

文章编号: 0253-2239(2004)06-813-4

# I 型准相位匹配周期性极化铌酸锂倍频蓝光输出\*

陈玉萍<sup>1</sup> 陈险峰<sup>1</sup> 曾祥龙<sup>1</sup> 吴 锐<sup>1</sup> 石剑虹<sup>1</sup> 夏宇兴<sup>1</sup> 陈英礼<sup>1</sup> 丁良恩<sup>2</sup> 丁晶新<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海交通大学物理系光学与光子学研究所, 上海 200030  
<sup>2</sup> 华东师范大学物理系光谱与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 在周期为  $14.5 \mu\text{m}$  的周期性极化铌酸锂中, 利用  $d_{31}$ , 得到了一阶 I 型  $E_y^{\omega}E_y^{\omega} - E_z^{2\omega}$  (oo-e) 准相位匹配蓝光二次谐波。在  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下, 由  $114 \mu\text{J}$  抽运光, 得到了  $52 \mu\text{J}$ ,  $0.473 \mu\text{m}$  倍频蓝光, 对应于平均最大转换效率  $45.6\%$ 。制备了一阶和三阶周期分别为  $4.5 \mu\text{m}$  和  $13.5 \mu\text{m}$  的周期性极化铌酸锂。在  $E_z^{\omega}E_z^{\omega} - E_z^{2\omega}$  (ee-e) 准相位匹配  $0.473 \mu\text{m}$  蓝光倍频中,  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下, 分别得到了  $41.3\%$  和  $19\%$  的倍频转换效率。oo-e 准相位匹配比传统的 ee-e 准相位匹配有较大的光栅周期, 尤其在短波长区域倍频输出应用中, 降低了周期性结构制作的困难, 其较大的容许带宽在实验中提高了频率转换效率。实验结果表明了在周期性极化铌酸锂中准相位匹配倍频的偏振相关性。

**关键词:** 非线性光学; 倍频; 准相位匹配; 铌酸锂; 蓝光

中图分类号: TN248; O437 文献标识码: A

## Blue Light Generation by Type I Quasi-Phase-Matching Frequency Doubling in Periodically Poled $\text{LiNbO}_3$

Chen Yuping<sup>1</sup> Chen Xianfeng<sup>1</sup> Zeng Xianglong<sup>1</sup> Wu Rui<sup>1</sup> Shi Jianhong<sup>1</sup>  
Xia Yuxing<sup>1</sup> Chen Yingli<sup>1</sup> Ding Liang'en<sup>2</sup> Ding Jingxin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Optics and Photonics, Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical & Magnetic Resonance Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062

(Received 31 March 2003; revised 1 July 2003)

**Abstract:** First-order type I  $E_y^{\omega}E_y^{\omega} - E_z^{2\omega}$  (oo-e) quasi-phase-matched (QPM) blue harmonic generation was demonstrated in periodically poled  $\text{LiNbO}_3$  (PPLN) with period of  $14.5 \mu\text{m}$  by using  $d_{31}$ . In a single-pass configuration, corresponding to the highest frequency conversion efficiency of  $45.6\%$ ,  $52 \mu\text{J}$  of harmonic blue light at  $0.473 \mu\text{m}$  was generated from an input of  $114 \mu\text{J}$  at  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . It was also demonstrated the conventional QPM  $E_z^{\omega}E_z^{\omega} - E_z^{2\omega}$  (ee-e) blue second harmonic generation (SHG) of  $0.473 \mu\text{m}$  in PPLN with the first order period of  $4.5 \mu\text{m}$  and the third order period of  $13.5 \mu\text{m}$  at  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , whose conversion efficiency were  $41.3\%$  and  $19\%$  respectively. The larger grating period for the type I QPM (oo-e) than for the conventional QPM (ee-e), lowers the fabrication constrains especially in the short-wavelength region, which increases the acceptance bandwidth and enhances the frequency conversion efficiency in experiment. The experimental results show the polarization dependence of QPM SHG in PPLN.

**Key words:** nonlinear optics; second harmonic generation; quasi-phase-matching; periodically poled  $\text{LiNbO}_3$ ; blue light

\* 国家自然科学基金(60007001)资助课题。

E-mail: ypchen@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2003-03-31; 收到修改稿日期: 2003-07-01

## 1 引 言

基于激光二极管的倍频器件是获得蓝、绿或紫外相干光源的有效途径。通过在周期性极化铁电晶

体材料中实现准相位匹配倍频,可以实现最大的转换效率<sup>[1~6]</sup>。铌酸锂晶体由于其低至 0.35  $\mu\text{m}$  的透明带宽,较大的有效非线性系数和优良的机械稳定性而得到广泛应用。

最近,我们在 Z 切,周期为 6.5  $\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup> 的电场极化铌酸锂中,演示了利用最大的非线性系数  $d_{33}$  的一阶准相位匹配(QPM)  $E_z^{\omega} E_z^{\omega} - E_z^{2\omega}$  (ee-e)[在下文中简称为 QPM(e)]倍频,在 5  $^{\circ}\text{C}$  (设计的匹配温度为 190  $^{\circ}\text{C}$ ) 下得到了归一化转换效率为 1.5%  $\text{cm}^{-1} \text{W}^{-1}$  的 0.532  $\mu\text{m}$  的连续倍频绿光。实验中低转换效率和准相位匹配温度的漂移主要是由于光栅周期偏离理想的准相位匹配周期所致,尤其在短波长区域,很难保证所制作的准相位匹配光栅的均匀性。为了降低这种制作困难,我们通常使用具有更大周期的高阶 QPM(e)非线性过程。然而,在  $m$  阶准相位匹配(占空比为 50%,  $m$  为奇数)中,其有效的非线性系数被降低至  $1/m$  倍,所以倍频转换效率仍不能被有效提高。

在参考文献[8]中,我们提出了一种新的准相位匹配方法-I 型准相位匹配  $E_z^{\omega} E_z^{\omega} - E_z^{2\omega}$  (oo-e)[在下文中简称为 QPM(o)]。QPM(o)过程中输入、输出光的偏振方向正交,代替高阶 QPM(e)过程中偏振方向平行的输入、输出光。QPM(o)倍频比 QPM(e)倍频有更大的容许带宽和光栅周期,尤其在短波长区域降低了倍频器件的制作困难,提高了光栅周期的均匀性,使频率转换效率大大提高。

本文在长度为 20 mm,一阶周期为 14.5  $\mu\text{m}$  的周期极化铌酸锂(PPLN)中,实现了利用  $d_{31}$  的 QPM(o)蓝光倍频。在 150  $^{\circ}\text{C}$  下,从 114  $\mu\text{J}$ , 0.946  $\mu\text{m}$  输入抽运光波获得了 52  $\mu\text{J}$  的 0.473  $\mu\text{m}$  倍频蓝光,得到本实验中最大的平均转换效率 45.6%。同时在长度为 20 mm,一阶周期和三阶周期分别为 4.5  $\mu\text{m}$  和 13.5  $\mu\text{m}$  的周期极化铌酸锂中,在 150  $^{\circ}\text{C}$  下,实现了利用  $d_{33}$  的 QPM(e)蓝光倍频,分别获得了 41.3% 和 19% 的平均转换效率。可以看出,同阶周期的 QPM(e)倍频蓝光转换效率低于 QPM(o)倍频蓝光,尽管其利用了晶体的最大非线性系数。上述实验结果很好地证明了我们在文献[8]中所得到的理论结果。

## 2 不同偏振态的 I 型准相位匹配理论

在体周期性极化铌酸锂器件中,由(1)式知,QPM(e)二次谐波和 QPM(o)二次谐波过程分别利用了非线性系数  $d_{33}$  和  $d_{31}$ <sup>[8]</sup>

$$P_z(2\omega, t) = d_{31} E_y^2(\omega, t) + d_{33} E_z^2(\omega, t), \quad (1)$$

对于周期极化铌酸锂的准相位匹配共线相互作用,由(2)式所示,准相位匹配二次谐波的转换效率  $\eta$  正比于  $(d_Q)^2$  和  $\text{sinc}^2(\Delta k_Q L/2)$ :

$$\eta \propto (d_Q)^2 * \text{sinc}^2(\Delta k_Q L/2), \quad (2)$$

其中,

$$\text{sinc}(\Delta k_Q L/2) \equiv \sin(\Delta k_Q L/2) / (\Delta k_Q L/2),$$

以及

$$d_Q = d_{\text{eff}} \times \frac{2}{\pi m}, \quad (3)$$

上两式中,  $d_Q$  为周期极化铌酸锂周期性调制非线性系数,  $d_{\text{eff}}$  为在单畴晶体材料中二次谐波过程的有效非线性系数,  $\Lambda$  是周期极化铌酸锂周期性调制结构的周期,  $m$  为准相位匹配周期  $\Lambda$  的奇数阶数。  $\Delta k_Q$  为准相位匹配总的波矢失配,  $L$  为周期极化铌酸锂的总作用长度。

周期极化铌酸锂的光栅周期公式为

$$\Lambda = \lambda/2(n_2 - n_1),$$

对于 QPM(e)二次谐波,  $n_1$  和  $n_2$  分别是基频和倍频 e 光的折射率;对于 QPM(o)二次谐波,  $n_1$  和  $n_2$  分别表示基频 o 光和倍频 e 光的折射率。在文献[8]的图 1 中,比较了在相同抽运波长,同温度下,同阶的两种不同 I 型准相位匹配二次谐波的光栅周期。图示结果表明,一阶 QPM(o)二次谐波的畴周期比三阶 QPM(e)二次谐波的大,这方便了周期极化铌酸锂器件的制作,降低了相位失配的可能性,提高了转换效率。

由(3)式可知,在 QPM(e)二次谐波和 QPM(o)二次谐波过程,其对应的  $m$  阶有效非线性系数分别为  $d_Q(e) = (2d_{33}/\pi m)^2$  和  $d_Q(o) = (2d_{31}/\pi m)^2$ 。所以在 150  $^{\circ}\text{C}$ , 对于在 0.946  $\mu\text{m}$  处的倍频蓝光, QPM(o)倍频的一阶周期为 14.5  $\mu\text{m}$ , 大于 QPM(e)倍频的三阶周期 13.5  $\mu\text{m}$ ;其转换效率之比为

$$\frac{d_{Q3}(e)}{d_{Q1}(o)} = \frac{(2d_{33}/\pi \cdot 3)^2}{(2d_{31}/\pi \cdot 1)^2} = \frac{(27/3)^2}{8^2} = 1.26$$

假设  $d_{33} = 27$ ,  $d_{31} = 8$ 。尽管理论上一阶 QPM(o)倍频的转换效率略低于三阶 QPM(e)倍频,但 QPM(o)倍频的大周期和大半峰全宽值(FWHM)保证了畴反转光栅的均匀性和准相位匹配质量,使其在实验上获得更高的转换效率成为可能<sup>[8,9]</sup>。

## 3 实 验

周期极化铌酸锂晶体中均匀的周期畴结构对于获得高频率转换效率是十分重要的。我们用 Z 切,

长为 20 mm, 宽 10 mm, 厚 0.5 mm 的光学级铌酸锂晶体分别制作了光栅周期为 4.5  $\mu\text{m}$ , 13.5  $\mu\text{m}$  和 14.5  $\mu\text{m}$  的周期极化铌酸锂片子。为了检验畴反转周期光栅的均匀性, 我们用 1:2 的氢氟酸和硝酸混合液将样品腐蚀。样品的 +Z 和 -Z 面都呈现出均匀、一致的畴光栅图案, 该图是用一型号为 BX50WI Olympus 固定台式直立显微镜的 CCD 摄像头拍摄的, 如图 1(a)~图 1(c) 所示。图 1 表明, 13.5  $\mu\text{m}$

和 14.5  $\mu\text{m}$  周期极化铌酸锂的占空比均接近于理论上可获得最高的倍频转换效率的 50% 的畴反转占空比, 这说明较大的周期保证了极化反转畴良好的质量。

基于 4.5  $\mu\text{m}$ , 13.5  $\mu\text{m}$  和 14.5  $\mu\text{m}$  周期极化铌酸锂的准相位匹配倍频蓝光转换效率的测量装置如图 2 所示。

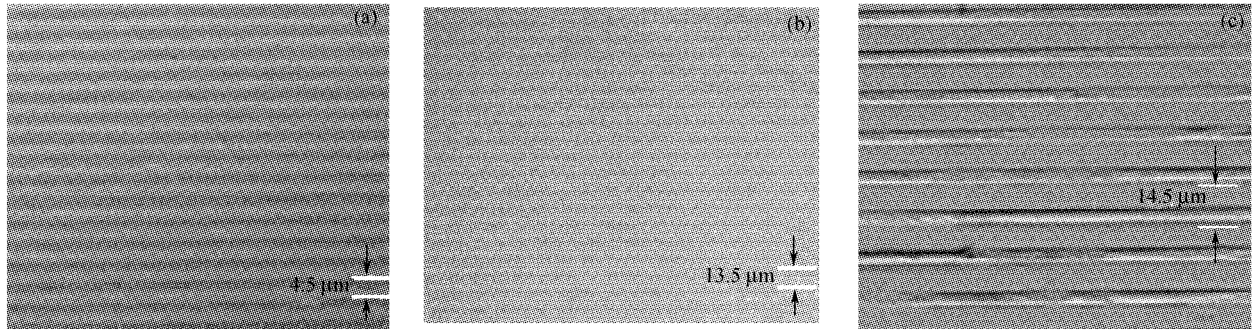


Fig. 1 (a), (b) and (c) are the pictures of etching domain inversion pattern for -Z face, grating periods of 4.5  $\mu\text{m}$ , 13.5  $\mu\text{m}$  and 14.5  $\mu\text{m}$  show the duty cycles of about 45%, 50% and 50% respectively

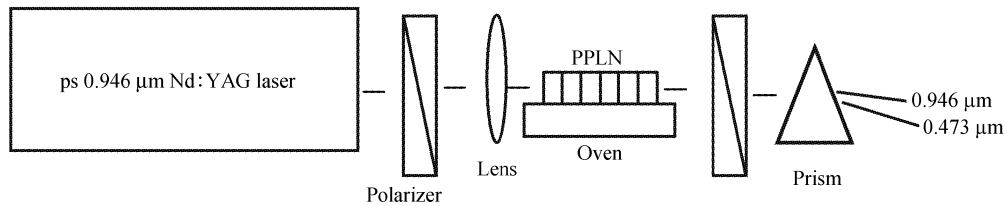


Fig. 2 The measuring setup for the blue light QPM SHG measurement

图 2 中抽运光源为 Continuum 公司生产的调 Q Nd:YAG 脉冲激光器输出 0.946  $\mu\text{m}$  波长的光波, 脉宽为 35 ps, 重复频率为 10 Hz。QPM(o) 倍频蓝光的抽运光沿 Y 轴偏振, X 轴方向入射, 以 40  $\mu\text{m}$  左右束腰斑半径松散聚焦在周期极化铌酸锂样品上。样品两端面均被抛光, 但未镀增透膜。周期极化铌酸锂样品被放置在一控温精度为 0.1  $^{\circ}\text{C}$  的控温炉中。在测量装置的末端, 用一检偏器来检测倍频光的偏振态。发现所输出的倍频蓝光偏振方向与 Z 轴平行。在 150  $^{\circ}\text{C}$ , 用 114  $\mu\text{J}$  的 0.946  $\mu\text{m}$  抽运光, 得到了最大平均转换效率为 45.6% 的 52  $\mu\text{J}$  的倍频蓝光。图 3 是在室温 25  $^{\circ}\text{C}$  下得到的 QPM(o) 倍频蓝光照片。由于铌酸锂晶体的光折变效应, 该转换效率远小于 150  $^{\circ}\text{C}$  时的倍频转换效率。

用同样的测量装置, 在 150  $^{\circ}\text{C}$ , 由偏振方向平行 Z 轴的 0.946  $\mu\text{m}$  输入光, 分别在一阶周期为 4.5  $\mu\text{m}$  和三阶周期为 13.5  $\mu\text{m}$  的周期极化铌酸锂中得到了 QPM(e) 倍频蓝光, 其分别对应于本实验中所得到的

最大平均转换效率 41.3% 和 19%。可看出, 实验所得到的 QPM(e) 一阶和三阶倍频蓝光效率均低于 QPM(o) 一阶倍频蓝光转换效率。该实验结果表明了周期极化铌酸锂的准相位匹配倍频非线性过程的偏振相关性。

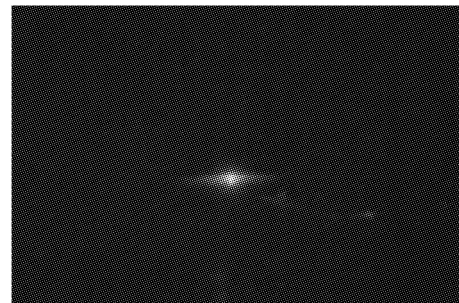


Fig. 3 QPM (o) blue SHG at 0.473  $\mu\text{m}$  in PPLN of 14.5  $\mu\text{m}$ , 25  $^{\circ}\text{C}$

**结论** 在周期极化铌酸锂晶体中, 分别演示了利用非线性系数  $d_{31}$  的 I 型一阶 QPM(o), 和利用晶体最

大非线性系数  $d_{33}$  的一阶和三阶 QPM(e) 蓝光二次谐波发生。在 150 °C, 14.5  $\mu\text{m}$  周期极化铌酸锂中, 得到了平均最大转换效率为 45.6% 的 0.473  $\mu\text{m}$  QPM(o) 倍频蓝光; 在相同温度下, 分别获得了平均最大转换效率为 41.3% 和 19% 的一阶和三阶 0.473  $\mu\text{m}$  的 QPM(e) 倍频蓝光。由此看出, I 型 QPM(o) 方法具有比传统的 QPM(e) 过程大的光栅周期, 这明显提高了周期性畴反转结构的制作质量; 另外, 前者较大的温度和波长容许带宽也保证了获得高质量非线性参变相位匹配。该方法有希望用于由近红外激光二极管倍频获得蓝光和紫外光源; 同时也可用于其他非线性光参变过程如准相位匹配光参变振荡, 和频和差频过程。

### 参 考 文 献

- 1 Yamada M, Nada N, Saitoh M *et al.*. First-order quasi-phase matched LiNbO<sub>3</sub> waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(5): 435~436
- 2 Pruneri V, Koch R, Kazansky P G *et al.*. 49 mW of cw blue light generated by first-order quasi-phase-matched frequency doubling of a diode-pumped 946-nm Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(23):2375~2377
- 3 Miller G D, Batchko R G, Tulloch W M *et al.*. 42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(24):1834~1836
- 4 Chen Yuping, Chen Xianfeng, Zeng Xianglong *et al.*. Green light generated by third-order quasi-phase-matched frequency doubling in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2001, **B10**: II 70~73 (in Chinese)
- 5 Wang S, Pasikevicius V, Hellstrom J *et al.*. First-order type II quasi-phase-matched UV generation in periodically poled KTP. *Opt. Lett.*, 1998, **24**(14):978~980
- 6 Chen Xianfeng, Xie Shengwu, Xia Yuxing *et al.*. Experimental study of quasi-phase-matched second harmonic generation in annealed proton-exchanged lithium niobate waveguides. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(7):591~594 (in Chinese)
- 7 Chen Yuping, Chen Xianfeng, Zeng Xianglong *et al.*. 18 mW cw green light generation by first-order quasi-phased-matched frequency doubling in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4): 399~401 (in Chinese)
- 8 Chen Yuping, Chen Xianfeng, Zeng Xianglong *et al.*. Polarization dependence of quasi-phase-matched second-harmonic generation in bulk periodically pole LiNbO<sub>3</sub>. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2002, **4**:324~328
- 9 Fejer M M, Magel G A, Jundt D H *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(11): 2631~2654