

准相位匹配 LiNbO_3 蓝光倍频器的研究*

于 建 倪文俊 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

陈云琳

(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要 采用外加电场极化法, 实现了 LiNbO_3 晶体的周期性极化, 并制备出周期为 $9.5 \mu\text{m}$ 的三阶准相位匹配周期性极化 LiNbO_3 晶体(PPLN); 用准连续钛宝石激光器作基频光源, 对准相位匹配周期性极化 LiNbO_3 进行了光学倍频实验, 得到了 $12 \mu\text{W}$ 的蓝光输出。

关键词 LiNbO_3 晶体, 周期性极化, 准相位匹配, 倍频。

1 引 言

早在 1962 年, Armstrong 等人^[1]首次提出了准相位匹配技术, 并应用此技术进行了光波倍频转换器的研究。利用铁电晶体(如: LiNbO_3 , KTP, BBO, LiTaO_3 等)的铁电畴周期性极化反转结构来补偿光波间的相位失配, 是实现体材料准相位匹配倍频转换最简单的方法。虽然准相位匹配技术的提出早于双折射相位匹配, 但是由于实现材料准相位匹配制作工艺上的困难, 使其未能得到广泛的应用。近年来, 随着对体材料准相位匹配制作工艺的改进, 又重新推动了该技术的发展。1997 年 Arie 等人用厚 0.5 mm 、长 10 mm 、铁电畴极化反转周期 $9.0 \mu\text{m}$ 的周期性极化 KTP(PPKTP), 将 225 mW 连续 YAG 的 1064 nm 激光倍频为 123.5 mW 的 530 nm 激光, 倍频转换效率为 55% ^[2]。1997 年英国 Southampton 大学在大的模体积的掺铒光纤系统中, 用周期性极化 LiNbO_3 (PPLN) 对 $180 \mu\text{J}$ 的基波进行倍频, 二倍频效率达 83% , 三倍频效率达 34% ^[3]。

自 90 年代初以来, 人们研究出了多种新技术、新工艺来实现铁电体的铁电畴周期性极化反转, 主要有: 扩 Ti 法, LiO_2 外扩散法, 喷镀 SiO_2 加热法, 质子交换诱发法, 电子束扫描法和外加电场极化法^[4-9]。在这些技术中, 由前四种技术所产生的畴反转仅仅发生在晶体表面附近较浅的三角区域内, 不利于基波与谐波的充分耦合, 而且这四种技术的工艺过程均需要在一定的高温 and 较苛刻的实验条件下进行。虽然, 运用电子束扫描法可以制备出反转层较深的畴反转结构, 但是其畴反转连续性不好, 而且需要逐个样品扫描, 难以大批量生产。然而, 用外加电场极化法可以大大降低畴反转极化的难度和成本, 因此这种技术备受人们的重视。

* 天津市重点自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1999-04-02; 收到修改稿日期: 1999-08-29

应用外加电场极化法已在厚为 0.25 mm 的 z 切 LiNbO₃、LiTaO₃ 和 KTiOPO₄ 晶体样品上制备出了铁电畴周期性反转结构^[10~12]。但对厚度为 0.5 mm 以上的 LiNbO₃、LiTaO₃ 和 KTiOPO₄ 晶体, 实现铁电畴周期性极化反转的成功率报道还不多见。

在铁电类晶体中, 因为 LiNbO₃ 晶体具有较大的非线性光学系数, 并且制备 LiNbO₃ 晶体的技术已很成熟, 因此我们选用 LiNbO₃ 晶体作为实验材料, 从事准相位匹配 LiNbO₃ 蓝光倍频器的研究。本文报道了在室温下运用外加电场极化法, 在 0.5 mm 厚的 z 切铌酸锂晶片上制备了周期性极化 LiNbO₃ 铁电畴反转光栅, 并对所制备出的周期性极化 LiNbO₃ 进行了初步的光学倍频实验。

2 周期性极化 LiNbO₃ 的制备

首先用光刻技术、镀膜和腐蚀的方法在 z 切厚为 0.5 mm 的 LiNbO₃ 晶体的正畴面和负畴面上制作金属电极, 将高压脉冲电压加在两电极上, 通过控制脉冲幅度、脉宽和脉冲个数来制备最佳的畴反转光栅。由 LiNbO₃ 铁电体的电滞回线可知, 当在 z 切 LiNbO₃ 晶体上所加电场大于 LiNbO₃ 铁电体的矫顽场(约为 21 kV/mm)时, 其铁电畴将发生反转。在实验中发现, 若对晶体加一个持续的直流高压时往往会发生电崩现象导致晶体被击碎。为了避免这一现象, 在实验中采用对晶体施加一定数量的方形负电脉冲, 每个脉冲电压都要大到足以使晶体固有的剩余极化反向。图 1 为用外加电场极化法制备周期性极化 LiNbO₃ 的示意图。 R_m 为泄放电阻。

由图 1 可见, 晶体正畴面上的栅格电极接地, 负畴面上的平面电极接电源, 电源所给的脉冲电压是负脉冲, 这样, 外加电场的方向与晶体自发极化强度 P_s 的方向正好相反。在整个极化过程中, 回路中极化电流的幅值可由下式给出:

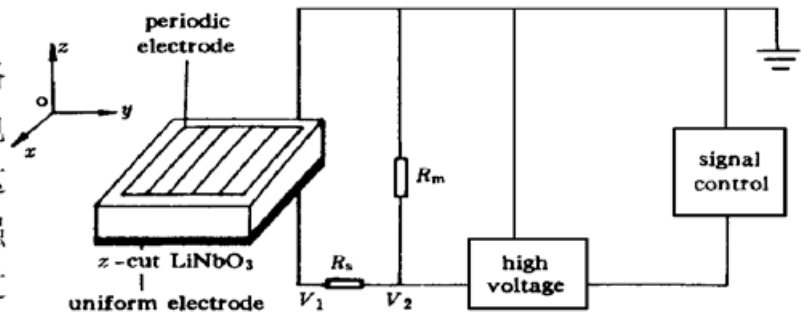


Fig. 1 Schematic of applying electric field for PPLN

$$I_{\text{pol}} = \frac{V_2 - V_1}{R_s}, \quad (1)$$

式中 V_1 为加在晶体上的极化电压, V_2 的值接近于 LiNbO₃ 晶体的矫顽场电压。 R_s 是限流电阻, 调整 R_s 可以得到不同的电流值, 在实验中所用极化电流的范围为 20~50 μA 。当厚度为 0.5 mm 的 LiNbO₃ 晶体实现周期性极化反转时, 所需的电荷 Q 主要由极化电流 i 和脉冲持续时间来决定。电荷 Q 、电流 i 和畴发生反转面积 A 的关系为

$$Q = \int i dt = 2P_s A, \quad (2)$$

其中 $P_s = 71 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 是 LiNbO₃ 的自发极化强度^[13]。极化电流 i 与脉冲电压强度有关, 当脉冲电压强度确定以后, 反转畴区域的面积 A 可由脉冲所持续的时间控制。将极化后的样品放入到 NaOH 的水溶液中去掉 Al 膜, 然后将其放置到温度为 100℃ 的 HNO₃ 和 HF(2:1) 的混合液中进行腐蚀, 腐蚀时间为 5 分钟左右, 最后在偏光光学显微镜下进行观察和拍照。

在用外加电场极化法制备周期性极化 LiNbO₃ 的大量实验中发现, 脉冲电压的幅值、脉宽和脉冲个数及极化电流的大小是直接影响周期性极化 LiNbO₃ 制备的主要参量。通过对这

些参量取值范围内(脉冲电压的幅值: $-11.0 \sim -14.5$ kV, 脉冲宽度: $0.5 \sim 100$ ms, 脉冲个数: $6 \sim 20$, 极化电流: $20 \sim 50$ μ A)的多次反复实验, 最终得出了制备三阶准相位匹配周期性极化 LiNbO₃ 的本次实验的最佳参量值。它们分别是: 脉冲电压幅值为 -12 kV, 脉冲宽度为 2 ms, 脉冲个数为 9 , 极化电流为 25 μ A。图 2 就是在这些最佳参量值条件下所制备的周期为 9.5 μ m 的 LiNbO₃ 周期性畴反转 + z 面结构。将图 2 所示样品沿 y 向切割抛磨并进行腐蚀, 可得畴反转光栅的横截面结构, 如图 3 所示。从图 3 中可以清晰地看到, 畴的反转几乎贯穿整个 LiNbO₃ 晶片的厚度, 并且反转畴的界面与晶体表面垂直。这种畴反转结构应该是准相位匹配倍频器所要求的较为理想的结构。

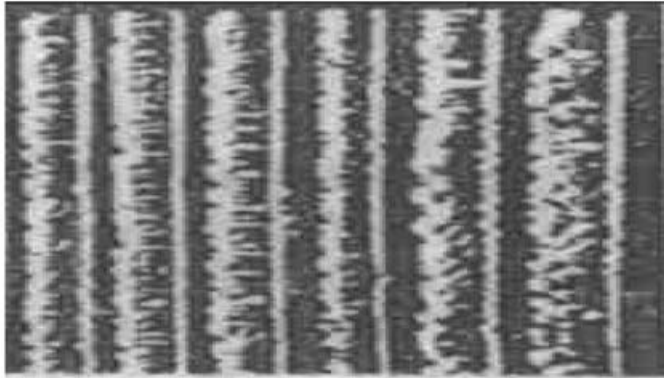


Fig. 2 + z top view of the PPLN with a period of 9.5 μ m

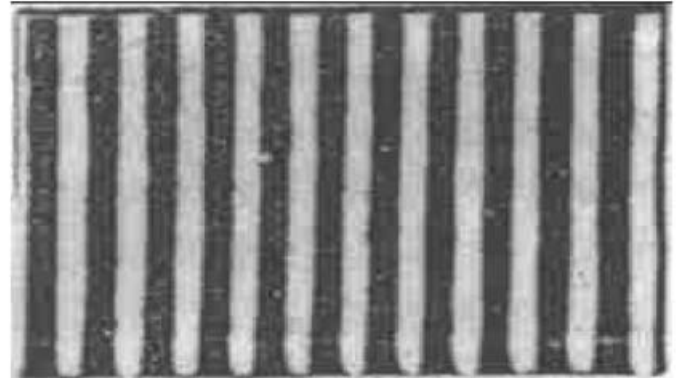


Fig. 3 Cross-sectional structure of PPLN on y face

3 光学实验

用中心波长为 810 nm 的准连续钛宝石激光器作基频光源, 用同一批研制样品进行了倍频实验, 实验的光路如图 4 所示。图中 L_1 和 L_2 是焦距为 100 mm 的透镜, 周期性极化 LiNbO₃ 的周期为 9.5 μ m, 厚度为 0.5 mm, 其通光方向长度为 3.3 mm。实验中, 首先将钛宝石激光器输出的基频光经透镜 L_1 聚焦到周期性极化 LiNbO₃ 的端面, 端面已进行了光学加工, 但未镀增透膜, 然后通过棱镜系统分光滤光, 最后用功率计测出倍频光的功率。对功率为 100 mW 的基频光得到了 12 μ W 的倍频蓝光, 其倍频转换效率为 1.2×10^{-4} 。倍频转换效率低于理想准相位匹配情况下的理论计算值, 主要原因有: 一方面光路耦合方式和参数不是最佳, 将增加光波的损耗, 进而影响倍频转换效率; 另一方面所制备的周期性极化 LiNbO₃ 不可避免地存在着周期和每一反转畴畴界的随机误差, 这些误差将直接影响倍频转换效率^[14]。

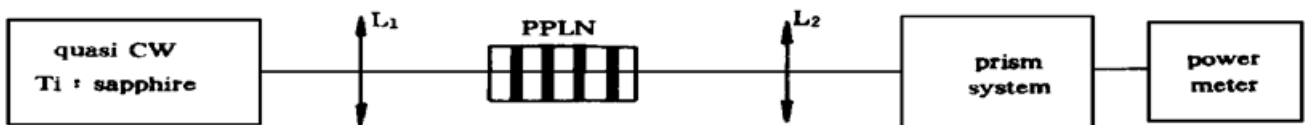


Fig. 4 Experimental configuration of QPM PPLN frequency doubling

结 论 采用外加电场极化法, 实现了 LiNbO₃ 晶体铁电畴周期性极化反转, 并制备出周期为 9.5 μ m 的三阶准相位匹配周期性极化 LiNbO₃ 晶体: 用中心波长为 810 nm 的准连续钛宝石激光器作基频光源, 对准相位匹配周期性极化 LiNbO₃ 晶体进行了光学倍频实验, 得到了 12 μ W 的蓝光输出。

参 考 文 献

- [1] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6) : 1918~ 1939
- [2] Arie A, Rosenman G, Korenfeld A *et al.*. Efficient resonant frequency doubling of a cw Nd:YAG laser in bulk periodically poled KTiOPO₄. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(1) : 28~ 30
- [3] Taverner D, Britton P, Smith P G R *et al.*. Highly efficient second-harmonic and sum-frequency generation of nanosecond pulse in a cascaded erbium-doped fiber: Periodically poled lithium niobate source. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3) : 162~ 164
- [4] Lim E J, Fejer M M, Byer R L *et al.*. Blue light generation by frequency doubling in periodically poled lithium niobate channel waveguide. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(11) : 731~ 732
- [5] Webjorn J, Laurell F, Arvidsson G. Blue light generated by frequency doubling of laser diode light in Lithium niobate channel waveguide. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1989, **1**(10) : 316~ 318
- [6] Webjorn J, Laurell F, Arvidsson G. Fabrication of periodically domain inverted channel waveguides in Lithium Niobate for second harmonic generation. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(10) : 1597~ 1600
- [7] 张志永, 朱永元, 祝世宁等. 一种制备 LiNbO₃ 周期性畴反转的新方法. 人工晶体学报, 1995, **24**(1) : 1~ 9
- [8] 陈云琳, 阮永丰, 姚 珪等. 电子束扫描 LiNbO₃ 制备畴反转光栅. 中国激光, 1996, **A23**(6) : 505~ 508
- [9] Webjorn J, Pruneri V, Russell P St *et al.*. Quasi-phase-matched blue light generation in bulk Lithium Niobate, electrically poled via periodic liquid electrodes. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11) : 894~ 895
- [10] Burns W K, McElhanon W, Goldberg L. Second harmonic generation in field poled quasi-phase-matched bulk LiNbO₃. *IEEE Photo. Lett.*, 1994, **6**(2) : 252~ 254
- [11] Mizuuchi K, Yamamoto K. Harmonic blue light generation in bulk periodically poled LiTaO₃. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(22) : 2943~ 2945
- [12] Chen Q, Risk W P. Periodic poling of KTiOPO₄ using an applied electric field. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(18) : 1516~ 1517
- [13] Myers L E, Eckardt R C, Fejer M M *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(11) : 2102~ 2116
- [14] 陈云琳, 倪文俊, 李世忱等. 准相位匹配 LN 倍频波导铁电畴光栅的研究. 中国激光, 1998, **25**(5) : 448~ 452

Quasi-Phase-Matched Frequency Doubling Blue Light Generation in LiNbO₃

Yu Jian Ni Wenjun Li Shichen

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory,
Tianjin University, Tianjin 300072)

Chen Yunlin

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 2 April 1999; revised 29 August 1999)

Abstract The electric-field poling was used to achieve the periodic poling LiNbO₃ crystal (PPLN), and the third order quasi-phase-matched (QPM) PPLN with a period of 9.5 μm was fabricated. By utilizing this PPLN, 12 μW output of blue light was obtained with a quasi-cw Ti:sapphire laser.

Key words LiNbO₃ crystal, periodic poling, quasi-phase-matched, frequency doubling.