

文章编号: 0253-2239(2008)01-0146-05

周期性极化铌酸锂晶体中半非共线型宽带 光学参变放大理论研究

胡志远 梁晓燕 赵宝真 李儒新 徐至展

(中国科学院上海光机所强场光学激光国家重点实验室, 上海 201800)

摘要 基于周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)的准相位匹配光参变放大过程,通过倾斜周期极化铌酸锂晶体中极化域(极化光栅)一定角度,实现了介于共线匹配方式和非共线匹配方式之间的一种半非共线型准相位匹配方式,并以该匹配方式下的各光矢量几何关系得出相位匹配曲线,找到在特定抽运光和信号光波长下能获得宽带增益放大的周期极化长度。并研究其极化倾斜角度与温度特性。模拟计算表明,在合适的角度与温度条件下,该方式可以532 nm 抽运光抽运的信号光在 800 nm 和 1064 nm 处均获得宽带光参变放大。

关键词 非线性光学; 准相位匹配; 光学参变放大

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A

Theoretical Investigation on Broad Band Semi-Noncollinear Optical Parametric Amplification in Periodically Poled Lithium Niobate

Hu Minyuan Liang Xiaoyan Zhao Baozhen Li Ruxin Xu Zhizhan

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on noncollinear optical parametric amplification in periodically poled lithium niobate (PPLN) which is realized by quasi-phase matching (QPM) technology, we consider the possibility of semi-noncollinear phase matching method between collinear and noncollinear geometry. With this configuration and geometry of all vectors in periodically poled lithium niobate, phase matching curves can be obtained. A sure grating period can always be found to satisfy the broad bandwidth optical parametric amplification (OPA) at fixed wavelengths of pump and signal from the phase matching curves. By tilting periodically poled lithium niobate-crystal's parallel grating a sure angle and keeping a sure temperature, numerical simulation with proper parameter shows broad bandwidth OPA at signal wavelengths of 800 nm and 1064 nm can be achieved.

Key words nonlinear optics; optical parametric amplification; quasi-phase matching

1 引 言

超短脉冲的频率转换可以应用到很多重要的实际应用中去,比如通信、信号处理和光谱学等。同样的,关于近年来迅速发展光学参变啁啾脉冲放大(OPCPA)的研究也是其中一项重要的应用。光学参变啁啾脉冲放大的主要原理是用能量较大的抽运脉冲通过三波相互作用去放大能量较小的宽带线性啁啾信号脉冲,它的主要优势在于宽带增益放大,高

的信噪比,无光谱窄化和热沉积作用^[1~3]。

在光学参变放大(OPA)中,除了应用光致双折射技术来实现相位匹配以外,1962年,Armstrong等首次提出^[4],通过周期性改变非线性光学系数的符号来实现有效的频率转换,这种方法被称做准相位匹配(QPM)。准相位匹配实质上是在二阶非线性介质中,用周期性光栅的附加波矢来补偿基波与谐波之间的相位失配。相比于双折射相位匹配技

收稿日期: 2007-04-04; 收到修改稿日期: 2007-07-15

作者简介: 胡志远(1980-),男,博士研究生,主要从事超强超短激光技术方面的研究。

E-mail: humingyuan@mail.siom.ac.cn

导师简介: 梁晓燕(1967-),女,研究员,主要从事超强超短激光技术方面的研究。E-mail: liangxy@mail.siom.ac.cn

术,准相位匹配技术能够利用到晶体的最高有效非线性系数 d_{33} ,并由于允许非严格的相位匹配而消除了信号光与抽运光之间空间走散所造成的作用长度的限制。1988年首先在铌酸锂(LiNbO_3)晶体中建立了准相位匹配相互作用,它是用空间调制的化学扩散和晶体生长,以产生铁电畴的周期性反转和非线性系数符号的周期性改变,通常我们将这种特殊制作方式下生长出的铌酸锂晶体称之为周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)。到目前为止,国际上对于二倍频(SHG),光参变放大(OPA)等应用已经广泛的利用了该准相位匹配技术和铁电材料晶体^[5~7]来获得所需的宽带超短脉冲。

2 倾斜极化光栅角度后的相位匹配原理

图1所示为周期性极化铌酸锂晶体晶体中非共线准相位匹配波矢图,相位失配 $\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_g$,式中 k_p 、 k_s 、 k_i 分别为抽运光、信号光、闲频光的波矢,极化光栅所形成的波矢 $|k_g| = 2\pi/\Lambda$, Λ 为极化周期。若使极化光栅的方向倾斜于 x 轴一定的角度 θ ,此时准相位匹配可以形成如图2所示的几何形式,信号光的波矢 k_s 和抽运光的波矢 k_p 是共线的,但是由于光栅波矢 k_g 的存在而使得闲频光的波矢 k_i 与信号光波矢 k_s 并不共线,它们之间的离分角为 φ 。我们称这种新颖的方式为半非共线型相位匹配方式。这种匹配几何形式的改变最终使得光参变放大中的回流效应得到抑制并且仍然能够得到极高带宽的输出光。

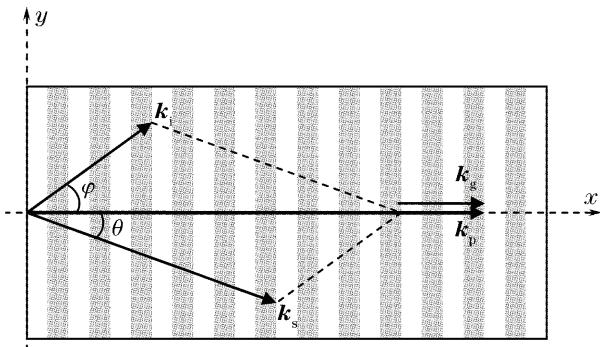


图1 非共线相位匹配方式的波矢几何关系

Fig.1 Vector geometry of noncollinear phase matching

在0类相位匹配方式下,所有的参与相互作用的波的偏振方向都沿着 z 轴方向并在 x 轴方向上传播,此时刚好能利用到周期性极化铌酸锂晶体最大的非线性系数 $d_{33} = 27 \text{ pm/V}$,由傅里叶展开式,可以得到有效非线性系数^[8]:

$$d_Q = d_{\text{eff}} G_m, \quad (1)$$

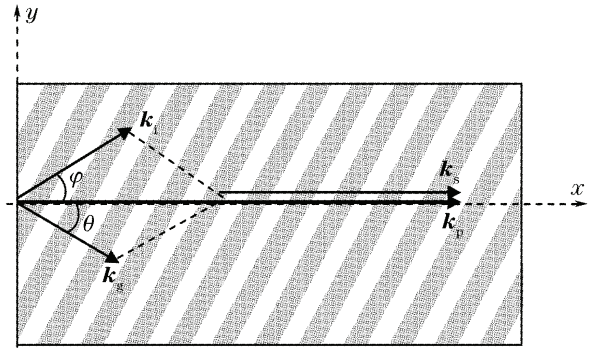


图2 半非共线相位匹配方式的波矢几何关系

ig.2 Vector geometry of semi-noncollinear phase matching 这里

$$G_m = \frac{2}{m\pi} d_{33} \sin(m\pi D), \quad (2)$$

为对应的傅里叶系数, m 代表准相位匹配过程的阶数,占空比因子 $D = l/\Lambda$ 表示每个极化域的长度占整个极化周期的比例。从(2)式中可知,只有奇数阶的准相位匹配过程能得到最有效的频率转换,当 m 为偶数并且 D 为 0.5 时,有效非线性系数 d_Q 为 0。使用一阶准相位匹配,占空比定为 0.5,则此时有效非线性系数可以被简化为

$$d_Q = \frac{2}{\pi} d_{33}, \quad (3)$$

同时,在光参变放大过程中能量守恒和动量守恒条件必须同时满足

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i, \quad (4)$$

$$k_p = k_s + k_i + k_g,$$

由(4)式和半非共线相位匹配方式的几何关系,推导出如下表达式:

$$1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i,$$

$$k_i \sin \theta = k_g \sin \varphi, \quad (5)$$

$$k_p = k_s + k_g \cos \theta + k_i \cos \varphi.$$

在慢变振幅近似和忽略抽运光衰减的条件下,可以由耦合波方程组算得光参变放大增益带宽的解析解。信号脉冲的增益强度(G)和相位(φ)可以表述为

$$G = 1 + (\gamma L)^2 (\sinh B/B)^2,$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{B \sin A \cosh B - A \cos A \sinh B}{B \cos A \cosh B + A \sin A \sinh B} \right), \quad (6)$$

式中 $A = \Delta k L / 2$, $B = \sqrt{(\gamma L)^2 - (\Delta k L / 2)^2}$,增益系数 $\gamma = 4\pi d_{\text{eff}} \sqrt{I_p / (2\epsilon_0 n_p n_s n_i c \lambda_s \lambda_i)}$, L 为晶体的长度, d_{eff} 为有效非线性系数, I_p 为抽运光强度,相位失配量可以表示为^[9]

$$\Delta k(\lambda_s) = |\Delta k(\lambda_s)| = 2\pi \left[\frac{n_i(\lambda_s)}{\lambda_i(\lambda_s)} - \frac{n_{io}(\lambda_{so})}{\lambda_{io}(\lambda_{so})} \right], \quad (7)$$

式中 λ_{io} 和 λ_{so} 分别代表着实现相位匹配时的闲频光和信号光波长, $n_i(\lambda_s)$ 和 $n_o(\lambda_s)$ 则是信号光中心波长处周围未达成相位匹配时的波长所对应的闲频光折射率和闲频光波长。

3 相位匹配曲线分析

目前的光学参变放大系统信号光源的波长多集中在 800 nm 和 1064 nm 上, 本文的研究也就是关于在这两个波长下。使用前面所述的半非共线性准相位匹配方式, 放大系统增益的光谱特性随着极化光栅的倾斜角度和温度的变化特性, 找到能获得稳定高带宽增益输出的理想情况。本文计算模拟是基于以下条件: 抽运光的波长为 532 nm, 强度为 40 MW/cm²。信号光的波长为 800 nm 和 1064 nm 两种情况, 信号光与抽运光共线入射。忽略群速度色散和抽运光的衰减。

参考对应于铌酸锂 (LiNbO₃) 的塞耳迈耶尔 (Sellmeier) 方程^[10], 并由 (5) 式可以算出随着光栅倾斜角度 θ 的相位匹配曲线。分别截取重点研究的信号光中心波长处周围一段, 并选取一些不同的周期长度 Λ , 能够由图 3 看出不同的周期长度对应着

不同的相位匹配曲线, 因为宽带的增益输出是在该曲线的斜率接近无穷的时候取得的, 所以可以根据此图获得在所需信号光中心波长处获得宽带增益放大时的光栅倾斜角度的取值范围, 从而方便在具体的模拟计算中缩小范围, 减少运算量。从图 3(a) 中可以发现, 在信号光波长为 800 nm 时, 周期长度取值 2.4 μm 能获得高带宽的增益放大, 此时大约的光栅倾斜角度为 62°至 63°之间。同时, 不同的信号波长处获得宽带放大的极化倾斜角度变化量比较大, 这说明实验对角度的要求会比较严格, 否则无法获得预期的宽带放大。而图 3(b) 中显示当信号光波长为 1064 nm, 甚至一个更大的范围里, 都可以获得宽带增益输出, 此时的极化周期长度大约是 4.5 μm , 极化倾斜角度在 45°附近。由图中的曲线, 可以知道随着极化周期的变化, 能够获得宽带增益输出的中心波长位置确很小, 而相应的极化倾斜角度的变化确高达数 10°。也就是说, 若选用中心波长为 1064 nm 波长的光作为信号光, 那么获得高带宽增益输出的容忍度是比 800 nm 处明显高的, 对实验中的精度要求也没有后者严格。

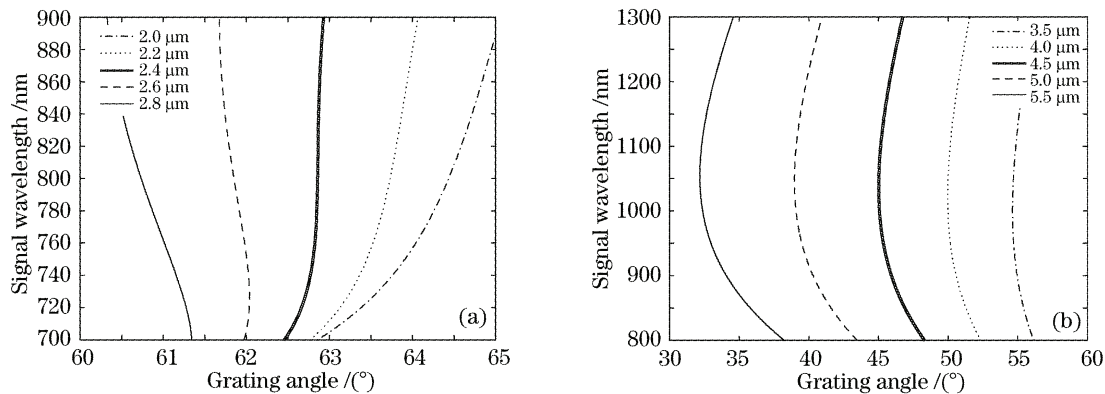


图 3 不同光栅周期下的相位匹配曲线 (μm)。 (a) 信号光波长在 800 nm 附近, (b) 信号光波长在 1064 nm 附近

Fig. 3 Phase matching curves with different grating period (μm). (a) Signal wavelength is around 800 nm, (b) signal wavelength is around 1064 nm

4 极化角度与温度特性

利用 (6) 式、(7) 式, 对参变放大的增益做计算模拟, 这里我们取晶体的长度为 9 mm。首先, 我们研究该匹配方式下增益带宽随极化角度的变化特性, 图 4(a) 是信号光波长为 800 nm 时的情况, 当极化角度为 62.71° 的时候, 我们获得了最大的增益带宽 121 nm。模拟结果中还可以知道此时的离分角 (闲频光与信号光之间的角度) 为 11.1°, 周期长度为 2.43 μm 。图 4(b) 则是信号光波长为 1064 nm 时的

情况, 当极化角度为 43.6° 的时候, 我们获得了最大的增益带宽 70 nm。模拟结果中还可以知道此时的离分角 (闲频光与信号光之间的角度) 为 3.6°, 周期长度为 4.62 μm 。从图 4 两幅图中的曲线得知, 的确如前面从相位匹配曲线中分析的结果一致, 增益带宽在信号光为 800 nm 时比 1064 nm 时的变化幅度要大很多, 1° 的变化就可以使增益带宽产生剧烈的改变, 而在信号光波长为 1064 nm 时, 极化角度即使相差 10°, 而增益带宽的改变也非常小。因此,

从实验中的具体操作来讲,第一种情况下的精度要求是非常高的,实验难度明显大于后者,但是能得到的带宽也比后者高出了大约 50 nm。而从离分角来看,前者的离分角明显更大,这个特性会使得回流得到很好的抑制,光束质量也会更好。

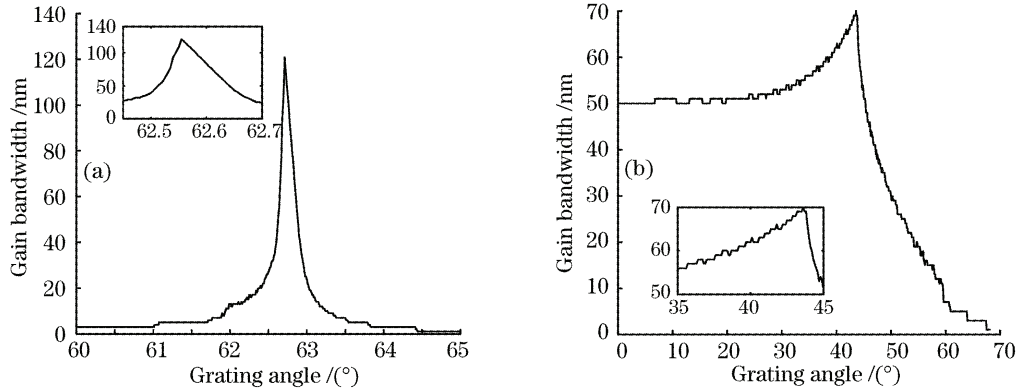


图 4 不同光栅角度下的增益光谱带宽(晶体长度为 9 mm)。(a)信号光波长为 800 nm,(b)信号光波长为 1064 nm
Fig. 4 Gain spectrum bandwidth with different grating angle (crystal length $L=9$ mm). (a) Signal wavelength is 800 nm, (b) signal wavelength is 1064 nm

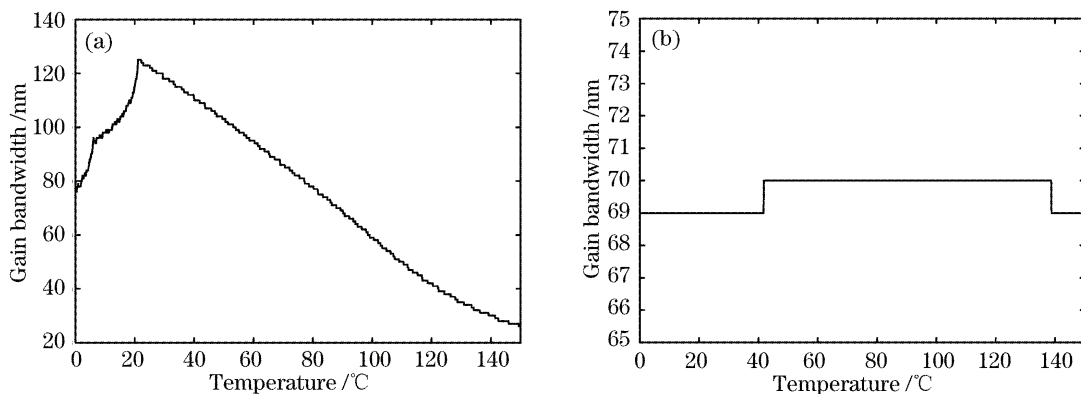


图 5 温度匹配曲线。(a)在信号光波长为 800 nm 附近,(b)在信号光波长为 1064 nm 附近
Fig. 5 Temperature matching curves at (a) signal wavelength is around 800 nm, (b) signal wavelength is around 1064 nm

当晶体温度在 21.1° 至 22.1° 之间时,增益带宽能达到它的最大值 121 nm。随后,随着温度的继续升高,增益带宽单调的递减。图 5(b)是信号光波长为 1064 nm 时的情况,增益带宽几乎一直保持在 70 nm 的最大值,也就是说温度的影响在这种情况下可以忽略不计。那么,二者之间的差别很显然的涉及到实验中的温控问题,当我们用 800 nm 的信号光时,必须在晶体加上温控设备,以保持实验中可以稳定的获得高带宽输出。而当我们用 1064 nm 的信号光时,这一点可以不必考虑。

5 结 论

研究了在倾斜极化的周期性极化铌酸锂晶体中采用新颖的半非共线型相位匹配方式进行光参变放

同样,晶体温度也是一个我们关注的参量,它的改变给增益放大输出的影响也被计算模拟,如图 5 所示。图 5(a)是当信号光波长为 800 nm 时,增益带宽随晶体温度的变化曲线。

大的过程。数值模拟结果表明,如果选取适当的光栅极化角度和温度,能在信号光波长为 800 nm 的情况下获得增益带宽高达 121 nm;在信号光波长为 1064 nm 的情况下获得增益带宽为 70 nm。在第一种情况下,能获得较高增益带宽,但是对于角度和温度参量有着比较严格的要求,对实验的要求比较高。在后一种情况下,不论是对于角度还是温度参量,都能在很宽的范围内满足,实验要求较低。由于 800 nm 和 1064 nm 的超短脉冲振荡器的广泛商业化,可以根据具体应用的需要选取适合的方式。在增益带宽大于 60 nm 的情况时,这两种情况下都可以支持对小于 10 fs 的超短脉冲放大,所以,本文的模拟计算结果以及对极化角度特性和温度特性的研究,对超短脉冲放大技术提供了一种新的有效方式。

参 考 文 献

- 1 Zhu Pengfei, Qian Liejia, Lin Zunqi. Numerical studies of characteristic of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2001, **13**(4): 408~412
朱鹏飞, 钱列加, 林尊琪. 啁啾脉冲参变放大特性的数值模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(4): 408~412
- 2 Yang Xiaodong, Xu Zhizhan, Zhang Zhengquan *et al.*. Experimental study on bandwidth of BBO- I noncollinear optical parametric chirped pulse amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1224~1227
杨晓东, 徐至展, 张正泉 等. BBO- I 非共线光学参变啁啾脉冲放大增益带宽的实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1224~1227
- 3 Leng Yuxin, Jin Shiqi, Pen Jiahui *et al.*. Investigation of non-collinear type- I phase matched optic parametric amplification using BBO crystal[J]. *Chin. 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变放大研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11): 977~980
- 4 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectrics[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 5 Zhao Baozhen, Liang Xiaoyan, Leng Yuxin *et al.*. Investigation of noncollinear QPM optical parametric amplification based on periodically poled KTP[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(4): 387~394
- 6 M. A. Arbore, O. Marco, M. M. Fejer. Pulse compression during second-harmonic generation in aperiodic quasi-phase-matching gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 865~867
- 7 L. E. Myers, G. D. Miller, R. C. Eckardt *et al.*. Quasi-phase-matched 1.064-mm-pumped optical parametric oscillator in bulk periodically poled LiNbO₃[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1): 52~54
- 8 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11): 2102~2116
- 9 X. Yang, Z. Xu, Z. Zhang *et al.*. Dependence of spectrum on pump-signal angle in BBO- I noncollinear optical-parametric chirped-pulse amplification[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(3): 219~222
- 10 Dieter H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1553~1555