

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0146-03

# BBO飞秒光参量振荡器中非线性晶体的空间啁啾

马晶, 章若冰, 赵华军, 张伟力, 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** 理论计算和分析了飞秒BBO光参量振荡器(OPO)在角度调谐时非线性晶体中的空间啁啾。给出了不同波长的参量光在谐振腔内的振荡回路以及在非线性晶体中的光路。给出了非线性晶体中的空间啁啾解析表达式,并计算了非线性晶体中的空间啁啾随腔参量的变化。

**关键词** 非线性光学; 空间啁啾; 角度调谐; 飞秒光参量振荡器

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

## Spatial Chirp of the Nonlinear Crystal for a Femtosecond BBO Optical Parametric Oscillator

MA Jing, ZHANG Ruo-bing, ZHAO Hua-jun, ZHANG Wei-li, WANG Qing-yue

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

**Abstract** The spatial chirp of the nonlinear crystal for a femtosecond BBO OPO is calculated theoretically and analyzed. The oscillating loops in the resonant cavity and the optical paths in the nonlinear crystal of OPO for different wavelength rays are given. The analytical expressions of the spatial chirp in the nonlinear crystal are deduced. Moreover, variation of the spatial chirp with cavity parameters is calculated.

**Key words** nonlinear optics; spatial chirp; angle tuning; femtosecond OPO

### 1 引言

飞秒光参量振荡(OPO)能产生窄脉宽和宽调谐的飞秒光脉冲,它在很多领域获得了广泛应用。飞秒OPO在角度调谐时,非线性晶体处光线的入射角是不断变化的。当光线斜入射到晶体表面时,在晶体内不同频率的光线将有不同的光学通道<sup>[1,2]</sup>,即有空间啁啾存在。不同波长的光线具有不同的光学通道导致光场时空的不均匀性<sup>[3]</sup>,它是宽带飞秒脉冲的一个重要特性。2001年L. Gallmann等人曾详细研究了克尔透镜锁模激光器飞秒脉冲谱的空间结构<sup>[4]</sup>。飞秒OPO在晶体内和光学谐振腔内,不同波长的光线具有不同的光学通道也将导致飞秒OPO谱的空间结构。这种光谱的空间结构随着腔参量及腔的调整而变化。并且它也将随着调谐角的变化而变化。因此,本文对I类非共线相位匹配的飞秒BBO OPO在角度调谐时BBO晶体的空间啁啾进

行了理论计算和分析。给出了不同波长的参量光在谐振腔内的振荡回路以及在BBO晶体中的光路。给出了BBO晶体中的空间啁啾解析表达式。并计算了BBO晶体中的空间啁啾随腔参量的变化。该分析方法及所得结果对同类型飞秒OPO同样有效。

### 2 BBO晶体中空间啁啾的解析表达式

图1为飞秒OPO的装置示意图。在图1中,KLM钛宝石激光器的二次谐波经球面镜 $M_3$ 反射,以一非共线角聚焦到BBO晶体内; $M_1, M_2$ 是曲率半径相等的球面折叠镜;HR为平面全反镜;OC为输出耦合镜。BBO晶体放置在两球面折叠镜的中心附近, $M_1, M_2$ 接近共焦放置。腔内用棱镜对 $P_1, P_2$ 进行色散补偿。当选取合适的非共线角时,可以实现时间和空间的走离补偿,从而增加参量激光的转换效率,增宽脉冲的光谱宽度。如1995年G. M. Gale等人利用非共线角为 $3.7^\circ$ 的飞秒BBO OPO在可见光

基金项目:国家重点基础研究项目(E-1999075201)、高等学校优秀青年教师教学及研究奖励基金资助课题。

作者简介:马晶(1978-),女,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: mj@twmail.tju.cn

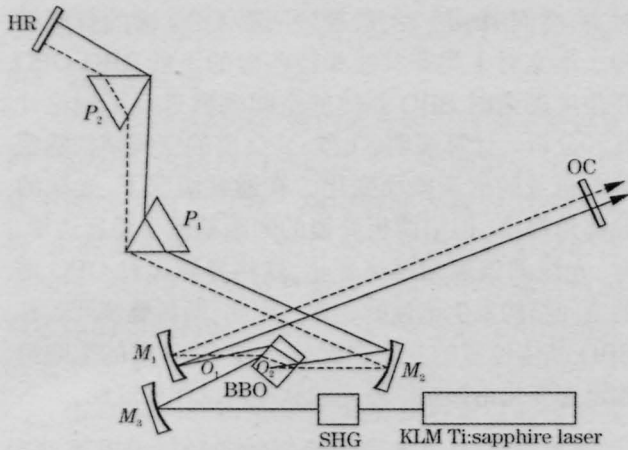


图 1 飞秒 OPO 装置示意图

Fig.1 Schematic of a femtosecond OPO

区获得脉宽为 13fs 的光脉冲<sup>[6]</sup>。在光学谐振腔内两种不同波长光线的振荡回路分别用图 1 中的虚线和实线表示。其中虚线表示信号光中心波长的光线,为参考光线;实线表示波长为  $\lambda$  的某一偏离中心波长的光线。因为折叠镜反射到两长臂的光线必须是平行的,因此  $O_1$  和  $O_2$  分别为折叠镜  $M_1$  和  $M_2$  的焦点。

晶体内不同波长信号光的光学通道如图 2 所示。图 2 给出的是  $O_1$  在晶体外,而  $O_2$  在晶体内部时的光路。随着两折叠镜之间的间隔和晶体位置不同,在晶体内部的光学通道还有  $O_1$  在晶体内部  $O_2$  在晶体外,  $O_1, O_2$  都在晶体内部和  $O_1, O_2$  都在晶体外,共四种。但下面的分析方法对这几种是相同的。在图 2 中  $A_0B_0$  为晶体的通光长度,  $A_1B_1 // A_0B_0$ ,  $\phi_0, \phi'_0$  分别是信号光中心波长光线的入射角、出射角,  $\phi$  是波长为  $\lambda$  的光线的入射角,  $\gamma$  是晶体内部波长为  $\lambda$  的光线相对于中心波长光线的偏离角,  $\gamma$  可正可负,在  $A_1B_1$  以上为正,在  $A_1B_1$  以下为负。在图 2 中,因为  $\Delta O_1A_1A_0$  与  $\Delta O_2B_1B_0$  相似,有

$$\frac{A_1A_0}{O_1A_0} = \frac{B_0B_1}{|\Delta y|} \quad (1)$$

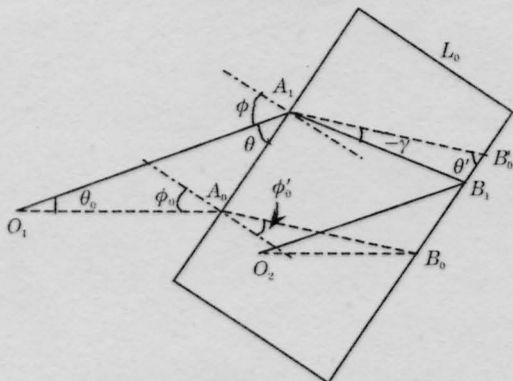


图 2 信号光在 BBO 晶体中的光路图

Fig.2 Optical paths of the signal beam in the BBO crystal

式中  $\Delta y = O_2B_0 - O_1A_1$ ,  $\Delta y$  可正可负。当  $\lambda < \lambda_0$  时  $\theta_0 = \phi - \phi_0$ , 当  $\lambda > \lambda_0$  时  $\theta_0 = \phi_0 - \phi$ , 因此由  $\Delta O_1A_1A_0$  可得

$$\frac{A_1A_0}{O_1A_0} = \frac{\sin|\phi - \phi_0|}{\cos\phi} \quad (2)$$

由折射定律可知

$$\sin\phi = n\sin(\gamma + \phi'_0) \quad (3)$$

当  $\gamma < 0$  时  $\theta' = \pi/2 - \phi'_0$ , 当  $\gamma > 0$  时  $\theta' = \pi/2 + \phi'_0$ , 因此由  $\Delta A_1B_0B_1$  可知

$$B_0B_1 = \frac{L_0 \sin|\gamma|}{\cos\phi'_0 \cos(\gamma + \phi'_0)} \quad (4)$$

式中  $L_0$  为 BBO 晶体的厚度。将(2)式,(3)式和(4)式代入(1)式可得

$$L_0 \sin\gamma \sqrt{1 - n^2 \sin^2(\gamma + \phi'_0)} = \Delta y \cos\phi'_0 \cos(\gamma + \phi'_0) \times [n \sin(\gamma + \phi'_0) \cos\phi_0 - \sqrt{1 - n^2 \sin^2(\gamma + \phi'_0)} \sin\phi_0] \quad (5)$$

(5)式为联系  $\gamma$  和腔参量的一个重要方程。由(5)式可知,如果腔参量  $L_0, \phi_0, \Delta y$  已知,  $\gamma, \phi$  即可获得。波长为  $\lambda$  的信号光在 BBO 晶体中的光学通道将被确定。

### 3 BBO 晶体中的空间啁啾随腔参量的变化

若 BBO 晶体的厚度为 2 mm, 切割角为  $30^\circ$ , 当逆时针转动 BBO 晶体时,信号光入射角为  $6^\circ$ , 在完全补偿抽运光走离效应的情况下,由 I 类非共线相位匹配条件可知相应的信号光中心波长为 650 nm。若两折叠镜的曲率半径均为 100 mm, 两长臂长分别为 100 cm 和 60 cm, 由四镜折叠腔的稳定条件可得,在稳区范围内  $\Delta y$  的变化范围为  $-1.4167 \text{ mm} < \Delta y < 1.1942 \text{ mm}$  和  $-5.9257 \text{ mm} < \Delta y < -3.3149 \text{ mm}$ 。由上述已知条件和(5)式,可得到光线的偏离角  $\gamma$  随信号光波长  $\lambda$  和  $\Delta y$  的变化关系,分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3,图 4 可知,偏离角  $\gamma$  的绝对值随着信号

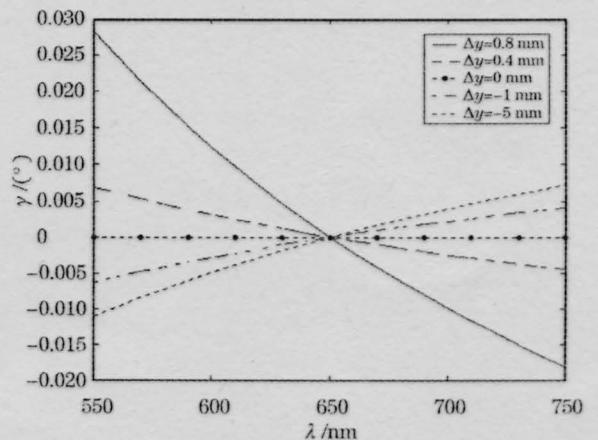


图 3 偏离角  $\gamma$  随波长  $\lambda$  的变化

Fig.3 Deviation angle  $\gamma$  as a function of wavelength  $\lambda$

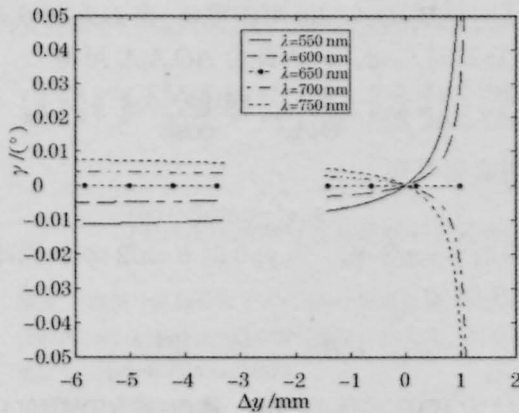


图4 偏离角  $\gamma$  随  $\Delta y$  的变化

Fig.4 Deviation angle  $\gamma$  as a function of  $\Delta y$

光波长  $\lambda$  趋近于中心波长而逐渐减小为 0。当  $\Delta y > 0$  时,短波长光线的偏离角为正,长波长光线的偏离角为负;当  $\Delta y < 0$  时,情况正好相反。在通常情况下,即  $\Delta y$  远离正的稳区边界时,光线的偏离角很小。但当  $\Delta y$  趋近于正的稳区边界时,偏离角的绝对值迅速增加。换言之,即当两折叠镜的间距  $2f_y + \delta_y$  ( $f_y$  为折叠镜子午面的焦距)趋近于稳区边缘 ( $\delta_y = 0$ ) 时,光线的偏离角迅速变化。迅速变化的偏离角使飞秒 OPO 谱的空间结构发生迅速的变化,这将影响信号光的脉冲宽度和稳定性。

## 4 结 论

飞秒 OPO 在角度调谐时,非线性晶体处光线的入射角是不断变化的。当光线斜入射到晶体表面

时,有空间啁啾存在,这导致飞秒 OPO 谱的空间结构。本文对 I 类非共线相位匹配的飞秒 BBO OPO 在角度调谐时 BBO 晶体的空间啁啾进行了理论计算和分析。计算表明,飞秒 OPO 谱的空间结构随着腔参量及腔的调整而变化。在通常情况下,光线的偏离角很小。但当两折叠镜的间距趋近于稳区边缘时,光线的偏离角迅速变化,这将导致飞秒 OPO 谱的空间结构发生迅速的变化。因此,两折叠镜间距和 BBO 晶体位置的变化引起的飞秒 OPO 谱的空间结构迅速变化将影响信号光的脉冲宽度和稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 Malini Ramaswamy-Paye, J. G. Fujimoto. Compact dispersion-compensating geometry for Kerr-lens mode-locked femtosecond lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1756-1758
- 2 R. B. Zhang, J. H. Sun, D. Q. Pang *et al.*. Analytical expressions of quadratic and cubic phase in a three-element resonator for Kerr-lens mode locking [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(5): 897-902  
章若冰, 孙敬华, 庞冬青等. 用于固体自锁模的三元腔激光器的二阶、三阶色散的解析表示 [J]. *物理学报*, 2001, **50**(5): 897-902
- 3 Christophe Dorrer, Ian A. Walmsley. Simple linear technique for the measurement of space-time coupling in ultrashort optical pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18): 1947-1949
- 4 L. Gallmann, G. Steinmeyer, D. H. Sutter *et al.*. Spatially resolved amplitude and phase characterization of femtosecond optical pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(2): 96-98
- 5 G. M. Gale, M. Cavallari, T. J. Driscoll *et al.*. Sub-20-fs tunable pulses in the visible from an 82-MHz optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(14): 1562-1564