

文章编号: 0258-7025(2002)07-0586-05

# 基于 PPLN 晶体的飞秒 OPA 中的非共线位相和群速度匹配

林 飞<sup>1</sup>, 钱列加<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 高功率激光物理国家实验室 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 复旦大学光科学系先进光子学材料与器件实验室, 上海 200433)

**提要** 研究了基于二阶极化率周期性反转铌酸锂(PPLN)晶体的飞秒光参量放大器(OPA)中的非共线位相和群速度匹配, 由于其具有准位相匹配结构, 非共线匹配方式不同于以 BBO 为代表的传统晶体。分别讨论了非临界位相匹配 PPLN 和倾斜 PPLN 两种情况下的匹配过程。

**关键词** 非共线位相匹配, PPLN, 飞秒 OPA, 群速度匹配

**中图分类号** O 437.4 **文献标识码** A

## Noncollinear Phase and Group-velocity Matching of Femtosecond Optical Parametric Amplification Based on Periodically Poled Lithium Niobate

LIN Fei<sup>1</sup>, QIAN Lie-jia<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(<sup>2</sup> State Key Laboratory for Advanced Photonic Material and Device, Department of Optical Science, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** Noncollinear phase and group-velocity matching of femtosecond OPA based on periodically poled lithium niobate were discussed, which differ from that based on birefringent phase matched traditional crystals such as BBO. The noncollinear phase matching was investigated in noncritical phase matched PPLN and tilted PPLN.

**Key words** noncollinear phase matching, PPLN, femtosecond OPA, group-velocity matching

### 1 引 言

利用光参量过程构成的光参量放大器(OPA)、光参量发生器(OPG)和光参量振荡器(OPO),是迄今为止产生几个飞秒激光脉冲的方法之一<sup>[1,2]</sup>,同时又可作为可调谐激光源<sup>[3]</sup>,其波长范围可覆盖可见到红外。由于光参量放大过程具有高增益和大增益带宽(简并和非共线)特点,非常适合应用于宽带超短脉冲激光系统,因此飞秒 OPA 是近年来各种新型非线性光学晶体在参量技术方面的研究重点。二阶极化率  $\chi^2$  调制晶体周期性极化铌酸锂(period-poled

lithium niobate, PPLN)是一种全新热门的非线性光学材料,在光波转换、光开关、光调制、脉冲压缩等许多领域有着重要的应用前景。基于 PPLN 晶体的光参量飞秒系统已有 OPG<sup>[4~6]</sup>和 OPG<sup>[7]</sup>,但尚未见到关于几十个飞秒级别的 PPLN OPA 的报道。

PPLN 是一种特殊的晶体,与其他传统晶体如 KTP, LBO, BBO 相比, PPLN 有非常大的二阶非线性系数  $\chi^2$ , 同时 PPLN 具有准位相匹配(QPM)结构。因此 PPLN 具有高增益、易位相匹配、可实现非临界位相匹配等优点,同时由于其长度短(一般不超过厘米量级),可用于紧凑系统。PPLN 的非线性系数  $d_{33}$

收稿日期 2001-04-19;收到修改稿日期 2001-07-19

基金项目 国家惯性约束委员会(416-5-1)及国家自然科学基金资助项目。

作者简介 林飞(1975—),男,主要从事飞秒光学的研究工作。E-mail:afeilin@sina.com

比其他系数如  $d_{31}$  大一个数量级,因此借助 QPM 结构可以选择  $e \rightarrow e + e$  匹配方式,让三个相互作用波的偏振相互平行来获得最大的有效非线性系数 ( $d_{\text{eff}} = 2d_{33}/\pi \approx 17 \text{ pm/V}$ )。在此方式下,可获得更高的增益,位相匹配也更易。PPLN 晶体的缺点是群速度失配(GVM)相对其他晶体非常大,并且在三波偏振平行下 GVM 会更大。GVM 的增大会使光脉冲间的有效相互作用距离变短,从而降低转换效率。并且光参量转换的增益带宽与信号波及空闲波间的 GVM 成反比。因此,GVM 大是飞秒 OPA 要解决的主要问题。

补偿 GVM 的方法有很多,包括角位相匹配(APM)<sup>[8]</sup>、非共线位相匹配(NCPM)技术等。NCPM 是其中重要的一种,具有实现简单等优点。它正是为补偿参量过程中的 GVM 而提出的,通过使信号波、空闲波和抽运光沿着三个不同方向传播,使信号光和空闲光间的群速度达到匹配(以下简称群速度匹配),来获得大增益带宽。但迄今为止,NCPM 方式一般应用在 BBO 材料上,有基于 BBO 的飞秒 OPA<sup>[1,2]</sup>和 OPO<sup>[9~11]</sup>系统,但还没有基于 PPLN 晶体的非共线位相匹配的报道。由于 PPLN 是一种非常重要的晶体,研究 PPLN 中的 NCPM 显得十分必要。首先,这将拓宽 PPLN 的应用范围;其次,由于 PPLN 具有与 BBO 等传统晶体所不同的 QPM 结构,有着不同的位相匹配方式,其 NCPM 方式也不同。通过 NCPM 方式,可研制基于 PPLN 材料的脉宽小于 100 fs 的低功率抽运的宽带 OPA,消除 PPLN 中 GVM 大带来的难题。

## 2 QPM 结构的非共线位相匹配原理

由于采用非周期 QPM 结构的倾斜 APPLN 近来发现在改变光束质量<sup>[12]</sup>等方面有着重要应用前景,因此我们的模型建立在更为普遍的倾斜 PPLN 基础上。如图 1 所示,PPLN 的倾斜角为  $\theta$ ,平行于抽运光方向上的 PPLN 有效周期长度为  $\Lambda$ 。PPLN 的 NCPM 光线示意图 2,光轴在  $y-z$  平面内,光轴与  $x$  轴所构成的平面平行于极化反转区域界面,光脉冲在  $x-y$  平面内传播,抽运光与  $z$  轴的夹角为  $\phi$ , $\alpha$  和  $\beta$  分别是信号光和空闲光与抽运光间的非共线角,信号光、抽运光、空闲光与光轴间的夹角分别为  $\gamma_s$ ,  $\gamma_p$ ,  $\gamma_i$ 。下文下标  $s$ ,  $p$  及  $i$  分别相应于信号光、抽运光及空闲光。

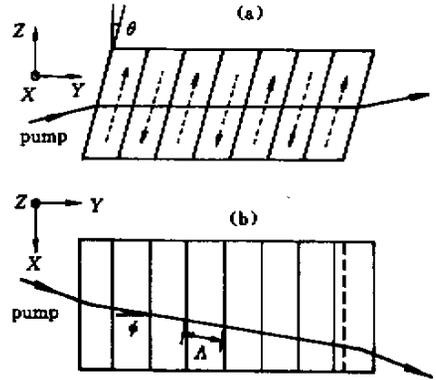


图 1 一块有效周期为  $\Lambda$  的倾斜 PPLN 示意图 (图上仅画出了抽运光,虚箭头代表了极化方向)

(a)侧面图 (b)俯视图

Fig.1 Schematic diagrams of titled PPLN with effective period of  $\Lambda$

(Only pump light was drawn. The vertical arrows represent the directions of nonlinear polarization.)(a) side view;(b) top view

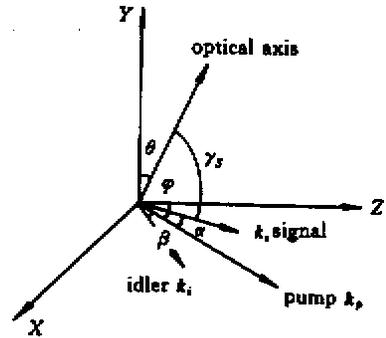


图 2 PPLN OPA 在 NCPM 下的几何光线图

图中所用坐标系与图 1 中的是匹配的。光轴在  $y-z$  平面内。光轴和  $x$  轴所构成的平面平行于 PPLN 极化反转区域界面。 $k_p$ ,  $k_s$  和  $k_i$  分别代表了抽运光、信号光和空闲光的波矢

Fig.2 Geometry of the NCPM of OPA based on PPLN

The coordinates here and that of Fig.1 are matched. The optical axis is in  $y-z$  plane. The plane constructed by optical axis and  $x$ -axis parallels the surfaces of polarization domain of PPLN. The wave vectors of the pump, signal and idler represented respectively by  $k_p$ ,  $k_s$  and  $k_i$  are shown

位相匹配对三波相互作用的高效频率转换极为重要<sup>[13,14]</sup>。倾斜 QPM 中波矢失配矢量为  $\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_{\text{QPM}}$ ,其中  $k_{\text{QPM}}$  为 QPM 的周期结构波矢,它实质上是一个虚矢,即是虚构的矢量,在抽运光波矢方向上的大小为  $2\pi/\Lambda$ 。由此得到在垂直抽运光方

向应有

$$k_s \sin \alpha - k_i \sin \beta \cong 0 \quad (1)$$

上式忽略了此方向上的波矢失配,因为只有平行抽运光方向上的波矢失配

$$\Delta k = k_p - k_s \cos \alpha - k_i \cos \beta - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

影响增益,其中  $\Lambda = \Lambda_0 / (\cos \theta \cos \phi)$ ,  $\Lambda_0$  为 QPM 结构中极化反转区域界面垂直方向上的周期。

### 3 飞秒 PPLN OPA 中的群速度匹配

#### 3.1 群速度匹配原理

为获得最大的增益带宽,应使  $\partial \Delta k / \partial v_s = 0$  [15]。经过简单演算后得到,此条件等价于信号光和空闲光间的有效群速度失配量  $GVM_{s-i} = 0$ ,即

$$GVM_{s-i} = \frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_i \cos(\alpha + \beta)} = 0 \quad (3)$$

其中  $v_j = dk_j / d\omega_j = (-\lambda \cdot dn / d\lambda + n) / c$  为群速度在波矢方向的分量  $j = s, i$  或  $p$ 。

抽运光和信号光间的有效群速度失配量

$$GVM_{p-s} = \frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_s \cos \alpha} \quad (4)$$

也是一个相当重要的量,它决定了光波在 PPLN 中的有效相互作用距离。

光脉冲传播方向与光轴的夹角分别为

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \arccos(\sin \theta \cdot \cos \phi) \\ \gamma_s &= \arccos[\sin \theta \cdot \cos(\phi - \alpha)] \\ \gamma_i &= \arccos[\sin \theta \cdot \cos(\phi + \beta)] \end{aligned}$$

因此有  $n_p = n_p(\lambda_p)$ ,  $n_s = n_s(\lambda_s, \alpha)$ ,  $n_i = n_i(\lambda_i, \beta)$  故式(3)可写为

$$GVM_{s-i}(\lambda_s, \alpha, \beta) = \frac{1}{v_s(\lambda_s, \alpha)} - \frac{1}{v_i(\lambda_i, \beta) \cos(\alpha + \beta)} = 0 \quad (5)$$

同样式(1)可写成

$$\beta - \arcsin\left[\frac{n_s(\lambda_s, \alpha) \lambda_i \sin \alpha}{n_i(\lambda_i, \beta) \lambda_s}\right] = 0 \quad (6)$$

其中  $\lambda_i = \lambda_p^{-1} - \lambda_s^{-1}$ 。对于一定的  $\theta, \phi, \lambda_p$  和  $\lambda_s$ , 非共线角  $\alpha, \beta$  可以通过由式(5)(6)组成的非线性方程组求解。

#### 3.2 非临界 NCPM

非临界 NCPM 就是当  $\theta = 0$  时的情形,这时空间走离效应消失,坡印廷矢量与波矢重合。这是与 BBO 情形又一不同之处,而且不存在 BBO NCPM 中的脉冲波面倾斜的问题。这时角度  $\phi$  对群速度匹配

没有影响,  $\phi$  可用来调谐 PPLN 有效周期长度。

抽运光波长  $\lambda_p$  为钛宝石激光器的 800 nm。在解方程组(5),(6)时所用的 Sellmeier 系数 (Congruently melting LiNbO<sub>3</sub> at 20°C)来自参考文献 [16]

非共线角对波长越不敏感,则越易获得较大的增益带宽。图3给出了满足群速度匹配情况下的非共线角  $\alpha$  和信号波长的关系。考察曲线  $GVM_{s-i} = 0$ , 最佳非共线角即在曲线极值处,对应最佳信号波长为 1279 nm,  $\alpha = 2.4^\circ$ 。在此  $\alpha$  角附近波动  $0.1^\circ$  范围,对应信号波长范围为 160 nm 左右。由此可知,在最佳非共线角处, PPLN 有相当大的带宽范围近似满足群速度匹配。

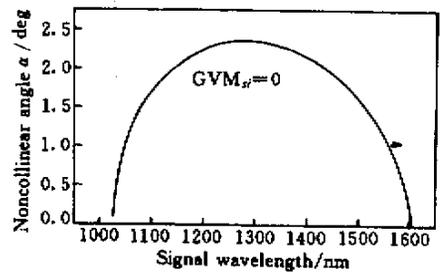


图3 在非临界位相匹配 PPLN 中满足信号光和空闲光间群速度匹配条件下的非共线角  $\alpha$

Fig.3 Noncollinear angles  $\alpha$  to match group-velocity between signal and idler in a noncritical phase-matched PPLN OPA

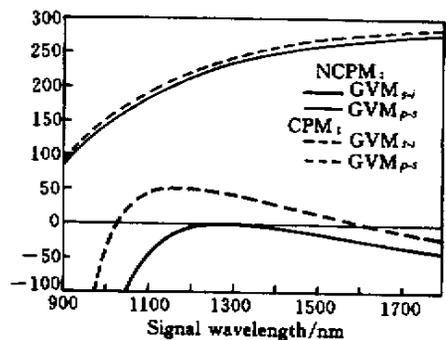


图4 在非临界位相匹配 PPLN 中  $GVM_{s-i}$  和  $GVM_{p-s}$  随信号波长变化曲线

实线和虚线分别相应于  $\alpha = 2.4^\circ$  时的 NCPM 情形和 CPM 情形

Fig.4  $GVM_{s-i}$  and  $GVM_{p-s}$  versus signal wavelength in a noncritical phase-matched PPLN OPA

The straight line and dashed line indicate the NCPM with  $\alpha = 2.4^\circ$  and CPM, respectively

在  $\alpha = 2.4^\circ$  时的  $GVM_{s-i}$  和  $GVM_{p-s}$  与信号波长的关系见图 4,其中包含了 CPM 和 NCPM 两种情形。通过 NCPM,信号光和空闲光的 GVM 在  $\lambda_s = 1279$  nm 附近较大带宽范围内得到补偿。另外抽运光和信号光的 GVM 在 NCPM 时稍有补偿。

由上述结果可知,通过群速度匹配,信号光和空闲光间的 GVM 得到补偿,OPA 的增益带宽大幅度增加,并且增益也得到提高。同时在  $\theta = 0$  时,参量过程不存在走离角,及 NCPM 和群速度匹配对  $\theta$  和  $\phi$  不敏感,因此非常适合于飞秒 OPA。此外,高增益使 OPA 在低抽运功率下也能很好地工作。

### 3.3 倾斜 PPLN 中的 NCPM

图 5 给出了在  $\phi = 0, \alpha = 2.4^\circ, \lambda_s = 1279$  nm 时  $GVM_{s-i}$  和  $\theta$  的关系,可见群速度匹配对  $\theta$  不敏感(一般  $\theta < 30^\circ$  对 PPLN 较合理)。群速度匹配与 PPLN 周期大小无关。图 6 给出了在信号光和空闲光间群速度匹配和  $\phi = 0$  情况下,非共线角及信号波长和  $\theta$  间的曲线关系,最佳信号波长不随倾角  $\theta$  变化,而在倾角  $\theta$  从  $0^\circ$  变化到  $30^\circ$  时最佳非共线角  $\alpha$  的变化量远小于  $0.1^\circ$ 。由此可见倾角  $\theta$  对群速度匹配无显著影响。我们更为详细的计算包括了在不同角度  $\phi$  下的 NCPM 情况(为简化起见,略去其数据讨论),结果表明在倾斜 PPLN 和非倾斜 PPLN 中一样易于实现 NCPM 和群速度匹配。这对倾斜 PPLN 的应用十分有利。

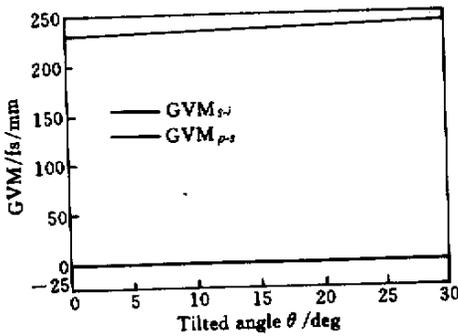


图 5  $GVM_{s-i}$  和  $GVM_{p-s}$  随倾角  $\theta$  的变化关系  
PPLN 中以下参数固定:  $\alpha = 2.4^\circ, \lambda_s = 1279$  nm 及  $\phi = 0^\circ$

Fig.5  $GVM_{s-i}$  and  $GVM_{p-s}$  versus tilted angle  $\theta$  for PPLN with fixed parameters

$$\alpha = 2.4^\circ, \lambda_s = 1279 \text{ nm}, \text{ and } \phi = 0^\circ$$

但倾斜 PPLN 也带来了不利因素。首先三个作用的  $e$  光波长的偏振方向不再平行而是都共同指在光轴的某一点上,因此有效非线性  $d_{\text{eff}}$  减小而导致增益降低。其次,无法避免地导致坡印廷矢量和

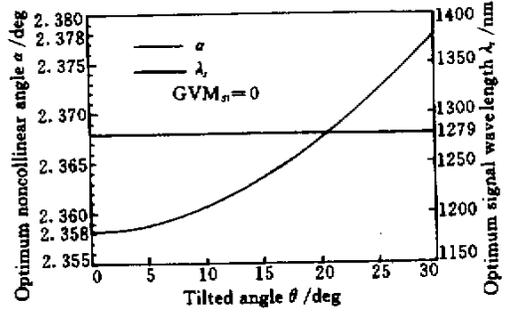


图 6 在  $\phi = 0^\circ$  的 PPLN 中满足信号光和空闲光群速度匹配条件下,最佳非共线角  $\alpha$  和最佳信号波长随倾角  $\theta$  的变化关系

Fig.6 Optimum noncollinear angle  $\alpha$  and optimum signal wavelength versus tilted angle  $\theta$  for PPLN with  $\phi = 0^\circ$  under group-velocity matching between the signal and idler

波矢方向偏离,从而产生空间走离角。另外,三个光波间的坡印廷矢量间的夹角稍有增大。

比较具有相同有效周期的非倾斜 PPLN 和倾斜 PPLN。群速度方向是和坡印廷矢量方向平行的,在倾斜 PPLN 中它和波矢方向会产生偏离。但是我们前面讨论的群速度匹配实际上是有效群速度匹配,即在波矢方向上的群速度分量的匹配。因此相对于非临界情形,走离角(或者说能流方向)不会对群速度匹配产生影响。在第二部分中,我们提到 QPM 位相匹配是在抽运光的波矢方向上进行,因此位相匹配也与走离角无关。在图 6 中看到的角度  $\alpha$  的微小变化实际上来自折射率变化。

由此可知,对一块非临界 PPLN 进行 NCPM,在角度失调( $\theta \neq 0, \theta$  较小)情况下,由于等效 QPM 周期改变等导致的位相失配和  $d_{\text{eff}}$  减小而影响到增益大小,但对群速度匹配不会有显著影响。

除了抽运光为 800 nm 的情况外,还对其他常用波长如 532 nm 的情况进行了计算,结果表明也有相同的结果。

## 4 结 论

本文详细研究了非临界(非倾斜)PPLN 中的非共线位相匹配,同时给出了 NCPM 下的最佳非共线角和信号光波长。讨论了倾斜 PPLN 情形下的 NCPM。结果表明,PPLN 飞秒 OPA 虽然与 BBO 飞秒 OPA 的位相匹配方式有所不同,但它在倾斜和非倾

斜两种情况下都易实现非共线位相匹配。这给研制低抽运功率的几十个飞秒级别的 PPLN OPA 提供了新的途径。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 G. Gerullo, M. Nisoli, S. Stagira *et al.*. Mirror-dispersion-controlled sub-10-fs optical parametric amplifier in the visible [ J ]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**( 21 ):1529 ~ 1531
- 3 M. H. Dunn, M. Ebrahimzadeh. Parametric generation of tunable light from continuous-wave to femtosecond pulses [ J ]. *Science*, 1999, **286**( 5444 ):1513 ~ 1517
- 4 K. C. Burr, C. L. Tang, M. A. Arbore *et al.*. High-repetition-rate femtosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**( 25 ) 3341 ~ 3343
- 5 L. Lefort, K. Puech, S. D. Butterworth *et al.*. Generation of femtosecond pulses from order-of-magnitude pulse compression in a synchronously pumped optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [ J ]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**( 1 ) 28 ~ 30
- 6 T. Beddard, M. Ebrahimzadeh, T. D. Reid *et al.*. Five-optical-cycle pulse generation in the mid infrared from an optical parametric oscillator based on aperiodically poled lithium niobate [ J ]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**( 14 ):1052 ~ 1054
- 7 A. Galvanauskas, M. A. Arbore, M. M. Fejer *et al.*. Fiber-laser-based femtosecond parametric generator in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [ J ]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**( 2 ):105 ~ 107
- 8 B. A. Richman, S. E. Bisson, R. Trebino *et al.*. Achromatic phase matching for tunable second-harmonic generation by use of a grism [ J ]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**( 16 ):1223 ~ 1225
- 9 G. M. Gale, M. Cavallari, F. Hache. Femtosecond visible optical parametric oscillator [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**( 2 ):702 ~ 714
- 10 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
- 11 Xia Jianfan, Wei Zhiyi, Zhang Jie. Bandwidth and gain of BBO in non-collinear optical parametric process [ J ]. *Acta Physica Sinica* ( 物理学报 ), 2000, **49**( 2 ):256 ~ 261 ( in Chinese )
- 12 Wang Tao, Qian Liejia, Zhu Heyuan *et al.*. Beam-quality improved efficient second-harmonic generation in aperiodic quasi-phase-matching gratings [ J ]. *Opt. Comm.*, 2001, **188** 213 ~ 217
- 13 J. Yao. Nonlinear Optical Frequency Conversion and the Technology of Laser Tune [ M ]. Beijing: Science Press, 1995. 1 ~ 67 ( in Chinese )
- 14 Wang Jie, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. Amendatory calculation of the acceptance parameters in three-wave interactions [ J ]. *Acta Optica Sinica* ( 光学学报 ), 2001, **21**( 2 ):139 ~ 141 ( in Chinese )
- 15 A. Shirakawa, T. Kobayashi. Pulse-front-matched optical parametric amplification for pulse generation tunable in the visible and near-infrared reaching to 6.5 fs [ J ]. *IEICE Trans. Electron.*, 1998, **E81-C** 246 ~ 253
- 16 V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan. Handbook of Nonlinear Optical Crystals [ M ]. Second, Revised and Update Edition, Springer, 1997. 119 ~ 125