

BBO 晶体中非共线参量过程的 带宽与增益特性研究*

夏江帆 魏志义 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(1999 年 8 月 17 日收到)

研究了非共线作用下 BBO 晶体中的参量特性. 结果表明这种参量过程不仅存在着比较宽的光谱带宽和较高的参量增益, 而且也能在较宽的范围内满足群速匹配条件. 这对于高效率地产生脉宽极短的飞秒参量激光、扩大飞秒激光的调谐范围以及通过参量技术放大飞秒脉冲都具有重要的意义.

PACC: 4265K; 4280W

1 引 言

新型非线性光学晶体的激光参量技术是近十年来最热门的研究内容之一. 利用 BBO, LBO, KTP 等晶体, 目前的参量激光的调谐波长覆盖了从紫外到中红外的波段范围, 已经成为人们产生可调谐相干辐射的重要手段之一^[1,2]. 在传统的参量激光研究中, 作为反映其特征的重要参数之一——激光线宽, 通常总是希望越窄越好, 为此人们曾采用各种不同的相关技术以压缩激光线宽. 但是, 对于近年来建立在固体飞秒激光发展基础上的飞秒参量振荡(OPO)和啁啾脉冲参量放大技术(OPCPA)研究而言, 为了通过参量放大产生脉宽尽可能短的参量激光和能量尽可能高的激光脉冲, 就必须要有尽可能宽的本征带宽^[3]. 针对这一与传统参量技术完全不同的要求, 有必要重新进行参量方案的优化设计.

已有的共线参量作用下的理论计算及实验结果表明, 用于 I 类相位匹配的 BBO 晶体具有较宽的参量带宽^[4]. 但对于非共线相位匹配下的参量过程, 迄今很少见到系统的分析讨论. 实际上, 由于非共线作用能在一定程度上补偿光束走离角的影响^[5,6], 因此不仅能够取得较高的参量增益, 而且也是可能产生宽带参量激光的有效方案. 这对于获得近 10 fs 的 OPO 输出^[7,8]及采用 OPCPA 技术^[9]建立高束质、高效率、脉宽小于 20 fs 的台面超强超短激光系

统具有重要的实际意义. 本文将结合我们采用自锁模 Ti:Sapphire 激光进行的可见光飞秒 OPO 及其为种子的 OPCPA 技术研究, 系统分析了 BBO 晶体在非共线 I 类匹配条件下, 参量放大的本征宽度及等效非线性光学系数等重要参数与非共线角、相位匹配角以及激光波长之间的特征关系, 给出了实现最佳增益及获得最宽带宽的条件; 此外我们还进一步讨论了群速匹配对参量相互作用的影响及补偿的方法.

2 BBO 晶体中的非共线相位匹配参量过程

BBO 晶体具有透明波段宽、双折射大、非线性系数高、容许角小等特点. 自从 1985 年以来, 已被广泛地应用于各种非线性光学过程^[10,11], 特别是用于参量激光的研究. 但对于超短脉冲而言, 常用的共线相互作用方案只能在有限的带宽内满足相位匹配条件和群速匹配条件, 从而严重地限制了 BBO 的应用前景. 针对共线相互作用的这种不足, 我们将首先讨论非共线相互作用下的相位匹配及群速匹配特性.

2.1 相位匹配和角度调谐

参量相互作用作为典型的三波耦合非线性过程, 其相位匹配条件为

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i,$$

* 国家高技术惯性约束核聚变主题基金(批准号 863-416-2-318)、国家自然科学基金(批准号 69508006)资助的课题.

$$k_p = k_s + k_i. \quad (1)$$

其中下标 p 表示抽运光, s, i 分别表示信号光和闲置光. 对于非共线相互作用的情形, 各光波之间存在一定的夹角, 设抽运光与信号光、闲置光的夹角分别为 α, β , 如图 1 所示, 则 (1) 式变为

$$\begin{aligned} 1/\lambda_p &= 1/\lambda_s + 1/\lambda_i, \\ n_p/\lambda_p &= n_s \cdot \cos\alpha/\lambda_s + n_i \cdot \cos\beta/\lambda_i. \end{aligned} \quad (2)$$

考虑 I 类相位匹配参量过程 ($e \rightarrow o + o$), 在相位匹配条件下由 (2) 式和图 1 可以给出

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \lambda_p \lambda_s / (\lambda_s - \lambda_p), \\ \beta(\lambda_s, \alpha) &= \arcsin\left(\frac{n_s}{n_i} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \sin\alpha\right), \\ \alpha(\lambda_s, \alpha) &= \arcsin\left\{ \lambda_s \lambda_i n_o(\lambda_p) n_e(\lambda_p) \right. \\ &\quad \left. - n_e^2(\lambda_p) [n_s \lambda_p \lambda_i \cos\alpha + n_i \lambda_p \lambda_s \cos\beta] \right. \\ &\quad \left. \left[(n_o^2 - n_e^2) [n_s \lambda_p \lambda_i \cos\alpha \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + n_i \lambda_p \lambda_s \cos\beta] \right] \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

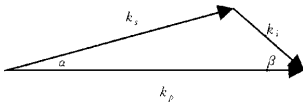


图 1 非共线抽运的波矢关系

根据 (3) 式, 可以很方便地计算在 I 类匹配情况下, 对于特定波长 λ_p 的抽运光, 其在不同的非共线角 (内部角 α) 下的信号光的角度调谐曲线. 针对飞秒倍频 Ti:Sapphire 激光 (400 nm) 抽运的 OPO 及调 Q 倍频 Nd:YAG 激光 (532 nm) 抽运的 OPCPA, 采用 BBO 作为参量晶体时, 我们计算得到的调谐曲线如图 2 所示, 不难看出非共线角的引入明显地增加了相位匹配带宽. 类似地, 上述计算过程可以同样用于分析讨论不同晶体在不同相位匹配情形下的调谐特性.

2.2 群速匹配

与相位匹配的分析类似, 群速匹配 (GVM) 的要求也来自于非线性光学过程的耦合方程, 只有在群速匹配的条件下, 晶体中三光波才能共同传播, 增益由瞬态变为稳态, 三波耦合才能达到最大效率. 群速匹配是飞秒参量过程中非常重要的一个条件, Trapani 等证实^[12], 在行波参量发生器中, 群速匹配决定了光学参量产生 (OPG) 的超荧光的角分布和谱分布, 因此在尽可能大的带宽内满足群速匹配条件, 是

保证参量过程转换效率和带宽的有利前提^[13].

群速匹配就是使三个光波的坡印廷矢量获得最大程度的重叠. 在共线抽运条件下, 空间走离使得信号光或闲置光的方向与抽运光的能流方向互相分开, 特别对于超短光脉冲而言, 由于色散引起的群速

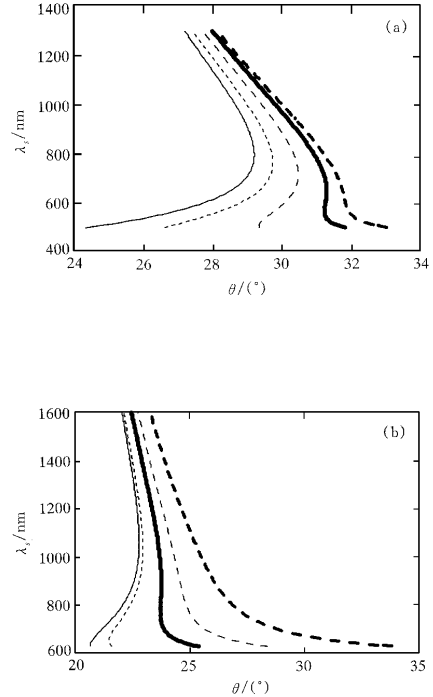


图 2 相位匹配角 θ 随参量光波长 λ_s 与非共线角 α 的变化 (a) 抽运波长为 400 nm; 从左向右, 非共线角依次为 $0, 2.0^\circ, 3.0^\circ, 3.7^\circ$ 和 4.0° (b) 抽运波长为 532 nm; 从左向右, 非共线角依次为 $0, 1.0^\circ, 2.3^\circ, 3.0^\circ$ 及 4.0°

失配, 三个光波之间将很快不再重叠. 虽然 Danielius 等曾采用波前倾斜的方法^[4]较好地解决了群速匹配问题, 然而由于波前倾斜将导致脉宽延展, 因此不利于可调谐超短脉冲的产生与放大. 采用非共线抽运方式, 通过选择合适的非共线角, 则不仅有可能大大降低空间走离的影响, 同时可在相当长的传播距离内满足群速匹配条件.

对 BBO 中的 I 类相位匹配, 抽运光为 e 光, 其群速方向沿坡印廷矢量方向, 而信号光与闲置光均为 o 光, 其群速方向与波矢方向一致^[14], 由此可直接计算指定非共线角时群速匹配参数与信号光波长之间的关系. 引入群速匹配特征参数,

$$GVM_{sp} = \frac{\tau}{\frac{l_c}{v_s} - \frac{l_c}{v_p \cos(\rho - \alpha)}},$$

$$GVM_{s_i} = \frac{\tau}{\frac{l_c}{v_s} - \frac{l_c}{v_i \cos(\alpha + \beta)}}. \quad (4)$$

其中 τ 为脉宽, l_c 为晶体长度, ρ 为走离角, 失配沿信号光波矢方向. 由于改变非共线角时, 相位匹配角将发生变化, 迫使通过角度调谐时抽运光与光轴的夹角接近这一匹配角, 因此在计算中除了考虑改变非共线角后走离角的变化外, 还必须在此之前考虑相位匹配角的变化. 取晶体长度 $l_c = 2$ mm, 抽运光脉宽 200 fs, 对于指定参量过程(400 nm 抽运的 OPO), 计算结果如图 3 所示.

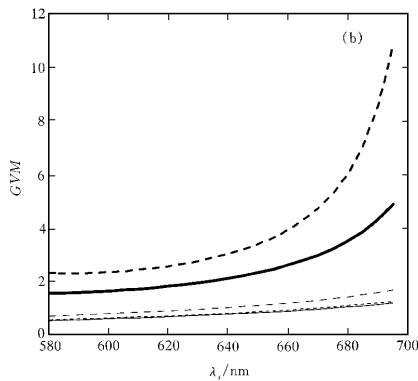
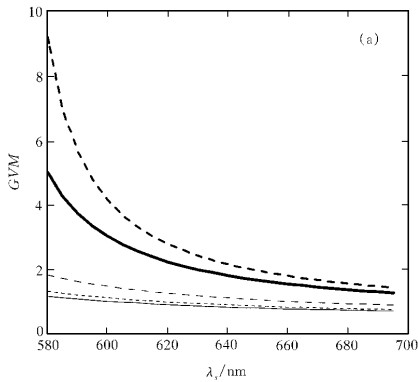


图 3 群速匹配随参量光波长 λ_s 与非共线角 α 的变化(400 nm 抽运 OPO) (a) 抽运光与信号光的群速匹配 (b) 闲散光与信号光的群速匹配从下向上, 非共线角依次为 $0, 1.0^\circ, 2.3^\circ, 3.7^\circ$ 及 4.0°

结果表明, 对 GVM 而言, 难以找到一个非常准确的定量判据, 不过定性的结果还是有用的. 非共线抽运时 GVM 参数比共线时大得多, 而且大参数的带宽与要高许多.

对 OPCPA 而言, 由于信号光和抽运光具有脉宽较宽 (>100 ps), 群速匹配比较容易满足.

3 相位失配下的参量过程

相位匹配只是满足了最佳耦合条件, 此时对应着参量光的最大增益. 在相位失配条件下参量转换效率将很快降低, 特别对于飞秒宽带光脉冲抽运的情况, 由于匹配只是对于某一个波长(中心波长)而定义的, 因此对于其他频谱成分自然存在着失配问题. 为讨论方便起见, 通常的做法是定义位相失配量 $\Delta kl_c/\pi$, 在 $\Delta kl_c/\pi = 0$ 的两侧允许有 ± 1 的失配量.

首先考虑抽运光以完全相位匹配角入射时的带宽. 由于完全相位匹配角是仅对指定的参量光中心波长而言的, 因此当参量光波长变化时, $\Delta kl_c/\pi$ 将偏离 0. 假设在垂直于抽运光波矢方向无相位失配, 参考图 1, 有 $k_i \sin \beta = k_s \sin \alpha$, 我们来考虑信号光波矢方向的相位失配

$$\Delta k_s = k_p \cos \alpha - k_s - k_i \cos(\alpha + \beta). \quad (5)$$

对于我们感兴趣的两个特例, 实际计算中所取参数如表 1 所示. 根据计算得到的满足 $|\Delta kl_c/\pi| \leq 1$ 的参量光波长范围, 我们定义为参量带宽. 参量带宽对于非共线角 α 很敏感, 图 4 所示为两种参量过程中参量带宽随非共线角的变化. 对 400 nm 激光抽运的 OPO 与 532 nm 激光抽运的 OPCPA 两种情况, 都存在一个最佳非共线角, 表 1 中给出了该情况下的有关数值, 此时对应着可获得的最大参量带宽.

表 1 BBO 中参量过程的计算参数

λ_p/nm	λ_s/nm	l_c/mm	$\alpha/^\circ$	τ/fs
400	630	2	3.7	200
532	800	10	2.4	100

其次考虑抽运光偏离相位匹配角入射时的情况. 首先考虑在中心波长处当抽运光与光轴的夹角偏离相位匹配角 $\Delta\theta$ 时的相位失配 $\Delta kl_c/\pi$, 满足 $|\Delta kl_c/\pi| \leq 1$ 的偏离有 $\Delta\theta$ 即容许角, 图 5(a) 给出了非共线抽运角对容许角的影响. 为了考察抽运光波矢偏离相位匹配方向时对相位失配的影响, 引入角度容错灵敏度

$$R = \left| \frac{\partial (\Delta kl_c/\pi)}{\partial (\Delta\theta)} \right|, \quad (6)$$

可以证明, 在一阶近似下, 角度容错 R 与 $\Delta\theta$ 无关, 而主要与非共线角有关. R 越大, 晶体对于角度偏

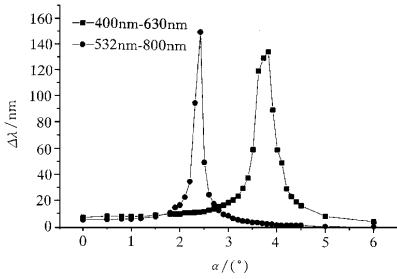


图 4 参量带宽 $\Delta\lambda$ 随非共线角 α 的变化 (l_c 分别为 2 mm, 10 mm)

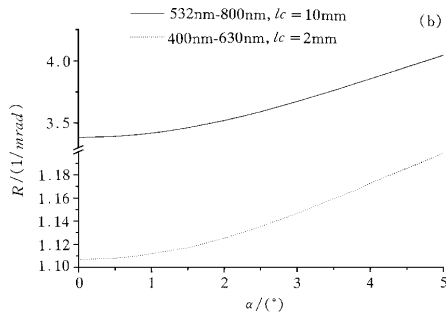
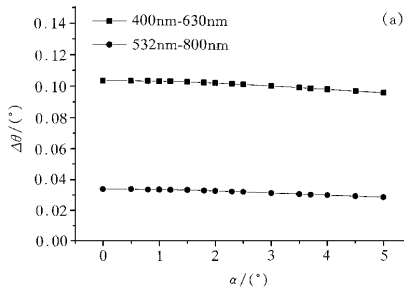


图 5 BBO 晶体的角度容错性 (a) 容许角 $\Delta\theta$ 随非共线抽运角 α 的变化 (l_c 分别为 2 mm, 10 mm) (b) 参量过程的角度容错灵敏度 R 随非共线抽运角 α 的变化 (l_c 分别为 2 mm, 10 mm)

离越敏感, 角度偏离的影响越大. 图 5(b) 给出了非共线抽运角对容许角的影响. 计算表明, 该容许角很小, 这意味着使用 BBO 作参量晶体时要求调节晶体的方向至完全相位匹配角附近. 而且, 随着非共线角的增大, 角度偏离相位匹配角的影响也增大, 这正是宽带 BBO-OPO 比较困难的原因之一.

4 参量增益与增益带宽

参量带宽只是有可能实现的最大增益带宽, 实际的带宽还与参量过程的增益谱有关. 考虑 I 类相位匹配过程, 假定信号光沿 z 轴运动. 其振幅方程为

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_s(z, t) = i \frac{\omega_s^2}{k_s c^2} d_{\text{eff}} E_p E_i^* \exp(-i\Delta k_s z), \quad (7)$$

其中有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = d_{31} \sin(\theta + \rho) - d_{22} \sin 3\varphi \cos(\theta + \rho). \quad (8)$$

由于 $d_{31} \ll d_{22}^{[15]}$, 因此 (8) 式可简化为

$$d_{\text{eff}} \approx -d_{22} \sin 3\varphi \cos(\theta + \rho). \quad (9)$$

另一方面, 闲置光的方程为

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_i \cos(\alpha + \beta)} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_i(z, t) = i \frac{\omega_i^2}{k_i c^2} \frac{1}{\cos(\alpha + \beta)} d_{\text{eff}} E_p E_s^* \cdot \exp(-i\Delta k_s z) \exp(i\delta z), \quad (10)$$

其中

$$\delta = \frac{k_p}{2} \sin\alpha (\sin 2\alpha + \sin 2\beta).$$

对于我们所讨论的参量过程, 即使在抽运光无损耗的小信号条件下, 方程 (7) (10) 也没有解析解^[6]. 作为简化, 在群速匹配的条件下, 还是可以求得小信号稳态增益的. 假设相位匹配和群速匹配条件满足, 则 (7) (10) 式可简化为一元常微分方程, 信号光随传播距离的有效小信号增益系数为

$$\Gamma_0 = \sqrt{2} (\omega_s \omega_i)^{1/2} (\epsilon_0 n_p n_s n_i c^3)^{-1/2} d_{\text{eff}} \sqrt{I}. \quad (11)$$

在此条件下, 信号光通过距离 l_c 所获得的放大倍数为

$$G = \cosh^2 \left[\sqrt{\Gamma_0^2 - (\Delta k_s / 2)^2} l_c \right]. \quad (12)$$

利用上一节获得的相位失配计算结果, 不难计算在不同抽运光强下增益随信号光波长的变化, 并由此得出参量过程中信号光的增益谱. 很显然, 参量带宽是由允许的相位失配决定的, 它给出了增益带宽的最大可能值, 在此范围内, 增益越大, 增益带宽

越宽,当小信号增益系数远大于相位失配时,增益带宽被饱和为参量带宽,而当小信号增益可与相位失配相比拟时,具体的增益带宽与增益谱随非共线角的变化而变化.图6给出了400 nm激光抽运的BBO中I类参量匹配过程的增益谱随抽运光强和非共线角的变化情况.

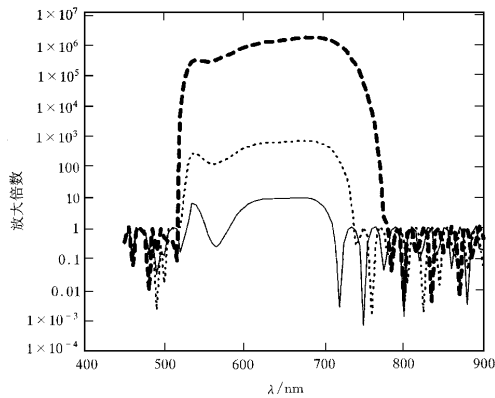


图6 BBO中I类参量过程(400 nm \rightarrow 630 nm)的增益谱特性 $\alpha=3.7^\circ$,从下向上,光强依次为 $2 \times 10^{13} \text{Wm}^{-2}$, $1 \times 10^{14} \text{Wm}^{-2}$, $1 \times 10^{14} \text{Wm}^{-2}$, $4 \times 10^{14} \text{Wm}^{-2}$

5 结 论

利用非共线相互作用,BBO晶体参量过程中各个光波可在较大带宽范围内满足群速匹配条件.计算表明,非共线抽运的GVM参数较之于共线相互作用情况高.由于GVM参数越大,群速失配的影响就越小,因此采用非共线相互作用后,群速失配不再是影响非共线参量作用的带宽与增益的决定性因素,而使得我们可以把注意力更多地放在带宽与增益本身上.

非共线相互作用还有效地增大了在允许相位失配下的参量带宽.计算表明,参量带宽强烈地依赖于所引入的非共线角,对于特定的参量过程可以通过选择非共线角使参量带宽达到最大.例如在400 nm抽运的OPO中,选择 3.7° 非共线角,可使得参量带宽相对于其他条件有极明显的增大,理论上可达到 $\sim 140 \text{nm}$;在532 nm抽运的OPCPA中,选择 2.4°

非共线角,理论上可达到 $\sim 150 \text{nm}$ 的带宽.不难设想,对于其他过程也可以得到类似的优化非共线角,因此这一结果具有可推广的普遍价值.

由允许相位失配给出的参量带宽是有可能实现的最大增益带宽,实际的增益谱与小信号增益因而与抽运光强有关.在一定的增益系数范围中,增益越大,增益带宽越大,这一性质明显不同于普通CPA技术中高增益下的光谱窄化效应,使得BBO在OPCPA的应用中完全没有光谱带宽方面的限制,这对于产生脉宽小于20 fs的超强激光具有重要的实际意义.

感谢钱列加博士与作者进行的有益讨论.

- [1] M. K. Reed, M. K. Steiner-Shepard, D. K. Negus, *Opt. Lett.*, **19** (1994), 1855.
- [2] V. Krylov, A. Kalintsev, A. Rebane *et al.*, *Opt. Lett.*, **20** (1995), 151.
- [3] A. Andreoni, M. Bondani, M. A. C. Potenza, *Opt. Comm.*, **154** (1998), 376.
- [4] R. Danielius, A. Piskarskas, P. Di Trapani *et al.*, *IEEE J. QE*, **34** (1998), 459.
- [5] T. J. Driscoll, G. M. Gale, F. Hache, *Opt. Comm.*, **110** (1994), 638.
- [6] A. Shirawa, T. Kobayashi, *IEEE Trans. Electron.*, **E81** (1998), 246.
- [7] G. M. Gale, M. Cavallari, T. J. Driscoll *et al.*, *Opt. Lett.*, **20** (1995), 1562.
- [8] A. Shirakawa, I. Sakane, T. Kobayashi, *Opt. Lett.*, **23** (1998), 1292.
- [9] I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*, *Opt. Comm.*, **144** (1997), 125.
- [10] O. D'uehr, E. T. J. Nibbering, G. Korn *et al.*, *Opt. Lett.*, **24** (1999), 34.
- [11] P. S. Banks, M. D. Feit, M. D. Perry, *Opt. Lett.*, **24** (1999), 4.
- [12] P. Di Trapani, A. Andreoni, G. P. Banfi *et al.*, *Phys. Rev.*, **A51** (1995), 3164.
- [13] P. Di Trapani, A. Andreoni, C. Solcia *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B12** (1995), 2237.
- [14] G. M. Gale, M. Cavallari, F. Hache, *J. Opt. Soc. Am.*, **B15** (1998), 702.
- [15] R. C. Eckardt, H. Masuda, Y. X. Fan, R. L. Byer, *IEEE J. QE*, **26** (1990), 922.
- [16] R. Danielius, A. Piskarskas, A. Stabinis *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B10** (1993), 2222.

BANDWIDTH AND GAIN OF BBO IN NON-COLLINEAR OPTICAL PARAMETRIC PROCESS*

XIA JIANG-FAN WEI ZHI-YI ZHANG JIE

(*Laboratory of Optical Physics ,Institute of Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100080*)

(Received 17 August 1999)

ABSTRACT

The optical parametric process in BBO with non-collinear configuration is discussed in this paper. The results show that not only the wider bandwidth and higher gain could be obtained in this process , but it is also possible to meet the group-velocity-matched requirement within rather large bandwidth. These properties provide great potentials to efficiently produce and amplify very short femto-second parametric laser pulses with a wide tunable range.

PACC : 4265K ; 4280W

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69508006).