

文章编号: 0258-7025(2007)01-0021-08

# BBO 晶体 I 类相位匹配从可见光到近红外光 宽带参量放大的带宽研究

刘 博, 章若冰, 刘华刚, 马 晶, 朱 晨, 王清月

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

**摘要** 超快激光的应用, 需要有高功率、窄脉宽和宽调谐的激光光源。飞秒光参量放大是产生可调谐、短至几个飞秒光脉冲的一种重要方法。为获得极窄的飞秒光脉冲, 飞秒光参量放大器就应该有尽可能大的本征带宽。理论研究了 BBO 晶体在 I 类非共线相位匹配条件下的宽带参量放大特性。将多色相位匹配技术应用于飞秒光参量放大, 推导出信号光带角色散时的宽带运转条件。分别介绍了从可见光到近红外光选取合适的参数实现宽带运转的方法。基于 400 nm 蓝光抽运的 BBO 晶体光参量放大器(OPA), 系统地分析了非共线角和信号光角色散值对相位失配和参量带宽的影响。研究结果表明选取适当非共线角和在近红外光中引入适当的角色散可极大提高参量带宽。

**关键词** 非线性光学; 宽带飞秒光参量放大; 角色散; 群速匹配

中图分类号 O 437.4 文献标识码 A

## Investigation of Spectral Bandwidth of BBO- I Phase Matching Noncollinear Broadband Optical Parametric Amplification from Visible to Near-Infrared

LIU Bo, ZHANG Ruo-bing, LIU Hua-gang,  
MA Jing, ZHU Chen, WANG Qing-yue

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Laser sources that are high power, short time duration and broadly tunable are needed for the application of ultra-fast laser. Femtosecond optical parametric amplification is one of the important techniques to produce broadly tunable and several femtoseconds pulse. To produce extremely short laser pulse, the femtosecond optical parametric amplification should support large spectral bandwidth enough. The ultra-broadband optical parametric amplification of BBO type-I phase matching is theoretically investigated. The achromatic phase matching technology is introduced in femtosecond optical parametric amplification, and broadband phase matching condition with angular dispersion of signal beam is given. The effects of noncollinear angle and angular dispersion of signal pulse on the phase mismatching and parametric bandwidth are also discussed. The results indicate that a suitable noncollinear angle of signal pulse and introducing suitable angular dispersion in near-infrared signal pulse can increase the parametric bandwidth dramatically. As an example, phase-matched noncollinear optical parametric amplifiers (NOPAs) pumped by the blue light of 400 nm are discussed. The method and the analysis results provide a theoretical guidance for obtaining broadband parametric amplifiers.

**Key words** nonlinear optics; broadband femtosecond optical parametric amplification; angular dispersion; group velocity matching

收稿日期: 2006-04-21; 收到修改稿日期: 2006-08-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G1999075201)和高等学校博士学科点专项科研基金(20030056021)资助项目。

作者简介: 刘 博(1974—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒光参量放大方面的研究工作。

E-mail: boliu@peoplemail.com.cn

导师简介: 章若冰(1943—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事超快激光及非线性光学方面的研究。

E-mail: zhangrb@tju.edu.cn

## 1 引 言

由于超快激光应用的需要,获取高功率、窄脉宽和宽调谐的激光光源一直是人们所追求的目标。飞秒光参量放大器(OPA)作为可调谐光源,因其放大过程具有高的单程增益和大的增益带宽等特点,成为产生可调谐的几个飞秒光脉冲的一种重要方法。目前由它产生的最窄脉冲宽度已达到4 fs<sup>[1]</sup>。这一指标是通过400 nm抽运的BBO晶体I类相位匹配光参量放大获得的。为了获取极窄的放大的飞秒光脉冲,飞秒光参量放大器应该有尽可能大的本征带宽。但是,在飞秒参量放大过程中,带宽受到相位匹配条件的限制。研究发现,利用非共线相位匹配可有效地加宽飞秒光参量放大的增益带宽<sup>[2~9]</sup>。并且证明,种子光和闲频光的群速度匹配是实现宽带运转的条件<sup>[4,5]</sup>。但是,由于这个条件要求闲频光的群速度必须大于种子光的群速度。这样,对于400 nm抽运的飞秒光参量放大,用大于800 nm的近红外光作种子光时,不可能仅通过改变非共线角来实现这种群速度匹配。因此,小于10 fs的光脉冲都是用可见光作种子光来产生的。

20世纪90年代,Szabo和Martinez等针对倍频提出了多色相位匹配方案(Achromatic Phase Matching),通过角色散使不同的频率成分以接近相位匹配的非共线角传播,产生宽带的二次谐波<sup>[10,11]</sup>。在2003和2004年,人们采用这种方案,用光栅和棱镜产生角色散实现了宽带倍频,获得了小于10 fs的紫外脉冲<sup>[12]</sup>。同时,人们也将多色相位匹配技术用于和频产生紫外光的过程来改善带宽<sup>[13]</sup>。

本文将多色相位匹配用于飞秒光参量放大系统。给出了BBO晶体在非共线I类相位匹配下,产生宽带可见光和近红外光参量放大的条件。系统地研究了400 nm抽运的非共线I类相位匹配飞秒光参量放大中非共线角和角色散对相位失配和参量带宽的影响。对小于800 nm的种子光,分析了非共线角对带宽的影响,以及通过改变非共线角改善带宽。对大于800 nm的种子光,证明了加入适当的角色散可实现宽带相位匹配。给出了相位匹配角、非共线角和角色散的选取方法,分析了角色散对相位失配和参量带宽的影响。该理论计算为实现从可见光到近红外光整个宽光谱内宽带飞秒光参量放大运转提供了条件。

## 2 理论分析

### 2.1 宽带运转条件

在参量放大过程中,抽运光、信号光/种子光和闲频光要满足能量守恒和动量守恒条件

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

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad (2)$$

其中下标 p,s 和 i 分别表示抽运光、信号光/种子光和闲频光。 $\omega$  为角频率, $\mathbf{k}$  为波矢。动量守恒条件也称为相位匹配条件。相位匹配条件不是必要条件,但是当该条件满足时参量增益最大,若偏离相位匹配条件,参量增益随之减小。

为了研究相位失配量随信号光角频率(波长)的变化,将相位失配

$$\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i, \quad (3)$$

在信号光中心角频率 $\omega_{s0}$ 处进行泰勒展开

$$\Delta\mathbf{k} = \Delta\mathbf{k}_0 + \frac{\partial\Delta\mathbf{k}}{\partial\omega_s}\Delta\omega_s + \frac{1}{2}\frac{\partial^2\Delta\mathbf{k}}{\partial\omega_s^2}(\Delta\omega_s)^2 + \dots, \quad (4)$$

式中 $\Delta\mathbf{k}_0$ 为中心角频率处三波的相位失配。由于在中心角频率处满足相位匹配条件,即 $\Delta\mathbf{k}_0 = 0$ ,因此相位失配 $\Delta\mathbf{k}$ 主要由一阶导数项决定。若一阶导数项

$$\frac{\partial\Delta\mathbf{k}}{\partial\omega_s} = 0, \quad (5)$$

$\Delta\mathbf{k}$ 将取决于二阶及高阶项。此时信号光波长的变化对相位失配量 $\Delta\mathbf{k}$ 影响较小。(5)式即为光参量放大器宽带运转条件。

在非共线配置中,三波波矢相互作用关系如图1所示。将 $\Delta\mathbf{k}$ 沿平行和垂直于抽运光波矢的方向分解为

$$\Delta k_{\parallel} = k_p - k_s \cos\alpha - k_i \cos\beta, \quad (6)$$

$$\Delta k_{\perp} = k_s \sin\alpha - k_i \sin\beta, \quad (7)$$

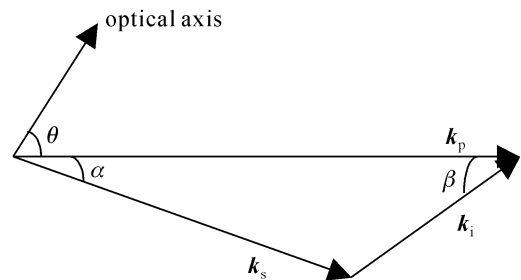


图1 BBO晶体I类非共线相位匹配的波矢矢量图  
Fig. 1 Wave-vector geometry of noncollinear phase matching based on BBO type I

若设 $\Delta k_{\perp} = 0$ ,相位失配由 $\Delta k_{\parallel}$ 确定,(6),(7)式可写成

$$\Delta k = k_p - k_s \cos \alpha - k_i \cos \beta, \quad (8)$$

$$k_s \sin \alpha = k_i \sin \beta, \quad (9)$$

若信号光带角色散,将方程(6),(7)对信号光角频率求导,可得

$$\frac{\partial \Delta k_{//}}{\partial \omega_s} = \frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} \cos \alpha - k_s \frac{\partial \alpha}{\partial \omega_s} \sin \alpha + \frac{\partial k_i}{\partial \omega_s} \cos \beta - k_i \frac{\partial \beta}{\partial \omega_s} \sin \beta, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Delta k_{\perp}}{\partial \omega_s} = \frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} \sin \alpha + k_s \frac{\partial \alpha}{\partial \omega_s} \cos \alpha - \frac{\partial k_i}{\partial \omega_s} \sin \beta - k_i \frac{\partial \beta}{\partial \omega_s} \cos \beta, \quad (11)$$

(10) 式乘以  $\cos \beta$ , (11) 式乘以  $\sin \beta$ , 然后两式相加可推得

$$\frac{\partial \Delta k_{//}}{\partial \omega_s} \cos \beta + \frac{\partial \Delta k_{\perp}}{\partial \omega_s} \sin \beta = - \frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} \cos(\alpha + \beta) - \frac{\partial k_i}{\partial \omega_s} + k_s \frac{\partial \alpha}{\partial \omega_s} \sin(\alpha + \beta), \quad (12)$$

因为宽带运转条件(5)式要求  $\frac{\partial \Delta k_{//}}{\partial \omega_s} = \frac{\partial \Delta k_{\perp}}{\partial \omega_s} = 0$ ,

因此在宽带相位匹配条件下,应有

$$- \frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} \cos(\alpha + \beta) - \frac{\partial k_i}{\partial \omega_s} + k_s \frac{\partial \alpha}{\partial \omega_s} \sin(\alpha + \beta) = 0, \quad (13)$$

若抽运光准单色则  $\partial \omega_i = -\partial \omega_s$ ,  $\frac{\partial k_i}{\partial \omega_s} = \frac{\partial k_i}{\partial \omega_i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \omega_s} =$

$-\frac{\partial k_i}{\partial \omega_i}$ , 再利用  $\frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} = \frac{1}{v_s}$ ,  $\frac{\partial k_i}{\partial \omega_i} = \frac{1}{v_i}$ , (13) 式可写成

$$k_s \frac{\partial \alpha}{\partial \omega_s} \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_s} \cos(\alpha + \beta) = 0, \quad (14)$$

(14) 式即为信号光带角色散时的宽带运转条件。若信号光角色散为零, (14) 式简化为

$$v_s = v_i \cos(\alpha + \beta), \quad (15)$$

(15) 式表明闲频光的群速度在信号光方向上的投影等于信号光群速度, 即满足信号光与闲频光群速度匹配时, 实现宽带运转<sup>[4,5]</sup>。对 400 nm 抽运的 BBO 晶体光参量放大器, 当信号光波长小于 800 nm 时, 此条件可满足。而当种子光波长大于 800 nm 时, 无法仅通过调节非共线角满足此条件。这时宽带运转条件式(5), 可通过引入种子光角色散, 即(14)式来实现。

## 2.2 相位匹配曲线与宽带相位匹配

在 BBO 晶体的 I 类相位匹配参量过程中, 抽运光是非常光, 信号光和闲频光是寻常光( $e \rightarrow o + o$ )。在非共线配置下, 由图 1 可得

$$k_i^2 = k_p^2 + k_s^2 - 2k_p k_s \cos \alpha, \quad (16)$$

(16) 式可写为

$$n_i^2/\lambda_i^2 = n_p^2/\lambda_p^2 + n_s^2/\lambda_s^2 - 2n_p n_s \cos \alpha / (\lambda_p \lambda_s), \quad (17)$$

由(17)式和(1)式与(16)式可得

$$\alpha = \arccos\left\{\left(\frac{n_p^2}{\lambda_p^2} + \frac{n_s^2}{\lambda_s^2} - \frac{n_i^2}{\lambda_i^2}\right) / \left[2n_p n_s / (\lambda_p \lambda_s)\right]\right\}, \quad (18)$$

式中  $1/n_p^2 = \cos^2 \theta / n_o^2(\lambda_p) + \sin^2 \theta / n_e^2(\lambda_p)$ ,  $\theta$  为相位匹配角,  $n_o, n_e$  为主轴折射率, 它们随波长的变化由塞耳迈耶尔(Sellmeier)方程求得。

根据(18)式可计算, 对给定抽运光波长, 当相位匹配角取某一定值时, 非共线角与信号光波长的关系曲线, 如图 2 所示。图中抽运光为 400 nm。由图 2 可以看出, 对相位匹配角为 0.55 rad 的曲线在 550~700 nm 区间接近水平直线, 非共线角在 0.065 rad (3.7°) 附近可实现可见光宽带相位匹配。种子光波长大于 800 nm 时, 各曲线接近有一定斜率的直线, 表明无法通过选取某一固定的非共线角实现宽带运转, 但可适当引入某一常数值种子光角色散来实现在近红外的宽带相位匹配。

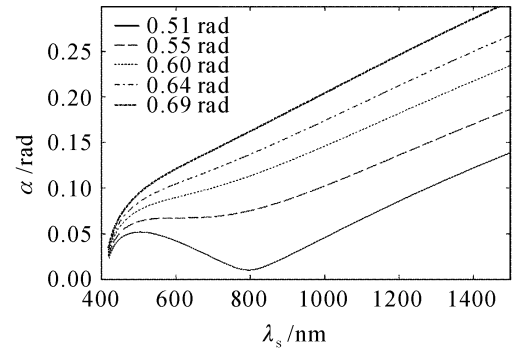


图 2 相位匹配曲线

Fig. 2 Curves of phase matching

将(16)式对信号光波长  $\lambda_s$  求导可得

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \lambda_s} = \left( k_i \frac{\partial k_i}{\partial \lambda_s} - k_s \frac{\partial k_s}{\partial \lambda_s} + k_p \frac{\partial k_p}{\partial \lambda_s} \cos \alpha \right) / (k_p k_s \sin \alpha), \quad (19)$$

利用  $\frac{\partial k_i}{\partial \lambda_s} = \frac{\partial k_i}{\partial \omega_i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \omega_s} \frac{\partial \omega_s}{\partial \lambda_s}$ ,  $\frac{\partial k_s}{\partial \lambda_s} = \frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} \frac{\partial \omega_s}{\partial \lambda_s}$  和(1)式。以及

由于抽运光准单色, 有  $\frac{\partial \omega_i}{\partial \omega_s} = -1$ ,  $\frac{\partial k}{\partial \omega} = v^{-1}$ 。(19) 式

改写为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \lambda_s} = \frac{2\pi c}{\lambda_s^2} \frac{k_i/v_i + k_s/v_s - k_p \cos \alpha / v_s}{k_p k_s \sin \alpha}, \quad (20)$$

由(20)式可求得使种子光满足相位匹配时在各波长

处种子光的角色散。

### 3 相位失配与参量带宽的理论计算

在参量放大过程中,一般选取一个相位失配量作为计算本征带宽的依据。这个最大允许失配量一般定义为<sup>[14]</sup>

$$|\Delta k|l_c = \pi, \quad (21)$$

其中 $l_c$ 为非线性晶体长度。达到最大允许失配量时,参量转换效率下降到0.4。由(21)式可知,归一化的相位失配 $\Delta k l_c / \pi$ 允许在-1到+1之间变化。由(21)式确定的带宽称为参量带宽,以区别于小信号增益带宽。参量带宽仅由相位失配决定,与抽运光强弱无关。

#### 3.1 可见光波段

在BBO晶体I类相位匹配光参量放大器中,采用准单色的400 nm波长抽运光抽运,如果信号光中心波长小于800 nm,可选取适当的非线性角 $\alpha$ 实现宽带运转。由(15)式和(2)式可知,满足宽带运转条件(15)式的非共线角 $\alpha$ 为

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{k_i}{k_p} \sqrt{1 - \left( \frac{v_s}{v_i} \right)^2} \right]. \quad (22)$$

图3和图4分别为满足宽带运转条件时,非共线角 $\alpha$ 和相位匹配角 $\theta$ 与信号光中心波长的关系。由图3和图4可根据信号光中心波长选取满足宽带运转条件的非共线角和相位匹配角。图5中实线为满足宽带运转条件时,不同信号光波长处的参量带宽。在以往的文献中,在计算参量带宽时,相位失配量 $\Delta k$ 一般是用泰勒展开式近似到二阶项的方法求得<sup>[6,14]</sup>。而本文是直接利用相位失配量表达式(3)式求得的。由图5可知,在560~657 nm之间,参量带宽均大于

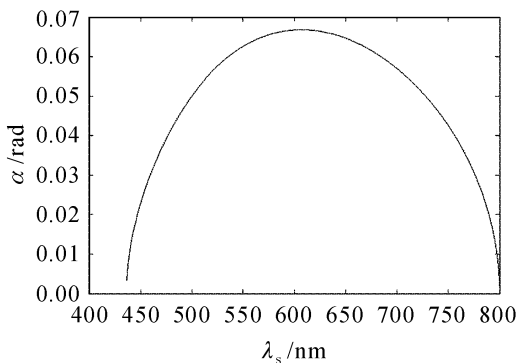


图3 信号光与闲频光群速度匹配下的非共线角 $\alpha$ 随信号光波长的变化

Fig. 3 Dependence of signal-pump angle  $\alpha$  on the signal wavelength when the velocities between the signal and idle are matched

160 nm。并且由图3可知,此时的非共线角在0.0641 rad(3.67°)到0.0672 rad(3.85°)之间变化。当波长小于560 nm和大于657 nm时,参量带宽迅速减小。

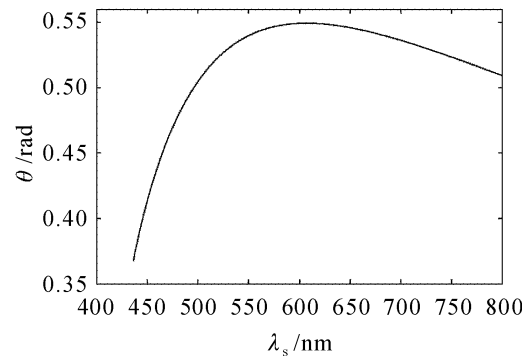


图4 信号光与闲频光群速度匹配条件下相位匹配角 $\theta$ 随信号光波长的变化

Fig. 4 Dependence of phase matching angle  $\theta$  on the signal wavelength when the velocities between the signal and idle are matched

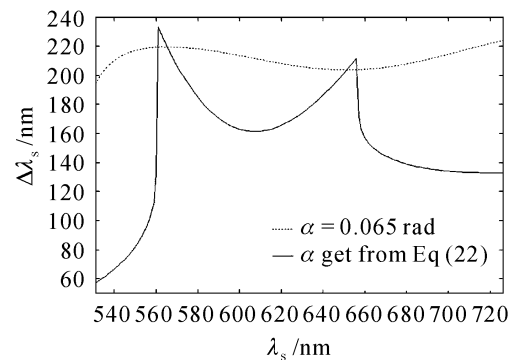


图5 参量带宽与信号光中心波长的关系曲线(在可见光谱区)

Fig. 5 Parametric bandwidth in the visible

为了解释迅速减小的原因,图6给出了在560 nm处和550 nm处的相位失配曲线。由图6可知,若以(21)式作为允许的最大失配量,当信号光波长为550 nm(<560 nm)时,频谱被截断为两段,光谱出现分裂,谱宽急剧下降。这时若适当增加非共线角,谱宽会得到改善。图7给出了在这种情况下适当增加非共线角对相位失配曲线和参量带宽的影响。由图7可知当信号光波长为550 nm(<560 nm)时,非共线角由(22)式计算的群速度匹配下的值0.0625 rad(3.58°)加大到0.065 rad(3.7°)可使截断的频谱变为连续的频谱,这时参量带宽由81.9 nm增加到213.5 nm。当信号光大于657 nm时,情况类似。

同时考察信号光中心波长在560~657 nm时的

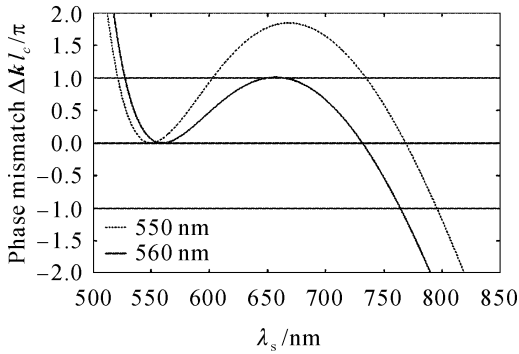


图 6 信号光中心波长在 560 nm(突变点)和 550 nm(560 ~ 657 nm 波段以外)处的相位失配曲线比较,且满足群速度匹配条件

Fig. 6 Phase-mismatching curves at the central wavelength of 550 nm and 560 nm, respectively. The group velocities of the signal and idle are matched at the central wavelength

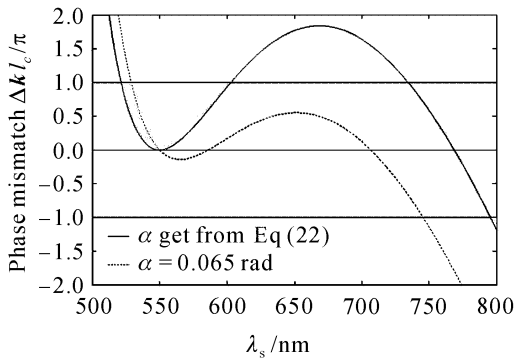


图 7 非共线角的变化对相位失配和带宽的影响 (信号光中心波长为 550 nm)

Fig. 7 Phase-mismatching curves with different signal-pump angle (central signal wavelength is 550 nm)

相位失配曲线,发现非共线角取 0.065 rad 时,除接近 560 nm 和 657 nm 的极小范围带宽稍微减小外,参量带宽都有较大增加,如图 5 所示,图中实线表示非共线角取满足群速度匹配条件时的值,虚线表示非共线角取一固定值为 0.065 rad,晶体长度为 1 mm。由图 5 可知,非共线角取固定的 0.065 rad 在 531 ~ 726 nm 范围内调谐时,参量带宽基本都在 200 nm 以上。从图 2 可知,这正是匹配角为 0.55 rad 的相位匹配曲线中接近水平的一段。因此,在可见光波段,相位匹配角取 0.55 rad,非共线角取 0.065 rad 是一个最佳选择,这一点已为实验所证实。

### 3.2 近红外波段

在种子光波长大于 800 nm 的近红外波段,宽带运转条件(5)式可以通过对种子光引入适当的角色散来实现,如(14)式所示。由图 2 也可看出,对种子光波长大于 800 nm 时,各曲线接近有一定斜率的

直线,因此可以引入一定的角色散来实现宽带相位匹配。非共线角  $\alpha$  和信号角色散取值可以通过如下的方法选取:由信号光中心波长和相位匹配角,根据(18)式,可确定非共线角  $\alpha$ 。再由(20)式,可确定信号角色散  $\frac{\partial \alpha}{\partial \lambda_s}$ 。根据(20)式,信号角色散随其波长的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在种子光波长大于 800 nm 时,各种子光角色散曲线都接近水平直线。种子光角色散变化比较小,可认为在一定信号光波长范围内近似为定值。当在某一段波长范围内调谐,计算相位失配时,取种子光中心波长处按(20)式算得的角色散为引入的角色散。

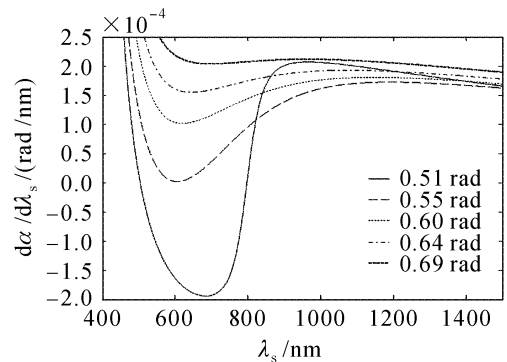


图 8 完全相位匹配下的种子光角色散随信号光波长的变化曲线

Fig. 8 Curves of angular dispersion versus the seeding light central wavelength with perfect phase matching

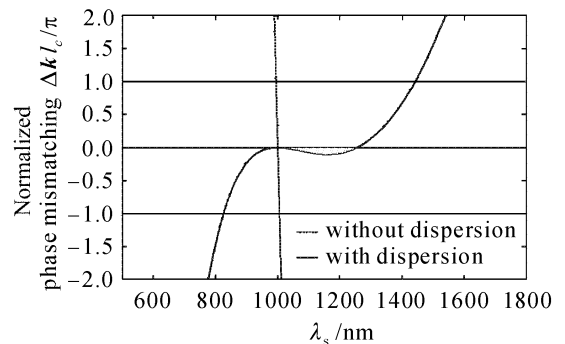


图 9 种子光有无角色散时的相位失配和参量带宽

Fig. 9 Comparison of phase mismatching and parametric bandwidth when the seeding beams are angularly dispersed or not

图 9 是种子光中心波长在 1000 nm 处,相位匹配角为 0.64 rad 时没加角色散和加入角色散的相位失配曲线。图中虚线角色散为零,实线加入  $1.9182 \times 10^{-4}$  rad/nm 的角色散。加入角色散后,带宽从 11 nm 增加到 618 nm。可见在近红外种子光中引入角色散可很好地改善带宽。

图 10(a), (b) 给出了当相位匹配角分别为

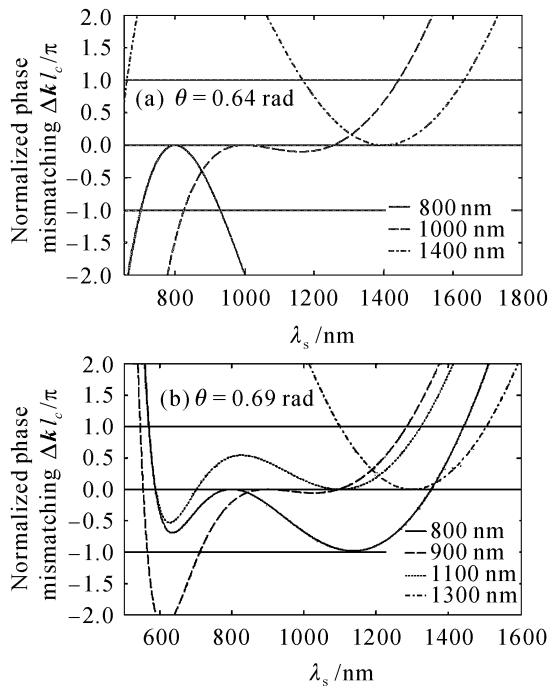


图 10 带有角色散的种子光在不同中心波长处的相位失配曲线

Fig. 10 Phase mismatching curves at different central wavelength when seeding beams are angularly dispersed

0.64 rad和 0.69 rad,非共线角按(18)式取值,角色散按(20)式取值时,调谐到不同种子光中心波长处的相位失配曲线。计算表明,在相位失配许可值(21)式之内,包含种子光中心波长的相位失配曲线基本上可分为四种类型。一种是有一个极值点(极大或极小)的曲线,如图 10(a)中种子光中心波长取 800 nm和 1400 nm时的相位失配曲线,称其为 I 型,这种类型的曲线对应带宽较宽。第二种是有两个极值点(极大和极小)的曲线,如图 10(a)中种子光中心波长取 1000 nm时的相位失配曲线,称其为 II 型,其对应的带宽比 I 型宽。第三种是有三个极值点的曲线,如图 10(b)中信号光中心波长取 1100 nm时的相位失配曲线,称其为 III 型,其对应的带宽是最宽的。还有一种是没有极值的,即单调上升或单调下降的曲线,如图 9 中的虚线所示,称其为 IV 型。这种类型的曲线对应的带宽很窄。当近红外种子光不加角色散时,基本为 IV 型。图 10(a)为当相位匹配角取 0.64 rad,种子光中心波长取 800 nm,1000 nm和 1400 nm时,按(20)式取角色散后的相位失配曲线。计算表明,调谐范围接近 800 nm 和 1500 nm 时为 I 型曲线,如图 10(a)点划线和实线所示。在 920~1280 nm 范围调谐为 II 型曲线,如图 10(a)虚线所示。可知在近红外波段中段带宽大,两侧波段带宽比中段有所下降。当相位匹配角在 0.51~0.68 rad

范围内取值时,相位失配曲线与图 10(a)类似。图 10(b)为当相位匹配角取 0.69 rad,种子光中心波长取 800 nm,900 nm,1100 nm 和 1300 nm 时,按(20)式取角色散后的相位失配曲线。计算表明,在 800~820 nm 以及 1083~1132 nm 两段波长内调谐时相位失配曲线为 III 型曲线,如图 10(b)实线和点线所示。在 820~1083 nm 范围调谐变为 II 型曲线,如图 10(b)虚线所示。大于 1083 nm 时失配曲线为 I 型曲线,如图 10(b)点划线所示。可知,此种情况下,近红外带宽在长波段带宽窄,在短波段带宽宽。

为了对取不同相位匹配角的情况进行比较,计算相位匹配角取 0.51 rad,0.60 rad,0.64 rad 和 0.69 rad 时的带宽随种子光中心波长变化曲线,如图 11 所示。由图 11 可知,在近红外光中段,按本方法取不同相位匹配角信号光加入角色散后带宽均较大。相位匹配角取 0.51 rad,0.60 rad 和 0.64 rad 时,中段宽带区域分别为 877~1280 nm,987~1360 nm 和 920~1280 nm,带宽分别大于 525 nm,595 nm 和 560 nm;但短波段带宽较窄,到 800 nm 处时分别下降至 140 nm,180 nm 和 230 nm。长波段带宽同时也有所下降,但仍有较宽带宽,分别在 500 nm,510 nm 和 455 nm 以上。我们发现当相位匹配角取 0.69 rad 时,近红外光短波段无下降特性,仍具有宽的带宽。但信号光大于 1130 nm 时,带宽下降至 400 nm。当同时考虑带宽与调谐范围时,取 0.51 rad 相位匹配角,宽带调谐范围最宽,从 877~1500 nm,且带宽均大于 500 nm。

考虑到在实验过程中要求易于操作,我们也计

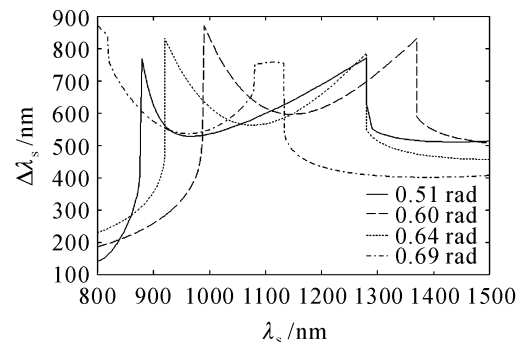


图 11 近红外光谱区使用带角色散的种子光,在取不同的相位匹配角时,参量带宽随种子光中心波长的变化曲线(角色散按(20)式取值,晶体长度为 1 mm)

Fig. 11 Parametric bandwidth in the near-infrared spectral range with different phase matching angle, when the seeding beams are angularly dispersed. The value of dispersions is determined by Eq. (20). The crystal length is 1 mm

算了在整个调谐范围内取一个适当的固定角色散时的带宽。先按(20)式计算得到在整个调谐范围内的各个角色散值,然后取这些角色散值的中值确定为固定角色散。经计算,从800 nm调谐到1500 nm时,当相位匹配角为0.51 rad,0.60 rad,0.64 rad和0.69 rad时,固定角色散应取为 $1.893 \times 10^{-4}$  rad/nm,  $1.762 \times 10^{-4}$  rad/nm,  $1.885 \times 10^{-4}$  rad/nm 和  $2.073 \times 10^{-4}$  rad/nm。种子光加入固定角色散后带宽随种子光波长变化曲线如图12所示。由图12可知,相位匹配角为0.51 rad(实线)时,种子光波长在828~958 nm波段,带宽下降到360~500 nm及接近1500 nm处带宽在230 nm与300 nm之间;相位匹配角为0.69 rad(点划线)时,种子光波长在1030~1240 nm波段,带宽下降到480 nm,及从1360~1500 nm带宽显著下降。将图11和图12比较可知,除这些少许波段外,其他情况带宽都接近或好于图11给出的值。计算表明,这些波段带宽显著下降是因为在最大允许失配量内,相位失配曲线被截为两段,光谱出现分裂。若分段设角色散,或适当调整角色散值,其带宽即可得到改善。从图12中还可看出,当相位匹配角取0.60 rad(虚线)时,种子光波长在850~1500 nm范围内调谐,带宽均大于780 nm。当相位匹配角取0.64 rad(点线),种子光中加入 $1.885 \times 10^{-4}$  rad/nm的角色散后,在800~1500 nm范围内调谐,带宽均大于768 nm。此参数为最佳选择。

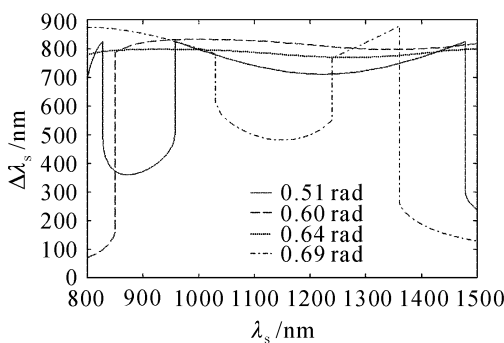


图12 取固定角色散时参量带宽随种子光波长的变化曲线(晶体长度为1 mm)

Fig.12 Parametric bandwidth in the near-infrared spectral range with different seeding light wavelength when angular dispersion is constant. The crystal length is 1 mm

## 4 结 论

本文对400 nm抽运的BBO晶体非共线I类相位匹配飞秒光参量放大,非共线角、角色散对相位失

配和参量带宽的影响进行了系统的理论计算。给出了在可见光波段宽带运转条件下(即信号光与闲频光群速度匹配条件下),非共线角和相位匹配角随信号光波长的变化曲线,并发现在稍微偏离群速度匹配条件下,选取适当的非共线角可使带宽和调谐范围进一步改善。计算证明对400 nm蓝光抽运的非共线I类相位匹配BBO光参量放大器,选择0.065 rad的非共线角和0.55 rad相位匹配角,可在531~726 nm调谐范围内,实现参量带宽大于200 nm的宽带参量放大。对大于800 nm近红外种子光加入角色散普遍可改善参量带宽。给出了确定其相位匹配角、非共线角以及信号光角色散的方法。系统地计算了满足宽带运转条件下(即角色散按(20)式取值时)和选取适当常数角色散时的相位失配曲线和参量带宽。计算还表明,在近红外波段某一波长范围内,均可选取适当的角色散值来大幅度提高带宽。当选择0.64 rad相位匹配角,加入 $1.885 \times 10^{-4}$  rad/nm的信号光角色散时,可实现在800~1500 nm的调谐范围内大于768 nm的参量带宽。本文计算给出的参数对于非共线参量放大实验具有指导意义。提出的确定实现宽带参量放大参数的方法对不同的非线性晶体、相位匹配方式和抽运光波长具有普遍意义。

## 参 考 文 献

- 1 A. Baltuška, 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
  - 2 V. Krylov, A. Kalintsev, A. Rebane *et al.*. Noncollinear parametric generation in  $\text{LiIO}_3$  and  $\beta$ -barium borate by frequency-doubled femtosecond Ti:sapphire laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2):151~153
  - 3 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
  - 4 A. Shirakawa, T. Kobayashi. Noncollinear phase- and group-velocity matching of optical parametric amplifier for ultrashort pulse generation [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 1998, **E81C**(2):246~253
  - 5 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**(3):457~465
  - 6 L. Hongjun, Z. Wei, C. Guofu *et al.*. Investigation of spectral bandwidth of optical parametric amplification [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(5):569~576
  - 7 Leng Yuxin, Jin Shiqi, Peng Jiahui *et al.*. Investigation of non-collinear type-I phase matched optic parametric amplification using BBO crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):977~980
- 冷雨欣,金石琦,彭家晖等. BBO晶体I型非共线相位匹配参量放大研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(11):977~980

- 8 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  
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
- 9 Yang Xiaodong, Xu Zhizhan, Zhang Zhengquan *et al.*. Experimental study on the gain bandwidth of non-collinear type-I optic parametric chirped pulse amplification using BBO crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8):1151~1152  
杨晓东,徐至展,张正泉 等. BBO-I 非共线光学参量啁啾脉冲放大增益带宽实验研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8):1151~1152
- 10 G. Szabó, Z. Bor. Broadband frequency doubler for femtosecond pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 1990, **50**(1):51~54
- 11 O. E. Martínez. Achromatic phase matching for second harmonic generation of femtosecond pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(12):2464~2468
- 12 P. Baum, S. Lochbrunner, E. Riedle. Tunable sub-10-fs ultraviolet pulses generated by achromatic frequency doubling [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14):1686~1688
- 13 Y. Nabekawa, K. Midorikawa. Group-delay-dispersion-matched sum-frequency mixing for the indirect phase control of deep ultraviolet pulses in the sub-20-fs regime [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(2):569~581
- 14 N. P. Barnes, V. J. Corcoran. Parametric generation processes: spectral bandwidth and acceptance angles [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(3):696~699