

文章编号: 0258-7025(2005)07-0913-04

BBO II 类共线相位匹配结构中群速失配的补偿

马 晶, 章若冰, 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)

摘要 为了消除群速失配对飞秒光参量放大(OPA)的不利影响,描述了在 II 类共线相位匹配的飞秒 BBO 光参量放大中,同时倾斜抽运光和信号光的脉冲波面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,相位匹配角、抽运光和信号光的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化。并分析了三波群速匹配对抽运光光斑尺寸的要求和对参量带宽的影响。结果表明,利用该方法不仅能够完全补偿飞秒 BBO 光参量放大在连续调谐时三波的群速失配,而且能够实现最大的参量带宽。此外,选取合适的抽运光光斑尺寸对提高参量增益至关重要。

关键词 非线性光学;群速匹配;脉冲波面倾斜;飞秒光参量放大

中图分类号 O 437.4 **文献标识码** A

Compensating Group Velocity Mismatch in BBO Type-II Collinear Phase-Matched Configuration

MA Jing, ZHANG Ruo-bing, 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, Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract In order to avoid adverse effect arisen from group velocity mismatch in femtosecond optical parametric amplification (OPA), a method that compensates completely the group velocity mismatch among three waves is presented, by tilting simultaneously wave fronts of pump and signal pulses, for femtosecond OPA in β -BaB₂O₄ (BBO) type-II collinear phase-matched configuration. When the group velocities of three waves are matched, the variations of the phase-matched angle and the wave front tilting angles of pump and signal pulses with the signal wavelength are calculated theoretically, and the effects on the pump beam size and the parametric bandwidth are analyzed. The results indicate that this method not only can match completely group velocities among three waves, but also can achieve maximal parametric bandwidth for continuous tunable femtosecond BBO OPA. In addition, for increasing parametric gain, it is very importance to appropriately choose the pump beam size.

Key words nonlinear optics; group velocity matching; pulse wave front tilting; femtosecond optical parametric amplification

1 引 言

对于飞秒光参量放大(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通常会使得三波的有效相互作用长度变短,导致参量光增益降低,脉宽变宽。因此,群速失配的补偿成为飞秒光参量放大中最为关键的技术。1996年 R. Danielius 等指出倾斜脉冲波面可以改变非常光的群速度,而

且能够减小三波之间的群速失配^[1],但对于调谐飞秒光参量放大来说这种方法很难实现三波的群速匹配。1997年 T. Wilhelm 等证明了当信号光的群速度与闲频光的群速度满足 $v_s = v_i \cos \Omega$ 时, BBO 光参量放大的参量带宽最大,并且信号光与闲频光群速匹配^[2]。在此基础上人们获得了可见光区小于 10 fs, 近红外光区小于 20 fs 的光脉冲^[3~10]。但是

收稿日期:2004-09-21;收到修改稿日期:2004-12-13

基金项目:国家 973 计划(G1999075201)、高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和霍英东教育基金资助项目。

作者简介:马 晶(1978—),女,黑龙江省兰西县人,天津大学博士研究生,主要从事超快激光及超快非线性光学方面的研究工作。E-mail:zpq_mj@eyou.com

这类光参量放大的信号光、闲频光与抽运光之间存在群速失配,其BBO晶体的长度均不超过1 mm,因此严重影响了参量光的增益。而且由于近红外光区的飞秒脉冲一般是由闲频光获得的,所以具有较大的角色散,脉宽较宽,压缩装置复杂。2001年 Arlee V. Smith 提出利用脉冲波面倾斜和非共线相位匹配相结合的方法可以完全补偿双折射晶体中三波的群速失配,而且对于 I 类和 II 类相位匹配均适用^[11]。但是非共线结构和晶体的双折射效应使三波之间存在较大的空间分离。

在近红外区,不同波长的飞秒脉冲之间的空间分离很小,几乎为 0,因此,利用钛宝石啁啾脉冲放大器抽运的光参量放大通常采用共线相位匹配方式。对于 I 类共线相位匹配的 BBO 光参量放大,很难实现三波群速的完全匹配。而对于 II 类共线相位匹配的 BBO 光参量放大,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。因此本文提出了同时倾斜抽运光和信号光脉冲波面,来完全补偿钛宝石啁啾脉冲放大器抽运的 II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大中三波群速失配的方法。虽然 II 类相位匹配 BBO 晶体的二阶非线性系数比 I 类相位匹配的小,但是由于采用共线结构并且三波在近红外区,空间分离效应很小,因此可以增加 BBO 晶体的长度来弥补这个不足。而且由于共线结构,使得放大后的脉冲具有很小的分离角,因此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,但是它们的偏振方向相互垂直,因此很容易分开。

2 同时倾斜抽运光和信号光的脉冲波面实现三波的群速匹配

BBO 晶体为负单轴晶,在 II 类共线相位匹配条件下,若抽运光和信号光均为非常光,则闲频光为寻常光。三波满足能量守恒和动量守恒条件,即

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$k_p = k_s + k_i, \quad (2)$$

式中 ω, k 分别表示光脉冲的圆频率和波矢的大小,下标 p, s 和 i 分别表示抽运光、信号光和闲频光。由以上两个关系即可得到 800 nm 近红外光抽运的 II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大的相位匹配角 θ 随信号光波长 λ_s 变化的曲线,如图 1 所示。

利用色散元件,例如棱镜、光栅等均可将脉冲波

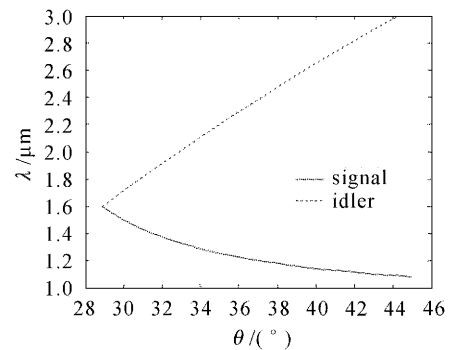


图 1 BBO 光参量放大的 II 类共线相位匹配曲线
Fig. 1 Collinear phase-matched curve for type-II BBO OPA

面倾斜^[12]。倾斜后其群速度变为^[1]

$$v_t = v_0(1 + \tan\rho \cdot \tan\gamma), \quad (3)$$

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分离角和脉冲波面倾斜角。当 γ 为从倾斜的脉冲波面顺时转向光波矢量方向时, γ 为正,反之为负。为便于实际操作,还需知道在非线性晶体外的脉冲波面倾斜角 γ_{external} ,对于垂直入射情况,它与 γ 有如下关系^[13]

$$\tan\gamma = \frac{v_t}{c} \tan\gamma_{\text{external}}, \quad (4)$$

式中 c 为真空中的光速。由(3)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。因此,对于 II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大来说,由于抽运光和信号光都是非常光,所以通过控制抽运光和信号光的脉冲波面倾斜角即可改变二者的群速度,使它们与闲频光的群速度相等(即 $v_t = v_i$),从而实现三波的群速匹配,并且此时参量带宽最大^[2]。图 2 即为同时倾斜抽运光和信号光脉冲波面,使 800 nm 近红外光抽运的 II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大实现三波群速匹配时,抽运光和信号光在 BBO 晶体内外的脉冲波面倾斜角 $\gamma, \gamma_{\text{external}}$ 随信号光波长 λ_s 变化的曲线。

由图 2 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。抽运光脉冲波面倾斜角的绝对值小于信号光脉冲波面倾斜角的绝对值,而且抽运光和信号光脉冲波面的夹角随着信号光波长的变化而变化。经过计算可知,当信号光波长小于 1.5 μm 时,脉冲波面的夹角随着信号光波长的增加而增加;当信号光波长大于 1.5 μm 时,脉冲波面的夹角随着信号光波长的增加而减小。因此抽运光和信号光的

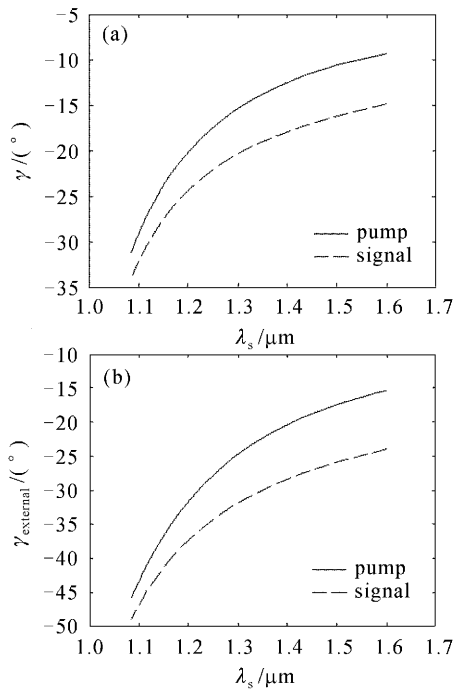


图 2 BBO 晶体内(a),外(b)的脉冲波面倾斜角随信号光波长的变化

Fig. 2 Wave front slant angle in (a) and out (b) the BBO crystal as a function of the signal wavelength

脉冲波面在空间的交叠会相应地变化。

在 II 类共线相位匹配的 BBO 光参量放大连续调谐时,根据图 1,2,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。

3 三波群速匹配时选择抽运光光斑尺寸的标准

虽然实现了三波的群速匹配,但是由于抽运光和信号光脉冲波面的倾斜,致使抽运光和信号光的脉冲波面并不重合,空间交叠随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。因此在任何脉冲波面倾斜的设计中抽运光光斑尺寸的选择都是非常重要的问题。

三波群速匹配时抽运光和信号光倾斜的脉冲波面空间交叠示意图如图 3 所示。图 3 中两条平行的实线表示抽运光倾斜的脉冲波面,两条平行的虚线表示信号光倾斜的脉冲波面。 k_p, k_s 及 S_p, S_s 分别

表示抽运光和信号光的波矢矢量及坡印亭矢量,由于抽运光和信号光的波长在近红外区,所以二者之间的空间走离很小,它们的坡印亭矢量很接近。 τ_p, τ_s 及 v_p, v_s 分别表示抽运光和信号光的脉宽及群速度。 ρ_p, ρ_s 及 γ_p, γ_s 分别表示抽运光和信号光在 BBO 晶体内的空间走离角及脉冲波面倾斜角。 θ 为相位匹配角。由图 3 可知

$$AB = \tau_s v_s \cos(\gamma_s - \rho_s) / \cos(\gamma_s - \rho_p) + \tau_p v_p, \quad (5)$$

$$BC = AB \cos(\gamma_s - \rho_p) / \sin(\gamma_p - \gamma_s) = [\tau_s v_s \cos(\gamma_s - \rho_s) + \tau_p v_p \cos(\gamma_s - \rho_p)] / \sin(\gamma_p - \gamma_s), \quad (6)$$

则抽运光的有效光斑直径 D 的大小为

$$CE = BC \cos(\gamma_p - \rho_p) / \cos \rho_p = [\tau_s v_s \cos(\gamma_s - \rho_s) + \tau_p v_p \cos(\gamma_s - \rho_p)] \times \cos(\gamma_p - \rho_p) / [\sin(\gamma_p - \gamma_s) \cos \rho_p]. \quad (7)$$

图 4 为 800 nm 近红外光抽运的 II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大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 λ_s 变化的曲线。图中抽运光的脉宽为 200 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

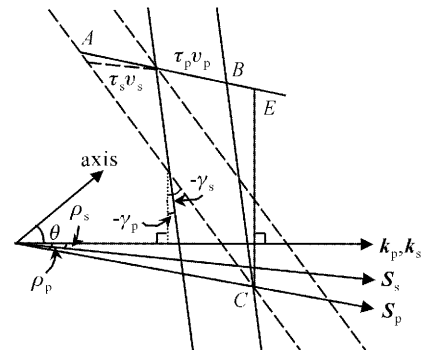


图 3 抽运光和信号光倾斜的脉冲波面交叠示意图

Fig. 3 Scheme of overlapping wave front of tilting pump and signal pulses

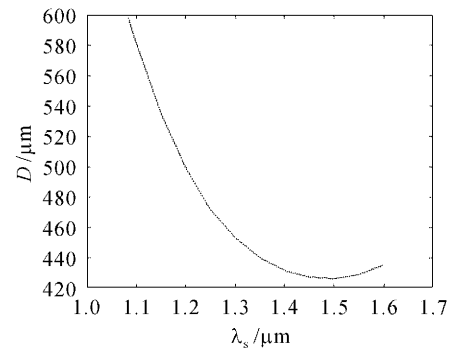


图 4 抽运光的有效光斑直径随信号光波长的变化

Fig. 4 Effective diameter of the pump beam as a function of the signal wavelength

斑直径将增加。由图 4 可以看出抽运光的有效光斑直径随信号光波长的增加逐渐减小,信号光波长大于 $1.5 \mu\text{m}$ 后直径又逐渐增加。这也正是抽运光和信号光倾斜的脉冲波面夹角随信号光波长的增加先增加后减小的结果[如图 2(a)所示]。在整个信号光波长范围内,抽运光的有效光斑直径大于 $420 \mu\text{m}$,小于 $600 \mu\text{m}$,因此根据所需要的调谐波段由图 4 即可选取最佳光斑尺寸的抽运光来抽运飞秒 BBO 光参量放大。

4 三波群速匹配对参量带宽的影响

参量带宽是可能实现的最大增益带宽,带宽越宽,则脉宽可以压缩得越窄。II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大中信号光的参量带宽 $\Delta\lambda_s$ 为^[14]

$$\Delta\lambda_s = \begin{cases} \frac{\lambda_s^2 v_{si}}{cl}, & v_{si}^{-1} \neq 0 \\ \frac{0.8\lambda_s^2}{c\sqrt{-l(g_s + g_i)}}, & v_{si}^{-1} = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $v_{si}^{-1} = v_i^{-1} - v_s^{-1}$, v_s , v_i 及 g_s , g_i 分别表示信号光、闲频光在 BBO 晶体中的群速度及群速度色散。 l 为 BBO 晶体的长度。当信号光与闲频光群速度相等时 ($v_{si}^{-1} = 0$), 参量带宽最宽。

图 5 为 800 nm 近红外光抽运的 II 类共线相位匹配 BBO 光参量放大实现三波群速匹配时,信号光的参量带宽 $\Delta\lambda_s$ 随信号光波长 λ_s 变化的曲线。BBO 晶体的长度 l 如图 5 所示。由图可知,信号光的参量带宽随着信号光波长的增加而增加,而且随着 BBO 晶体长度的增加而减小。在相同的 BBO 晶体长度下(如 1 mm), 脉冲波面倾斜后的参量带宽比脉冲波面倾斜前要宽得多。因此利用倾斜脉冲波面实现三波群速匹配后,可以通过增加 BBO 晶体的长

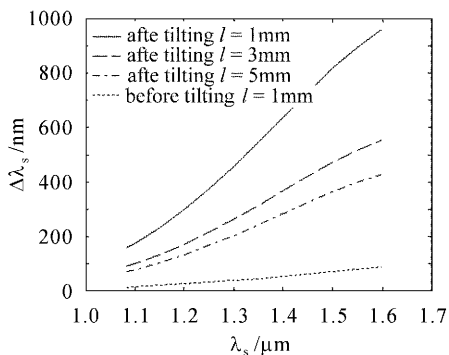


图 5 参量带宽随信号光波长的变化

Fig. 5 Parametric bandwidth as a function of the signal wavelength

度来提高参量增益,而且不必担心参量带宽的减小,因为此时的参量带宽比群速不匹配时较大的参量带宽还要宽得多,从而脉冲可以压缩得更窄。

5 结 论

结果表明,利用本文提出的方法不仅能够完全补偿连续调谐的飞秒光参量放大中三波的群速失配,而且能够实现最大的参量带宽。此外,该方法简单可行,其理论计算和分析结果对其他同类型非线性晶体的飞秒光参量放大同样适用。

参 考 文 献

- 1 R. Danielius, A. Piskarskas, P. Di Trapani *et al.*. Matching of group velocities by spatial walk-off in collinear three-wave interaction with tilted pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(13): 973~975
- 2 T. Wilhelm, J. Piel, E. Riedle. Sub-20-fs pulses tunable across the visible from a blue-pumped single-pass noncollinear parametric converter [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19): 1494~1496
- 3 G. Cerullo, M. Nisoli, S. Stagira *et al.*. Sub-8-fs pulses from an ultrabroadband optical parametric amplifier in the visible [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(16): 1283~1285
- 4 A. Shirakawa, I. Sakane, T. Kobayashi. Pulse-front-matched optical parametric amplification for sub-10-fs pulse generation tunable in the visible and near infrared [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(16): 1292~1294
- 5 A. Shirakawa, I. Sakane, M. Takasaka *et al.*. Sub-5-fs visible pulse generation by pulse-front-matched noncollinear optical parametric amplification [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(16): 2268~2270
- 6 A. Baltuska, T. Fuji, T. Kobayashi. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(5): 306~308
- 7 M. Nisoli, S. Stagira, S. De Silvestri *et al.*. Parametric generation of high-energy 14.5-fs light pulses at $1.5 \mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(8): 630~632
- 8 J. Piel, M. Beutter, E. Riedle. 20-50-fs pulses tunable across the near infrared from a blue-pumped noncollinear parametric amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(3): 180~182
- 9 E. Riedle, M. Beutter, S. Lochbrunner *et al.*. Generation of 10 to 50 fs pulses tunable through all of the visible and the NIR [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**: 457~465
- 10 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi. BBO optical parametric oscillator with the configuration of walk off-compensating crystals and noncollinear dual-direction pumping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 199~202
- 11 姚宝权,王月珠,王 骐. 双晶体双向非共线抽运 BBO 光参量振荡器[J]. *中国激光* 2003, **30**(3): 199~202
- 12 Arlee V. Smith. Group-velocity-matched three-wave mixing in birefringent crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 719~721
- 13 Zs Bor, B. Racz. Group velocity dispersion in prisms and its application to pulse compression and traveling-wave excitation [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **54**(3): 165~170
- 14 O. E. Martinez. Achromatic phase matching for second harmonic generation of femtosecond pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(12): 2464~2468
- 15 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study on the bandwidth of three-wave mixing optical parametric amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 680~686
- 16 刘红军,陈国夫,赵 卫等. 三波混频光参量放大器中带宽的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 680~686