

文章编号: 0253-2239(2006)04-0611-5

高稳定高转换效率光参变放大器倍频抽运光源研究*

康 俊 陈绍和 朱健强 韦 辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 为了实现光参变放大抽运光源高稳定输出的目的。通过对倍频过程的数值模拟分析, 提出倍频中存在“稳定区”的概念, 在基频光强一定的条件下(小于倍频晶体破坏阈值), 通过非共线双程倍频的方式或串联倍频的方式可有效延长倍频晶体的有效作用长度, 保证倍频工作区能够被控制在“稳定区”内, 从而实现高稳定高转换效率的倍频输出。实验数据验证了这一结论, 实验中, 利用非共线双程倍频的方式使得倍频工作区在“稳定区”内, 对波动 $\pm 5.7\%$ 的 1064 nm 高斯脉冲基频光, 倍频光波动小于 $\pm 2\%$, 脉冲形状为高阶高斯脉冲, 转换效率大于 70%, 实验结果表明, 倍频光的稳定性指标相对于基频光提高了近 3 倍。

关键词: 非线性光学; 光参变放大; 非共线双程倍频; 输出稳定性

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Highly Stable Second-Harmonic Pumping Source with High Conversion Efficiency for Optical Parametric Amplifier

Kang Jun Chen Shaohe Zhu Jianqiang Wei Hui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: To improve the stability of pumping source of optical parametric amplifier, the concept of stable area in the frequency-doubling is proposed, with the numerical simulation of the frequency doubling process. Under certain intensity of the fundamental light, less than the breakdown threshold of the frequency-doubling crystal, the valid length of the frequency-doubling crystal is prolonged with the nonlinear two-pass frequency-doubling or the tandem frequency-doubling, with which the frequency-doubling course is located in the stable area and the highly stable second harmonic output with high conversion efficiency is realized. The experiments prove the above conclusion, and in the experiment the nonlinear two-pass frequency-doubling method is used to ensure the work area of the frequency-doubling in the stable area. The fluctuation of the second harmonic is less than $\pm 2\%$ for the 1064 nm fundamental Gaussian pulse with fluctuation $\pm 5.7\%$, and the conversion efficiency exceeds 70% for high-order Gaussian pulses. The experimental results show that the stability of the second harmonic is near 3 times higher than that of the fundamental light.

Key words: nonlinear optics; optical parametric amplification; noncollinear two-pass frequency doubling; stability of laser output

1 引 言

近年来, 利用光学参量啁啾脉冲放大技术得到超强超短激光脉冲成为人们研究的重点^[1~5]。随着研究的深入, 如何实现高功率超短脉冲稳定输出的问题成为一个很重要的考虑因素^[1,6]。目前, 提高输出稳定性所采用的方法有两种, 一种是仔细设计

非线性晶体的长度及输入信号光强度与抽运光源强度的关系, 使得工作的区域位于稳定范围之内^[7,8]; 另一种就是提高信号源本身的稳定性和抽运光源的稳定性。相比较而言, 抽运源的稳定性对于系统稳定性的影响更为关键。理论计算表明, 不稳定的抽运光源可造成很大的输出起伏, 在非稳区, 10% 的抽

* 国家 863 计划(2005AA842010)资助课题。

作者简介: 康 俊(1970~), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光参变放大和激光脉冲整形的研究。E-mail: kangjun@siom.ac.cn

收稿日期: 2005-07-15; 收到修改稿日期: 2005-09-15

运光强起伏造成放大后信号光的变化幅度达44.5%之多,即使工作在稳定区,实验值也有±5.7%的起伏^[8]。稳定的平顶绿光抽运源是最为理想的光参变放大系统抽运光源,在目前文献报道中,整形装置很复杂,且对倍频前的1064 nm基频光源稳定性要求很高^[9]。

本文提出倍频过程存在“稳定区”的概念,通过理论计算找到了该区,并在实验中得到证实。据此找到了一种简捷地获取高功率高稳定输出的近平顶光参变放大抽运光源的设计方式。利用非共线双程倍频的方法,使得倍频工作在稳定区内,从而获得了近平顶的高阶高斯脉冲稳定倍频抽运源输出。实验中,稳定区工作条件下,稳定性指标相对于基频光提高了近3倍,且转换效率大于70%。以此输出作为光参变放大系统的绿光抽运源,将大大改善光参变放大系统的输出稳定性。

2 理论分析

在无限大平面波近似下,二倍频的理论描述可从耦合波动方程出发,在慢变振幅的近似条件下,得到归一化的耦合方程组^[10,11]:

$$\begin{cases} du_1/d\xi = -u_1 u_2 \sin \theta, & (1a) \\ du_2/d\xi = u_1^2 \sin \theta, & (1b) \\ d\theta/d\xi = \Delta S + \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right) \frac{d}{d\xi} [\ln(u_1^2 u_2)], & (1c) \end{cases}$$

式中下标值为1和2,分别对应基频抽运光与倍频光的情况。 u_i ($i=1,2$)为相应光的归一化振幅,分别定义为

$$\begin{cases} u_1 = [I_1/(2\omega_1 W)]^{1/2}, & (2a) \\ u_2 = [I_2 \cos^2 \beta/(\omega_2 W)]^{1/2}, & (2b) \\ W = I_1(0) + I_2(0) \cos^2 \beta, & (2c) \end{cases}$$

式中 β 为抽运光走离角, I_i 为相应的光强, $I_i(0)$ 为初始光强, ω_i 为相应角频率。

$$\Delta S = \Delta k z / \xi, \quad (2d)$$

$$\theta = \Delta k z + \Phi_2 - 2\Phi_1, \quad (2e)$$

$$\xi = \frac{4d_{\text{eff}} \pi (\pi W)^{1/2} z}{\epsilon_0 \lambda_1^2 \lambda_2 n_1^2 n_2 \cos^2 \beta}. \quad (2f)$$

波沿 z 轴传播, $\Delta k = k_2 - 2k_1$ 为其相位失配, d_{eff} 为BBO晶体相应的有效非线性系数。 Φ_i 为初始位相。 n_i 为相应的折射率。

方程(1)的解析解,一般用(3)式来表示^[10,11]:

$$\begin{cases} I_1(z) = I_1(0) \tanh^2(z/L_{\text{SH}}), & (3a) \\ I_2(z) = I_2(0) \text{sech}^2(z/L_{\text{SH}}), & (3b) \end{cases}$$

式中定义长度因子 $L_{\text{SH}} = u_1(0)\xi/z$ 。

(3)式表明,在相位完全匹配条件下,基频光经过一段长度的倍频晶体后,可全部转换为倍频光,基频光强越强,所需要的晶体长度越短。

用龙格-库塔方法对(1)式进行数值计算。模拟计算的条件是,BBO晶体满足I类相位匹配条件,抽运基频光波长1064 nm,倍频光波长532 nm,抽运光光强取值为 $I_p = 0.2 \text{ GW/cm}^2$ 。

由图1可见,当基频光全部转化为倍频光之后,随着晶体长度的增加,倍频光重新又开始反转为基频光,由(3)式得到的解析计算结果(图中虚线)在此时与数值计算的结果(图中实线)发生了偏离,解析计算结果没有反映出基频光与倍频光反转的情况,故以数值计算结果来描述倍频的物理机制更为准确。

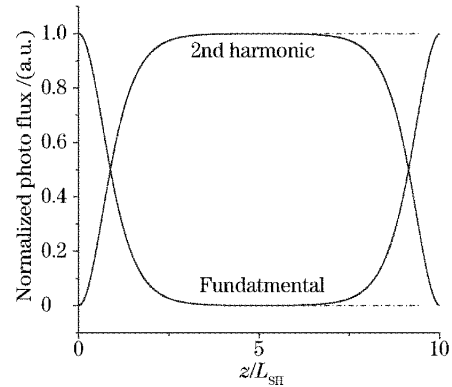


图1 归一化基频光与倍频光光强数值计算值与解析解的曲线

Fig. 1 Calculated normalized fundamental and second harmonic intensity comparison with analytical solution

对倍频过程进行模拟计算,初始基频光光强设定为 0.2 GW/cm^2 ,对基频光光强变化-10%、-5%、5%和10%的倍频输出情况分别进行模拟,计算结果如图2所示。

图2(a)给出了对应于不同的基频光输入光强情况下(变化范围±10%)倍频光光强的变化曲线。由图可知,位置A以前,倍频光由零达到饱和输出;A到B的区域内,倍频光达到饱和,基频光基本都转换为倍频光输出;B到C区,这时出现“能量倒流”,部分倍频光的能量开始转换回基频光。C位置存在一个交叉汇聚区,在这个区域,输入基频光光强的波动对于倍频光输出的影响很小,故称之为倍频“稳定区”。当BBO晶体长度设计在该区域,在上述初始条件下,基频光强的波动对倍频光输出稳定性的影响可得到有效控制。

以输出倍频光的变化幅度来衡量输出稳定

性,令 $\Delta(z)=[I_{sp}(z)-I_{s0}(z)]/I_{s0}$,式中 $I_{s0}(z)$ 为不考虑基频光波动时候在 z 处倍频光光强大小, $I_{sp}(z)$ 为存在基频光波动情况下,晶体中 z 处倍频光光强。 Δ 值为零时表示输出信号光稳定性最好。图 2(b)给出了在 BBO 晶体中不同长度位置处倍频光波动的变化曲线。图中可知,A 以前,倍频光的波动范围大于基频光的波动范围;A 到 B 区域,倍频

光的波动范围大致与基频光的波动范围一致;B 到 C,倍频光的波动范围小于基频光的波动范围;在 C 区(稳定区),倍频光输出稳定性得到明显改善(当输入基频光光强变化 $\pm 10\%$,倍频输出的变化范围仅仅是 4% ;输入基频光光强变化 $\pm 5\%$,倍频输出的变化范围小于 1%)。

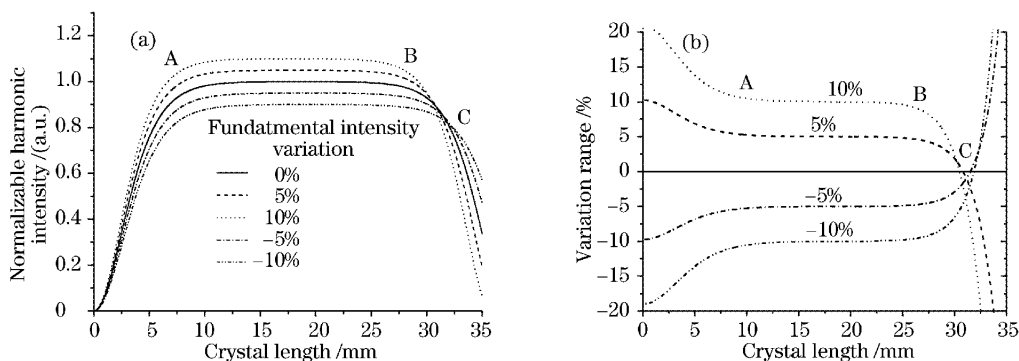


图 2 在不同的基频光光强情况下,归一化倍频光光强(a)及其变化幅度(b)

Fig. 2 The normalized intensity (a) and its variation range (b) of the second harmonic varying with the crystal length, under different fundamental intensity conditions

模拟计算表明,当入射基频光脉冲形状为高斯型,峰值光强为 0.42 GW/cm^2 ,BBO 晶体长度设计在 23 mm 附近时,相应的输出倍频光脉冲形状如图 3 所示,此时,输出倍频脉冲形状为近似平顶的高阶高斯脉冲,脉宽有一定的加宽。作为光参变放大抽运源,这一结果是相当有利的。

短为 20.6 mm 。

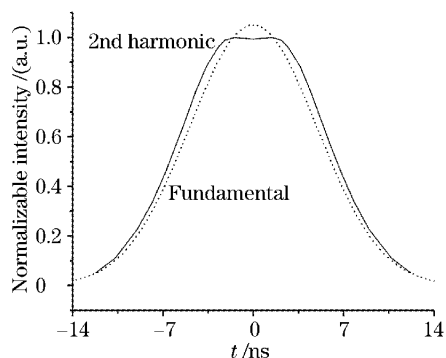


图 3 高斯脉冲形状的基频光输入情况下,模拟计算得到的高阶高斯脉冲形状倍频光输出

Fig. 3 Simulated plots of the high-order second harmonic Gaussian pulse with fundamental Gaussian pulse

图 4 给出了基频光光强变化与到达稳定区时所需要的 BBO 晶体合适长度的对应关系,图中表明,入射光强越大,所需要的晶体长度越短,对于脉冲宽度为 10 ns 的 1064 nm 入射基频光,BBO 晶体的破坏阈值为 0.5 GW/cm^2 ^[12],故而 BBO 有效长度最

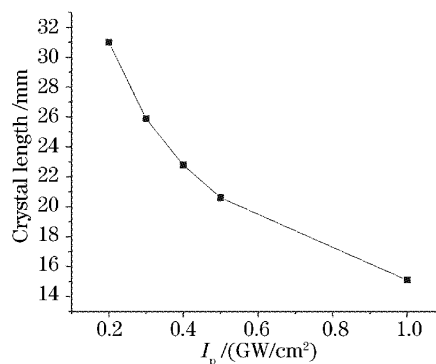


图 4 基频光光强与最佳晶体长度的关系曲线

Fig. 4 Dependence of the most appropriate crystal length on fundamental intensity

对于 BBO 晶体,考虑到晶体中光束容许角的影响,实际需要的 BBO 晶体有效作用长度大于 20.6 mm ,又由于晶体中光束走离角的影响,单块 BBO 晶体中耦合效率达不到要求,需要以两块 BBO 晶体串联^[13,14]或者双程^[15]的方式来延长晶体有效作用长度,实验中采用非共线双程倍频的方法来解决这一矛盾。与文献^[15]不同的是,我们在采用双程倍频时所采用的回程光路不是原路返回的,而是在 BBO 晶体的 ϕ 角方向有个偏离角,这样一方面补偿了单程引起的走离角的影响,另一方面可很容易引出倍频光束,利用 ϕ 角非共线双程倍频的方法,可

达到稳定倍频的工作条件。有关非共线双程倍频的讨论限于篇幅,我们将在另文中详细讨论。

3 实验和结果

在以上理论研究的基础上,进行了倍频高稳定性输出的实验,实验装置如图 5 所示,调 Q 激光器产生单纵模高斯脉冲输出,经过放大后,经由一个 2:1 缩束

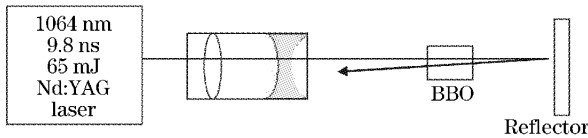


图 5 非共线双程倍频装置光路图

Fig. 5 Diagram of the noncollinear two-pass frequency-doubling configuration

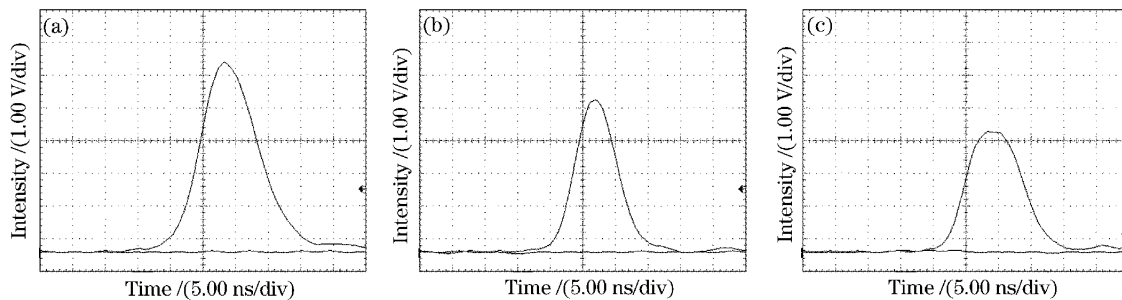


图 6 (a) 输入 1064 nm 基频光脉冲形状, (b) 单程倍频后得到的 532 nm 倍频光脉冲形状, (c) 双程倍频后得到的 532 nm 倍频光脉冲形状

Fig. 6 (a) The input pulse shape of 1064 nm fundamental, (b) the pulse shape of 532 nm second harmonic after single pass frequency-doubling through BBO, (c) the pulse shape of 532 nm second harmonic after two-pass frequency doubling through BBO

以此输出作为光参变放大系统的绿光抽运源,将降低对光参变放大系统的设计与调节要求,理论计算表明,即使参变放大工作在非稳定区,输出信号也可控制在 $\pm 8\%$ 之内,而稳定区内有望得到波动小于 1%的高稳定性光参变放大输出。

4 结 论

利用数值模拟的方法,对倍频输出稳定性的情况进行了分析,提出了获得高稳定高转换效率倍频光输出的方法,并在实验中得到验证。这一结果大大改善了光参变放大抽运光源的稳定性,为整体提高光参变放大系统的稳定高效输出提供了保证。

参 考 文 献

1 M. J. Guardalben, J. Keegan, L. J. Waxer *et al.*. Design of a highly stable, high-conversion-efficiency, optical parametric

镜进入一个 BBO 晶体 ($8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 12.5\text{ mm}$, $\theta=22.8^\circ$, $\phi=0^\circ$) 进行非共线双程倍频,测得输入能量大约 60 mJ,光斑直径为 2 mm,输出倍频光经过衰减后,由示波器来检测。图 6(a)为输入 1064 nm 的光束脉冲形状,图 6(b)为单程 BBO 倍频后输出的倍频光脉冲形状,图 6(c)为双程倍频后输出倍频光脉冲形状,可看到倍频光脉冲宽度相对于单程情况明显加宽,脉冲形状为近似平顶的高阶高斯脉冲。对于波动 $\pm 5.7\%$ 的 1064 nm 的基频光源,可得到光强波动小于 $\pm 2\%$,转换效率大于 70%的高稳定高转换效率的倍频高阶高斯脉冲,稳定性指标相对于基频光提高了近 3 倍。文献报道^[1,6],日本 GX II 装置与美国 OMEGA EP 装置光参变放大系统中所用的绿光抽运源波动为 $\pm 4\%$ 与 $\pm 5\%$ 。我们得到的倍频光的稳定性指标要高一倍多。

chirped-pulse amplification system with good beam quality[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2511~2524

2 Igor Jovanovic, Brian J. Comaskey, Christopher A. Ebberts *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15): 2923~2929

3 Y. X. Leng, X. D. Yang, H. H. Lu *et al.*. Temporal synchronization in optical parametric chirped pulse amplification laser system[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(12): 2994~2997

4 Peng Jiahui, Li Ruxin, Jin Shiqi *et al.*. Optical parametric chirped pulse amplifier with biaxial crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1153~1159 (in Chinese)

彭家晖,李儒新,金石琦等. 双轴晶体光学参变放大的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1153~1159

5 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study of noncollinearly phase-matched LiB_3O_5 femto-second optical parametric amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1195~1201 (in Chinese)

刘红军,陈国夫,赵卫等. 非共线相位匹配 LBO 晶体飞秒光参变放大器的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1195~1201

6 Yoneyoshi Kitagawa, Hisanori Fujita, Ryosuke Kodama *et al.*. Prepulse-free petawatt laser for a fast ignitor[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(3): 281~293

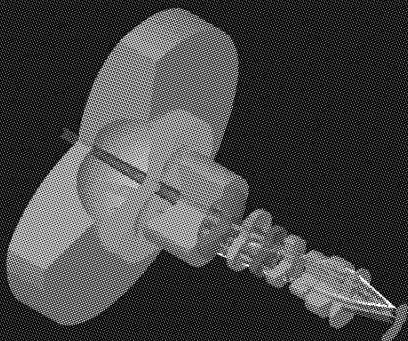
- 7 S. K. Zhang, M. Fujita, M. Yamanaka *et al.*. Study of the stability of optical parametric amplification[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **184**(5): 451~455
- 8 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. The generation of high efficiency and high stability parametric amplified light[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1): 105~113 (in Chinese)
刘红军, 陈国夫, 赵 卫 等. 高质量高效率高稳定性参量放大光产生的研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1): 105~113
- 9 L. J. Waxer, V. Bagnoud, I. A. Begishev *et al.*. High-conversion-efficiency optical parametric chirped-pulse amplification system using spatiotemporally shaped pump pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1245~1247
- 10 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuino *et al.*. Interaction between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 11 Richard A. Baumgartner, Robert L. Byer. Optical parametric amplification[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **15**(6): 432~444
12 <http://www.castech.com>
- 13 Cai Xijie, Dai Meilan, Lang Jiajun *et al.*. Large aperture high-efficiency frequency doubling using tandem KDP crystals [J]. *Acta Optic Sinica*, 1986, **6**(12): 1098~1104 (in Chinese)
蔡希洁, 戴美兰, 朗家俊 等. 大口径 KDP 晶体高效率串接倍频 [J]. *光学学报*, 1986, **6**(12): 1098~1104
- 14 D. J. Armstrong, W. J. Alford, T. D. Raymond *et al.*. Parametric amplification and oscillation with walkoff-compensating crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(2): 460~474
- 15 J. M. Yarborough, J. Falk, C. B. Hitz. Enhancement of optical second harmonic generation by utilizing the dispersion of air[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(3): 70~73

• 广告 •



光研科学有限公司

光学软件权威供应商



ZEMAX[®]
光学设计软件

TFCIac[®]
薄膜设计软件

欢迎致电或浏览网页
了解软件订购和课程安排详情

新加坡电话/传真: 65-65643659/65649627
南京电话/传真: 025-57929358/57929359
深圳电话: 0755-27698403

福州电话/传真: 0591-83730680/83721062
北京电话/传真: 010-67126765/67113155
<http://www.wavelab-sci.com>