

文章编号: 0258-7025(2001)11-0977-04

# BBO 晶体 I 型非共线相位匹配参量放大研究

冷雨欣 金石琦 彭家晖 杨晓东 徐至展

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**摘要** 理论研究了 BBO 晶体在 I 型相位匹配下非共线情况时的激光参量放大特性。研究表明,对于一定波长的抽运光,存在一定的非共线入射角对应一定波长的信号光,使在较高的激光增益下增益带宽最大,同时温度的调谐也对增益谱的形状有部分影响。这对于短激光脉冲的激光参量放大的优化具有重要意义。

**关键词** 参量放大,非共线夹角,增益带宽

中图分类号 O 734<sup>+</sup>.1 文献标识码 A

## Investigation of Non-collinear Type- I Phase Matched Optic Parametric Amplification Using BBO Crystal

LENG Yu-xin JIN Shi-qi PEN Jia-hui YANG Xiao-dong XU Zhi-zhan

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

**Abstract** The non-collinear optic parametric amplification using BBO crystal with type- I phase matched geometry is investigated theoretically. For the certain pump wavelength and signal wavelength, it is indicated that the non-collinear incident angle exists with the maximum gain bandwidth and the higher gain. The temperature also effects the gain spectrum partly. The theoretical analysis is useful to optimize the optic parametric amplification of the short pulse.

**Key words** parametric amplification, nonlinear angle, gain bandwidth

### 1 引言

超短超强激光脉冲一直是研究的重点,而传统的激光晶体由于窄的增益带宽限制了短激光脉冲的放大。采用非线性光学晶体的激光参量放大和振荡技术由于其自身特有的宽增益带宽和可调谐等优点已经受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。利用 BBO, LBO, KDP 和 KTP 等晶体的非线性效应,可以在紫外到中红外的波长范围内对激光进行放大,成为产生可调谐相干辐射的一种重要方法<sup>[2]</sup>。但对于短激光脉冲,特别是 fs 激光脉冲存在很宽的激光脉冲频谱,在参量过程中将有部分频率分量不满足相位匹配条件造成增益下降,同时造成各频率分量存在相位差。因此,为了通过参量放大产生短的强激光脉冲,需要对参量放大的技术方案进行优化设计。

在参量放大过程中,理论计算和实验结果表明对于 I 型相位匹配的 BBO 晶体有较大的增益带宽<sup>[3]</sup>。当抽运光和信号光之间存在夹角时,通过调

谐晶体可以获得非共线相位匹配的参量放大过程,可以部分补偿部分频率分量的相位失配和非线性晶体造成的光束离散角的影响,而可能获得较宽的参量增益谱<sup>[4]</sup>。这对于采用啁啾脉冲参量放大技术(OPCPA),建立 fs 级固体超短脉冲强激光系统具有重要的实际意义<sup>[5,6]</sup>。

### 2 理论

光学参量放大过程属于光学差频效应的特例,其相位匹配条件应该满足能量守恒和动量守恒条件

$$\begin{aligned} \omega_p &= \omega_s + \omega_i \\ \Delta k &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中下标  $p, s$  和  $i$  分别代表抽运光、信号光和闲频光,  $\Delta k = k_p - k_s - k_i$  为相位失配。BBO 晶体为负单轴晶体,室温下(20℃)不同波长  $\lambda$  的  $o$  光和  $e$  光的折射率  $n$  可以通过经验公式计算而得

$$n_o^2(\lambda) = 2.7359 + 0.01878/(\lambda^2 - 0.01822) - 0.01354\lambda^2$$

$$n_i^2(\lambda) = 2.3753 + 0.01224/(\lambda^2 - 0.01667) - 0.01516\lambda^2 \quad (2)$$

考虑 BBO 晶体在 I 型相位匹配参量过程的情况下, 抽运光为  $e$  光, 而信号光和闲频光为  $o$  光( $e \rightarrow o + o$ )。当相位匹配时, 由(1)可以得到

$$\left(\frac{n_i}{\lambda_i}\right)^2 = \left(\frac{n_p}{\lambda_p}\right)^2 + \left(\frac{n_s}{\lambda_s}\right)^2 + 2\cos\alpha \frac{n_s n_p}{\lambda_s \lambda_p} \quad (3)$$

$$\frac{1}{n_p^2} = \frac{\cos^2\theta}{n_{po}^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_{ps}^2}$$

这里  $\alpha$  为信号光和抽运光的非共线夹角,  $\theta$  为抽运光的相位匹配角。由此可见, 抽运光波长一定时, 非共线夹角  $\alpha$  与信号光波长和抽运光入射角度有关。对于不同波长的信号光, 可以通过调节晶体角度和抽运光与信号光之间的角度来调谐相位匹配。

群速度失配是影响激光脉冲参量放大的一个重要因素。对群速度匹配的要求来自光学非线性耦合方程。对参量放大而言, 群速度失配使抽运光、信号光和闲频光脉冲在空间分离, 相互作用长度变短, 使参量放大过程变成瞬态过程, 降低放大效率。

在晶体中, 由于信号光和闲频光是  $o$  光, 而抽运光是  $e$  光而存在离散角。用信号光和抽运光脉冲分离长度  $l_s = \tau/[1 - v_s - 1/v_s \cos(\alpha - \rho)]$  与晶体长度比较可以衡量群速度失配的影响<sup>[7]</sup>。这里  $\tau$  是脉冲脉宽(FWHM),  $\rho$  为离散角,  $v$  是晶体中的光速。从上式可以看出非共线夹角可以补偿一部分抽运光的离散角。由于相位匹配条件和群速度匹配条件一般不能同时满足, 而在具体实验中, 为了使晶体中信号光和抽运光不分离增大放大效率, 一般采用啁啾展宽技术将信号光脉冲展宽到与抽运光脉冲宽度相当的几百 ps 量级。这样导致相位匹配时,  $l_s$  一般远大于晶体长度。因此在非线性晶体长度范围内群速度失配一般可以忽略。

增益介质的增益带宽是影响短激光脉冲放大的另一个重要因素, 对实验而言, 脉冲放大的频率增益谱比单纯的参量带宽更具有实际意义。结合实验, 以下仅对频率增益谱进行讨论。由于只有一个特定波长才能满足相位匹配条件, 因此对于短脉冲, 特别是 fs 脉冲, 其他频率必然存在相位失配, 这是造成增益谱变窄的重要原因。

在基本的三波混频耦合波方程中, 假设晶体中不存在吸收损耗, 同时因为在一般情况下, 抽运光强度远大于放大后的信号光强度, 满足抽运光无损耗的小信号近似。当相位匹配和忽略群速度失配时, 可以解耦合波方程获得信号光通过晶体后强度放大

率  $G$  和相位变化  $\varphi$ <sup>[5]</sup>

$$G = 1 + (\gamma L)^2 (\sinh B / B)^2$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{B \sin A \cosh B - A \cos A \sinh B}{B \cos A \cosh B + A \sin A \sinh B}$$

$$A = \Delta k L / 2$$

$$B = [(\gamma L)^2 - A^2]^{1/2}$$

$$\gamma = 4\pi d_{\text{eff}} (I_p / 2\epsilon_0 n_p n_s n_i c \lambda_s \lambda_i)^{1/2} \quad (4)$$

这里  $\gamma$  为有效增益系数,  $L$  为放大长度即光在晶体中的传播长度,  $I_p$  为抽运光的入射强度,  $d_{\text{eff}} = d_{31} \sin(\theta + \rho) + d_{22} \cos(\theta + \rho) \sin 3\phi \approx d_{22} \cos(\theta + \rho)$  为晶体有效非线性系数(BBO 晶体 I 型相位匹配,  $d_{31} \ll d_{22}$ )<sup>[8]</sup>,  $\rho$  为离散角,  $\Delta k = |\Delta \vec{k}|$  为 OPA 中的相位失配。

对于 BBO 晶体 I 型相位匹配, 信号光  $s$  和闲频光  $i$  都是折射率各向相同的寻常光, 因此当抽运光与信号光之间夹角一定时, 相位失配  $\Delta k$  与信号光频率  $\lambda_i$  的关系可以表示为

$$\Delta k(\lambda_s) = |\Delta \vec{k}(\lambda_s)| = 2\pi \left[ \frac{n_i(\lambda_s)}{\lambda_i(\lambda_s)} - \frac{n_{i0}(\lambda_{i0})}{\lambda_{i0}(\lambda_{i0})} \right] \quad (5)$$

$\lambda_{i0}$  和  $\lambda_{s0}$  为晶体中相位匹配时闲频光和信号光波长。对不同波长的信号光, 通过(1)式得到闲频光波长, 通过(3)式得到信号光折射率。将(5)式代入(4)式, 可以得到不同抽运强度  $I_p$  和抽运光与信号光不同夹角  $\alpha$  下增益随信号光波长的变化, 并由此得到参量放大过程中信号光的增益谱和相位谱。图 1 给出了信号光增益谱和相位谱随抽运光强度和非共线夹角的变化而改变的情况。

从图 1 可见, 抽运光强度和非共线夹角不仅对增益谱的大小有影响, 而且可以决定增益谱和相位谱的形状。抽运光强度主要影响增益大小, 非共线夹角主要影响增益谱和相位谱的形状。在相同的非共线夹角下, 抽运光越强增益谱放大率越高, 而相位谱变化不大。值得注意的是, 增益谱的宽度和相位谱的形状对非共线夹角非常敏感, 这表明在实验中对夹角的调节要求比较精细。虽然较大的非共线夹角有大的增益带宽, 但是也造成增益谱存在凹陷以至谱发生分裂, 因此存在一个最佳非共线夹角使增益带宽最大而使增益谱的凹陷在允许的范围, 例如增益谱的凹陷在 50% 以内。图 2 给出了在一定波长的抽运光和信号光下, 增益带宽随非共线夹角变化的情况。

由图 1(a) 和图 2 可见, 增益谱对非共线夹角的变化非常敏感。在 0.0415 rad 附近, 当非共线夹

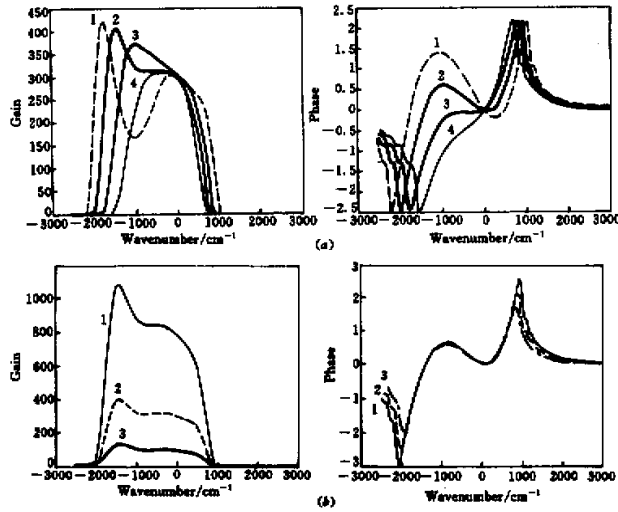


图 1 室温(20℃)下 BBO 晶体 I 型相位匹配时, 信号光的光学参量放大的增益谱和相位谱

抽运光和信号光波长分别为 532 nm 和 800 nm, 晶体长度为 13.5 mm。(a) 抽运光强度一定时( $I_p = 350 \text{ MW/cm}^2$ ), 不同非共线夹角下(曲线 1: 0.041, 2: 0.0415, 3: 0.042, 4: 0.0425 rad)的增益谱和相位谱; (b) 非共线夹角一定时(0.0415 rad), 不同抽运光强度下(曲线 1: 450, 2: 350, 3: 250  $\text{MW/cm}^2$ )的增益谱和相位谱

Fig. 1 Gain and phase calculated for the maximum bandwidth in non-collinear geometry in room temperature (20℃)

(a) when non-collinear angles are 1: 0.0410, 2: 0.0415, 3: 0.0420 and 4: 0.0425 rad. The pump intensity  $I_p$  is 350  $\text{MW/cm}^2$  and the pump wavelength is 532 nm. The length of BBO crystal is 13.5 mm. The signal wavelength is 800 nm; (b) when non-collinear angle is 0.0415 rad. The pump intensities are 1: 450, 2: 350 and 3: 250  $\text{MW/cm}^2$ , respectively

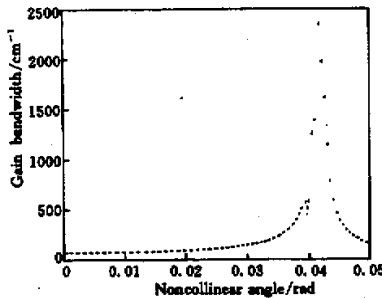


图 2 室温(20℃)下 BBO 晶体 I 型相位匹配时, 信号光的光学参量放大的增益谱宽度随非共线角的变化  
抽运光和信号光波长分别为 532 nm 和 800 nm, 晶体长度为 13.5 mm, 抽运光强度  $I_p = 350 \text{ MW/cm}^2$

Fig. 2 Dependence of the signal gain bandwidth (FWHM) on the non-collinear angle in room temperature (20℃)  
The pump intensity  $I_p$  is 350  $\text{MW/cm}^2$ , the pump wavelength is 532 nm and the signal wavelength is 800 nm. The length of BBO crystal is 13.5 mm

角由大变小时, 增益谱变宽, 然后由于谱分裂而造成

增益谱的凹陷, 使谱宽迅速变窄。但是研究表明, 如果由于角度调谐不准确而导致谱分裂, 可以通过温度的调谐来部分地补偿。

BBO 晶体温度的改变可以导致折射率的变化, 因此在确定了抽运光和信号光的相位匹配角和非共线夹角后, 可以通过调节晶体的温度来改变 OPA 的增益谱。BBO 的折射率随温度的增加而减少<sup>[9]</sup>

$$\frac{\partial n_o}{\partial T} = -16.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \frac{\partial n_e}{\partial T} = -9.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (6)$$

$T$  为晶体的温度。将公式(6)代入公式(4)可以得到增益  $G$  与晶体温度的关系。图 3 表明, 通过温度的调谐虽然不能明显增加增益谱宽度, 但可以有效地部分补偿增益谱的分裂。

由于相位失配的存在, 造成增益谱存在相位分布。对于短激光脉冲在 BBO 晶体中的 OPA 非线性过程, 相位和增益谱型都对脉冲波形的变化有影响。通过傅里叶变换, 将激光脉冲从时域变换到频域, 在频域与晶体的增益和相位谱作用, 再通过傅里叶反变换转换到时域, 可以得到脉冲的 OPA 演化。在

此,根据我们的实验方案,通过以上参数的优化,采用在室温(20°C)下 532 nm 的 Nd:YAG 激光脉冲通过 BBO 晶体 I 型非共线相位匹配放大 800 nm 的 Ti:sapphire 激光脉冲。图 4 表示一个  $\text{Sech}^2$  型的脉冲经过 BBO 晶体 I 型非共线相位匹配 OPA 过程波形的变化。抽运光和信号光的夹角为 0.0415 rad。入射脉冲频率带宽为  $1000 \text{ cm}^{-1}$ 。通过晶体,脉冲时

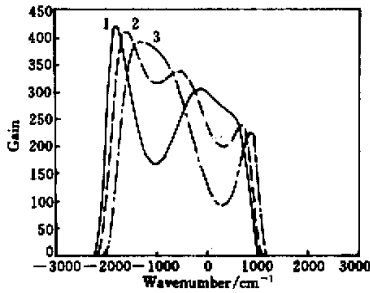


图 3 不同温度(曲线 1:20°C, 2:10°C, 3:0°C)对非共线 OPA 增益谱的影响

非共线夹角为 0.0410 rad, 抽运光和信号光波长分别为 532 nm 和 800 nm, 晶体长度为 13.5 mm, 抽运光强度  $I_p = 350 \text{ MW/cm}^2$

Fig. 3 Gain of OPA in different temperature (1:20°C, 2:10°C, 3:0°C)

The non-collinear angle between the pump beam and the signal beam is 0.0410 rad. The pump intensity  $I_p$  is  $350 \text{ MW/cm}^2$ , the pump wavelength is 532 nm and the signal wavelength is 800 nm. The length of BBO crystal is 13.5 mm

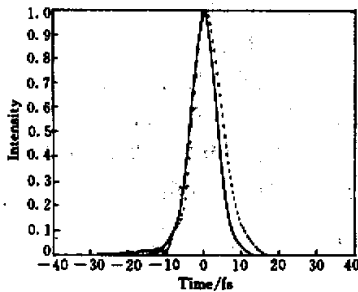


图 4 室温(20°C)下 BBO 晶体 I 型相位匹配时,脉冲放大时波形的变化

抽运光和信号光波长分别为 532 nm 和 800 nm, 晶体长度为 13.5 mm, 抽运光强度  $I_p = 350 \text{ MW/cm}^2$ , 非共线夹角为 0.0415 rad, 在频域中初始脉冲为  $\text{Sech}^2$  型, 脉宽  $1000 \text{ cm}^{-1}$

Fig. 4 Fourier transform of the input (solid curve) and output (dot curve) pulses in room temperature (20°C)

The length of BBO crystal is 13.5 mm. The pump intensity  $I_p$  is  $350 \text{ MW/cm}^2$ , the pump wavelength is 532 nm and the signal wavelength is 800 nm. The non-collinear angle is 0.0415 rad

间宽度从 8.3 fs 增加到 9.0 fs。从图中可以看出,由于存在一定的增益带宽和相位分布,造成脉冲宽度展宽并使脉冲波形畸变。

### 3 结 论

利用 BBO 晶体 I 型非共线相位匹配,可以有效地加宽晶体参量放大的增益带宽。通过引入一定的非共线夹角,补偿了一部分频率相位失配的影响。计算表明,参量放大的增益带宽对非共线夹角非常敏感。在相同的抽运光作用下,一定频率的信号光在不同的非共线夹角下有不同的增益带宽。非共线夹角的引入还导致激光脉冲不同频率分量之间存在相位差,对放大脉冲的形状有一定影响,这使 BBO 晶体在 OPCPA 过程中在增益带宽方面限制小,另外还考虑了相位和温度的影响。以上各方面都对超短超强 fs 激光脉冲的参量放大具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 M. K. Reed, M. K. Steiner-Shepard, D. K. Negus. Widely tunable femtosecond optical parametric amplifier at 250 kHz with a Ti:sapphire regenerative amplifier. *Opt. Lett.*, 1994, 19(22):1855~1857
- 2 V. Krylov, A. Kalitsev, A. Rebane *et al.*. Noncollinear parametric generation in  $\text{LiIO}_3$  and  $\beta$ -barium borate by frequency-doubled femtosecond Ti:sapphire laser pulses. *Opt. Lett.*, 1995, 20(2):151~153
- 3 R. Danielius, A. Piskarskas, P. Di Trapani *et al.*. A collinearly phase-matched parametric generator/amplifier of visible femtosecond pulses. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34(3):459~464
- 4 G. M. Gale, M. Cavallari, T. J. Driscoll *et al.*. Sub-20-fs tunable pulses in the visible from an 82-MHz optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1995, 20(14):1562~1564
- 5 I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers. *Opt. Comm.*, 1997, 144:125~133
- 6 A. Shirakawa, I. Sakane, M. Takasaka *et al.*. Sub-5-fs visible pulse generation by pulse-front-matched noncollinear optical parametric amplification. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(16):2268~2270
- 7 R. Danielius, A. Piskarskas, A. Stabinis *et al.*. Traveling-wave parametric generation of widely tunable, highly coherent femtosecond light pulses. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, 10(11):2222~2232
- 8 Ichiro Shoji, Hirotaaka Nakamura, Keisuke Ohdaira *et al.*. Absolute measurement of second-order nonlinear-optical coefficients of  $\beta$ - $\text{BaB}_2\text{O}_4$  for visible to ultraviolet second-harmonic wavelengths. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, 16(4):620~624
- 9 Lei Shizhan. Handbook of Laser Technology. Beijing: Science Press, First edition, 1992. 920