

# BBO I 类相位匹配光参量放大中群速失配的补偿<sup>\*</sup>

马 晶 章若冰<sup>†</sup> 张伟力 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

(2004 年 6 月 15 日收到, 2004 年 11 月 8 日收到修改稿)

描述了在 BBO I 类相位匹配的飞秒光参量放大(OPA)中, 利用非共线结构和倾斜抽运光的脉冲波面来完全补偿三波群速失配的方法. 理论计算了三波群速匹配时, 非共线角、相位匹配角、抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化, 并分析了对抽运光光斑尺寸的要求和对空间走向长度的影响. 结果表明, 利用该方法不仅能够实现最大的参量带宽, 而且能够完全补偿飞秒 OPA 中三波的群速失配. 此外, 选取合适的抽运光光斑尺寸和非线性晶体的长度对提高参量增益也至关重要.

关键词: 群速匹配, 非共线相位匹配, 脉冲波面倾斜, 飞秒光参量放大

PACC: 4265K, 4280, 4280W

## 1. 引 言

光参量放大(OPA)自首次实现频率转换以来, 一直是激光研究的热点之一. 飞秒 OPA 是获得高增益、窄脉宽、宽调谐飞秒脉冲的一个重要方法, 它在许多领域都得到了广泛应用. 尤其是利用 OPA 获得的可见光光谱区微焦耳能量的飞秒脉冲, 对于非线性光学和超快时间分辨光谱测量均具有非常重要的意义. 但是, 对于飞秒 OPA, 在可见光光谱区抽运光、信号光及闲频光之间的群速失配较严重, 这会大大限制三波的有效相互作用长度, 导致参量光增益降低, 脉宽增宽. 因此, 群速失配的补偿成为飞秒 OPA 中最为关键的技术. 1996 年 Danielius 等人指出倾斜脉冲波面可以改变非常光的群速度, 在 I 类共线相位匹配 BBO OPA 中, 当倾斜抽运光的脉冲波面使其群速度等于信号光和闲频光群速度和的一半时, 能够减小三波之间的群速失配<sup>[1]</sup>. 如果信号光和闲频光的波长相同, 则可以达到三波群速的完全匹配, 但对于调谐飞秒 OPA 来说很不实用. 1997 年 Wilhelm 等人证明了当信号光的群速度与闲频光的群速度满足  $v_s = v_i \cos \Omega$  ( $\Omega$  为信号光波矢与闲频光波矢之间的夹角)时, I 类相位匹配 BBO OPA 的参量带宽最大, 并且信号光与闲频光群速匹配<sup>[2]</sup>. 在此基础上, 人们

利用钛宝石再生放大器的二次谐波以  $3.7^\circ$  的非共线角抽运 I 类相位匹配 BBO OPA, 先后获得了可见光光谱区脉宽为 13.5—4fs 的脉冲, 单脉冲能量为 1—7 $\mu$ J, 转换效率为 15%—20%<sup>[3-8]</sup>. 虽然这类 OPA 的信号光与闲频光群速匹配, 但是由于信号光、闲频光与抽运光之间群速失配的限制, 其 BBO 晶体的长度均不超过 1 mm, 因此影响了参量光的转换效率和脉冲宽度.

为了消除三波群速失配对飞秒 OPA 的不利影响, 本文利用非共线结构和倾斜抽运光脉冲波面的方法, 在 I 类相位匹配飞秒 BBO OPA 的参量带宽最大时, 对完全补偿三波的群速失配进行了理论计算和分析, 给出了飞秒 BBO OPA 在连续调谐时, 为实现三波的群速匹配所需的非共线角、相位匹配角、抽运光的脉冲波面倾斜角的大小, 并给出了对抽运光光斑尺寸的要求和对空间走向长度的影响. 利用该方法能够保证在参量带宽最大的前提下, 实现飞秒 OPA 中三波群速的完全匹配, 从而可以获得更高增益、更窄脉宽的参量光输出. 该计算方法和分析结果对其他同类型非线性晶体的飞秒 OPA 同样适用.

## 2. 利用非共线结构和倾斜抽运光的脉冲波面补偿三波的群速失配

图 1 为非共线相位匹配 OPA 中三波混频的矢量

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999075201), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20030056021), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目资助的课题.

<sup>†</sup> 永久联系人, E-mail: zhangrb@tju.edu.cn

图.图中  $\theta$  为抽运光波矢  $k_p$  与晶体光轴之间的夹角,即相位匹配角. $\alpha, \beta$  分别为信号光波矢  $k_s$ 、闲频光波矢  $k_i$  与抽运光波矢  $k_p$  的夹角,即非共线角.粗实线代表抽运光倾斜的脉冲波面, $\gamma$  为抽运光脉冲波面的倾斜角,如图所示为正,反之为负.利用色散元件,例如棱镜、光栅等均可将脉冲波面倾斜,并且可以改变非常光的群速度.选择信号光波矢  $k_s$  的方向为基准,使三波沿此方向传播的群速度相等,如图 2 所示.在满足相位匹配的条件下,相应地改变  $\theta, \alpha(\beta), \gamma$  就可实现飞秒 OPA 连续调谐时三波的群速匹配.

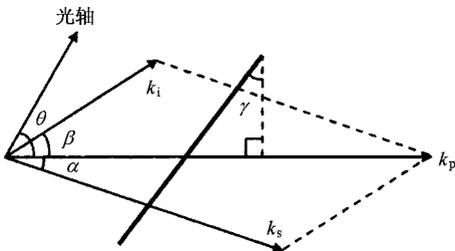


图 1 非共线相位匹配矢量图

图 2 为 BBO I 类非共线相位匹配条件下,三波混频时群速匹配的矢量图. BBO 晶体为负单轴晶,在 I 类相位匹配条件下,满足  $e \rightarrow o + o$ ,即抽运光为非常光,信号光与闲频光均为寻常光.图 2 中  $\rho$  为抽运光在 BBO 晶体中的空间走离角,其余各角与图 1 所示相同. $v_p, v_s, v_i$  分别为抽运光、信号光、闲频光的群速度矢量, $v_{pt}$  为抽运光脉冲波面倾斜后的群速度矢量.

由图 1 和图 2 所示各参数间的关系,可得三波群速匹配时所需的非共线角  $\alpha(\beta)$ 、相位匹配角  $\theta$  及抽运光脉冲波面倾斜角  $\gamma$  的大小.

由图 1 可得

$$k_s \sin \alpha = k_i \sin \beta. \quad (1)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_o^2 n_e^2 \lambda_s^2 \lambda_i^2 - n_o^2 [n_s^2 \lambda_p^2 \lambda_i^2 + n_i^2 \lambda_p^2 \lambda_s^2 + 2n_s n_i \lambda_p^2 \lambda_s \lambda_i \cos(\alpha + \beta)]}{(n_o^2 - n_e^2) [n_s^2 \lambda_p^2 \lambda_i^2 + n_i^2 \lambda_p^2 \lambda_s^2 + 2n_s n_i \lambda_p^2 \lambda_s \lambda_i \cos(\alpha + \beta)]} \right\}. \quad (7)$$

又由图 2 可得抽运光脉冲波面倾斜后的群速度为

$$v_{pt} = v_p (1 + \tan \rho \tan \gamma). \quad (8)$$

当抽运光与信号光群速匹配时,有

$$v_s = v_{pt} \cos \alpha. \quad (9)$$

由 (8) 式和 (9) 式可得抽运光脉冲波面倾斜角  $\gamma$  为

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{v_s - v_p \cos \alpha}{v_p \cos \alpha \tan \rho} \right). \quad (10)$$

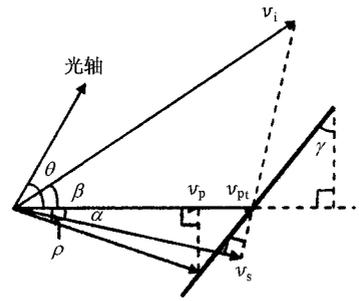


图 2 BBO 晶体中三波群速匹配矢量图

由于波矢  $k_x = 2\pi n_x / \lambda_x$ ,  $x = p, s, i$  分别表示抽运光、信号光、闲频光, $n_x$  表示三波在 BBO 晶体中的折射率, $\lambda_x$  表示三波的波长,则 (1) 式可写为

$$\sin \beta = \frac{n_s \lambda_i}{n_i \lambda_s} \times \sin \alpha. \quad (2)$$

由图 2 可知,当信号光与闲频光群速匹配时,有

$$v_s = v_i \cos(\alpha + \beta), \quad (3)$$

并且此时参量带宽最大<sup>[2]</sup>. 其中群速度, $v_x =$

$c \left( n_x - \lambda_x \frac{dn_x}{d\lambda_x} \right)$ ,  $x = p, s, i$ . 由 (2) 式和 (3) 式可得非共线角  $\alpha$  为

$$\alpha = \sin^{-1} \left\{ \left[ 1 + \frac{(n_s \lambda_i v_i + n_i \lambda_s v_s)^2}{n_i^2 \lambda_s^2 (v_i^2 - v_s^2)} \right]^{-1/2} \right\}. \quad (4)$$

又由图 1 可得

$$k_p^2 = k_s^2 + k_i^2 + 2k_s k_i \cos(\alpha + \beta), \quad (5)$$

即

$$\frac{n_p^2}{\lambda_p^2} = \frac{n_s^2}{\lambda_s^2} + \frac{n_i^2}{\lambda_i^2} + 2 \frac{n_s n_i}{\lambda_s \lambda_i} \cos(\alpha + \beta), \quad (6)$$

式中  $n_p = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}}$ ,  $n_o$  和  $n_e$  为抽运光在

BBO 晶体中的两个主折射率. 由 (6) 式可得相位匹配角  $\theta$  为

若已知波长  $\lambda_p, \lambda_s$  (或  $\lambda_i$ ), 由以上的计算关系式可求得  $\alpha, \beta$ , 以及  $\theta, \gamma$  的大小.

图 3、图 4 及图 5 分别为 400 nm 蓝光抽运的 BBO OPA, 在 I 类相位匹配条件下, 利用非共线结构和倾斜抽运光脉冲波面的方法, 完全补偿三波群速失配时所需的非共线角  $\alpha(\beta)$ 、相位匹配角  $\theta$  及抽运

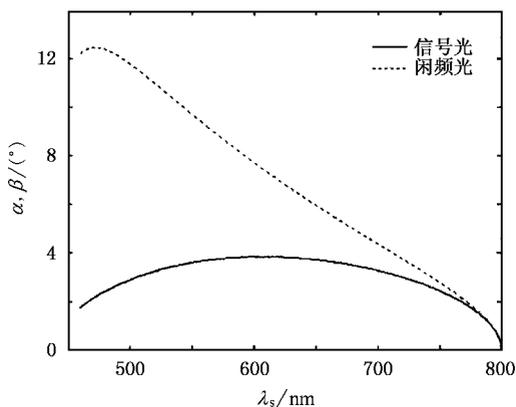


图3 群速匹配时非共线角随信号光波长的变化

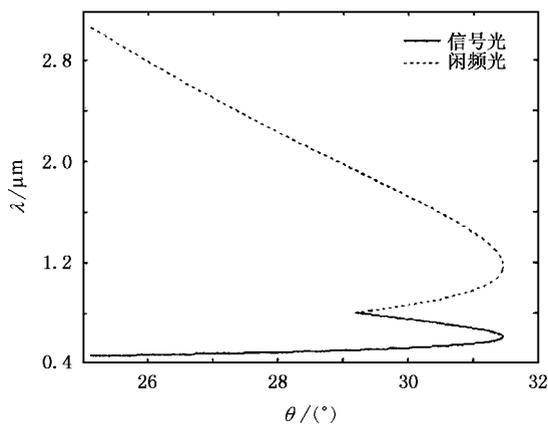


图4 群速匹配时的相位匹配曲线

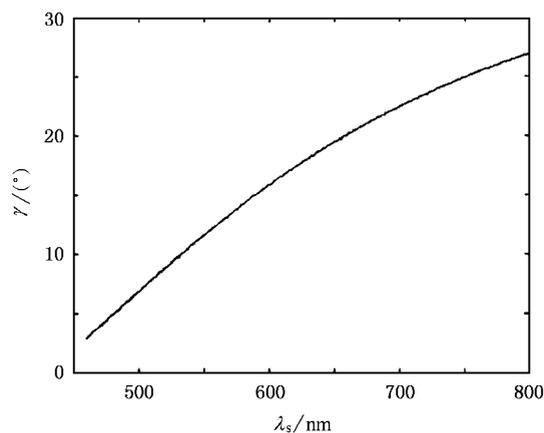


图5 群速匹配时抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化

光脉冲波面倾斜角  $\gamma$  随信号光波长  $\lambda_s$  变化的曲线。由图3可看出当信号光波长在610 nm附近时,抽运光与信号光之间的非共线角  $\alpha$  变化较平缓,并且与抽运光的空间走离角( $4^\circ$ )很接近,空间走离效应可

以得到很好的补偿。由图5可知,抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的增加而增加,倾斜角越大,抽运光与信号光脉冲波面的夹角就越大,空间交迭就越小,抽运光的有效光斑尺寸就越小。

在I类相位匹配BBO OPA连续调谐时,由图3,图4和图5,适当选择与信号光波长  $\lambda_s$  相对应的非共线角  $\alpha$  相位匹配角  $\theta$  及抽运光的脉冲波面倾斜角  $\gamma$ ,就能够保证在参量带宽最大的前提下,实现抽运光、信号光、闲频光的群速匹配,从而获得更高增益、更窄脉宽的参量光输出。

### 3. 三波群速匹配对抽运光光斑尺寸的要求和对空间走离长度的影响

利用如上所述的方法虽然实现了三波的群速匹配,但是由于非共线结构以及抽运光脉冲波面的倾斜,致使抽运光与信号光的脉冲波面并不重合,空间交叠随非共线角和脉冲波面倾斜角的变化而变化,因此抽运光的有效光斑尺寸有限。若抽运光的光斑尺寸太小,则参量增益会下降,若抽运光光斑尺寸太大,则造成不必要的能源浪费。因此抽运光光斑尺寸的选择是很重要的问题。

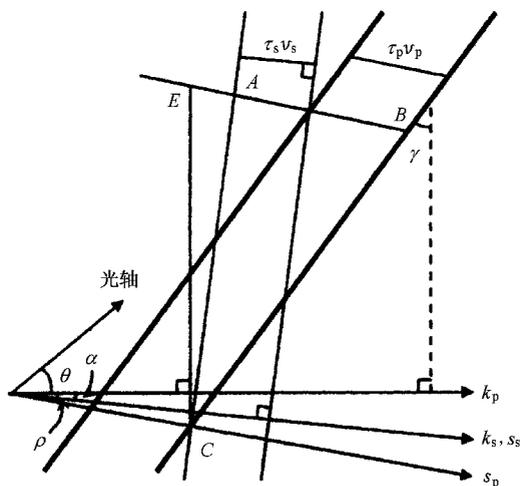


图6 群速匹配时抽运光与信号光的脉冲波面交叠示意图

抽运光与信号光的脉冲波面空间交叠示意图如图6所示。图中两条平行的粗实线表示抽运光倾斜的脉冲波面,两条平行的细实线表示信号光的脉冲波面。 $s_p, s_s$  及  $\tau_p, \tau_s$  分别表示抽运光和信号光的玻印亭矢量及脉冲宽度。其余各参数与前所述相同。由图6可知

$$AB = \tau_s v_s / \cos(\rho - \alpha) + \tau_p v_p, \quad (11)$$

$$BC = AB \cos(\rho - \alpha) \sin(\gamma - \alpha)$$

$$= [\tau_s v_s + \tau_p v_p \cos(\rho - \alpha)] \sin(\gamma - \alpha) \quad (12)$$

则抽运光的有效光斑直径  $D$  的大小为

$$CE = BC \cos(\gamma - \rho) \cos \rho$$

$$= [\tau_s v_s + \tau_p v_p \cos(\rho - \alpha)] \times \cos(\gamma - \rho) [\sin(\gamma - \alpha) \cos \rho]. \quad (13)$$

图 7 为 400 nm 蓝光抽运的 I 类相位匹配 BBO OPA 实现三波群速匹配时,抽运光的有效光斑直径  $D$  随信号光波长  $\lambda_s$  变化的曲线. 图中抽运光的脉宽为 100 fs, 信号光的脉宽为 50 fs. 若抽运光和信号光的脉宽变大, 则抽运光的有效光斑直径将增加. 由图 7 可以看出抽运光的有效光斑直径随信号光波长的增加而减小, 这也正是由于抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的增加而增大(如图 5 所示), 致使抽运光与信号光的脉冲波面夹角增大的结果. 在整个信号光波长范围内, 抽运光的有效光斑直径从 1.2 mm 减小到 50  $\mu\text{m}$ , 大部分在 0.4 mm 以下. 因此根据所需要的调谐波段由图 7 即可选取最佳光斑尺寸的抽运光来抽运飞秒 BBO OPA.

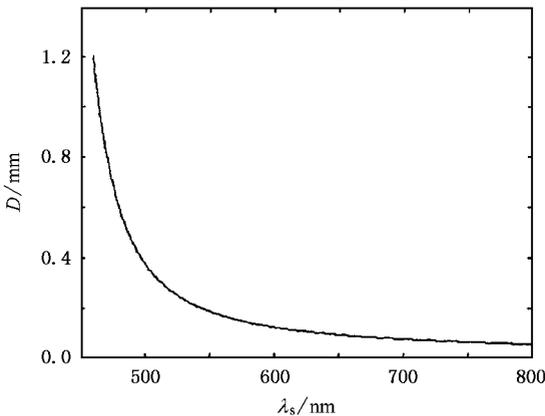


图 7 抽运光的有效光斑直径随信号光波长的变化

利用非共线结构和倾斜抽运光脉冲波面的方法, 实现了 I 类相位匹配 BBO OPA 中三波的群速匹配, 消除了三波的群速失配对时间走离长度的限制, 从而可以增加 BBO 晶体的长度来提高参量增益. 但是由于非共线结构以及 BBO 晶体的双折射效应, 导致抽运光与信号光的波印亭矢量随着传播距离的增加在空间上逐渐走离, 这不仅影响光斑质量, 而且当它们在空间上完全分开时, 导致参量过程结束. 因此 BBO 晶体的长度不应大于抽运光与信号光之间的空间走离长度.

图 8 为 I 类非共线相位匹配条件下, 抽运光与

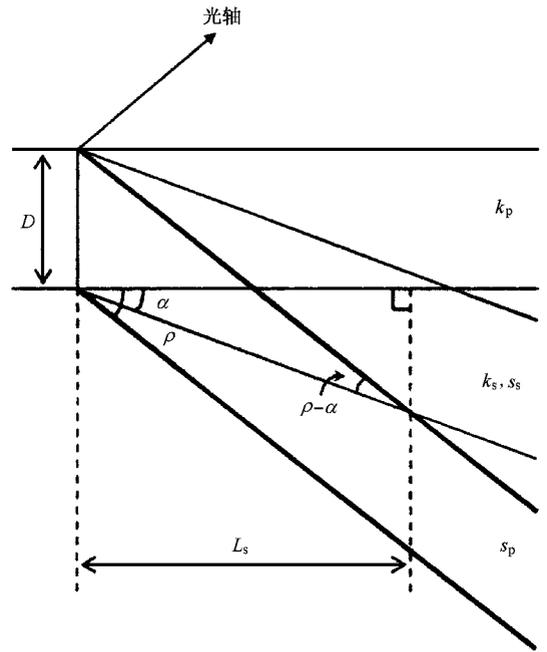


图 8 抽运光与信号光之间的空间走离效应示意图

信号光在 BBO 晶体中空间走离效应的示意图. 图中两条平行的粗实线表示抽运光的波印亭矢量, 两组平行的细实线分别表示抽运光和信号光的波矢矢量.  $D$  为抽运光光斑直径.  $L_s$  为抽运光与信号光之间的空间走离长度. 其余各角与前所述相同. 由图 8 可知, I 类非共线相位匹配条件下, 抽运光与信号光之间的空间走离长度  $L_s$  为

$$L_s = D \cos \alpha \cos \rho / \sin(\rho - \alpha). \quad (14)$$

由于三波的群速匹配消除了对时间走离长度的限制, 所以此时三波的有效相互作用长度应由空间走离长度来决定, 从而可以确定所允许的 BBO 晶体的最大长度.

图 9 为抽运光与信号光之间的空间走离长度  $L_s$  随信号光波长  $\lambda_s$  变化的曲线. 图中抽运光光斑直径  $D$  为 1. 由图 9 可知, 在短波长和长波长处空间走离长度较小, 而在中间波长处空间走离长度较大. 这正如图 3 所示, 当信号光波长在 610nm 附近时, 抽运光与信号光之间的非共线角  $\alpha$  与抽运光的空间走离角  $\rho$  (约  $4^\circ$ ) 很接近, 空间走离效应可以得到很好地补偿. 在整个波长范围内最小的空间走离长度为 15. 若抽运光的光斑直径取为 0.4 mm, 则 BBO 晶体的长度不能大于 6 mm. 因此可以在空间走离长度范围内适当增加非线性晶体的长度来提高参量增益, 同时要考虑参量带宽会随着非线性晶体长度的

增加而减小,因此为了获得高增益、窄脉宽的参量光脉冲要综合考虑参量增益和带宽来确定非线性晶体的最佳长度.

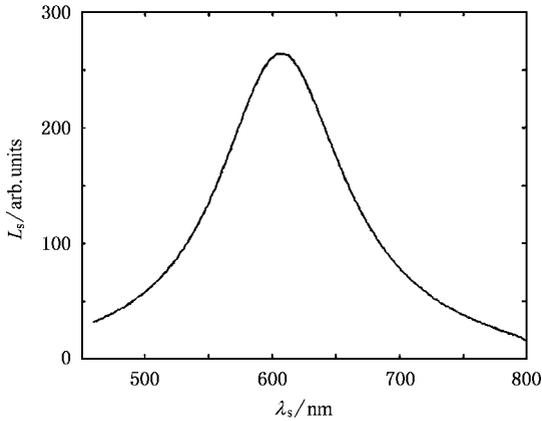


图9 空间走离长度随信号光波长的变化

## 4. 结 论

在飞秒 OPA 中,非线性晶体的长度必须小于时

间走离长度,否则由于抽运光、信号光、闲频光之间的群速失配,使三波在时间上逐渐走离,乃至分开,致使参量过程结束.这不仅使参量光的增益降低,而且使参量光的脉宽增宽.因此为了消除三波群速失配对飞秒 OPA 的不利影响,本文描述了在 BBO I 类相位匹配条件下,利用非共线结构和倾斜抽运光的脉冲波面,在飞秒 OPA 参量带宽最大时完全补偿三波群速失配的方法.理论计算了飞秒 BBO OPA 在三波群速匹配时,非共线角、相位匹配角、抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化,并分析了对抽运光光斑尺寸的要求和对空间走离长度的影响.结果表明,利用非共线结构和倾斜抽运光的脉冲波面不仅能够实现最大的参量带宽,而且完全补偿了飞秒 OPA 中三波的群速失配,大大增加了三波的有效相互作用长度,从而可以获得更高增益、更窄脉宽的参量光输出.此外,选取合适的抽运光光斑尺寸和非线性晶体的长度对提高参量增益也至关重要.该理论计算和分析方法为能够获得高增益、窄脉宽的参量光脉冲提供了理论依据.

- [ 1 ] Danielius R , Piskarskas A , Trapani P Di , Andreoni A , Solcia C and Foggi P 1996 *Opt. Lett.* **21** 973
- [ 2 ] Wilhelm T , Piel J and Riedle E 1997 *Opt. Lett.* **22** 1494
- [ 3 ] Cerullo G , Nisoli M and Silvestri S D 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 3616
- [ 4 ] Cerullo G , Nisoli M , Stagira S and Silvestri S D 1998 *Opt. Lett.* **23** 1283

- [ 5 ] Shirakawa A , Sakane I and Kobayashi T 1998 *Opt. Lett.* **23** 1292
- [ 6 ] Shirakawa A , Sakane I , Takasaka M and Kobayash T 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2268
- [ 7 ] Baltuska A , Fuji T and Kobayashi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 306
- [ 8 ] Sun T , Huang J S , Zhang W L and Wang Q Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2281 ( in Chinese ) [ 孙 涛、黄锦圣、张伟力、王清月 2002 物理学报 **51** 2281 ]

# Compensation of group velocity mismatch for optical parametric amplification in BBO type- I phase-matched configuration \*

Ma Jing Zhang Ruo-Bing<sup>†</sup> Zhang Wei-Li Wang Qing-Yue

( *Ultrafast Laser Laboratory , College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science ( Tianjin University ) , Ministry of Education , Tianjin 300072 , China* )

( Received 15 June 2004 ; revised manuscript received 8 November 2004 )

## Abstract

A method that compensates completely the group velocity mismatch between three waves for femtosecond optical parametric amplification ( OPA ) in BBO type-I phase-matched configuration is presented by combining noncollinear configuration with tilting pump wave front. When the group velocities of the three waves are matched , the variations of the noncollinear angle , the phase-matched angle and the pump wave front tilt angle with the signal wavelength are calculated theoretically , and the effects of the pump beam size and the spatial walk-off length are analyzed. The results indicate that this method not only can achieve maximal parametric bandwidth , but also can match completely the group velocities between three waves for femtosecond OPA. In addition , with increasing parametric gain , it is very importance to appropriately choose the pump beam size and the nonlinear crystal length.

**Keywords** : group velocity matching , noncollinear phase matching , pulse wave front tilting , femtosecond optical parametric amplification

**PACC** : 4265K , 4280 , 4280W

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 1999075201 ) , Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education ( Grant No. 20030056021 ) and the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE , China.

<sup>†</sup>E-mail : zhangrb@tju.edu.cn