插入非临界相位匹配 KTP 晶体, 构成内腔式 KTP 光学参量振荡器, 获得脉宽 3 ns、单脉冲能量 10 mJ、中心波长 1.568 μm 的人眼安全激光输出。当光学参量振荡器的腔长分别为 3 cm、6 cm 和 8 cm 时, 得到的信号光脉冲的时间宽度分别为 6 ns、4 ns 和 3 ns。当氙灯电注入能量为 26 J 时, 输出的信号光出现双脉冲。实验上比较了 Nd:YAG 激光器不同的谐振腔结构和参量对信号光脉冲的影响, 并从理论上加以解释。

关键词:光学参量振荡器; KTP 晶体; 被动调 Q ; 非临界相位匹配

中图分类号:TN248.3+4

文献标识码:A

Experimental investigation of intracavity KTP optical parametric oscillator

ZHANG Feng-juan¹, WANG Jia-xian², WANG Hong-hua³

(1. Wuxi Professional College of Science and Technology, Wuxi 214028, China; 2. College of Information Science and Engineering,

Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 3. Yantai Nanshan University, Yantai 265706, China)

Abstract: An eye-safe laser pulse with 3 ns pulse duration, 10 mJ output energy and 1.568 μm central wavelength was generated from a intracavity KTP optical parametric oscillator. OPO was formed by putting a noncritically phase-matched KTP crystal inside a passively Q -switched Nd:YAG laser pumped by a pulsed Xe lamp. When the cavity length of the optical parametric oscillator were respectively 3 cm, 6 cm and 8 cm, the pulse duration of signal laser were respectively 6 ns, 4 ns and 3 ns. The double pulses were observed when the Xe electrical input energy was 26 J. The influence of the different Nd:YAG laser resonator structure and parameter on the signal pulse were compared experimentally and analyzed theoretically.

Key words: optical parametric oscillator; KTP crystal; passively Q -switched; noncritically phase-matched

1 引言

对大能量可调谐激光脉冲的需求促进了光学参量振荡器(OPO)的迅速发展。早期, 国内外学者研究最多的是外腔式光学参量振荡器(EOPO)^[1-2], 对于 EOPO, 抽运源和 OPO 可作为互相独立的部分进行考虑。到 20 世纪 70 年代初, 国外学者开始对内腔式光学参量振荡器(IOPO)进行研究^[3-4], 既然 IOPO 是把光学参量振荡器放置在抽运源谐振腔内,

所以两者是互相影响的。近几年, 国内对 IOPO 也进行了理论和实验研究^[5-7], 包括研究内腔光学参量振荡器的动力学过程^[8]。但是, 能够得到信号光脉冲宽度仅为抽运光脉冲宽度十分之一的文献尚没

基金项目:福建省自然科学基金项目(No. A0310022)资助。

作者简介:张凤娟(1978 -), 女, 硕士, 主要从事固体激光技术与器件方面的研究。E-mail: zhangfengjuan-2008@163.com

收稿日期:2009-12-06

有见到。本文报道在氙灯抽运的被动调 Q Nd:YAG 激光器腔内,实现非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器运转,获得脉宽 3 ns、单脉冲能量 10 mJ、中心波长 1.568 μm 的人眼安全激光输出。通过改变 OPO 腔长发现,随着 OPO 腔长的增加,脉冲变窄、阈值电注入能量增大、信号光输出能量减小。在电注入能量增加到一定值时出现了信号光的双脉冲,从理论上分析了这种现象的原因。

2 实验装置

图 1 为内腔式 KTP OPO 实验装置。其中 M_1 , M_3 构成 1.064 μm 激光谐振腔(主腔),腔长为 62 cm;A 为 Cr^{4+} :YAG 调 Q 晶体,P 为 1.064 μm 偏振片; M_2 , M_3 构成 OPO 谐振腔(内腔),采用平-平腔结构,沿腔轴移动 M_2 镜可改变 OPO 腔长。 M_1 为 1.064 μm 凹面全反射镜,曲率半径为 200 cm; M_2 为 1.064 μm 高透、1.57 μm 高反的介质膜片; M_3 对 1.064 μm 透过率为 10%,对 1.57 μm 透过率为 30%。KTP 晶体的尺寸为 8 mm $\times$ 8 mm $\times$ 20 mm, X 方向切割,非临界相位匹配。 M_4 为 22.5°角 1.064 μm 全反射介质膜片,除去信号光中残余的抽运光。输出的信号光由 InGaAs PIN 光电二极管构成的探测器接收并输入到 TDS3032B 型数字示波器上观察脉冲波形。

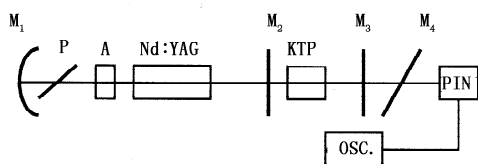


图 1 内腔式 OPO 实验装置

3 实验结果与结果分析

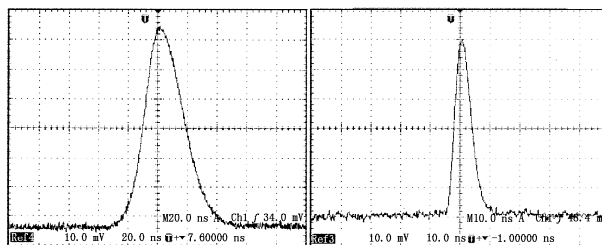
3.1 信号光脉冲的波形及脉宽

实验中,当抽运光正入射 KTP 晶体时,用 WGD-300A 型光栅光谱仪测量的 OPO 输出的信号光的中心波长为 1.568 μm 。

当电注入能量为 26 J 固定不变时,改变 OPO 谐振腔的长度,输出的信号光脉冲宽度有所改变。图 2 是 1.064 μm 脉冲波形(20 ns/div.)和 OPO 腔长分别为 $L = 3$ cm, 6 cm, 8 cm 时,信号光脉冲波形(10 ns/div.)。可以看出,抽运光的脉宽是 30 ns,信号光的脉宽分别为 6 ns, 4 ns, 3 ns。信号光脉冲宽度比抽运光脉冲宽度窄得多,可以从以下两个方面进行解释:①对于长脉冲(纳秒量级)抽运的 OPO,一般参量光从初始噪声建立以后,能与抽运光脉冲产生多次非线性相互作用,而且光参量振荡具有明显

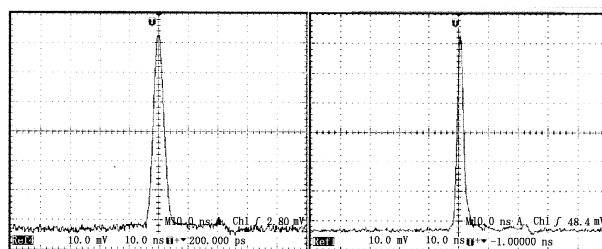
的阈值特性。在抽运光脉冲的前后沿,功率密度较低,没有达到光参量振荡阈值,不会产生信号光;信号光只会在抽运光脉冲峰值附近的时间内产生,所以信号光脉冲要比抽运光脉冲窄。实验中还发现抽运光脉冲越宽(插入不同小信号透过率的 Cr^{4+} :YAG 调 Q 晶体以改变抽运光脉宽),抽运速率上升越慢,信号光建立时间越长,输出的信号光与抽运光的脉宽差距就越大。② M_3 镜对 1.064 μm 激光的反射率高(90%),对 1.568 μm 信号光的反射率相对较低(70%),这样激光腔内 1.064 μm 光子寿命大于 1.568 μm 光子寿命,从而造成信号光脉冲较窄。

对信号光脉冲宽度随着腔长的增加而减小的解释是:OPO 谐振腔长的增加,导致在抽运脉冲时间内,信号光在谐振腔内的往返次数减少;同时,OPO 腔长的增加,导致抽运阈值的增加,这样有利于抑制边缘振荡,所以随着 OPO 腔长增加信号光脉冲宽度减小。实验中还发现,当 OPO 腔长进一步增加时,虽然信号光脉宽还有减小的趋势,但是输出能量下降得更快,直到不能形成信号光输出。所以在本实验条件下,OPO 腔长为 8 cm 是比较合适的。



(a) 1.064 μm 抽运光脉冲

(b) 1.568 μm 信号光脉冲
($L = 3$ cm)



(c) 1.568 μm 信号光脉冲
($L = 6$ cm)

(d) 1.568 μm 信号光脉冲
($L = 8$ cm)

图 2 1.064 μm 抽运光脉冲和不同 OPO 腔长 L 的
1.568 μm 信号光脉冲

3.2 阈值电注入能量和信号光能量与 OPO 腔长的关系

图 3、图 4 分别为实验测得的脉冲氙灯阈值电注入能量和在电注入能量 26 J 情况下信号光输出能量与 OPO 腔长的关系。可以看出,阈值电注入能

量随着 OPO 腔长的增加而增加,而信号光输出能量随着 OPO 腔长的增加而减小。理论上,阈值抽运能量密度与 OPO 腔长的关系为^[9]:

$$J_{th} = \frac{2.25}{\kappa g_s L_{eff}^2} \tau \left(\frac{15L}{c\tau} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 2 \right)^2$$

式中, κ 为非线性耦合系数; g_s 为抽运光与信号光模式耦合系数; L_{eff} 为有效参量增益长度; L 为 OPO 腔长; τ 为抽运光脉冲宽度; c 为光速; α 为晶体吸收系数; l 为晶体长度; R 为输出镜反射率。由上式可知,OPO 腔长较大时,阈值能量也较大;当抽运能量不变时,信号光输出能量就相对减小。

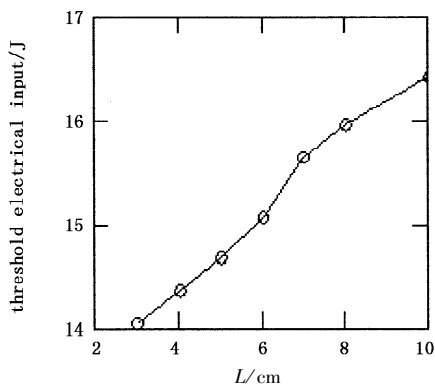


图3 阈值电注入能量与 OPO 腔长的关系

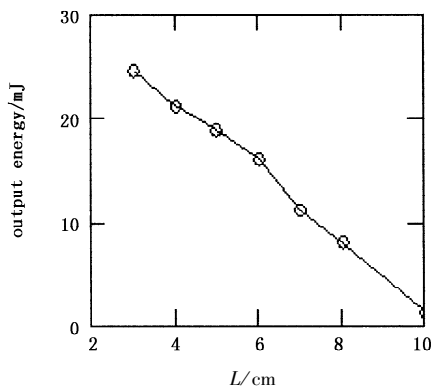


图4 信号光能量与 OPO 腔长的关系

3.3 多脉冲现象

实验中还观察到,当电注入能量较低时,OPO 输出单脉冲;当电注入能量增加到一定值时,OPO 输出双脉冲。图 5 是 $L=3$ cm,电注入能量为 35 J 时,OPO 输出的信号光双脉冲,二个脉冲峰值的延迟时间为 12 ns,这种现象可以做如下解释:

在电注入能量较小的情况下,OPO 输出一个脉冲后,Nd:YAG 中上能级残留的 Nd^{3+} 粒子数较少,通过增益放大产生的新的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光抽运能量也较小,达不到 OPO 的阈值,因此输出的信号光为单脉冲。当电注入能量较大时,抽运到 Nd:YAG 中

上能级的粒子数增多,而 OPO 的阈值又没有变化,这样在输出一个信号光脉冲后,上能级残留的粒子数就相对较多,通过增益放大产生新的 $1.064 \mu\text{m}$ 抽运脉冲的能量已经达到了光学参量振荡的阈值,进而重新抽运光学参量振荡器,从而产生了新的信号光脉冲。如果再继续增加电注入能量,可能会出现更多的脉冲串现象。为了避免腔内元件的光损伤,本实验没有再继续增加电注入能量。因此,为了保证 OPO 输出单脉冲,应选择合适的电注入能量。

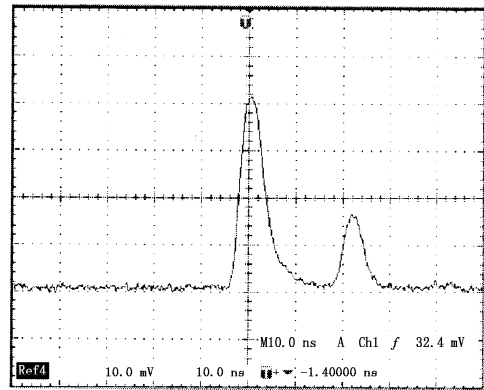


图5 输出信号光的双脉冲波形

3.4 $1.064 \mu\text{m}$ 主腔结构和参数对信号光脉冲能量的影响

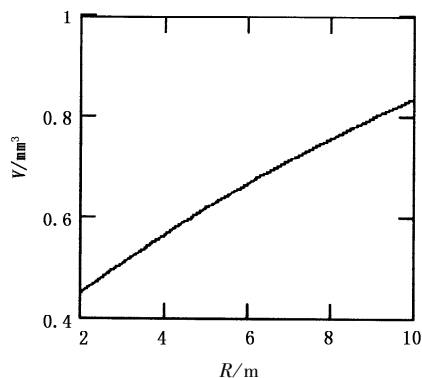
M_1 取曲率半径为 $R=200$ cm 的凹面镜,主腔构成平凹稳定腔,腔长为 62 cm,OPO 腔长为 3 cm,脉冲氙灯电注入能量为 26 J,在上述情况下,OPO 输出的信号光脉冲能量为 25 mJ。

把 M_1 换成曲率半径 $R=-200$ cm 的凸面全反射镜,主腔成为平凸非稳腔,其他条件保持不变的情况下,OPO 输出的信号光脉冲能量为 28 mJ。与主腔为平凹稳定腔时 OPO 输出的脉冲能量 25 mJ 相比,显然主腔是非稳腔的情况下 OPO 输出的信号光脉冲能量较大。作者认为其原因在于,非稳腔中具有比稳定腔中更大更均匀的模体积,这样就可以充分利用增益介质中的反转粒子数,建立激光振荡及达到峰值的时间较短。所以在相同的电注入能量下,可获得较大能量的 $1.064 \mu\text{m}$ 抽运光脉冲,从而使得信号光输出能量随着抽运光能量的增大而增大。

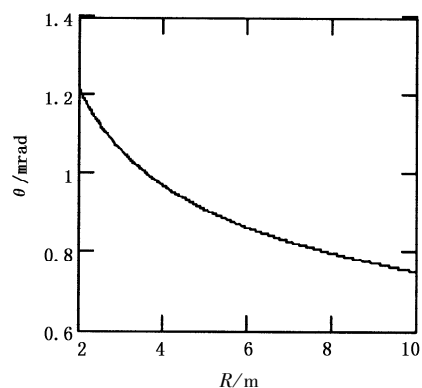
把 M_1 换成曲率半径分别为 $R=300$ cm 和 $R=600$ cm 的凹面镜,构成平凹非稳腔,在其他条件保持不变的情况下,OPO 输出的信号光的脉冲能量分别为 29 mJ 和 35 mJ。与 $R=200$ cm 时 OPO 输出的信号光能量 25 mJ 比较,可以看出,OPO 输出的信号

光能量随着主腔全反射镜曲率半径的增大而增大。这种现象可以作出如下解释。

根据文献[10]提供的有关公式,求出的 Nd:YAG 晶体内 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 激光模体积 V 和 KTP 晶体内 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 抽运光的发散角 θ 与主腔凹面全反镜曲率半径 R 的关系,分别如图 6 所示。



(a) 基模模体积与曲率半径 R 的关系



(b) 发散角与曲率半径 R 的关系

图 6 基模模体积和发散角与曲率半径的关系

可以看出,模体积随着曲率半径 R 的增大而增大,发散角随着 R 的增大而减小。模体积大,对该模式振荡有贡献的激发态粒子数就多,因此就有可能获得较大抽运光的能量;发散角越小,抽运光方向性越好,有更多的抽运光能满足相位匹配条件。所以, $1.568\text{ }\mu\text{m}$ 信号光输出能量随着曲率半径的增大而增加。

4 结 论

在脉冲氙灯抽运的被动调 Q Nd:YAG 激光腔内,实现内腔式非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器运转,获得了脉宽 3 ns ,单脉冲能量 10 mJ ,中心波长 $1.568\text{ }\mu\text{m}$ 人眼安全激光输出。实验中比较了 OPO 谐振腔长度对输出信号光脉宽、抽运阈值电压和输出能量的影响;不同的 Nd:YAG 激光器谐振腔结构和参数对 OPO 输出信号光脉冲的影响,并给予合理的理论解释。

参考文献:

- [1] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and line width studies [J]. IEEE J. Quant. Electron., 1979, 15(6): 415 - 431.
- [2] Tang C L, Bosenberg W R, Ukachi T, et al. Optical parametric oscillators [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(3): 365 - 367.
- [3] Ammann E O, Yarborough J M, Oshman M K, et al. Efficient internal optical parametric oscillator [J]. App. Phys. Lett., 1970, 16(8): 309 - 312.
- [4] Falk J, Yarborough J M, Ammann E O. Internal optical parametric oscillator [J]. IEEE J. Quant. Electron., 1971, QE-7(7): 359 - 368.
- [5] 金锋, 时顺森, 翟刚, 等. $1.57\text{ }\mu\text{m}$ 内腔光参量振荡器的研究 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 48 - 51.
- [6] 柳强, 鞠有伦, 姚宝权, 等. 被动调 Q 人眼安全内腔光学参量振荡器 [J]. 中国激光, 2003, 30(2): 113 - 116.
- [7] 王可强, 韩隆, 王建军, 等. 二极管泵浦腔内 OPO 高重复率 $2\text{ }\mu\text{m}$ 激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(s1): 185 - 188.
- [8] 柳强, 王月珠, 姚宝权, 等. 脉冲内腔光学参变振荡器的研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(10): 1228 - 1233.
- [9] Bapna R C, Dasgupta K, Nair L G. Optimum pump-pulse duration for optical parametric oscillators [J]. Optics & Laser Technology, 1997, 26(6): 349 - 351.
- [10] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 67 - 69.