

KBe₂BO₃F₂ 飞秒光参量放大中的群速匹配*

马 晶[†] 刘 迎

(天津大学理学院物理系, 天津 300072)

(2008 年 9 月 22 日收到, 2008 年 12 月 3 日收到修改稿)

提出了 KBe₂BO₃F₂(KBBF)飞秒光参量放大中三波群速完全匹配的方法. 对于 I 类相位匹配方式采用非共线结构及倾斜抽运光脉冲波面, 对于 II 类相位匹配方式采用共线结构同时倾斜抽运光和信号光脉冲波面, 可实现参量带宽最大时三波群速的完全匹配, 从而获得更高增益, 更窄脉宽的参量光.

关键词: 群速匹配, 相位匹配, 脉冲波面倾斜, 飞秒光参量放大

PACC: 4265K, 4280, 4280W

1. 引 言

随着非线性晶体和超快激光器的发展, 飞秒光参量放大(OPA)技术业已成熟, 其调谐波长能够覆盖从紫外到近红外波段, 脉冲宽度在可见光区最短达 4 fs, 近红外光区小于 10 fs^[1-11], 是获得宽调谐、窄脉宽激光的主要手段. 非线性光学晶体是飞秒 OPA 实现频率变换的关键元件, 它的光学性能直接影响输出参量光的带宽和增益. 其中最常用的是 β -BaB₂O₄(BBO)晶体, 它以独特的结构特性从 90 年代到现在广泛应用于飞秒 OPA 技术中. 但是, BBO 晶体由于透光范围的限制(189—3500 nm), 很难用于产生波长在 200 nm 以下的谐频光输出, 而且其激光损伤阈值比较低(13 GW/cm²), 在自然条件下极易吸湿, 在水中潮解等^[12], 这些因素对 BBO 晶体的应用都是不利的. 为了对 BBO 晶体进行改良, 一些新型的硼酸盐晶体相继出现, 如 K₂Al₂B₂O₇(KABO), CsLiB₆O₁₀(CLBO), Li₂B₄O₇(LB₄), KBe₂BO₃F₂(KBBF)等, 它们都具有与 BBO 晶体相似的非线性性质^[13]. 其中 KBBF 晶体是迄今为止最优秀的深紫外非线性光学晶体, 利用该晶体已经产生最短 177.3 nm 的深紫外光输出^[12]. 此外, KBBF 晶体还具有许多优良的性质, 如透光范围最宽(152—3780 nm), 损伤阈值最高(远远大于 40 GW/cm²), 非线性光学系数足够大($d_{11} = 0.49$ pm/V), 双折射率适中(0.07), 有合适的接收角

宽度(1.47 mrad/cm)在自然条件下不吸湿, 在水中不潮解, 不必使用任何表面保护膜等^[12], 因此 KBBF 晶体在非线性光学应用中具有不可估量的潜力.

同 BBO 飞秒 OPA 一样, 基于上述改良晶体的飞秒 OPA 也可以实现超宽带相位匹配^[14-16], 尤其是基于 KBBF 晶体的飞秒 OPA, 在相同条件下其参量光输出带宽最大, 有可能获得小于 4 fs 的光脉冲^[16]. 但是对于飞秒 OPA 来说, 在非线性晶体中抽运光、信号光和闲频光之间的群速失配会使三波的有效相互作用长度变短, 导致参量光增益降低, 脉宽增宽. 所以要获得小于两个光学周期的超短脉冲, 其首要的问题是补偿相互作用三波的群速失配. 因此本文对完全补偿基于 KBBF 晶体的飞秒 OPA 中的三波群速失配进行了研究, 包括 I 类和 II 类相位匹配的情况. 为获得更高增益、更窄脉宽的参量光输出提供理论依据和指导.

2. I 类 KBBF 飞秒 OPA 中三波的群速匹配

KBBF 晶体为负单轴晶, I 类相位匹配时, 互作用的三波满足 $e \rightarrow o + o$, 即抽运光为非常光, 信号光与闲频光均为寻常光. 与 BBO 晶体类似, 为了获得最大的参量带宽, 同时使得信号光与闲频光群速匹配^[2], 对于钛宝石啁啾脉冲放大器倍频光抽运的 I 类 KBBF 飞秒 OPA, 仍然选取非共线相位匹配方式, 如图 1 所示. 其中 θ 为相位匹配角, 即抽运光波矢

* 天津大学青年教师基金(批准号 5110133)资助的课题.

[†] E-mail: majing@tju.edu.cn

k_p 与 KBBF 晶体光轴之间的夹角. α, β 为非共线角, 即信号光波矢 k_s 、闲频光波矢 k_i 与抽运光波矢 k_p 的夹角. v_s, v_i 分别为信号光、闲频光的群速度矢量.

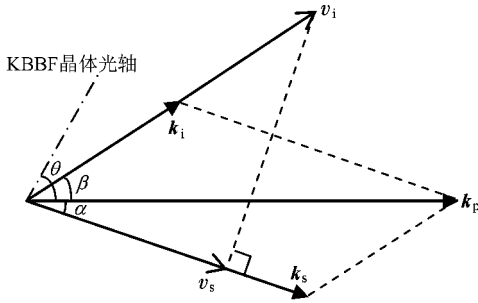


图 1 KBBF 晶体中 I 类非共线相位匹配矢量图

三波满足能量守恒和动量守恒的条件, 即

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (1)$$

$$k_s \sin \alpha = k_i \sin \beta, \quad (2)$$

$$k_p = k_s \cos \alpha + k_i \cos \beta, \quad (3)$$

式中 $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 分别为抽运光、信号光和闲频光的波长. 当信号光与闲频光群速匹配时, 由参考文献 [2] 和图 1 可知

$$v_s = v_i \cos(\alpha + \beta). \quad (4)$$

由 (2) 式和 (4) 式及波矢 $k = 2\pi n/\lambda$ 整理得非共线角

$$\alpha = \sin^{-1} \left\{ \left[1 + \frac{(n_s \lambda_i v_i + n_i \lambda_s v_s)^2}{n_i^2 \lambda_s^2 (v_i^2 - v_s^2)} \right]^{-1/2} \right\}, \quad (5)$$

式中 n_s 和 n_i 分别表示信号光和闲频光在 KBBF 晶体中的折射率. 三波在 KBBF 晶体中的主折射率可根据下面的色散方程来计算^[12]:

$$n_o^2 = 1 + 1.168705 \lambda^2 (\lambda^2 - 0.0062782) - 0.0096676 \lambda^2, \quad (6)$$

$$n_e^2 = 1 + 0.957724 \lambda^2 (\lambda^2 - 0.0059816) - 0.028510 \lambda^2. \quad (7)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_o^2 n_e^2 \lambda_s^2 \lambda_i^2 - n_e^2 [n_s^2 \lambda_p^2 \lambda_i^2 + n_i^2 \lambda_p^2 \lambda_s^2 + 2n_s n_i \lambda_p^2 \lambda_s \lambda_i \cos(\alpha + \beta)]}{(n_o^2 - n_e^2) [n_s^2 \lambda_p^2 \lambda_i^2 + n_i^2 \lambda_p^2 \lambda_s^2 + 2n_s n_i \lambda_p^2 \lambda_s \lambda_i \cos(\alpha + \beta)]} \right\}. \quad (9)$$

由 (9) 式可得 I 类 KBBF 飞秒 OPA 在信号光与闲频光群速匹配时的相位匹配曲线, 如图 3 所示.

由图 2 和图 3 可以得到 I 类 KBBF 飞秒 OPA 在参量带宽最大时, 连续调谐所需要的非共线角和相位匹配角. 尽管此时信号光与闲频光群速匹配, 但是抽运光与信号光、抽运光与闲频光的群速失配仍然

若抽运光为 400 nm 蓝光(以下均是), 则由 (5) 式和 (2) 式可得 I 类 KBBF 飞秒 OPA 在信号光与闲频光群速匹配时, 非共线角 α, β 随信号光波长 λ_s 的变化, 如图 2 所示. 图中的点划线为抽运光在 KBBF 晶体中的走离角.

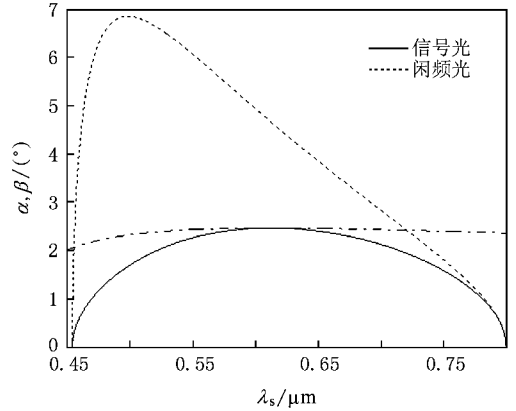


图 2 群速匹配时非共线角随信号光波长的变化

由图 2 可知, 当信号光波长在 613 nm 附近时, 信号光与抽运光之间的非共线角 α 变化比较平缓, 约为 2.5° , 这刚好与抽运光在 KBBF 晶体中的走离角接近. 因此, 选择此非共线结构, 不仅能够较大范围内实现信号光与闲频光的群速匹配, 保证参量带宽最大, 而且能够完全补偿 (613 nm 附近) 或减小抽运光和信号光之间的空间走离效应, 从而使参量增益最大.

由于抽运光在晶体中的折射率为

$$n_p = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}}, \quad (8)$$

式中 n_o 和 n_e 为抽运光在 KBBF 晶体中的两个主折射率. 由 (3) 式和 (8) 式及波矢 $k = 2\pi n/\lambda$ 整理得相位匹配角

会影响三波的相互作用, 减小时间走离长度, 使增益下降, 参量带宽变窄. 因此, 为了实现 I 类 KBBF 飞秒 OPA 中三波的群速匹配, 我们在采用非共线相位匹配方式达到信号光和闲频光群速匹配, 且保证参量带宽最大的基础上, 利用倾斜抽运光脉冲波面的方法达到相互作用的三波沿信号光方向群速完全匹配.

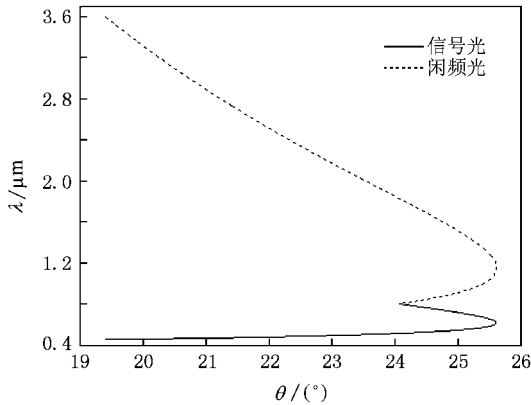


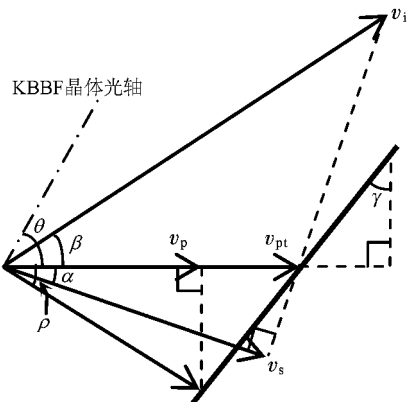
图3 群速匹配时的相位匹配曲线

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^[1]

$$v_t = v_0(1 + \tan\rho \cdot \tan\gamma), \quad (10)$$

式中 v_0 和 v_t 分别为脉冲波面倾斜前后的群速度, ρ 和 γ 分别为光脉冲在非线性晶体内的空间走离角和脉冲波面倾斜角.由(10)式可知,倾斜脉冲波面不能改变寻常光的群速度,只能改变非常光的群速度.

图4即为 KBBF 晶体中三波群速匹配的矢量图.图中 ρ 为抽运光的空间走离角,粗实线代表抽运光倾斜的脉冲波面, γ 为抽运光脉冲波面的倾斜角,如图所示为正,反之为负. v_p, v_{pt} 分别为抽运光脉冲波面倾斜前后的群速度矢量,其余各量与图1所示相同.

图4 KBBF 晶体中三波群速匹配矢量图

由(10)式和图4可得

$$v_{pt} = v_p(1 + \tan\rho \cdot \tan\gamma), \quad (11)$$

当抽运光与信号光群速匹配时,有倾斜后的抽运光群速度沿信号光方向的分量与信号光群速度相等,即

$$v_{pt} \cos\alpha = v_s. \quad (12)$$

由(11)式和(12)式可得抽运光脉冲波面倾斜角 γ 为

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{v_s - v_p \cos\alpha}{v_p \cos\alpha \tan\rho}\right). \quad (13)$$

由(13)式可得 I 类 KBBF 飞秒 OPA 在三波群速完全匹配时,抽运光脉冲波面倾斜角 γ 随信号光波长 λ_s 的变化,如图5所示.抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的增加而增大,且均为正.

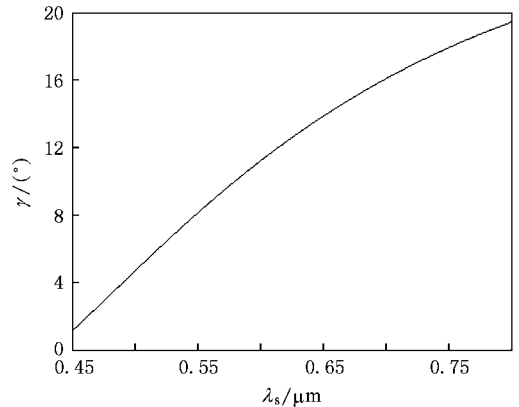


图5 群速匹配时抽运光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化

在钛宝石啁啾脉冲放大器倍频光抽运的 I 类 KBBF 飞秒 OPA 连续调谐时,由图2、图3和图5,选择与信号光波长 λ_s 相对应的非共线角 α 、相位匹配角 θ 及抽运光的脉冲波面倾斜角 γ ,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.

3. II 类 KBBF 飞秒 OPA 中三波的群速匹配

对于钛宝石啁啾脉冲放大器倍频光抽运的 I 类 KBBF 飞秒 OPA,利用上述方法虽然可以获得超宽带的可见光区脉冲,但是近红外光区的飞秒脉冲一般是由闲频光获得的,具有较大的角色散,脉宽较宽,压缩装置又较复杂.因此,对于近红外光区飞秒脉冲的获得,通常是利用钛宝石啁啾脉冲放大器基频光抽运的飞秒 OPA.由于在近红外光区,不同波长的飞秒脉冲之间的空间走离很小,几乎为0,所以该类 OPA 通常采用共线结构.这可使放大后的脉冲具有很小的分离角,简化了放大后的压缩设计,尤其是对

于闲频光.虽然信号光与闲频光沿同一方向传播,但是在 II 类相位匹配方式下它们的偏振方向相互垂直,因此很容易分开.对于 I 类共线相位匹配的 KBBF 飞秒 OPA,除了简并点处其余均无法实现三波群速的完全匹配.而对于 II 类共线相位匹配的 KBBF 飞秒 OPA,只要倾斜抽运光和信号光(非常光)的脉冲波面使它们的群速度均等于闲频光的群速度,即可实现三波群速的完全匹配.

KBBF 飞秒 OPA 在 II 类共线相位匹配条件下,互作用的三波满足 $e \rightarrow e + o$,即抽运光和信号光若均为非常光,则闲频光为寻常光.由于非常光的折射率随相位匹配角变化,所以 II 类相位匹配条件下得不到相位匹配角的解析表达式,只能进行数值求解.利用能量守恒和动量守恒条件(1)和(3)式, $\alpha = \beta = 0$ 并进行数值计算,可得到 800 nm 近红外光抽运的 KBBF 飞秒 OPA 的 II 类共线相位匹配角 θ 随信号光波长 λ_s 变化的曲线,如图 6 所示.

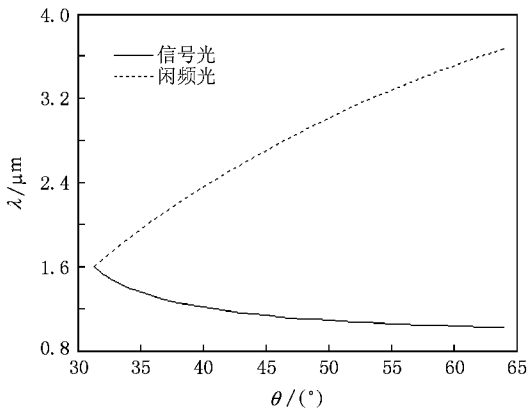


图 6 KBBF 飞秒 OPA 的 II 类共线相位匹配曲线

由图 6 可知,只有简并点处信号光与闲频光群速相等,其余三波群速均失配,这将使参量增益下降,且使增益带宽变窄.若倾斜抽运光和信号光的脉冲波面,使它们的群速度与闲频光的群速度相等,即

$$v_{pt} = v_{st} = v_i, \quad (14)$$

则可实现三波群速的完全匹配,并且此时参量带宽最大^[2].由(10)式和(14)式可得 800 nm 近红外光抽运的 II 类共线相位匹配 KBBF 飞秒 OPA 实现三波群速匹配时,抽运光和信号光在 KBBF 晶体中的脉冲波面倾斜角 γ 随信号光波长 λ_s 变化的曲线,见图 7.由图可知,抽运光和信号光的脉冲波面倾斜角均

为负,而且倾斜角的绝对值随着信号光波长的增加而减小.

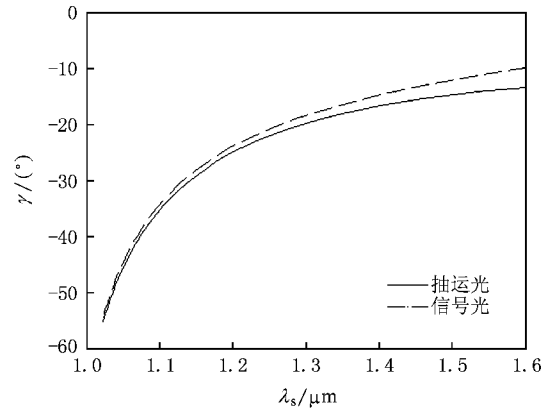


图 7 抽运光和信号光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化

在 II 类共线相位匹配的 KBBF 飞秒 OPA 连续调谐时,根据图 6 和图 7,适当选择与信号光波长相对应的相位匹配角及抽运光和信号光的脉冲波面倾斜角,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.

4. 结 论

在飞秒 OPA 中,由于不同波长的混频脉冲群速度不同,导致相互作用长度受限,从而造成参量增益降低,增益带宽变窄.因此,如何补偿相互作用飞秒脉冲之间的群速失配是获得高增益、窄脉宽参量光的关键.针对这个问题本文提出了完全补偿 KBBF 晶体中相互作用三波群速失配的方法,并进行了详尽的计算和分析.对于钛宝石啁啾脉冲放大器倍频光抽运的 I 类相位匹配方式,利用非共线结构和倾斜抽运光脉冲波面的方法,适当选择与信号光波长相对应的非共线角、相位匹配角及抽运光的脉冲波面倾斜角.对于钛宝石啁啾脉冲放大器基频光抽运的 II 类相位匹配方式,利用共线结构同时倾斜抽运光和信号光脉冲波面的方法,适当选择与信号光波长相对应的相位匹配角及抽运光和信号光的脉冲波面倾斜角.从而保证在参量带宽最大的前提下,KBBF 飞秒 OPA 在连续调谐时能够实现互作用的三波群速完全匹配.该方法简单可行,且适用于和 KBBF 晶体同类型的其他非线性光学晶体的飞秒 OPA.

- [1] Danielius R , Piskarskas A , Trapani P D , Andreoni A , Solcia C , Foggi P 1996 *Opt. Lett.* **21** 973
- [2] Wilhelm T , Piel J , Riedle E 1997 *Opt. Lett.* **22** 1494
- [3] Cerullo G , Nisoli M , Silvestri S D 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 3616
- [4] Cerullo G , Nisoli M , Stagira S , Silvestri S D 1998 *Opt. Lett.* **23** 1283
- [5] Nisoli M , Stagira S , Silvestri S D *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 630
- [6] Shirakawa A , Sakane I , Kobayashi T 1998 *Opt. Lett.* **23** 1292
- [7] Shirakawa A , Sakane I , Takasaka M , Kobayash T 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2268
- [8] Piel J , Beutter M , Riedle E 2000 *Opt. Lett.* **25** 180
- [9] Riedle E , Beutter M , Lochbrunner S *et al* 2000 *Appl. Phys. B* **71** 457
- [10] Baltuska A , Fuji T , Kobayashi T 2002 *Opt. Lett.* **27** 306
- [11] Sun T , Huang J S , Zhang W L , 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]
- [12] Chen C , Lin Z , Wang Z 2005 *Appl. Phys. B : Laser Opt.* **80** 1
- [13] Hussain K , Kumbhakar P 2006 *Braz. J. Phys.* **36** 1281
- [14] Kumbhakar P , Kobayashi T 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1329
- [15] Kumbhakar P , Kobayashi T 2004 *Appl. Phys. B : Laser Opt.* **78** 165
- [16] Kumbhakar P , Kobayashi T 2007 *Opt. Comm.* **277** 205

Group velocity matching in femtosecond optical parametric amplification of the $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ *

Ma Jing[†] Liu Ying

(School of Science , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 22 September 2008 ; revised manuscript received 3 December 2008)

Abstract

In this paper a method is presented for the first time , witch can match completely group velocities of three pulses in femtosecond optical parametric amplification (OPA) of the $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ (KBBF) crystal . We combine noncollinear configuration with tilting pulse front of pump , and collinear configuration with tilting pulse front of pump and signal , in type- I and type- II phase matching configurations respectively , to realize complete match of group velocities of three pulses in maximal parametric bandwidth of the femtosecond OPA , thus can obtain parametric pulses with higher gain and shorter duration .

Keywords : group velocity matching , phase matching , pulse front tilt , femtosecond optical parametric amplification

PACC : 4265K , 4280 , 4280W

* Project supported by the Foundation for Young Teachers of Tianjin University , China (Grant No. 5110133).

[†] E-mail : majing@tju.edu.cn