

文章编号: 0253-2239(2007)06-1063-4

准相位匹配 PPKTP 晶体连续倍频 13 mW 绿光输出*

付伟佳¹ 于 建¹ 康玉琢¹ 倪文俊¹ 陈亚南¹ 桑 梅¹ 李世忱¹ 胡永岚² 师瑞泽²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
(² 中材人工晶体研究院, 北京 100018)

摘要: 采用高压脉冲电场极化, 通过电光效应实时监控、倍频通光二维监控等手段的应用, 制备出周期为 9 μm 、长为 8 mm、宽为 3 mm、厚为 1 mm 的周期极化 KTiOPO_4 晶体 (PPKTP); 倍频通光实验中, 当波长 1064 nm 的基频光功率为 1 W 时, 得到了功率为 13.5 mW 的 532 nm 连续倍频绿光输出, 单通倍频转换效率为 1.35%, 归一化转换效率为 1.69%/(W·cm), 接近理论最大值。

关键词: 非线性光学; 准相位匹配; 周期极化; 倍频; PPKTP 晶体

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

13 mW-Continuous-Wave Green Light Output by Quasi-Phase-Matched Frequency Doubling in Periodically Poled KTP

Fu Weijia¹ Yu Jian¹ Kang Yuzhuo¹ Ni Wenjun¹ Chen Yanan¹

Sang Mei¹ Li Shichen¹ Hu Yonglan² Shi Ruize²

(¹ College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, Education Ministry of China, Tianjin University, Tianjin 300072)
(² Research Institute of Synthetic Crystals, Beijing 100018)

Abstract: A periodically poled KTiOPO_4 (PPKTP) for second harmonic generation (SHG) with 9 μm period, 8 mm length, 3 mm width and 1 mm thickness has been successfully fabricated by applying an external electric field of high pulsed voltage. During the program, the real time monitoring measures such as electro-optical effect method, second harmonic generation two-dimensional method were used. 13.5 mW of 532 nm second harmonic generation green light was obtained pumped by 1 W, 1064 nm fundamental wave. The single-pass second harmonic generation conversion efficiency was 1.35% and the normalized conversion efficiency was 1.69%/(W·cm), which was close to the maximal theoretic value.

Key words: nonlinear optics; quasi-phase matching; periodic poling; second harmonic generation; PPKTP crystal

1 引 言

准相位匹配(QPM)可以通过多种手段来实现, 目前最热门的方法是周期性极化反转铁电体材料中的自发极化方向^[1,2]。理论上只要根据设计不同的极化反转周期, 就可以实现晶体透光范围内任意波长的变换。其中, KTP 晶体具有矫顽场电压(约为 2.1 kV/mm)低、光损伤阈值高、非线性系数

较大和光折变效应不明显的综合特性引起人们的极大兴趣。目前, 对周期极化 KTiOPO_4 (PPKTP) 晶体制备技术的研究中, 比较成功也是普遍使用的方法, 就是用外加高压电场对晶体进行周期性极化反转来制备准相位匹配器件。

本文在设计和研制周期极化 KTP 晶体倍频器件的过程中, 采用电光效应实时监控和倍频通光二

* 国家自然科学基金(60377018)资助项目。

作者简介: 付伟佳(1981—), 女, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 主要从事光电子技术及非线性光学方面的研究。

E-mail: yoursjia@126.com

导师简介: 于 建(1946—), 女, 山东济南人, 教授, 主要从事光电子技术和激光技术、准相位匹配技术方面的研究。

E-mail: yuj@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-09-19; 收到修改稿日期: 2006-11-27

维监控两种监控方法相结合,较好地实现了畴反转的人为控制,研制出的器件在室温下进行光学倍频透光,获得了单通倍频转换效率为 1.35%、归一化转换效率为 1.69%/(W·cm)的连续绿光输出,接近于理论最大值^[3]。

2 PPKTP 晶体的制备

2.1 极化方案

采用外加电场方法对 KTP 晶体进行极化反转,其原理是利用半导体工艺中成熟的光刻工艺,在单畴化的 KTP 晶体上制作周期性的电极,然后在晶体的正负畴面施加高压电场以实现铁电畴自发极化方向的周期反转^[4~7]。整个极化反转过程中, KTP 晶体有着与铌酸锂晶体相似的一般性规律,即分为成核、贯穿、电极下面区域合并和畴壁横向扩展四个阶段。对于周期极化 KTP 晶体,理想的均匀周期性畴结构反转对获得高转换效率是非常重要的。因而合理设计电极结构、研制稳定的高精度高压脉冲电源、在周期反转过程采用有效的监控方案就成为了制备合格的 PPKTP 器件的必要条件。

2005 年,瑞典的 Carlota Canalias^[8]在实验中将金属膜均匀镀在 C-面和镀在 C+面作比较,结果发现当金属膜镀在 C-面晶体的成核密度较镀在 C+面高很多,并且当金属膜镀在 C-面时,在 C+面几乎没有形成畴核,也就是说畴核都在一个面上,它们的生长方向也都在一个方向,这对改善极化反转的质量更为有利。因而我们改变以往 C+面光刻光栅电极的设计方案,尝试在晶体的 C-面制作周期性光栅电极,另一面不做电极处理,采用液体电极方案,即通过饱和氯化钾电解液将正负畴面分别与高压电源的正负极连接。采用这种新的设计方案后,我们的实验结果较之以往有了很大的提高,本文所报道的倍频器件就采用了这种电极结构。

2.2 电光实时监控

室温下采用外加电场极化法制备 PPKTP 倍频晶体时,外场能量不仅为形成畴核、畴反转以及畴的生长提供所需能量,同时也会补偿晶体退极化场能和畴壁的能量等内场能。如果外加脉冲电压过高或个数过多时,很容易导致晶体内部能量过剩而引起畴的横向过度扩展而“过极化”。如果外加电压尤其是高压所提供能量不足以使畴充分沿电场方向生长就提前合并的话,则使畴无法贯穿到另一面。另外,在施加低于矫顽场的电压次数过多的情况下,也极易引起电极附近畴结构出现过度的横向扩展,改变占空比(一个光栅周期中极化反转区域宽度与周期之比)而影响到器件的质量。

因此需要采用有效的监控技术,才能在 PPKTP 晶体制备中获得理想的畴结构。

KTP 晶体的电导率很高(比 LiNbO₃ 晶体高 10 个数量级以上),容易产生传导电流,不适宜采用通过测量极化反转期间消耗的电荷量来评价晶体反转程度的监控方法,给有效控制 KTP 极化反转过程带来了困难。因此我们利用 KTP 晶体良好的电光性质,对其极化反转实行监控,以提高制作 PPKTP 器件的质量和重复性,我们已在国内报道了这种监控方法^[9]。

实时监控装置如图 1 所示。基本原理是:当对晶体沿 z 轴外加电场之后,晶体的折射率发生变化,由此引起激光在通过晶体后偏振态发生变化。外加电场 E_z 之后,激光经过晶体后, y 轴方向与 z 轴方向之间相位差的计算公式如下:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_E = \frac{2\pi L_x}{\lambda_0} (n_x - n_y) + (1 - 2D) \frac{\pi L_E E_z}{\lambda_0} (n_y^3 r_{23} - n_z^3 r_{33}), \quad (1)$$

其中 Γ_0 是由自然双折射效应产生的相位差, Γ_E 是由

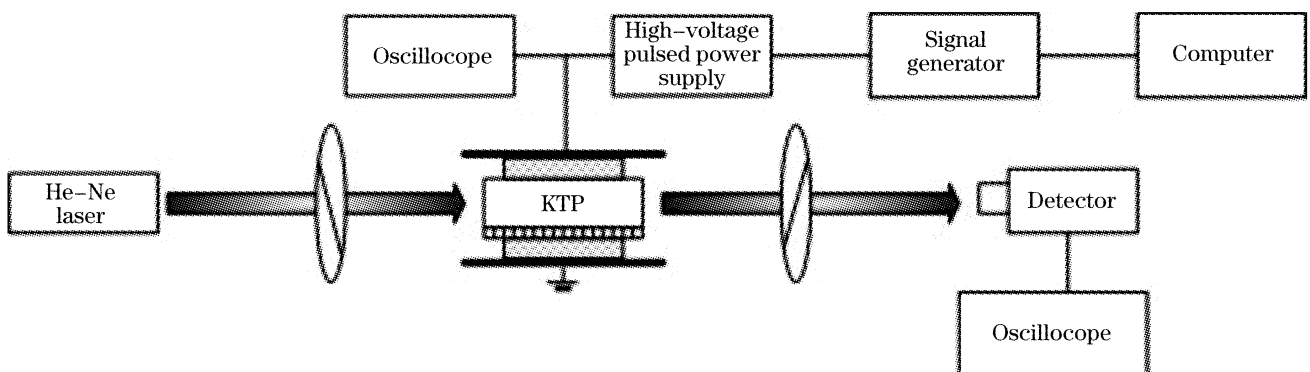


图 1 实时监控示意图

Fig. 1 Sketch of real-time monitoring

于外加电场后所产生的电光相位差, E_x 是外加电场的强度, L_x 是晶体的长度, L_E 是存在电场区域的总长度, D 为占空比。

实验中将晶体插入两正交偏振片之间, 第一个偏振片的偏振轴方向与晶体 z 轴成 45° , 当 He-Ne 激光沿着 x 轴方向通过第一个偏振片时变成与晶体的 z 轴成 $+45^\circ$ 的线偏振光, 经过晶体电光调制后输出的光再通过第二个偏振片, 此时检测器接收的光强便可反映出偏振态的变化。当外加电压超过矫顽场时, 由于畴反转区域的电光系数变负值, 该区域与没有发生极化反转区域的电光效应抵消。当占空比为 0.5 时, 电光效应的有效作用为 0, 极化过程就是电光效应的有效作用长度由晶体长度变为 0 的过程。检测器接受到的光强 I 与相位差 Γ 之间的关系表示为

$$I \propto (1 - \cos \Gamma). \quad (2)$$

由(1)式、(2)式可看出, 检测器接收到的光强主要由占空比和外加电压决定, 当施加脉冲方波时, 对应电压的平顶位置光强变化反映的是占空比的变化, 也就是说光强变化越明显, 极化反转进行得越激烈。

实验结果如图 2 所示, 由左至右三幅图分别为极化反转过程中, 利用我们自己研制的高压脉冲电源对晶体第一次、第三次和第四次外加脉冲的光强与电压关系图, 实验中施加的方波高压脉冲电压设为 3 kV, 脉宽为 6 ms 或 4 ms, 上升沿小于 0.1 ms。从图中光强的变化曲线可以看出, 第一次外加电场极化反转比较激烈, 光强的变化呈正弦变化, 第三次加压后, 所监控位置的光强几乎不随外加电场变化, 当再次施加第四次高压后, 光强再次出现波动, 分析可能是由于出现了少许过极化的原因。

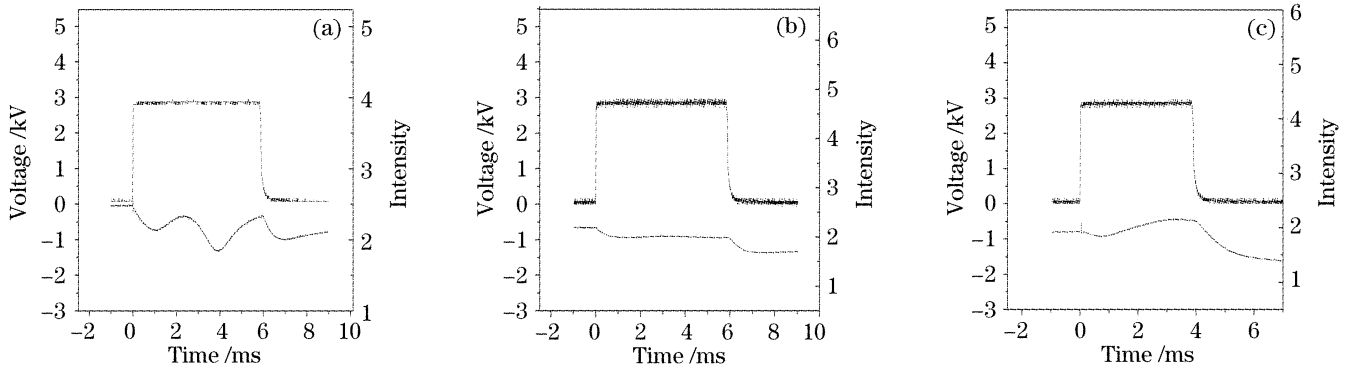


图 2 实时监控光强的变化曲线, (a)第一次加压, (b)第三次加压, (c)第四次加压的光强变化曲线

Fig. 2 Variety of optical intensity by real-time monitoring for the electric field applied separately first time (a), the third time (b), the fourth time (c)

2.3 倍频通光监控

由于 He-Ne 激光的光斑监测范围有限, 所以还要通过倍频通光的方法沿深度和宽度进行监控。以全固态激光器输出连续 1064 nm 光为基频光, 对制备器件通光倍频, 可沿纵向横向二维监测。对晶体施加电压后, 由于畴由光栅电极面开始生长, 所以在这一区域附近也最先有绿光输出, 然后继续加压, 输出绿光的区域逐渐下移, 并利用功率计接收倍频光功率(P_{SH})。在这一过程中, 将测得的 P_{SH} 与理论值比较, 当在光栅附近测得的 P_{SH} 与理论值接近时, 则可以停止加矫顽场以上的高压^[10,11]。

以一片 $8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的样品为例, 首先对样品施加一高于矫顽场电压的脉冲(电压 2.6 kV, 脉宽 7.2 ms), 第一次加高压后倍频通光中只有靠近 C 一面光栅的区域有绿光输出, 但绿光较弱。再次施加同一参量的高压后, 所测 P_{SH} 值与理论值曲线图比较, 可知与理论值较为接近, 随后施加二个低

于矫顽场的脉冲(电压 1.8 kV, 脉宽 7.2 ms), 使同一电极下相邻电畴能够很好地互相合并, 倍频通光发现靠近 C+ 面的区域也有绿光输出, 且 C- 一面区域光斑模式有所改善, 整个区域 P_{SH} 有所提高。

3 倍频实验

我们研制的 PPKTP 晶体倍频实验装置如图 3 所示。其中 1 为 Nd:YVO₄ 全固态连续激光器, 输出波长 1064 nm, 用作基频光, 2 为聚焦透镜(焦距 $f=190 \text{ mm}$), 3 为 PPKTP 晶体($8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times$

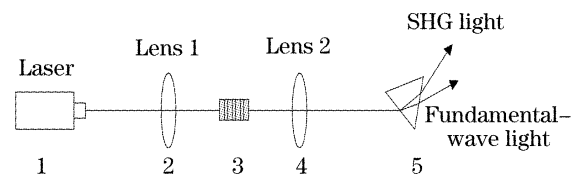


图 3 倍频实验装置

Fig. 3 Experimental setup of frequency doubling