

# 基于飞秒激光写制波导的 PPKTP 晶体倍频实验研究\*

王 珏 涂成厚 张双根 吕福云<sup>†</sup>

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2008 年 11 月 1 日收到, 2009 年 4 月 9 日收到修改稿)

在 PPKTP 晶体上进行了飞秒激光刻写波导的实验研究, 优化了 *c*-切 PPKTP 晶体中写制 II 型波导的工艺参数. 当波导长度为 10 mm, 宽度为 14.5  $\mu\text{m}$ , 准相位匹配波长为 1064 nm 时, 实现了单模传输. 利用该波导对调 Q Nd:YAG 激光进行了准相位匹配倍频实验, 实现的二次谐波转换效率为 39.8%.

关键词: 飞秒激光, PPKTP, 光波导

PACC: 4262A, 4280L, 4265K

## 1. 引 言

利用非线性晶体实现激光频率变换一直是扩展激光波段的有效方法<sup>[1]</sup>. 用非线性晶体微结构波导进行激光倍频时, 波导对光束具有较强的约束, 基频光和二次谐波被限制在波导内耦合和传输, 因此能够提高倍频转换效率, 获得高质量的倍频激光. 钛扩散法和质子交换法能够制备低损耗、高质量的光波导, 但是它们只能制备靠近基底表面的二维波导, 且制作工艺比较复杂. 随着飞秒激光的发展, 上述缺陷将逐渐被克服. 飞秒激光是一种峰值功率极高、脉宽极窄(10<sup>-15</sup> s)的超短脉冲激光. 由于飞秒激光脉冲持续时间极短, 激光辐照区域淀积的能量难以通过热辐射途径逸出辐照区域, 激光能量得到有效利用. 1996 年, Davis 等人报道了聚焦飞秒激光可诱导透明介质内折射率的增加, 并且利用飞秒激光的这种特性加工出微光波导<sup>[2]</sup>. 在过去的 10 年间, 研究人员深入探讨了飞秒激光微结构加工的可能性, 发展了飞秒激光微结构加工技术, 使之日趋成熟. 飞秒激光在金属、陶瓷等不透明材料及晶体、玻璃、聚合物等透明材料中均可直接写入微结构. 1999 年, Homolle 等人使用红外飞秒激光在硅玻璃上制作了波导结构, 并由此制作出了 Y 形耦合器<sup>[3]</sup>. 2002 年, Cerullo 等人利用红外散射飞秒激光光束, 通过控制光束束腰和焦点位置在掺铟和掺铯的玻璃上制作出了波长

为 1.5  $\mu\text{m}$  的单模波导<sup>[4]</sup>. 同年, Matthias Will 等人在硅玻璃上制作了波长为 514 nm 和 1.5  $\mu\text{m}$  的波导<sup>[5]</sup>. 2004 年, Gui 等人使用掺钛蓝宝石激光器(150 fs, 1 kHz)在 LN 晶体上制作了 3  $\mu\text{m}$  宽的波导<sup>[6]</sup>. 2005 年, Thomson 等人使用掺钛蓝宝石激光器(520 fs, 5 kHz)在 LN 晶体上分别制作了 I 型和 II 型波导<sup>[7]</sup>. 对于在 PPKTP 晶体上刻写波导, 国内还未见到这方面的相关研究.

在晶体中写制光波导, 一般有两种刻写方式: I 型刻写和 II 型刻写. 对于 I 型刻写, 导波区域为飞秒激光聚焦的区域, 此类型波导的热稳定性很难控制, 尤其是在入射光能量较高的情况下. II 型刻写能够克服这个缺点, 其波导区域在两个飞秒激光聚焦区域的中间(即导波区为晶体材料, 其折射率高于飞秒激光刻写区的折射率), 由于没有飞秒激光干扰, 其热稳定性较好.

在本文中, 我们使用紧聚焦飞秒激光脉冲, 在 *c*-切 PPKTP 晶体中写制了 10 mm 长的 II 型波导, 当波导宽度为 14.5  $\mu\text{m}$  时, 实现了光波在波导中的单模传输. 使用 PPKTP 波导对电光调 Q Nd:YAG 激光进行了有效的倍频. 在室温下, 当入射波长为 1064 nm 时, 获得的二次谐波转换效率高达 39.8%.

## 2. 波导刻写实验装置

实验中所用掺钛蓝宝石飞秒激光器(HP-

\* 国家自然科学基金(批准号: 60677013)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20060055021)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jufy@nankai.edu.cn

Spitfire, Spectr-Physics Inc.) 输出的飞秒脉冲中心波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 50 fs, 脉冲的峰值能量为 2 mJ. 图 1 为刻写示意图. 刻写时样品置于二维机械平台上, 运动速度为 200  $\mu\text{m/s}$ , 运动方向垂直于 Z 轴. 实验中选用 25 倍显微物镜 (NA = 0.4) 直接将激光聚焦在样品表面以下约 200  $\mu\text{m}$  处, 并使用一个 CCD 摄像头 (KA-320) 监视刻写过程. 实

验使用的 PPKTP 晶体, 长 10 mm, 厚 1 mm, 准相位匹配周期为 9.0  $\mu\text{m}$ . 为了刻写热稳定、单模传输的 II 型波导, 我们沿 X 轴方向对 PPKTP 晶体连续刻写了两条间隔 14.5  $\mu\text{m}$  的线条. 同时, 利用可调谐衰减器, 将脉冲能量调节到大约 100  $\mu\text{J}$ , 从而达到刻写波导的最佳能量值.

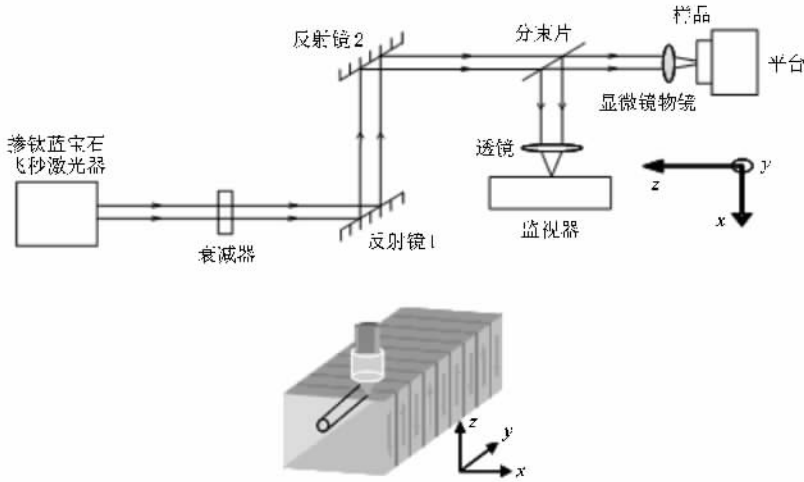


图 1 波导刻写示意图

### 3. 倍频实验研究

KTP 晶体具有很高的光损伤阈值, 在室温下运行光折变效应不明显, 矫顽场电压仅为 LN 的 1/10, 较容易极化反转较大厚度的晶体, 适合在高功率、大

孔径激光系统中应用.

实验使用的 PPKTP 晶体是由外加极化电场法制成的<sup>[8]</sup>. 我们对晶体的两个端面进行了抛光处理并镀上对 532 nm 高透的薄膜. 利用 PPKTP 波导进行倍频实验的过程如图 2 所示. 使用调 Q Nd:YAG 激光器 (Continuum Surelite II-10) 作为基频光源, 输出激

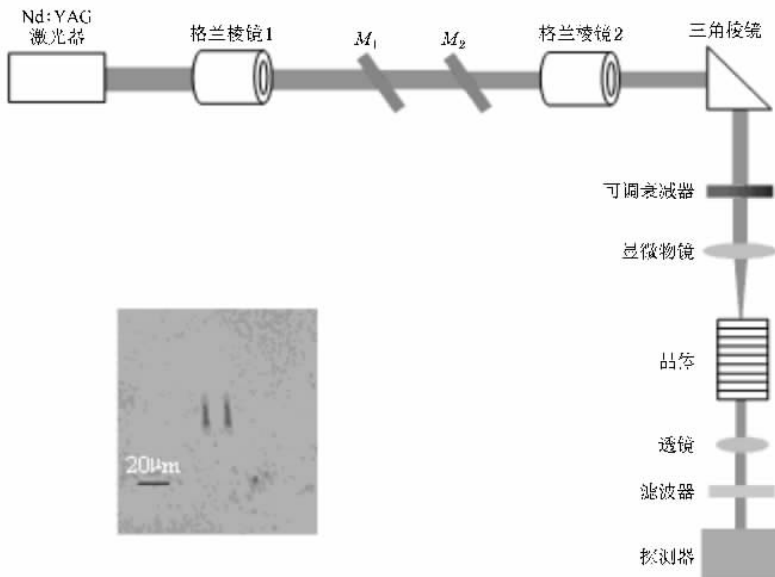


图 2 使用 PPKTP 波导倍频示意图( 插图为波导端面的显微图样 )

光的脉冲宽度为 5 ns, 重复频率为 10 Hz, 中心波长为 1064 nm. 通过空间滤波器, 得到光脉冲的空域图形近似于高斯型. 使用两块格兰棱镜 (Glan prism) 进行偏振选择和衰减光能量的作用.  $M_1$  和  $M_2$  为光衰减器, 也起到衰减光能量的作用. 将 Z 方向偏振光通过 10 倍显微物镜 (NA = 0.25) 耦合到波导内. 在准直透镜后, 放置一滤波器, 将 99.5% 的基频光反射, 并通过 90% 的倍频光. 最后用光功率计、光谱仪、光探测器和示波器测量倍频光.

使用高分辨率光谱仪 (Ocean Optics) 测量的二次谐波光谱图像, 如图 3 所示. 光谱半强度全宽为 1.2 nm, 波形的非对称性是由于脉冲在波导中传输过程中的色散和非线性效应造成的. 为了观测该刻写波导的传输特性, 将基频光耦合到波导内, 倍频激光经过 10 倍的显微物镜 (NA = 0.25) 扩束. 用相机观测到的倍频光近场图样, 如图 3 插图所示. 通过我们的实验可以发现, 只有 Z 方向的偏振光可以在该波导中传输.

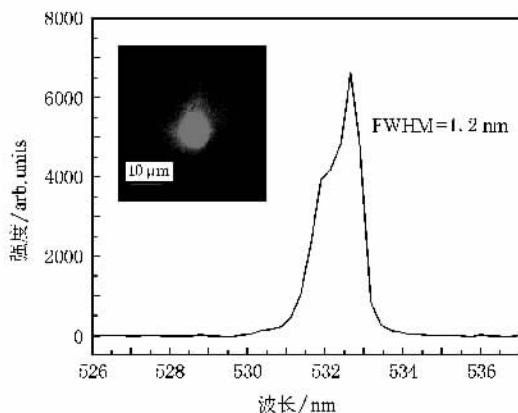


图 3 使用 1064 nm 基频光抽运的二次谐波光谱图像 (插图为二次谐波的近场图样)

虽然我们使用了一个显微物镜以确保激光与波导的准确耦合, 但是仍然还有部分基频光没有进入波导而被损耗掉. 将滤波器移开之后, 使用光谱仪可以同时观测到二次谐波和基频波的光谱图像. 经过波导后剩余的基频光光谱强度小于倍频光的三分之一, 如图 4 所示. 因此可以得出, 耦合到波导中的基频光已经有效的转换为二次谐波输出.

在分离了基频光后, 测得的二次谐波脉冲能量和倍频转换效率随入射基频光脉冲能量的变化, 如图 5 所示. 当入射光波长为 1064 nm 时, 产生的二次谐波能量与基频光的能量近似成线性关系, 当入射光为 317.76  $\mu\text{J}$  时, 二次谐波能量为 126.4  $\mu\text{J}$ , 得到

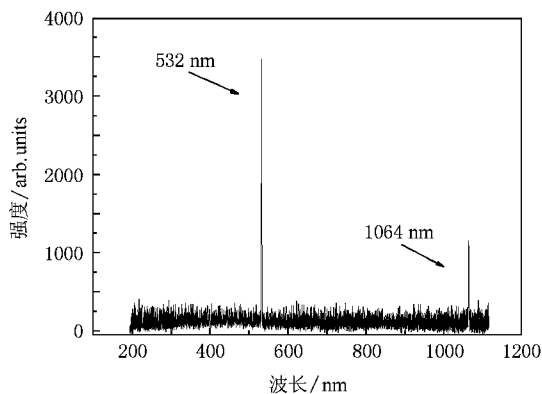


图 4 经过波导后的二次谐波与抽运波的光谱图像

的最大转换效率为 39.8%.

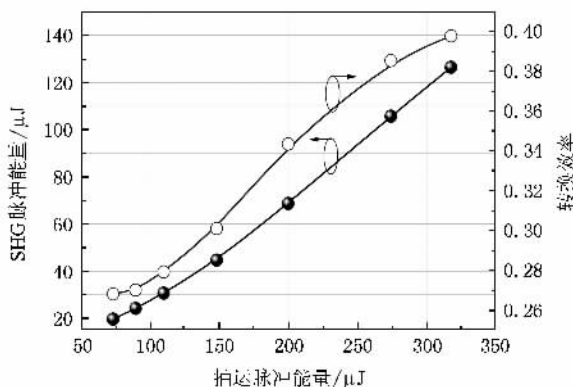


图 5 二次谐波脉冲能量随基频光能量变化曲线, 以及相应的转换效率

## 4. 结果与讨论

本文对飞秒激光在 PPKTP 晶体上刻写波导进行了初步探索. 首先, 使用飞秒激光刻写光波导, 要确定 KTP 晶体的损伤阈值, 当激光的脉冲能量超过晶体的损伤阈值时, 刻写的通道没有波导特性, 同时晶体会受到不同程度的损伤. 实验所用的激光脉冲能量为 20—200  $\mu\text{J}$ , 样品移动速度为 100—300  $\mu\text{m/s}$ . 综合考虑激光脉冲能量、扫描速度和激光聚焦光斑的大小, 则激光强度在 8—800  $\text{kW/cm}^2$  之间变化. 实验中发现, 激光脉冲能量在 100  $\mu\text{J}$  左右, 扫描速度在 200  $\mu\text{m/s}$  时刻写的通道具有较好的波导特性.

其次, 实验中发现, 波导区域的大小和均匀性主要取决于飞秒激光脉冲的能量和晶体的移动速率, 采用较低的激光功率和移动速度可以获得较好的刻写效果. 由于飞秒激光峰值功率极高, 受自聚焦、色

散等因素的影响,能量在空间上分布不均匀,使焦点处产生的改性区域不对称,其横截面底部较宽,而且其折射率的变化在同一截面的不同位置处分布也不一样.在实验中,我们通过改变激光功率、透镜数值孔径等参数,优化了改性区域的横截面形状.使用掺钛蓝宝石飞秒激光器,沿 X 轴方向对 PPKTP 连续刻写了两条间隔  $14.5\mu\text{m}$  的线条,当脉冲能量为  $100\mu\text{J}$  时,制备的光波导效果最好.实验成功写制了热稳定性良好的 II 型波导,并实现了单模传输.随后,用 Nd:YAG 调 Q 激光器作为基频光源,进行了飞秒激光刻写 PPKTP 波导的倍频实验,在室温下,获得的

$532\text{nm}$  短脉冲倍频激光的二次谐波转换效率为  $39.8\%$ .我们将实验结果与未刻写波导的 PPKTP 晶体进行比较:相同条件下倍频效率从  $26\%$  升至  $39.8\%$ ,其效率提高了  $53\%$ .并且,趋于发散的光斑模式得到有效的改善.规则的光斑近场分布,有利于波导与光纤的直接耦合.

这些研究表明利用飞秒激光在透明材料进行三维微制备的技术在微电子、微光学、光通信和生物医学等高新技术领域将有广阔的应用前景.

感谢天津大学的于建老师提供了性能良好的 PPKTP 晶体.

- [ 1 ] Chen Y L, Yuan J W, Yan W G, Zhou B B, Luo Y F, Guo J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2079 ( in Chinese ) [ 陈云琳、袁建伟、闫卫国、周斌斌、罗勇锋、郭 娟 2005 物理学报 **54** 2079 ]
- [ 2 ] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, Hirao K 1996 *Opt. Lett.* **21** 1729
- [ 3 ] Homoelle D, Wielandy S, Gaeta A L, Borrelli N F, Smith C 1999 *Opt. Lett.* **24** 1311
- [ 4 ] Cerullo G, Osellame R, Taccheo S, Marangoni M, Polli D, Ramponi R, Laporta P, De Silvestri S 2002 *Opt. Lett.* **27** 1938

- [ 5 ] Matthias Will, Stefan Nolte, Boris N Chichkov *et al* 2002 *App. Opt.* **41** 4360
- [ 6 ] Gui L, Xu B, Chong T C 2004 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16** 1337
- [ 7 ] Thomson R R, Campbell S, Blewett I J, Kar A K, Reid D T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 111109
- [ 8 ] Yamada M, Nada N, Saitoh M, Watanabe K 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 435

## Experimental research on frequency doubling in periodically poled $\text{KTiOPO}_4$ waveguide fabricated by femtosecond laser<sup>\*</sup>

Wang Jue Tu Cheng-Hou Zhang Shuang-Gen Lü Fu-Yun<sup>†</sup>

( College of Physical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China )

( Received 1 November 2008; revised manuscript received 9 April 2009 )

### Abstract

We present in this paper the fabrication and characterization of type II waveguide in *c*-cut periodically poled  $\text{KTiOPO}_4$  crystal. The waveguide was fabricated by using a femtosecond laser, and the fabrication process was optimized. In our experiments single mode propagation was observed at optimal waveguide width of  $14.5\mu\text{m}$  and quasi-phase matching wavelength of  $1064\text{nm}$ . The second-harmonic conversion efficiency of  $39.8\%$  can be achieved.

**Keywords**: femtosecond laser, PPKTP, waveguide

**PACC**: 4262A, 4280L, 4265K

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60677013 ) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20060055021 ).

<sup>†</sup> E-mail: lufy@nankai.edu.cn