

文章编号: 0258-7025(2001)08-0689-04

脉宽可调光学参量振荡器的研究*

王月珠 于欣 姚宝权 何伟明 鞠有伦 柳强 王骐

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 利用振-放双池受激布里渊散射(SBS)脉宽可调激光系统抽运非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器(OPO),在脉宽从小于 1 ns 至 6 ns 之间变化。小能量抽运的情况下,实现了 OPO 低阈值、较高转换效率运转,获得了脉宽可调参量激光,并且根据长脉冲抽运光学参量振荡器特点,结合实验结果对光学参量振荡器的输出特性进行了分析。

关键词 光学参量振荡器,受激布里渊散射,脉宽可调
中图分类号 O 437.2; TH 744.5 **文献标识码** A

Research of Optical Parametric Oscillator with Pulse-width tunable

WANG Yue-zhu YU Xin YAO Bao-quan

HE Wei-ming JU You-lun LIU Qiang WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The non-critical phase-matching KTP optical parametric oscillator (OPO), pumped by dual-cell stimulated Brillouin scattering (SBS) pulse-width tunable laser system, has achieved tunable pulse-width and comparatively high transforming efficiency with low-power pumping laser of ranging from less than 1 ns to 6 ns. The output character of this OPO is also analyzed along with experiment results according to characteristics of long-pulse pumped OPO.

Key words optical parametric oscillator (OPO), stimulated Brillouin scattering (SBS), tunable pulse-width

1 引言

磷酸钛氧化物光学参量振荡器(OPO)最具代表性当属 KTP 光学参量振荡器, KTP 晶体具有非线性系数较大、物化性能稳定、不易潮解、易抛光、生长技术较成熟、可匹配的抽运波长较多等优点,可获得可见-中红外波段,开展的研究相对也多,采用 KTP 晶体的 OPO 几乎覆盖了从长脉冲、短脉冲以至于超短脉冲不同脉宽段。单纵模、连续、超短脉冲输出的 KTP OPO 相继被实现,以 KTP 为基底制成的光学超晶格材料已见报道^[1-3],对于纳秒量级 OPO,要获得脉宽可调的光参量输出,目前主要有两种方案:1)利用脉宽可调的激光抽运 OPO,获得脉宽可调参量输出^[4-6]。2)在参量光输出能量较大的情况下,直接利用脉冲压缩的方法压窄参量光的脉冲宽度,获得脉宽可调参量激光^[7]。本文报道了带双池受激布

里渊散射(SBS)的脉宽从小于 1 ns 到 6 ns 可调 Nd:YAG 系统抽运 KTP OPO,实现了单共振 KTP 光学参量振荡低阈值、较高效率运转,在脉宽 2.5 ns 的条件下,能量阈值约为 6 mJ,抽运能量为 12 mJ 时,输出能量为 1.6 mJ,输出信号光波长为 1.57 μm ,相应的单频光转换效率为 13%,而此时的抽运能量仅为阈值的 2 倍。在进一步的实验中,通过对 SBS 后向光脉冲进行放大,将增大抽运能量,会获得更高的参量光转换效率。文中还结合实验结果,对参量光输出的能量特性、光脉冲特性和阈值特性进行了分析。

2 实验装置

实验光路如图 1 所示。主振 Nd:YAG 激光器输出能量约为 20 mJ,脉冲宽度约为 9 ns,重复频率 1 Hz,主振激光经偏振片和四分之一波片入射到双池 SBS 相位共轭系统中,偏振片和四分之一波片组成了后向 SBS 隔离器,双池 SBS 相位共轭系统中由短焦距透镜 1,长焦距透镜 2,振荡池和放大池组成,

* 国家自然科学基金(编号:69988002)资助项目。

收稿日期:2000-09-18;收到修改稿日期:2000-11-06

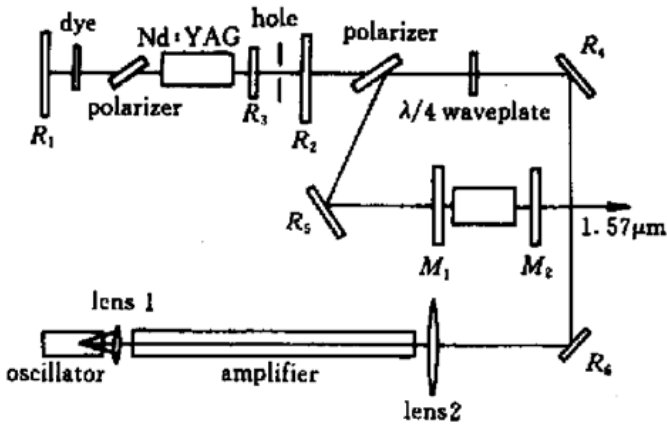


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

SBS 介质为液体 CCl_4 ，与其他液体 SBS 介质相比，具有短的声子寿命(0.6 ns)和对 $1.064 \mu\text{m}$ 激光较小的吸收系数。由 SBS 相位共轭镜产生的后向散射光脉冲的脉冲波形和能量分别由 PIN 光电二极管(响应时间为 200 ps)和 ED-500 能量计配合 TDS-684A 数字示波器测得，同时利用美国 SPIRICON 公司 LBA-100A, M^2 -101 计测得了 SBS 后向光脉冲的光束品质，光束全宽度发散角为 1 mrad, M^2 值为 1.37, 说明 SBS 相位共轭特性保证了后向散射光脉

冲与主振激光具有相同的光束质量，脉冲宽度的变化靠移动透镜 1 和透镜 2 之间的放大池，SBS 的有关参数为：透镜 1 的焦距为 15 cm, 透镜 2 的焦距为 100 cm, 振荡池的长度为 20 cm, 放大池的尺寸为 80 cm。当放大池由透镜 1 向透镜 2 移动过程中，由振荡池产生的后向 Stokes 脉冲与放大池中的抽运脉冲耦合放大的时间减少，振荡池产生的后向 Stokes 脉冲被压缩的程度减小，使得输出的脉冲宽度逐渐增加。在移动过程中选取的 3 个位置的脉冲波形如图 2 所示，脉冲波形基本保持了 SBS 后向散射脉冲前沿陡、后沿缓的特点，脉冲宽度在小于 1 ns 到 6 ns 之间连续可调。当放大池固定在一个位置，输出 SBS 脉冲转换效率的稳定性(定义为测量值均方差与算术平均值之比)小于 5%，脉冲形状基本不变，脉冲宽度有约 0.15 ns 的起伏。OPO 系统腔长 $L = 27 \text{ mm}$ ，采用单谐振腔镜，II 类相位匹配，输出信号光波长 $1.57 \mu\text{m}$ ， M_1 在 $1.06 \mu\text{m}$ 附近高透 $T = 91\%$ ，在 $1.57 \mu\text{m}$ 附近高反 $R = 95\%$ ； M_2 前端面在 $1.57 \mu\text{m}$ 附近 $R = 80\%$ 。后端面对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光高反 ($R = 99\%$)，在 $1.57 \mu\text{m}$ 附近高透 ($T > 90\%$)，KTP 晶体尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (宽 \times 高 \times 长)， x 轴切割，即 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ 。



图2 抽运激光脉冲波形

Fig. 2 Pulse shapes of the pump

3 实验结果分析

3.1 光学参量振荡器输出的光脉冲特性

对于长脉冲(纳秒量级)抽运 OPO, 一般参量光从初始噪声建立起来以后，能与抽运光脉冲产生多次非线性相互作用，又由于 OPO 具有明显的阈值行为，参量光脉冲持续的时间一定在抽运光脉冲持续的时期内。在本实验中，抽运光与输出信号光脉冲波形如图 2, 3 所示，图中的脉冲宽度是经过多次测量在平均值附近的结果。获得信号光脉宽比抽运光脉宽略窄，这一点是很容易被理解的，在抽运脉冲持

续时间的初期，抽运功率较低，没有达到 OPO 的阈值。脉宽越窄，抽运功率上升得越快，信号光建立的时间越短，输出信号光与抽运光的脉宽差距越小。从图中还可以看出，信号光脉冲保持了抽运光的形状，脉冲前沿较陡，后沿较缓。信号光之所以保持了抽运光的形状是因为：抽运脉冲前沿较陡，抽运功率上升得较快，保证有足够高的抽运功率以使信号光快速从参量噪声中建立形成自持脉动，抽运脉冲的后沿对 OPO 来说都是可以利用的，与参振光进行有效的耦合放大，形成缓后沿的信号光脉冲输出。在该实验的基础上，我们可以认为：在 $1.06 \mu\text{m}$ 激光抽

运非临界相位匹配 KTP OPO 中, 当抽运激光脉宽在 1~ 6 ns 范围内变化的情况下, 输出脉冲宽度也应该

是从小于 1~ 6 ns 范围内可调的, 并且能够保证脉冲前沿较陡, 后沿较缓的形状。

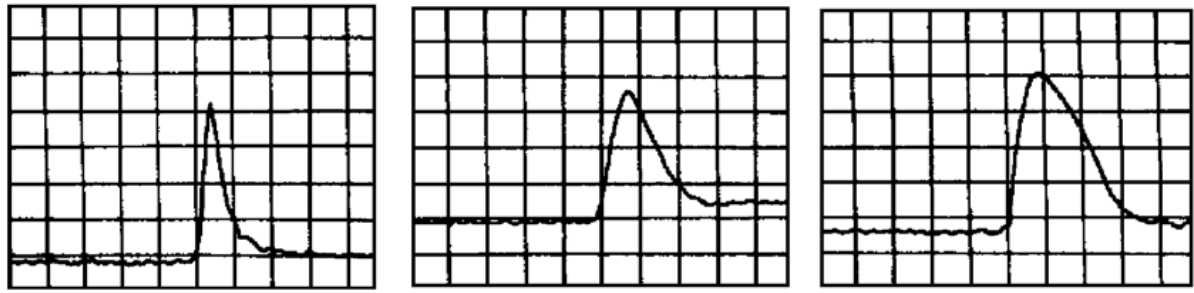


图 3 输出信号光脉冲波形
Fig. 3 Pulse shapes of the output signal

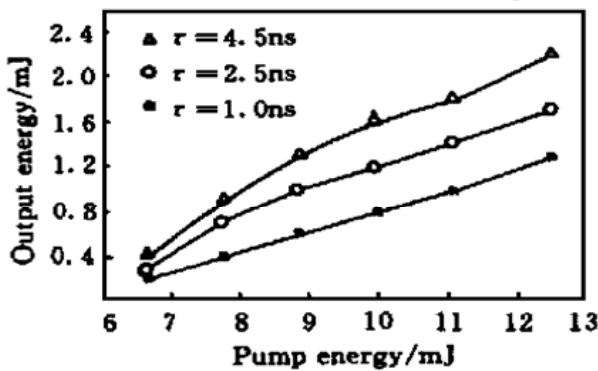


图 4 输出能量随抽运能量变化关系
Fig. 4 Output energy versus pump energy

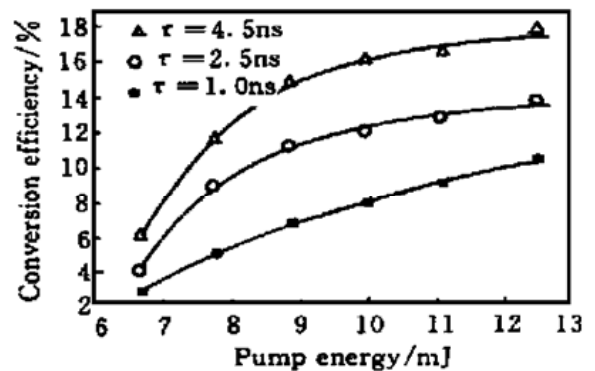


图 5 转换效率随抽运能量变化关系
Fig. 5 Conversion efficiency versus pump energy

3.2 光学参量振荡器的能量输出特性和转换效率

在激光器工作状态不变条件下, 抽运能量的变化是通过旋转放置在 OPO 腔镜的前端二分之一波片来实现的。图 4, 5 分别为输出能量和能量转换效率随抽运能量的变化关系曲线(图中的 Δ , \circ , \blacksquare 对应不同抽运脉冲宽度时的实验点; 曲线为实验点拟合曲线), 参量输出的能量和转换效率随抽运能量的增加而增加, 在相同的抽运能量下, 脉冲宽度越宽, 输出的信号光能量越大, 转换效率越高。在脉宽 1 ns 的条件下, 当抽运功率达到 12.5 MW 时, 转换效率才为 9.7%, 增加脉宽到 4.5 ns, 抽运功率刚为 2 MW, 转换效率就已达 14%。从图 6 中也可以看出, 对应相同的输出功率, 脉冲宽度越宽, 所需的抽运功率越低, 说明了虽然 OPO 的增益与抽运功率成正比, 抽运功率越高, 参量增益越大, 当脉宽较宽, 功率较低时, 参量增益较小, 但是参量光在 OPO 谐振腔内与抽运光的相互作用时间较长, 经过多次耦合放大, 仍然可以得到较高的输出功率, 获得较高的转换效率。相比之下, 利用较宽脉冲抽运比窄脉冲高功率抽运更容易获得高功率信号光脉冲。

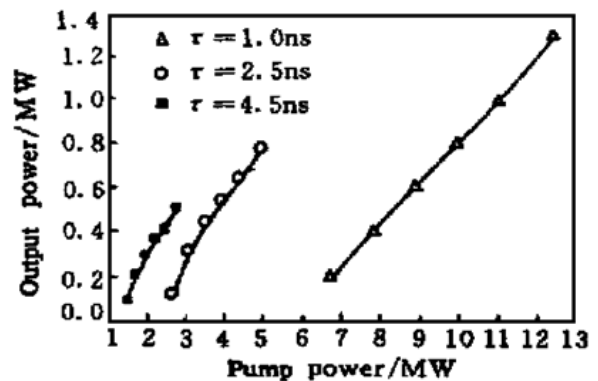


图 6 输出功率随抽运功率变化关系
Fig. 6 Output power versus pump power

3.3 光学参量振荡器的阈值特性

根据 S. J. Brosnan 等给出的 OPO 的阈值能量密度经验公式^[8]

$$T = \frac{2.25}{kg_s \zeta^2} \tau \left[\frac{L}{2\tau_c} \ln \frac{p_n}{p_o} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 2 \right]^2$$

这里 $k = \frac{2\omega_s \omega_i d_{\text{eff}}^2}{n_s n_i n_p \epsilon_0 c^3}$, 下标 p, s, i 分别代表抽运光、信号光、闲置光, 有效非线性系数 $d_{\text{eff}} = 7.6 \times 10^{-12}$

m/V, 高斯膜空间耦合系数 $g_s = 0.9$, ζ 为有效参量增益长度, 在非临界相位匹配走离角为 0 的情况下, 近似为晶体的长度, α 为场吸收系数为 0.0025 cm^{-1} , τ 为抽运光脉宽, R 为 OPO 腔输出镜对信号光的反射率为 80%, $p_n/p_o = 33$ 为达到阈值时(信号光脉冲能量达到 $100 \mu\text{J}$) 信号光与初始噪声功率之比, $L = 27 \text{ mm}$ 为 OPO 的腔长, $l = 25 \text{ mm}$ 为晶体长度, 抽运光斑直径约为 1.4 mm 。由此计算得到的 OPO 的阈值能量密度随脉宽变化的曲线如图 7 所示, 实线为理论计算曲线; 实点为实验多次测量平均值; 从图中可以看出, 二者在误差允许范围内吻合得较好。在脉冲宽度逐渐增加的过程中, 阈值能量密度呈线性增长, 但达到阈值时所需的功率密度相差不多(0.045 MW/cm^2), 而输出信号光的功率相差较大, 脉宽增大几倍, 输出的功率增加几倍。说明脉宽越宽, 在相同的抽运功率下, 输出的信号光功率越高。与图 6 中脉宽不同时输出曲线趋势相吻合。

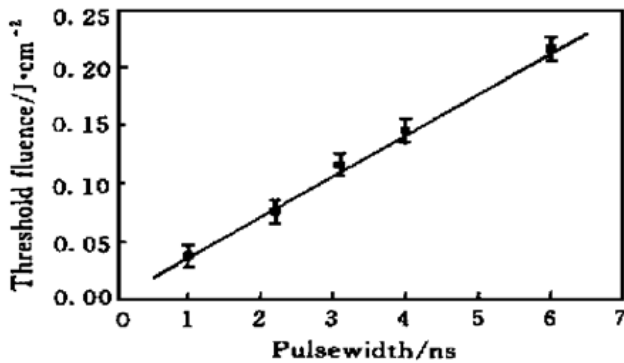


图 7 KTP OPO 阈值能量密度随脉宽变化的曲线

Fig. 7 Threshold energy fluence of SRO KTP OPO with the function of pulse width

4 结 论

在 OPO 发展日臻成熟的今天, 调谐范围、输出能量、转换效率在不断提高的同时, 人们利用各种方法对 OPO 的输出指标进行控制, 如利用线宽压缩技

术(F-P, 光栅, 棱镜等) 获窄线宽输出, 利用高重复频率、连续或者同步抽运技术, 得到高重复频率、连续或者超短脉冲光参量输出。而本文通过对振-放双池 SBS 脉宽可调激光系统抽运非临界相位匹配 KTP OPO 的实验研究, 获得了脉宽从 1~ 6 ns 可调参量激光, 实验结果证明该方法是完全可行和有效的。在进一步的实验中, 通过对 SBS 后向光脉冲进行放大, 将增大抽运能量, 会获得更高的参量光转换效率。

参 考 文 献

- 1 A. Englander, R. Lavi, M. Katz *et al.*. Highly efficient doubling of a high-repetition-rate diode-pumped laser with bulk periodically poled KTP. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(21): 1598~1599
- 2 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tunable Technology. Beijing: Science Press, 1995. 177~178
- 3 Tolga Kartaloglu, Kahraman G. Kodurlu, Orhan Avtur *et al.*. Femtosecond optical parametric oscillator based on periodically poled KTiOPO₄. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(1): 61~63
- 4 V. V. Krusas, A. S. Piskarskas, V. I. Smilgyavichyus *et al.*. High power subnanosecond optical parameter oscillator pumped by a laser with a stimulated Brillouin scattering compressor. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1987, **17**(8): 1054~1055
- 5 Wang Yuezhu, Liu Qiang, Yao Baoquan *et al.*. High efficient optical parametric oscillator pumped by SBS phase conjugation beam. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(9): 1176~1179 (in Chinese)
- 6 Liu Qiang, Ju Youlun, Wang Yuezhu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering phase conjugate resonator and internal optical parametric oscillator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8): 1089~1093 (in Chinese)
- 7 A. Matveyev, J. Partin, G. Pasmanik *et al.*. Formation of 1- to 2-ns high-energy OPO/OPA pulse. Conference on Laser and Electro-Optics, 1998. Eupore-Technical Digest, 191
- 8 Stephen J. Brosnan, Robert L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and Linewidth studies. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6): 415~431