

文章编号: 0258-7025(2004)12-1441-04

超短强激光作用下的 CsLiB₆O₁₀ 晶体的 光参量放大理论分析

王 丽¹, 韩秀友², 白晓东¹

(¹ 北京工业大学应用物理系, 北京 100022
² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 对超短强激光抽运波长为 355 nm, 脉冲宽度为 10 ps 的 CsLiB₆O₁₀ 光参量放大器(OPA)的最佳晶体长度、能量转换效率和输出信号光脉宽进行了理论分析和数值模拟。得到了在 $I_p(0) = 300 \text{ MW/cm}^2$, $I_s(0) = 5 \text{ MW/cm}^2$, $I_i(0) = 0$ 的情况下, 最佳晶体长度为 27.0 mm。随着抽运功率和信号光功率增大时, CsLiB₆O₁₀ 晶体作为光参量放大器的非线性晶体时, 其作用的晶体长度变得更短。高转换效率的信号光输出取决于抽运光和初始信号光的强度及晶体长度的最佳优化值。

关键词 非线性光学; CsLiB₆O₁₀ 晶体; 光参量放大; 超短脉冲; 转换效率

中图分类号 O 437.4 **文献标识码** A

Analysis of Optical Parametric Amplification with CsLiB₆O₁₀ for Ultra-Short Pulse

WANG Li¹, HAN Xiu-you², BAI Xiao-dong¹

(¹ Department of Applied Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China
² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Optimal crystal length, energy conversion efficiency and pulse width of output signal light of a CsLiB₆O₁₀ optical parametric amplifier that is pumped by an ultra-short high power laser with output wavelength of 355 nm and pulse width of 10 ps are theoretically analyzed and numerically simulated. It is presented that CsLiB₆O₁₀ crystal optimum length is 27.0 mm in the case of $I_p(0) = 300 \text{ MW/cm}^2$, $I_s(0) = 5 \text{ MW/cm}^2$, $I_i(0) = 0$. With increasing the pump power and signal power, CsLiB₆O₁₀ crystal length is shorter when it acts as nonlinear crystal of optical parametric amplifier. The signal power output of high conversion efficiency is depended on the optimum crystal lengths, pump intensity and signal power.

Key words nonlinear optics; CsLiB₆O₁₀ crystal; optical parametric amplification; ultra-short pulse; conversion efficiency

1 引 言

利用非线性光学晶体的光参量变化过程是激光研究领域产生高功率、激光变频的重要手段之一^[1~4]。在超短强激光作用于不同物质产生辐射的同时^[5], 小型全固化高功率变频器件不断研制开

发^[6~8]。而非线性光学晶体 CsLiB₆O₁₀ (CLBO) 是 1995 年研制成功的新型紫外晶体, 与常用的 BBO, LBO 相比, 该晶体具有生长周期短、体积大、抗损伤阈值高等优点, 是产生大功率紫外激光的优良晶体^[9,10]。光参量放大(OPA)恰好是利用非线性晶体的混频特性实现对信号光放大的过程, 由于无谐振

收稿日期: 2003-07-16; 收到修改稿日期: 2003-10-08

基金项目: 北京市教委基金(Km200310005022)资助项目。

作者简介: 王 丽(1958—), 女, 北京工业大学教授, 博士生导师, 从事新型激光变频器件、超短脉冲的非线性光学和光纤通信中的理论和应用研究。E-mail: Lwang. l@bjut. edu. cn

腔镜,所以更适合于超短强激光抽运的高重复频率深紫外激光器的研制和开发^[11]。它将在光信息储存、微加工技术领域有着广泛的应用。本文从三波耦合方程出发,对皮秒级 CLBO 光参量放大进行了理论分析,利用计算机数值模拟得到了最佳晶体长度、转换效率及信号光输出脉冲宽度的理论曲线。

2 理论分析

光参量放大过程中,频率为 ω_p 的抽运光和频率为 ω_s 的信号光共线入射 CLBO 晶体,通过晶体的非线性效应,抽运光的能量耦合到信号光,同时产生频率为 ω_i 的闲频光。在三波耦合过程中,满足能量守恒关系。在不考虑介质的吸收时,三波在非线性介质中的相互作用耦合波方程为^[12]

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{d\xi} &= -u_1 u_2 \sin\theta \\ \frac{du_2}{d\xi} &= -u_2 u_3 \sin\theta \\ \frac{du_3}{d\xi} &= u_1 u_2 \sin\theta \\ \frac{d\theta}{d\xi} &= \Delta S + \left(\frac{u_1 u_2}{u_3} - \frac{u_2 u_3}{u_1} + \frac{u_3 u_1}{u_2} \right) \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} u_1 = [I_1/(\omega_1 W)]^{1/2}, \\ u_2 = [I_2/(\omega_2 W)]^{1/2}, \\ u_3 = [I_3 \cos\beta/(\omega_3 W)]^{1/2}, \\ \text{其中 } W = I_1(0) + I_2(0) + I_3(0) \cos^2\beta, \\ \xi = \frac{4d_{\text{eff}}\pi(\pi W)^{1/2}r}{(\epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 n_1 n_2 n_3 \cos^2\beta)^{1/2}}, \\ \theta = \Delta k + \phi_3 - \phi_2 - \phi_1, \\ \Delta S = \Delta kr/\xi, \\ \text{其中 } \Delta k = k_3 - k_2 - k_1. \end{cases} \quad (2)$$

W 为三波总光强, n_i , ω_i 和 λ_i 分别为三波对应的折射率、频率和波长, I_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为抽运光、信号光和闲频光的光强。

当 β 很小,并满足 I 类相位匹配条件下,该方程组的解为

$$\begin{aligned} I_1(r) &= I_1(0) + (\omega_1/\omega_3)I_3(0) \times \\ &\quad \{1 - \text{sn}^2[(r-r_0)/l, \gamma]\} \\ I_2(r) &= (\omega_2/\omega_3)I_3(0) \times \\ &\quad \{1 - \text{sn}^2[(r-r_0)/l, \gamma]\} \\ I_3(r) &= I_3(0) \text{sn}^2[(r-r_0)/l, \gamma] \end{aligned} \quad (3)$$

其中 sn 为雅可比椭圆函数, l 为晶体长度

$$\begin{cases} 1/l = \frac{\pi d_{\text{eff}} [8I_3(0)]^{1/2}}{(\epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 n_1 n_2 n_3 c)^{1/2}} \times \\ \quad \{1 + I_1(0)\omega_3/[I_3(0)\omega_1]\}^{1/2} \\ \gamma^2 = \frac{I_3(0)/\omega_3}{I_3(0)/\omega_3 + I_1(0)/\omega_1} \\ r_0/l = \frac{1}{2} \ln\{16[1 + I_3(0)\omega_1/I_1(0)\omega_3]\} \end{cases}$$

3 数值模拟计算

3.1 最佳晶体长度

假设抽运光为 355 nm,信号光取 500 nm,抽运光脉冲初始为高斯光束,并忽略空间光强分布的变化,则有

$$I_3(t) = I_0 \exp(-4t^2/\tau^2) \quad (4)$$

其中 τ 为高斯脉冲宽度。

在 $\tau = 10$ ps, $I_p(0) = 300$ MW/cm², $I_s(0) = 5$ MW/cm², $I_i(0) = 0$ 的情况下,采用 I 类相位匹配,抽运光通过不同长度的 CLBO 晶体产生的信号光脉冲形状变化如图 1 所示。由图 1 可知,随着晶体长度的增加,信号光出现了多峰结构,即随着晶体长度的增长,信号光能量又耦合到抽运光中去,发生和频现象。在弱初始信号光注入下,抽运光、信号光及闲频光在 CLBO 晶体中的光强变化曲线如图 2(a) 所示。由图 2(a) 知,在抽运光和信号光进入晶体较短的一段距离时,抽运光的能量逐渐地耦合到信号光和闲频光中去,随着晶体长度的增长,三波之间的相互作用为和频过程。光参量过程在晶体中呈现周期性的变化。定义抽运光的能量第一次完全耦合到信号光和闲频光时的晶体长度为最佳晶体长度 l_{optimal} 。由图 2(a) 还可知,在 $I_p(0) = 300$ MW/cm², $I_s(0) = 0.5$ MW/cm², $I_i(0) = 0$ 时, $l_{\text{optimal}} = 36.8$ mm。但是随着初始入射信号光强度的增大,抽运光强度对最佳晶体长度的影响将逐渐减弱,得到了在 $I_p(0) = 300$ MW/cm², $I_s(0) = 5$ MW/cm², $I_i(0) = 0$ 的情况下,三波互作用的关系曲线如图 2(b) 所示。图 2(b) 得到最佳晶体长度为 27.0 mm。可见大的初始入射信号光使得和频现象过早地出现,而最佳晶体长度变短。图 3(a) 描述了在不同的初始信号光强度下最佳晶体长度随抽运强度变化的曲线。由图 3(a) 可以看出,随着抽运光强度的增大,最佳晶体长度逐渐减小。在不同抽运光强度下,最佳晶体长度随初始入射信号光强度变化的曲线如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可知,在抽运光强度一定的情况下,随着初始信号光强度的增加,最佳晶体长度的

变化逐渐减缓。因此,对于一定长度的 CLBO 晶体,为了获得高功率的信号光输出,抽运光和初始入射信号光应根据晶体长度取最佳优化值。

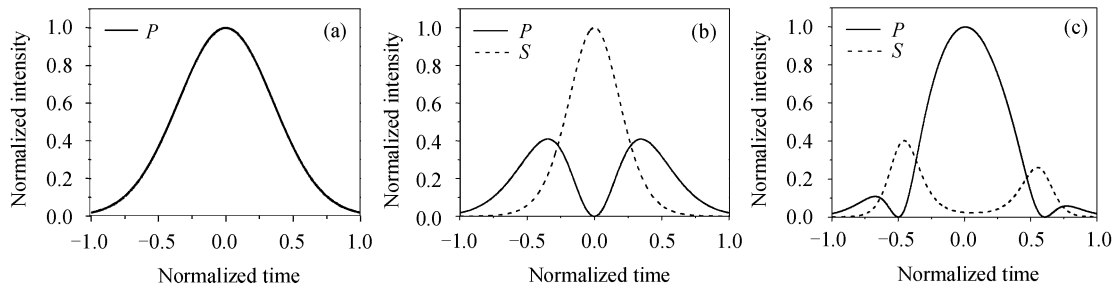


图 1 CLBO 晶体中的高斯脉冲形状随晶体长度的变化
Fig. 1 Curves of Gaussian beam versus crystal lengths in CLBO
(a) $l=0$; (b) $l=27$ mm; (c) $l=54$ mm

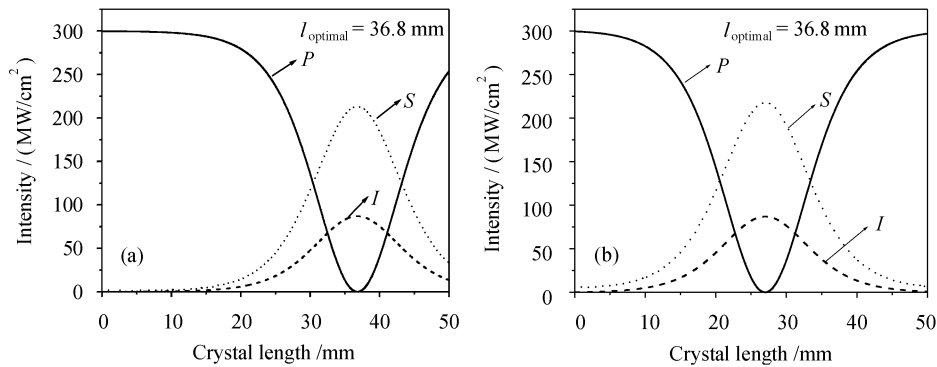


图 2 小信号光注入(a)和大信号光注入(b)时参量光强度与晶体长度的关系
Fig. 2 Relation of parametric light intensity with crystal lengths on small signal injection (a) and intense injection (b)
(a) $I_s(0)=0.5$ MW/cm²; (b) $I_s(0)=5$ MW/cm²

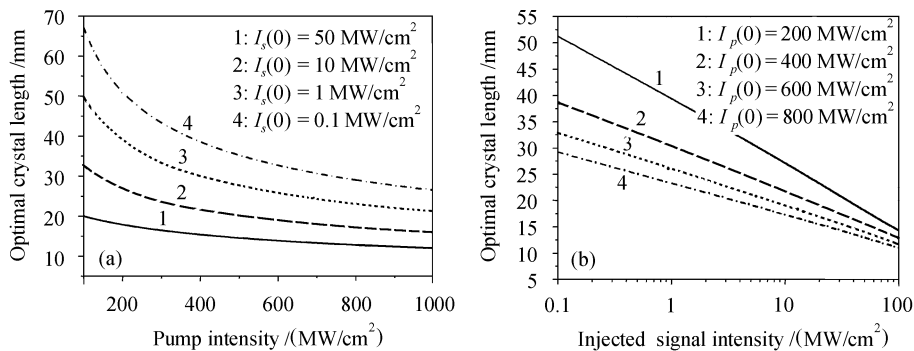


图 3 不同初始信号光强度下最佳晶体长度随抽运光强(a)及不同抽运光强度下最佳晶体长度随信号光强(b)的变化
Fig. 3 Curves of optimal crystal lengths with pump intensity in different signal injection (a) and with signal intensity on different pump light injection (b)

3.2 转换效率和脉冲宽度

由于光参量放大是为了获得高能量、窄脉宽的信号光,所以图 4 描绘了光参量放大输出的转换效率随信号光波长变化的曲线。可以看出,CLBO 光参量放大在短波范围内的转换效率高于长波。信号

光脉冲宽度与抽运光脉冲宽度的比值随抽运光强度变化的曲线如图 5 所示。由图 5 可看出,抽运光强越大,输出的信号光的脉冲宽度越窄,因此 CLBO 更适合于对短波作光参量放大,为了获得放大的窄脉宽信号光可适当增大抽运光强度。

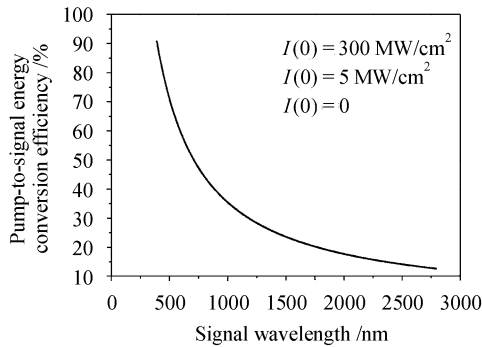


图 4 抽运光向信号光的能量转换效率随信号光波长变化的曲线

Fig. 4 Conversion efficiency of pump-signal versus signal wavelengths

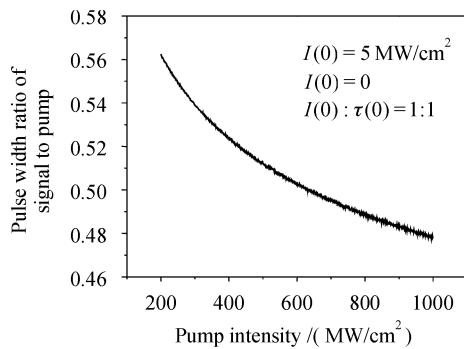


图 5 信号光与抽运光脉冲宽度的比值随抽运光强度变化的曲线

Fig. 5 Curves of ratio of signal to pump light with pump intensity

4 结 论

在三波耦合方程基础上,对抽运光波长为 355 nm,脉冲宽度为 10 ps CLBO 光参量放大进行了理论分析和数值模拟。结果表明 CLBO 晶体适合于短波范围的光参量放大,为达到高转换效率和窄脉宽信号光输出,抽运光和初始入射信号光的强度应根据晶体长度取最佳优化值。这一结果为 CLBO 光参量放大的研制开发提供了理论依据。

参 考 文 献

- H. Vanherzeele, C. Chen. Widely tunable parametric generation in beta barium borate [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(13):2634~2636
- Chuangtian Chen, Yicheng Wu, Aidong Jiang *et al.*. New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(4):616~621
- Yuping Wang, Zuyan Xu, Daoqun Deng *et al.*. Visible optical parametric oscillation in LiB₃O₅ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(5):531~533
- Wang Li, Yang Jiang, Huang Liu. BBo crystal optical amplifier of a narrow linewidth, ns tunable pulse Ti:sapphire laser on injection-seeded [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):104~106
王 丽,杨 建,黄 骝. 纳秒级窄线宽脉冲钛宝石激光注入 BBO 晶体光参量放大器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):104~106
- Zhong Fangchuan, Hu Xuyuan, Deng Jian *et al.*. Third harmonic generation in air through interaction with ultrashort intense [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):10~13
钟方川,胡雪原,邓 健等. 超短强激光作用下空气的三次谐波辐射[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):10~13
- Zhang Hengli, Zhu Raiyi, Yang Qianshuo *et al.*. Study of an efficient Nd:YVO₄/LBO red light laser pumped by laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):274~277
张恒利,竺乃宜,杨乾锁等. 激光二极管制抽运 Nd:YVO₄/LBO 红光激光器研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3):274~277
- Zheng Quan, Zhao Ling, Jiang Yaoliang *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd:YAG/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):492~494
郑 权,赵 岭,姜耀亮等. LD 抽运被动调 Q Nd:YAG/LBO 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):492~494
- Chen Zhenqiang, Zhang Ge, Shen Hongyuan *et al.*. High power red laser from intracavity-doubled Nd:YAlO₃/LBO laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):873~876
陈振强,张 戈,沈鸿元等. Nd:YAP/LBO 腔内倍频高功率红光激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):873~876
- Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajama *et al.*. Nonlinear optical properties of cesium lithium borate [J]. *Jpn. Appl. Phys.*, 1995, **34**(Part 2, 3A):296~298
- Wang Li, Chen Shaohua. Theoretical simulation of effective coefficient and permitted parameters of sum-frequency in CsLiB₆O₁₀ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12):1493~1496
王 丽,陈少华. 紫外晶体 CsLiB₆O₁₀ 混频允许参量范围的数值分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12):1493~1496
- Zhang Jingyuan, Kong Yufei, Xu Zuyan *et al.*. Optical parametric properties of ultraviolet-pumped cesium lithium borate crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(3):475~482
- Yao Jianquan. *Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995. 25
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京:科学出版社,1995. 25