

文章编号: 0253-2239(2002)04-0399-03

一阶准相位匹配周期性极化铌酸锂倍频 产生 18 mW 绿光连续输出*

陈玉萍 陈险峰 曾祥龙 谢绳武 夏宇兴 陈英礼

(上海交通大学应用物理系光学与光子学研究所, 上海 200030)

摘要: 通过高压脉冲电场极化, 制备了周期为 $6.5 \mu\text{m}$ 、长为 12 mm、宽为 10 mm、厚为 0.5 mm 的一阶准相位匹配周期性极化铌酸锂, 由 1.1 W 连续 $1.06 \mu\text{m}$ Nd:YAG 激光器抽运, 在 5° 时产生了约 18 mW、 $0.532 \mu\text{m}$ 的倍频连续绿光, 其对应的二次谐波转换效率约为 1.6%, 二次谐波的归一化转换效率约为 $1.5\% \text{ cm}^{-1} \text{ W}^{-1}$, 相当于 79% 的周期性极化铌酸锂的理想非线性系数。测量了抽运光功率与倍频光功率的关系。

关键词: 周期性极化铌酸锂; 准相位匹配; 倍频; 连续绿光

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

1 引 言

蓝、绿紧凑型激光在高密度光学存储、激光打印和光学显示等领域有重要应用。半导体激光器抽运的倍频器件是获得蓝、绿紧凑型激光的重要手段。工作于短波段的半导体激光器由于其成本昂贵而不能广泛应用于商业。另一方法是利用晶体中的非线性光学过程将现有可用的红外激光进行频率转换。对于非线性光学过程, 准相位匹配(QPM)相对于传统的双折射相位匹配具有许多优势, 主要原因是它可以利用晶体的最大非线性系数 d_{33} ; 并且适合规模生产。准相位匹配技术使非线性光学晶体成为一种“人工智能的材料”^[1]。

1962 年, Armstrong^[2]就提出了通过适当的周期性畴反转, 使材料的非线性系数 d 的符号周期性变化从而实现相位匹配这一概念。但真正要将此想法付诸实现, 制成可实用器件却存在很大困难。直到 1991, Yamada 和 Kishima^[3]成功地利用了电场极化在室温下实现了周期性极化铌酸锂(PPLN)。只有在室温电场极化方法被成功地用于周期性畴反转后, 周期性极化晶体的制备才取得突破性进展。

准相位匹配技术被广泛应用于各种非线性光学过程, 如倍频^[4-7]、光学参变振荡^[8]、差频^[9]等。据

文献 4 报道, 已从周期性极化铌酸锂波导的准相位匹配倍频中获得了 20.7 mW 连续蓝色激光。日本三菱公司宣称他们首先研制出用红外半导体激光器通过准相位匹配倍频得到约 15 mW 连续蓝光激光器。而文献 6 报道, 已在 5.3 cm 长的周期性极化铌酸锂中获得了单通、转换效率达 42%、归一化转换效率达 $1.6\% \text{ cm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 的连续倍频绿光输出。

本文报道了在周期性极化铌酸锂中获得了倍频归一化转换效率达 $1.5\% \text{ cm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 的绿光输出。与文献 6 在理想条件下进行的倍频实验所获得的理想归一化转换效率 $2.4\% \text{ cm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 相比, $1.5\% \text{ cm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 的倍频归一化转换效率表明实验中晶体的有效非线性系数为 13.4 pm/V , 这相当于一阶准相位匹配理想非线性系数的 79% (此处取理想一阶准相位匹配的有效非线性系数为 17 pm/V)。

2 周期性极化铌酸锂的制备和倍频实验

对周期性极化铌酸锂晶体来说, 理想的均匀周期性畴结构对于获得高转换效率非常重要。我们设计和制作了高压脉冲发生器, 其最大的脉冲宽度为 1.3 s, 而最高的输出电压是 12 kV。在实验中, 用长为 12 mm、宽为 10 mm、厚为 0.5 mm 的标准光学波导级铌酸锂样品来制作 $6.5 \mu\text{m}$ 周期的周期性极化铌酸锂。在 Z 向切割双面抛光铌酸锂薄片的 $+Z$ 面, 首先旋转涂覆一层厚约 $1 \mu\text{m}$ 的光刻胶, 经曝光、显影后得到周期性光栅条纹, 然后再在光刻胶外溅射一层厚约 $0.1 \mu\text{m}$ 左右的导电镍层, 在样品上

* 上海市科技发展基金、上海市教委重点学科项目基金、国家自学基金资助课题。

E-mail: chyuping@263.net

收稿日期: 2001-03-05; 收到修改稿日期: 2001-05-04

就形成了一周期性的由 $2\ \mu\text{m}$ 宽、 $10\ \text{mm}$ 长镍条构成的阵列金属电极(其他部分金属在光刻胶上,因而与铌酸锂 $+Z$ 表面绝缘)。正电极(镀有镍条的 $+Z$ 面)与高压电源间的连接是由限制在 O 圈内的氯化锂电解液来接触导通的。高压电源的负电极连接在一块接地的、表面抛光的金属板上,直接与样品的 $-Z$ 面接触。要保证外电场和金属电极之间有良好的欧姆接触,且要防止高压击穿。所用外电场为脉冲高压电场,由于铌酸锂晶体的矫顽场为 $21\ \text{kV}/\text{mm}$,所以施加在厚度为 $0.5\ \text{mm}$ 铌酸锂晶片上的脉冲峰值电压要大于 $10.5\ \text{kV}/\text{mm}$,脉冲周期的长短与次数与电极表面积有关^[8]。实验中所加的高压脉冲电压为 $12\ \text{kV}$,脉冲宽度设置为约 $560\ \text{ms}$ 。极化完成后,用硫酸将金属镍腐蚀掉,用丙酮洗掉绝缘胶。为了检验反转畴的均匀一致性,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,其占空比约为 45% 如图 1 所示。理论上获得最高的倍频转换效率的畴反转占空比是 $1/2$,这表明周期性极化铌酸锂的室温电场极化较成功。

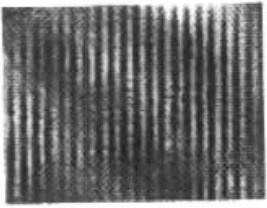


Fig.1 Periodically domain inversion pattern on the $-Z$ face of the PPLN sample

在周期为 $6.5\ \mu\text{m}$ 的周期性极化铌酸锂上进行的一阶准相位匹配倍频实验装置如图 2 所示。抽运光源是 $1.06\ \mu\text{m}$ 工作波长,束腰光斑半径为 $1\ \text{mm}$ 左右的连续 Nd:YAG 激光器(光谱物理公司的 3800S 型)。

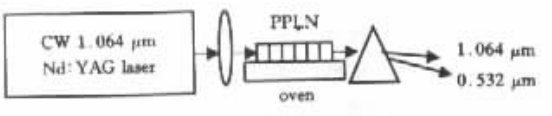


Fig.2 Setup for SHG experiment with a CW $1.06\ \mu\text{m}$ Nd:YAG pump laser

LiNbO_3 样品的端面被抛光,但未镀增透膜。在实验中,抽运激光的 TEM_{00} 单纵模输出经松散聚焦通过样品。根据共焦条件^[10],经透镜聚焦后通过周期性极化铌酸锂的激光腰斑半径为

$$w_{02} = \sqrt{l\lambda(2\pi n)}, \quad (1)$$

(1)式中周期性极化铌酸锂长 l 为 $12\ \text{mm}$, $\lambda = 1.064\ \mu\text{m}$, LiNbO_3 晶体的折射率 $n \approx 2.2$,由此计算出腰斑半径 w_{02} 为 $20.4\ \mu\text{m}$,而周期性极化铌酸锂样品厚为 $0.5\ \text{mm}$,足以将光束束缚其中;波长 $1.064\ \mu\text{m}$ 激光束腰光斑半径 w_{01} 为 $1\ \text{mm}$ 左右。可以从(2)式得出所需透镜的焦距 f 为 $90\ \text{mm}$ 。

$$f = \pi w_{01} w_{02} / \lambda. \quad (2)$$

周期性极化铌酸锂样品放置在一温度可调节的控温炉的开放圆柱体腔中, $1.064\ \mu\text{m}$ 抽运激光经过仔细调整松散聚焦垂直通过样品,可观测到绿光从另一端输出,为了测量转换效率,我们使用一等腰棱镜将 $1.064\ \mu\text{m}$ 红外基波和 $0.532\ \mu\text{m}$ 倍频绿光分开,功率由功率计测得。

3 测量结果和分析讨论

通过调节温度腔的温度发现,在 $5\ ^\circ\text{C}$ 时周期性极化铌酸锂倍频过程的转换效率最大。从周期性极化铌酸锂端面输出 $1.064\ \mu\text{m}$ 抽运光和 $0.532\ \mu\text{m}$ 绿光的功率测量值分别为 $1.1\ \text{W}$ 和 $18\ \text{mW}$,二次谐波转换效率为 1.6% 。对应的归一化转换效率约为 $1.5\% \text{ cm}^{-1} \text{ W}^{-1}$,表明倍频晶体的有效非线性系数为 $13.4\ \text{pm}/\text{V}$,这相当于一阶准相位匹配理想非线性系数的 79% ,接近于周期性极化铌酸锂理想一阶准相位匹配光栅有效非线性系数的理论估计值^[11] $17\ \text{pm}/\text{V}$ ($2d_{33}/\pi$, $d_{33} = 27\ \text{pm}/\text{V}$)。由于光折变损伤,最大功率输出只持续了约 $0.5\ \text{h}$ 。

改变抽运光的输入功率,分别测量从周期性极化铌酸锂端面输出的抽运光和倍频光的功率,其关系如图 3 所示。其纵坐标为在一定抽运光功率下得到的最大倍频光功率。即对应于每一基波输入功率,通过调节聚焦后基波在周期性极化铌酸锂中腰斑的大小、位置来获得最大的倍频输出功率。

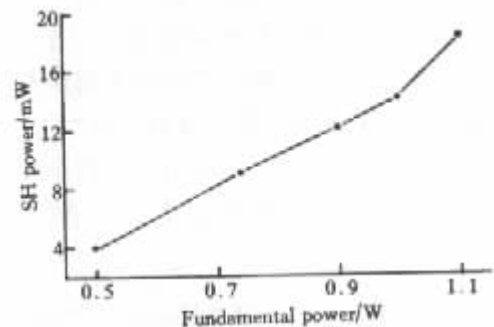


Fig.3 Measurement of cw $532\ \text{nm}$ output power internal to the exit face of the sample versus $1064\ \mu\text{m}$ input power internal to the exit face of the sample

在该倍频实验中, 获得最大倍频转换效率的温度约为 5 °C。而理论上, 当畴反转周期为 6.5 μm 时, 最大转换效率应出现在温度为 198 °C 时^[13]。因此我们推断出所制备的周期性极化铌酸锂样品的实际畴反转周期要大于 6.5 μm 。由于在 5 °C 时光折变损伤是非常明显的, 此时倍频功率不稳定, 最大功率输出维持不超过 0.5 h。提高准相位匹配温度和使用掺镁的铌酸锂晶体是解决光折变损伤的方法之一, 而使用高纯度少杂质的铌酸锂晶体是解决光折变损伤的根本途径。

4 结 论

在室温下通过高压电场脉冲极化, 成功地制备了周期为 6.5 μm 、长为 12 mm、宽为 10 mm、厚为 0.5 mm 的一阶准相位匹配倍频周期性极化铌酸锂, 并在 5 °C 左右得到由 1.1 W 连续 1.064 μm Nd:YAG 激光器抽运产生约 18 mW 连续 0.532 μm 绿光, 其对应 1.6% 的转换效率, 归一化转换效率约为 1.5% $\text{cm}^{-1}\text{W}^{-1}$, 表明倍频晶体的有效非线性系数为 13.4 pm/V, 这相当于一阶准相位匹配理想非线性系数的 79%。结果表明, 我们制作的周期性极化铌酸锂样品具有较好的质量。

参 考 文 献

- [1] Miller G D, Dissertation P D, Stanford Univ., 1995
 [2] Armstrong J A, Broembergen N, Ducuing J *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric.

- Phys. Rev.*, 1962, **127**(6):1918 ~ 1939
 [3] Matsumoto S, Lim E J, Hertz H M *et al.*. *Electron. Lett.*, 1991, **27**() 2040 ~
 [4] Yamada M, Nada N, Saitoh M *et al.*. First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(5) 435 ~ 436
 [5] 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
 [6] Miller G D, Batchko R G *et al.*. 42%-efficient single-pass CW second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(24):1834 ~ 1836
 [7] Yu Jian, Ni Wenjun, Li Shichen *et al.*. Quasi-phase-matched frequency doubling blue light generation in LiNbO₃. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(3): 410 ~ 413(in Chinese)
 [8] 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
 [9] Chou M H, Hauden J, Aarbore M *et al.*. 1.5 μm -band wavelength conversion based on difference-frequency generation in LiNbO₃ waveguides with integrated coupling structures. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13):1004 ~ 1006
 [10] Wang Zhijian, Yang Jiexiang. The study of photorefractive and LiNbO₃ and LiTaO₃. *J. Anhui University natural Science Edition*(安徽大学学报), 1997, **21**(4) 27 ~ 33(in Chinese)
 [11] Chen Yingli. *Introduction to Laser* (激光导论). Beijing:Electronic Industry Press, 1986. 190 ~ 193(in Chinese)

18 mW CW Green Light Generation by First-Order Quasi-Phase-Matched Frequency Doubling in Bulk Periodically Poled LiNbO₃

Chen Yuping Chen Xianfeng Zeng Xianglong Xie Shengwu Xia Yuxing Chen Yingli
 (Institute of Optics and Photonics, Department of Applied Physics,
 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)
 (Received 3 March 2001; revised 4 May 2001)

Abstract: A first order quasi-phase-matched periodically poled LiNbO₃(PPLN) for SHG with 6.5 μm period, 12 mm length, 10 mm width and 0.5 mm thickness has been successfully fabricated by applying an external electric field at room temperature from an high pulsed voltage generator. About 18 mW of CW 0.532 μm green light was obtained pumped by an 1.1 W of CW 1.064 μm Nd:YAG laser with end coupling, which corresponds to 1.6% power conversion efficiency. The SHG normalized conversion efficiency is about 1.5% $\text{cm}^{-1}\text{W}^{-1}$, which shows 79% of the ideal nonlinear coefficient. A reasonable explanation of the experiment is given.

Key words: periodically poled LiNbO₃; quasi-phase-matched; SHG; CW green light