

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0045-05

相位共轭激光对光学参变振荡器阈值影响的分析*

姚宝权 王月珠 柳 强 王 骥

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

摘要 : 实验上利用受激布里渊散射相位共轭 Nd:YAG 激光器抽运 KTP 非临界相位匹配 ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0$) 光学参变振荡器, 起振阈值比用普通激光器抽运降低 50%。理论上根据受激布里渊散射后向散射光的空间、时间分布特性, 即光束质量的改善和特殊的窄脉宽、陡前沿脉冲分布, 分析了这些因素对单共振光学参变振荡器阈值性能的影响。

关键词 : 受激布里渊散射; 相位共轭; 光学参变振荡器; KTP

中图分类号 : O437.2 文献标识码 : A

1 引 言

光学参变振荡器(OPO)作为一种波长可调谐的相干光源,其引人瞩目的性能是其宽带可调谐性。由于优良的非线性晶体 BBO、KTP、KTA、ZnGeP₂、AgGaSe₂ 的出现以及作为抽运源的固体激光器性能的提高,其可调谐范围极宽,从紫外一直到远红外 12 μm ^[1],因而可应用于 CARS(相干反斯托克斯拉曼散射)谱测量、激光分离同位素、人眼安全测距仪,军事上可应用于红外干扰、成像等领域。单共振光学参变振荡器激光输出稳定性好,转换效率高,所以应用也较双共振的光学参变振荡器更为广泛。而单共振光学参变振荡器对抽运激光器的功率密度、光束质量要求较高,波前畸变严重、光束质量差的抽运光会极大地增加光学参变振荡器阈值,从而导致能量转换效率降低。

激光系统中采用受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术,不但能补偿激光放大级因为热效应梯度折射率及晶体不均匀性引起的激光束波前畸变,改善光束质量,而且还具有脉冲整形作用,如脉宽被压缩、前沿陡化等^[2]。受激布里渊散射相位共轭光抽运光学参变振荡器,可起到降低起振阈值,提高参变转换能量效率的作用^[3]。

本文利用单共振光学参变振荡器阈值的理论模型,数值模拟了参变光建立过程,分析了抽运脉冲的时间线型及光束空间模式对光学参变振荡器阈值的影响。

2 影响单共振 KTP 光学参变振荡器阈值因素的理论分析

2.1 阈值模型

抽运波无损耗条件下,信号光在光学参变振荡器谐振腔中建立、演化的过程可用耦合波方程描述^[4]。由耦合波方程可导出三波非线性耦合产生增益系数及阈值公式,Byer 等给出了阈值的解析表达式^[4],但该式仅适用于信号光和闲波吸收系数相同的情形。Nd:YAG 激光器基频光(1.064 μm)抽运非临界相位匹配(x 轴切割,晶体主轴与通光轴夹角 $\theta = 90^\circ$,与 x 轴夹角 $\varphi = 0^\circ$)的 KTP 光学参变振荡器时,输出信号光为 1.57 μm ,闲波为 3.29 μm 。KTP 晶体对抽运波和信号波吸收较小, $\alpha_s = 0.0025 \text{ cm}^{-1}$,而对闲波的吸收系数相当大, $\alpha_i = 0.45 \text{ cm}^{-1}$,15 mm 长的 KTP 晶体在闲波 3 μm 左右的透过率经我们测量仅有 20% ~ 30%。此时增益表达式为^[5] :

$$G = \frac{\exp(-\bar{\alpha}z)}{2} \left\{ \left[1 + \frac{(\Delta\alpha/2)^2}{|2b|^2} \right] \cosh(\beta z) + \left[1 - \frac{(\Delta\alpha/2)^2}{|2b|^2} \right] + \frac{2}{|2b|^2} (\beta\Delta\alpha/2) \sinh(\beta z) \right\} \quad (1)$$

其中

$$\beta = [(2\gamma)^2 + (\Delta\alpha/2)^2]^{1/2},$$

$$|2b|^2 = (2\gamma)^2 + (\Delta\alpha/2)^2,$$

$$\bar{\alpha} = (\alpha_s + \alpha_i)/2,$$

$$\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_i,$$

$$\gamma = \sqrt{\kappa g_s I_p},$$

$$\kappa = 2w_s w_i d_{\text{eff}}^2 (n_s n_i n_p \epsilon_0 c^3),$$

$$g_s = w_p^2 (w_s^2 + w_p^2).$$

* 国家自然科学基金(69388002)资助课题。

E-mail : yccg@public.hr.hl.cn

收稿日期 2000-09-04; 收到修改稿日期 2001-01-15

式中,下标 s, i, p 分别代表信号光、闲光和抽运光, z 为光在晶体内的传输距离, d_{eff} 为有效非线性系数, g_s 为信号光与抽运光的高斯模耦合系数。由于抽运光强 I_p 是时间 t 的函数,因而增益系数也是时间 t 的函数。以信号波在谐振腔中往返一周为时间间隔,将高斯型抽运脉冲分成若干个时序($I_{p,m} = I_0 \times \exp[-\chi(t_m/\tau)^2]$, τ 为峰值功率 $1/e^2$ 处的半宽度),在一个时间间隔内(即信号光在腔内往返一周)抽运功率密度是不变的。当增益大于光学参变振荡器腔中的各种损耗,参变光从噪声功率水平按(2)式逐渐放大,并建立起振荡:

$$P_m = R(1 - R_c)^m \exp(-4\alpha_s l) p_{m-1} G(t_{m-1}), \quad (2)$$

P_m 为信号光在腔内往返 m 周后获得的功率, R 为输出镜对信号光的反射率, R_c 为晶体一个端面的反射损耗, l 为晶体长度。为与实验相对照,阈值定义为信号光输出能量 $100 \mu\text{J}$, 此时给出阈值功率与噪声功率的比值 $\ln(P_0/P_N) = 33$ 。从(2)式出发,我们数值模拟了参变光的建立过程,并从脉冲宽度、脉冲形状的非对称性、光束的空间耦合系数三个方面分析了降低单共振 KTP 光学参变振荡器阈值的途径。

2.2 脉冲宽度

脉冲宽度是影响阈能量密度的一个重要因素,脉宽窄意味着同样能量密度下,脉冲峰值功率密度大,与光强有关的增益系数也随之增大,信号光往返一周可获得尽可能的放大,因而能够较快地从初始参变噪声($5.16 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2$)中建立起参变振荡。从图 1 可看出,脉宽越窄,阈能量密度越小。因此压缩激光脉宽可降低光学参变振荡器阈值。

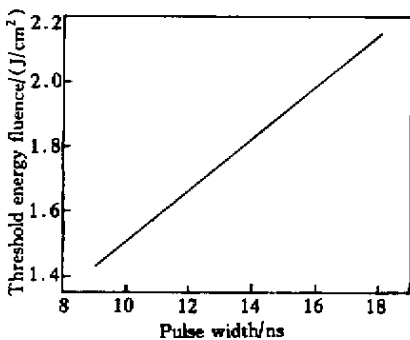


Fig. 1 Threshold energy fluence of singly resonant KTP OPO versus the pulse width. $g_s = 0.85$

2.3 脉冲轮廓非对称性

从图 2 可看出,整个脉冲宽度不变条件下,抽运脉冲上升沿越陡,下降沿越缓,即 τ_1/τ_2 的比值越小(τ_1 为上升段峰值 $1/e^2$ 的半宽度, τ_2 为下降段峰值

$1/e^2$ 的半宽度),信号光的建立时间缩短,阈能量密度降低,而峰值功率密度也同时降低。这与单纯为降低阈值而减小脉冲宽度,从而导致峰值功率密度增加不同,它可减小抽运激光峰值功率密度达到晶体损伤阈的危险性。

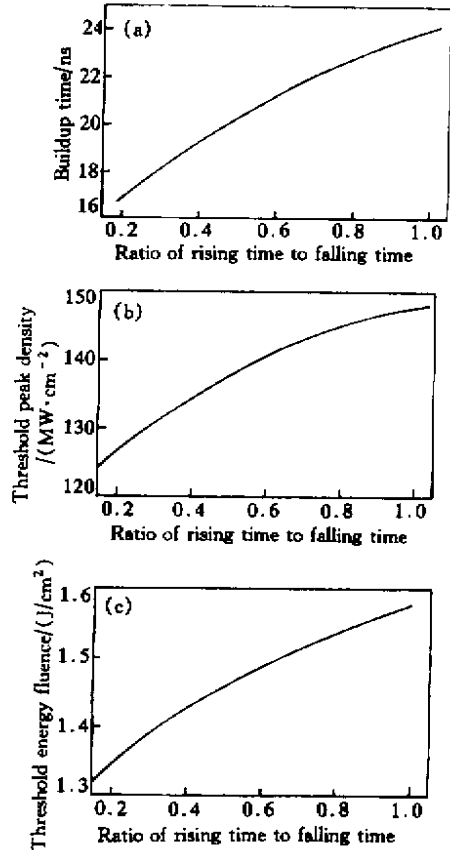


Fig. 2 Dependence of buildup time (a), threshold peak power (b), and threshold energy fluence (c) of singly resonant KTP OPO upon ratio of rising time (τ_1) to falling time (τ_2) of pump pulse. $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 10 \text{ ns}$, $g_s = 0.85$

陡前沿、缓后沿形式的非对称脉冲对参变振荡的贡献是: 1) 快速达到阈峰值功率密度, 克服参变噪声, 形成自持脉动; 2) 利用缓后沿保持的较高增益系数对已形成的自持脉动信号脉冲有效放大。因而有利于对称陡前沿、缓后沿脉冲尽快建立参变振荡, 维持高增益系数, 从而降低单共振光学参变振荡器的阈值。

2.4 抽运光束空间模式

在信号光的建立过程中,多个横模在相互竞争中产生振荡,不排除每一个模都振荡的可能性。无论方型镜产生的高阶厄米高斯光束还是圆形镜产生的高阶拉盖尔高斯光束,抽运光学参变振荡器产生的参变光必将是多横模的。在建立过程中,多模自洽场中信号光单个瓣模半径由(3)式决定^[6]:

$$\left(\frac{\pi}{2L\lambda_s}\right)^2 w_s^6 + w_s^2 - \frac{w_p^2}{3.6\sqrt{n}} = 0. \quad (3)$$

光学参变振荡器的腔长 $L = 30 \text{ mm}$, $n > 0$ 代表横模阶数, $\lambda_s = 1.57 \text{ }\mu\text{m}$, w_p 为抽运波高斯模半径, w_s 为信号波各瓣膜高斯模半径, 信号光的 n 阶横模半径为 $w_{s,n} = 1.8 w_s \sqrt{n}$. 抽运光与信号光之间的高斯模耦合系数 g_s 表达式为

$$g_{s,n} = \frac{w_p^2}{w_p^2 + w_{s,n}^2}. \quad (4)$$

图 3 显示了不同抽运光束半径, 不同阶横模的 g_s 值变化规律. 从图 3 可以看出, TEM_{00} 模的耦合系数最大, 多阶横模导致高斯模耦合系数减小. 多横模抽运光学参变振荡器, 在参变建立过程中产生的信号光光束不能与抽运光有效耦合, 因而会导致增益降低, 起振阈值增加, 如图 4 所示. 利用光束质

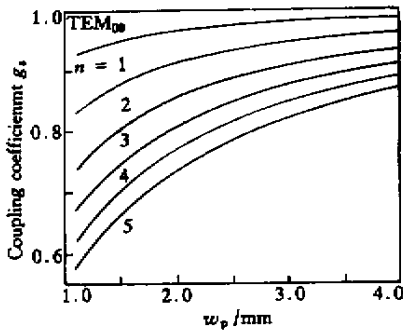


Fig.3 Coupling coefficients of TEM_{00} and high order mode versus pump beam radius

量好的单横模激光, 能够使单共振光学参变振荡器低阈值运转.

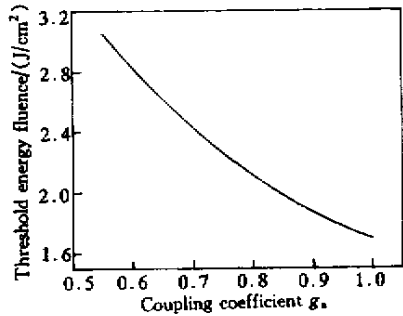


Fig.4 Threshold energy fluence of KTP OPO versus coupling coefficient

3 实验及分析

图 5 为 Nd:YAG 相位共轭激光系统抽运 KTP 光学参变振荡器实验装置: 线偏振光经格兰棱镜和 $\lambda/4$ 波片入射到受激布里渊散射池中, 受激布里渊散射池中装有具有较高增益、并且对 $1.06 \text{ }\mu\text{m}$ 激光的吸收系数较小的 CS_2 介质, 由受激布里渊散射池中产生的后向相位共轭光经激光放大级放大后, 再由聚光透镜会聚成直径为 2.5 mm 的光斑沿 KTP 晶体的 x 轴入射到光学参变振荡器谐振腔中. 光学参变振荡器输入耦合镜 M_1 在 $1.06 \text{ }\mu\text{m}$ 附近高透 ($T \geq 95\%$) 在 $1.57 \text{ }\mu\text{m}$ 附近全反 ($R > 99\%$); M_2 在 $1.57 \text{ }\mu\text{m}$ 附近的 $R \approx 80\%$.

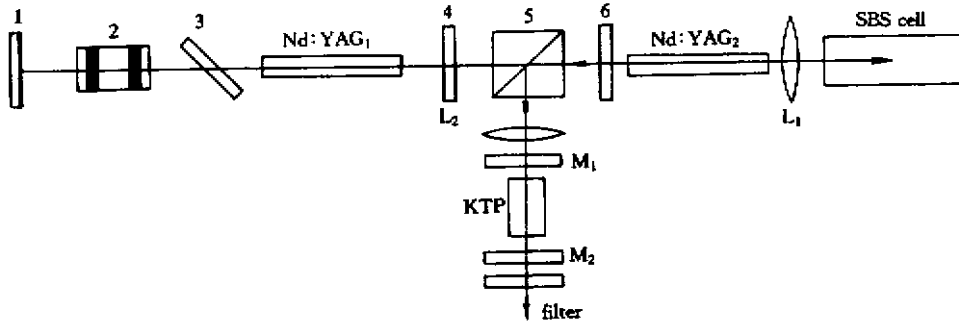


Fig.5 Experimental setup of KTP optical parametric oscillator pumped by SBS phase conjugate Nd:YAG laser. 1: HR mirror ($R = 99.8\%$ for $1.064 \text{ }\mu\text{m}$); 2: electrooptical Q-switch; 3: polarizer; 4: output-coupling mirror ($R = 8\%$ at $1.064 \text{ }\mu\text{m}$); 5: Glan prism; 6: quarter-wave plate for $1.064 \text{ }\mu\text{m}$; L_1 : lens of focal length 10 cm ; L_2 : lens of focal length 50 cm ; M_1 and M_2 : OPO input and output-coupling mirrors

为证实受激布里渊散射相位共轭效应, 实验中测量了共轭光脉冲的时间线型和空间光束形状并与非共轭光进行了比较, 结果如图 6、图 7 所示. 脉宽的测量用快响应 PIN 管 (上升时间 1 ns), 光束空间分布的测量采用美国 Spiricon 的 LBA-100A 激光束

分析仪. 受激布里渊散射后向散射光脉冲较 Nd:YAG 振荡级激光脉冲宽度压缩 1.4 倍, 脉冲前沿明显陡化 (上升时间约 4 ns), 后有拖曳现象, 上升时间与下降时间之比为 $2/3$. 后向散射光的建立是一个非线性过程, 随着受激布里渊散射池中入射激光

强度的增加,这个过程迅速达到饱和,入射光高效转换为后向散射光,导致脉冲前沿陡化^[7]。

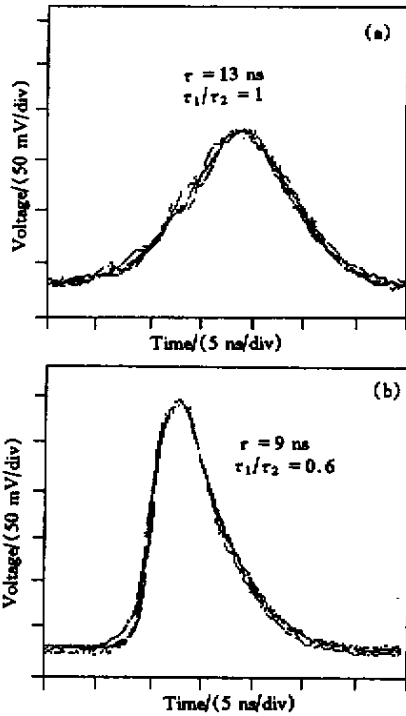


Fig. 6 Oscilloscope traces of main oscillator (a) and SBS phase-conjugate pulse (b) of Nd:YAG laser

图 7 为于远场(10 m)处测量的非相位共轲多模(4~5个横模)光斑和相位共轲单横模光斑分布。受激布里渊散射是一种高阈值非线性过程,多横模

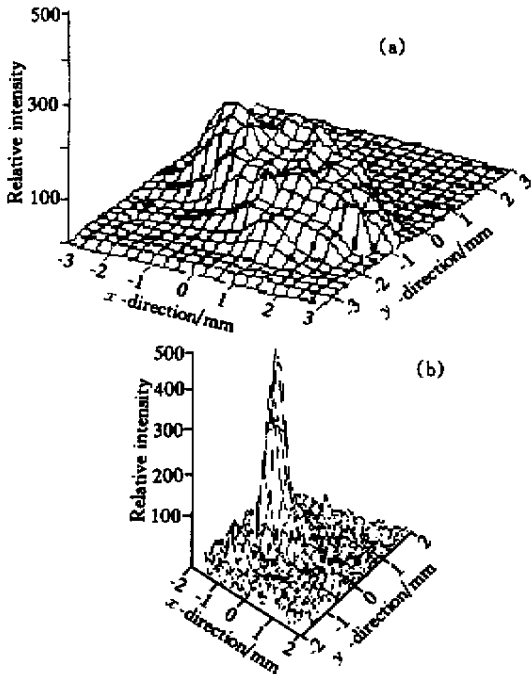


Fig. 7 Beam profile of multimode non-conjugate light (a) and SBS phase conjugate light (b)

激光入射进受激布里渊散射池中,光强较弱的旁模因为没有达到阈值而不能产生后向散射光,只有较强的瓣膜被选择出产生相位共轲光,短池、短焦距的相位共轲镜对多横模的选择作用更明显。相位共轲光由于补偿了波前畸变及高阈值的影响,光束质量改善,远场发散角被压缩一倍,亮度得以提高。

在相同的聚焦条件下,利用受激布里渊散射相位共轲激光器抽运 KTP 光学参变振荡器的振荡阈值为 22.5 mJ,最高能量转换效率为 32%(输出的 1.57 μm 激光能量与参与抽运的相位共轲激光能量的比值);用平行平面腔结构的多横模 Nd:YAG 激光器抽运的阈值为 44.4 mJ,最高转换效率为 19.2%,且转换效率随抽运能量的增加很快趋于饱和。相位共轲光抽运,阈值较非相位共轲光降低约 50%,效率提高 1.9 倍。

从以上实验测量结果可知,受激布里渊散射相位共轲光与非相位共轲光相比,脉宽压缩(从 13 ns 被压缩到 9 ns),脉冲形状具有陡前沿缓后沿型的非对称性(上升沿与下降沿时间比值为 2/3),光束质量的改善引起高斯模耦合系数的增大(抽运光束直径为 2.5 mm,二阶横模为 $g_s = 0.77$,零阶横模为 $g_s = 0.95$)。按照影响单共振 KTP 光学参变振荡器阈值理论分析,将测量的数据带入(2)式,采用重复计算及区间寻根,并根据界定条件 $\ln(p_0/p_N) = 33$,计算脉宽压缩、脉冲轮廓非对称性、光束质量改善对光学参变振荡器阈值降低的贡献分别约为 20%、4% 以及 21%。受激布里渊散射相位共轲光脉宽的压缩和光束质量的改善,对光学参变振荡器阈值降低的影响最大。因此在以后的实验中,我们将通过优化受激布里渊散射相位共轲系统,采用多程放大及多池结构,将受激布里渊散射脉冲上升时间缩短为 1 ns ~ 2 ns,提高峰值功率和光束亮度,从而进一步降低光学参变振荡器阈值。

结论 受激布里渊散射相位共轲光不但压缩了激光脉宽,而且形成特殊的优于普通高斯型脉冲的陡前沿脉冲,以及单横模高光束质量激光,这些因素都起到了降低光学参变振荡器阈值的效果,峰值功率的提高和光束质量的改善相比作用最大,为光学参变振荡器的高效运行提供了条件。

参 考 文 献

- [1] Hopkins F K. Nonlinear materials extend the range of high-power lasers. *Laser Focus World*, 1995, 31(7): 37 ~

93

- [2] Carr I D, Hanna D C. Performance of a Nd:YAG oscillator/amplifier with phase-conjugation via Stimulated Brillouin Scattering. *Appl. Phys. (B)*, 1985, **36**(2):83 ~ 92
- [3] 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)
- [4] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **QE-15**(6):415 ~ 431
- [5] Terry J A C, Cui Y, Yang Y *et al.*. Low-threshold operation of an all-solid-state KTP optical parametric oscillator. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(5):758 ~ 769
- [6] Marshall L R, Kaz A, Aytur O. Multimode pumping of optical parametric oscillators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **QE-32**(2):177 ~ 182
- [7] Han Yong, Tan Jichun, Ding Lei *et al.*. Temporal characteristics of Brillouin back-scattering pulses from a cell with focus geometry. *Chinese J. Lasers*(*中国激光*), 1999, **A26**(5):405 ~ 409

Analysis of Influence of Phase Conjugate Laser upon the Threshold of Optical Parametric Oscillator

Yao Baoquan Wang Yuezhu Liu Qiang Wang Qi

(*National key laboratory of tunable laser technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

(Received 4 September 2000 ; revised 15 January 2001)

Abstract : The threshold of singly resonant KTP ($\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$) optical parametric oscillator was reduced significantly (about 50%) by use of stimulated Brillouin scattering (SBS) phase-conjugate Nd:YAG laser as a pumping source comparing with the use of conventional multimode pumping source. Theoretical analysis shows that the OPO's threshold energy fluence depends on the pulse width, non-symmetrical temporal profile (sharp leading edge), and beam mode structure. The compressed pulse-width, sharp leading edge and single spatial mode with good beam quality contribute to the OPO's threshold reducing.

Key words : stimulated Brillouin scattering ; phase conjugation ; optical parametric oscillator ; KTP