

文章编号: 0258-7025(2002)06-0485-04

# 利用非周期 PPLN 晶体改善半导体 激光束质量

林 飞<sup>1</sup>, 王 韬<sup>2</sup>, 钱列加<sup>2</sup>

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

**提要** 研究了倾斜非周期 PPLN 中二次谐波感受到的空间相移, 结果表明可用来补偿入射基波的任意空间位相畸变。将其应用在横向位相畸变的半导体激光束的质量改善上, 可以获得转换效率近于传统 PPLN 的具有衍射极限光束质量的谐波输出。

**关键词** 非周期 PPLN, 空间相移, 光束质量改善, 半导体激光束

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Beam-quality Improved Diode Laser Beams in Aperiodic PPLN

LIN Fei<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</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 Photonics Materials and Devices, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433

**Abstract** It is found that the spatial phase shift is induced by the harmonic beam in aperiodic PPLN with spatial walk-off, so it can be engineered to compensate arbitrary spatial phase distortions of incident beam. By applying it to improve beam-quality of diode laser beams, diffraction-limited beam quality can be realized without scarifying the conversion efficiency.

**Key words** aperiodic PPLN, spatial phase shift, beam-quality improvement, diode laser beam

## 1 引 言

光束质量改善是激光应用尤其是半导体激光应用中的一个重要问题, 例如在半导体激光器中, 输出光在平行二极管结方向上光束质量极差<sup>[1]</sup>而不利其应用。各种各样的线性光学系统可通过改变光束轮廓来改善这一方向上的光束质量, 但实际上未能改变整个光束的质量因子  $M^2$ <sup>[2, 3]</sup>。一个常用的改善光束质量的方法是通过抽运使用以 Nd:YAG 和 Yb:silica<sup>[4, 5]</sup>等低饱和增益介质的固体激光器和

光纤激光器, 来获得接近衍射极限的激光束, 其典型转换效率在 30% 左右。我们利用二次谐波在倾斜的非周期周期极化铌酸锂(PPLN—period-poled lithium niobate, 非周期 PPLN 以下简称为 APPLN) 中通过非线性过程所感受到的空间相移, 补偿横向的位相畸变来改善宽发射区半导体激光的光束质量。通过这种方法可获得衍射极限的谐波。

作为一种准位相匹配(QPM)<sup>[6]</sup>结构, PPLN 通过其二阶极化率  $\chi^2$  周期性反转来改变位相从而实现位相匹配, 它可通过电场极化方法<sup>[7]</sup>制作而得。

收稿日期: 2001-04-19; 收到修改稿日期: 2001-07-09

基金项目: 国家惯性约束委员会(No. 416-5-1)、国家 973 计划(No. G19990752023)及国家自然科学基金(No. 60088003)共同资助项目。

作者简介: 林飞(1975—), 男, 主要从事非线性光学研究。E-mail: afeilin@sina.com

更进一步,在制作时对 PPLN 的局部周期进行与长度有关的调制,即应需要设计不同的纵向非周期结构(在制作掩模的微加工技术允许下,原则上任意的非周期结构可通过相应的平面掩模获得<sup>[7]</sup>),于是就发展成象啁啾 PPLN(CPPLN)<sup>[8]</sup>这样的 APPLN。这方面的应用已有啁啾脉冲压缩<sup>[8-10]</sup>、绝热孤子整形<sup>[11]</sup>、宽带飞秒脉冲位相匹配<sup>[12,13]</sup>和增强级联非线性相移<sup>[14,15]</sup>等。

近来,非周期 QPM 中的相移以及基波和谐波间的群速度失配(GVM)是较热门的研究内容。Arbore 等指出,APPLN 中的非线性过程可以提供符号可控制的相当大的群速度色散(GVD),而这种可为任意阶的 GVD 能用来补偿时域即传播方向上任意的位相畸变或增加任意的位相结构。在传统的 APPLN 中,光轴垂直于光束传播方向,如图 1(a)所示。由于位相匹配允许角度的限制导致了谐波光束质量的下降<sup>[16,17]</sup>。而应用如图 1(b)所示的倾斜 APPLN,由于空间走离角的作用,在空间域即横向上,谐波也可以产生非线性相移。本文就是利用这种非线性过程产生的空间域的相移来改善光束质量。同传统 APPLN 类似,倾斜 APPLN 通过对  $\chi^2$  周期进行适当调制,来补偿相应一横向上任意的位相畸变。而选择合适的空间走离角和周期调制率,在倾斜 APPLN 中可获得近于传统 PPLN 中的频率转换效率。

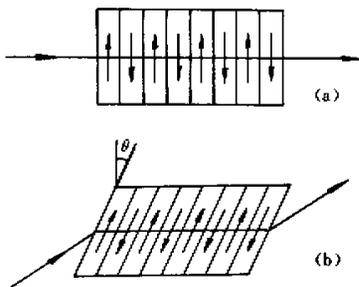


图 1 APPLN 倍频示意图

(a) 无空间走离角的传统方法;  
(b) 倾斜 APPLN 具有在平行纸面的  $x-z$  平面内的走离角)

Fig.1 Schematic diagrams of the second-harmonic generation by using APPLN

(a) conventional approach without walk-off; (b) approach described here in order to create walk-off in the plane( $xz$ ) parallel to the figure

## 2 APPLN 中的空间相移原理

基波和谐波间的耦合波方程如下:

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} = i \operatorname{sig}(\chi^{(2)}) E_1^* E_2 e^{i\Delta k z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial z} + \frac{L_{NL}}{L_w} \frac{\partial E_2}{\partial x} = i \operatorname{sig}(\chi^{(2)}) E_1 E_1 e^{-i\Delta k z} \quad (2)$$

其中  $E_1$  和  $E_2$  以初始基波电场峰值  $E_0$  为单位,  $E_0$  与初始光强峰值的关系为:  $I_0 = (\epsilon/\mu)^{1/2} |E_0|^2/2$ 。非线性长度  $L_{NL}$  表征了光波的相互作用情况,  $L_{NL} = n\lambda / (\pi\chi^{(2)}E_0)$ , 其中  $\lambda$  为基波波长,  $\chi^{(2)}$  为有效二阶非线性极化率。位置变量  $z$  和  $x$  分别以  $L_{NL}$  和  $x$  轴上的光束腰  $\omega_0$  为单位。符号函数  $\operatorname{sig}(\chi^{(2)})$  描述了 APPLN 的极化率周期调制结构, 而  $\Delta k$  为基波和谐波间波矢失配量。  $L_w$  为走离长度,  $L_w = \omega_0/\rho$ , 其中  $\rho$  为基波和谐波间的走离角, 可由基波入射角控制。  $\rho \approx \theta [(n_2^e/n_2^o)^2 - (n_1^e/n_1^o)^2]$ , 其中  $\theta$  为 APPLN 的倾角, 如图 1 所示。对于  $\theta < 0.1$  rad 的情况, 相比于传统 APPLN, 有效极化率只增加一个因子  $\cos^3\theta$ , 因此对频率转换效率的影响很小。

为考察 APPLN 中的非线性空间相移, 我们以具有球面位相畸变

$$\phi = \alpha_2 x^2 + \alpha_4 x^4 \quad (3)$$

的输入基波为例。对耦合波方程进行的理论分析建立在非抽运耗尽近似上。为处理方便, 将耦合波方程经傅里叶变换转换到空间频率域( $k_x$ )处理, 可得相应谐波电场的傅氏变换

$$E_2(k_x) = D(k_x) E_{10}^2(k_x) \quad (4)$$

其中

$$D(k_x) = \int \operatorname{sig}(\chi^{(2)}) \exp[i(k_x/\delta + \Delta k)z] dz \quad (5)$$

式中  $\delta = L_w/L_{NL}$ 。

$E_{10}^2(k_x)$  为相应基波电场平方的傅氏变换:

$$E_{10}^2(k_x) = \int |E_1(x)|^2 \exp(2i\phi) \exp(ik_x x) dx \quad (6)$$

$D(k_x)$  取决于极化率调制结构, 它可用来表征非线性相移, 通过对其控制, 来获得相应的位相结构或者补偿位相畸变。如果要获得无位相畸变的谐波输出,  $D(k_x)$  必与  $E_{10}^2(k_x)$  位相共轭, 由此有

$$\operatorname{sig}(\chi^{(2)}) = \exp(-i\Delta k z - id_2 z^2 - id_4 z^4) \times \operatorname{rec}[z/(L/L_{NL})] \quad (7)$$

$$d_2 = 2\alpha_2 \delta^{-2} \quad (8)$$

$$d_4 = 2\alpha_4 \delta^{-4} \quad (9)$$

其中  $L$  为晶体长度, 矩形函数  $\operatorname{rec}(s) = \{ \text{当 } |s| \leq 1/2 \text{ 时为 } 1, \text{ 当 } |s| > 1/2 \text{ 时为 } 0 \}$ , 从式(8)(9)中可知, 通过选择合适的极化率调制参数  $d_2$   $d_4$  和走离角, 可获得相应相移来消除位相畸变。上述理论分

析以非抽运耗尽近似为前提,但下文的数值模拟结果表明其同样适用于抽运耗尽情况。

### 3 在半导体激光束质量改善上的应用

#### 3.1 光束质量

为简化处理起见,假定输入基波为高斯波形。光束质量用质量因子  $M^2$  来表征。若忽略无像差光束的质量因子 ( $M_{x0}^2 = 1$ ) 则具有如式 (3) 描述的球面位相畸变的半导体激光束的质量因子  $M_x^2$  (假定其大于 3) 为

$$M_x^2 \cong 1.22\alpha_4 \left( \frac{\omega_0}{L_{NL}} \right)^4 \quad (10)$$

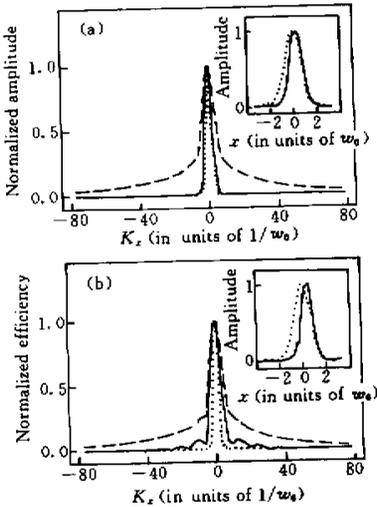


图 2 在空间频率域  $k_x$  和空间域  $x$  (见插图) 上的 APPLN 中谐波电场强度幅度曲线 (实线) (a) 弱抽运耗尽  $L_{NL} = 20L$  (b) 强抽运耗尽  $L_{NL} = 0.5L$ 。在数值模拟中, 走离长度取为  $L_w = 2L$ 。为作比较, 图上包括了具有球面位相畸变(虚线)和无畸变(点线)的入射基波电场幅度曲线, 其相应光束质量因子分别为  $M_x^2 = 10$  和  $M_{x0}^2 = 1$ 。在插图中的点线曲线为在空间域上的基波电场幅度曲线

Fig.2 Amplitude profiles (solid curves) in the spatial-frequency domain  $k_x$  and in the spatial domain  $x$  (inset) of harmonic beams generated with APPLN weak pump depletion  $L_{NL} = 20L$  (a) and strong depletion  $L_{NL} = 0.5L$  (b). The walk-off length  $L_w = 2L$  is used in the simulations. The incident amplitude profiles with (dashed) and without (dotted) spherical aberration are also included as comparison, the corresponding beam-qualities are  $M_x^2 = 10$  and  $M_{x0}^2 = 1$ , respectively. The inset dotted curve is the fundamental amplitude profile in the spatial domain

从第二节可知, 式 (8) (9) 是获得无位相畸变谐波的设计准则 (非抽运耗尽近似下)。在此准则下, 我们利用耦合波方程组 (1) (2) 进行数值模拟来考察谐波光束质量。通过对式 (7) 的一阶近似获得 APPLN 的局域周期  $\Lambda(z) = 2\pi(\Delta k + 2d_2z + 4d_4z^3)^{-1}$ 。

图 2(a) 描述了弱抽运耗尽 ( $L_{NL} \gg L$ ) 情况下, 输出谐波为无位相畸变 ( $M_{2\omega}^2 = 1$ ) 的高斯波形。谐波束宽为  $\omega_0/\sqrt{2}$ , 并象传统角度位相匹配晶体中的情况一样在横向 ( $x$  轴) 上谐波与基波有所偏离。图 2(b) 描述了强抽运耗尽 ( $L_{NL} < L$ ) 情形下, 谐波带有较弱的高频成分, 但还是获得接近衍射极限的光束质量 ( $M_{2\omega}^2 \cong 1$ )。由于高频峰比主峰强度小两个数量级, 故对光束质量无显著影响。

虽然以上模拟结果建立在基波为高斯波形的假定以及基波位相畸变为某一特定形式基础上, 但其结果是普适的。

#### 3.2 频率转换效率

频率转换效率是此方法是否可行的重要因素。为考察 APPLN 中的非周期结构和走离角对效率的影响, 我们将 APPLN 同传统 PPLN 中的谐波产生效率进行比较, 见图 3。效率取决于走离长度  $L_w$ , 由图 3 可知, 只要足够大的走离长度 ( $L_w > L$ ) 就可以使得归一化效率达到 1, 即等同于传统 PPLN 中的情形。对于输入一定位相畸变的基波, 较大的走

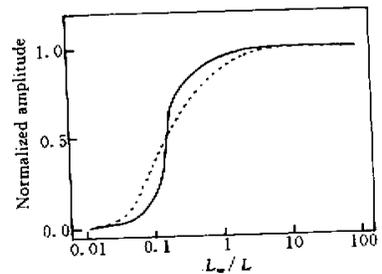


图 3 频率转换效率和走离长度的关系图 (实线:  $L_{NL} = 20L$  点线:  $L_{NL} = 0.5L$ )

在数值模拟中, 输入基波为具有空间位相畸变的光束, 其光束质量因子为  $M_x^2 = 10$ 。图中效率已用传统 PPLN 中的转换效率作了归一化

Fig.3 Conversion efficiencies plotted against the walk-off (solid curve,  $L_{NL} = 20L$ ; dotted curve,  $L_{NL} = 0.5L$ )

A spherical phase aberration corresponding to a beam-quality of  $M_x^2 = 10$  is used in the simulations. Efficiencies are normalized to that of the second-harmonic generation with conventional PPLN

离长度可以通过调整基波入射角以及  $d_2$  和  $d_4$  (满足式(8)(9))获得。

在传统的 5 cm 长的 PPLN 中,输入衍射极限的基波,可以获得转换效率约为 10% 的谐波输出;因此可以断定在同样长度的特定设计的倾斜 APPLN ( $L_w > 5$  cm,  $\theta \sim 0.1$  rad) 中,输入相应横向位相畸变的基波(比如半导体激光束),可以获得相近的转换效率。

## 4 结 论

我们考察了倾斜 APPLN 中的空间相移,并将其应用在具有横向位相畸变的激光束的质量改善上,并通过数值模拟了光束质量和频率转换效率。结果表明可以获得衍射极限或近衍射极限的输出谐波,同时具有相当于传统 PPLN 的转换效率。本文讨论了宽发射区半导体激光的质量改善,但实际上倾斜 APPLN 可以通过选择合适的设计参数  $d_2$  和  $d_4$  及走离角,来改善任意位相畸变光束的质量。另外应指出,这些结果同样可适用于其他具有倾斜非周期 QPM 结构的非线性光学材料。

## 参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman. Analysis of laser beam quality degradation caused by quartic phase aberrations [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30):5893~5901
- 2 A. E. Siegman. Binary phase plates cannot improve laser beam quality [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(9):675~677
- 3 W. A. Clarkson, D. C. Hanna. Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6):375~377
- 4 K. Tei, M. Kato, Y. Niwa *et al.*. Diode-pumped 250-W zigzag slab Nd:YAG oscillator-amplifier system [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7):514~516
- 5 H. Po, J. D. Cao, B. M. Laliberte *et al.*. High power Neodymium-doped single transverse mode fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17):1500~1501
- 6 M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt *et al.*. Quasi-

phase-matched second harmonic generation: Tuning and tolerances [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(11):2631~2654

- 7 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub> [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11):2102~2116
- 8 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
- 9 M. A. Arbore, A. Galvanauskas, D. Harter *et al.*. Engineerable compression of ultrashort pulses by use of second-harmonic generation in chirped-period-poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(17):1341~1343
- 10 A. Galvanauskas, D. Harter, M. A. Arbore *et al.*. Chirped-pulse-amplification circuits for fiber amplifiers, based on chirped-period quasi-phase-matching gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21):1695~1697
- 11 L. Torner, C. Balslev Clausen, M. M. Fejer. Adiabatic shaping of quadratic solitons [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12):903~905
- 12 K. Mizuuchi, K. Yamamoto. Waveguide second-harmonic generation device with broadened flat quasi-phase-matching response by use of a grating structure with located phase shifts [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24):1880~1882
- 13 T. Suhara, H. Nishihara. Theoretical analysis of waveguide second-harmonic generation phase matched with uniform and chirped gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**:1265~1276
- 14 M. Cha. Cascaded phase shift and intensity modulation in aperiodic quasi-phase-matched gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4):250~252
- 15 O. Bang, C. Balslev Clausen, P. L. Christiansen *et al.*. Engineering competing nonlinearities [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20):1413~1415
- 16 A. V. Smith, M. S. Bowers. Phase distortions in sum-and difference-frequency mixing in crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(1):49~57
- 17 J. M. Auerbach, D. Eimerl, D. Milam *et al.*. Perturbation theory for electric-field amplitude and phase ripple-transfer in frequency doubling and tripling [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3):606~612