

高峰值功率皮秒超短脉冲抽运 KTP 晶体倍频研究

沈梅力 李霄* 于海龙 尚亚萍 许晓军

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 脉冲光纤激光器具有输出光束质量好、峰值功率高等优势,易于激发晶体内部的非线性效应。晶体非线性效应能够将光纤激光的近红外输出波段变换至深紫外或中红外等波段。利用实验室自主搭建的中心波长为 1064 nm,脉宽为 650 ps 的脉冲光纤激光器抽运 KTP(磷酸钛氧钾)晶体,实现了高功率超短脉冲对 1064 nm 激光的单程倍频,输出 532 nm 激光。将脉冲宽度由 650 ps 压缩至 1 ps 后,抽运激光的峰值功率密度达到 24.97 GW/cm²,有效地将单程倍频转换效率从 0.8% 提高到 8.4%。研究了不同平均功率、脉宽、光斑直径的超短脉冲下 KTP 晶体的倍频效率,验证了未来在振荡腔结构下实现 KTP 晶体高效倍频的可行性。

关键词 激光器;非线性变频;二次谐波;超短脉冲抽运;KTP 晶体

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901006

Second-Harmonic Generation Through KTP Crystal Pumped by High-Peak-Power Picosecond Ultrashort Pulse

Shen Meili Li Xiao Yu Hailong Shang Yaping Xu Xiaojun

College of Optoelectronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract With high peak power and good beam quality, it is easy for pulsed fiber lasers to trigger nonlinear process in a nonlinear crystal, and the near-infrared laser can be transferred into the ultra-violet or mid-infrared regime. In an experiment, the homemade high power pulsed fiber laser with central wavelength of 1064 nm and pulse duration of 650 ps is used to pump KTP (potassium titanyl phosphate) crystal, and the 532 nm laser is output after second-harmonic generation (SHG). In the process, the pulse width is compressed from 650 ps to 1 ps, the peak power density of the pump laser is raised to 24.97 GW/cm², and the SHG efficiency increases from 0.8% to 8.4%. SHG efficiency is investigated for the pump laser of different average power, pulse width and beam spot, and the possibility to achieve highly efficient SHG with an oscillator is proved.

Key words lasers; nonlinear frequency conversion; second-harmonic generation; ultrashort pulse pumping; KTP crystal

OCIS codes 140.3515; 190.2620; 320.5390; 320.5520

1 引言

脉冲光纤激光器具有平均功率和峰值功率较高,光束质量良好、线宽窄等特点^[1],在材料的加工与处理^[2]、激光刻蚀^[3]、非线性晶体变频^[4]等方面具有广泛的应用。同时,相较于传统固体激光器存在成本高、结构复杂、体积庞大的问题^[5],脉冲激光器具有成本低^[5]、结构紧凑^[5]、热管理方便^[6]的优点,因此在实现非线性晶体的高效倍频方面更具有优势。Apurv 等^[5]利用大模场光子晶体光纤脉冲激光器抽运 BBO(偏硼酸钡)晶体实现了 1040 nm 激光的倍频转换,输出能量为 26.4 μJ 的 520 nm 激光。由于光子晶体光纤熔接困难,该实验系统中采

收稿日期: 2016-03-25; 收到修改稿日期: 2016-05-24

作者简介: 沈梅力(1992—),女,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: yoyosmile19921003@163.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事气动光学、自适应光学、光纤/固体激光器相干合成等方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

* 通信联系人。E-mail: crazyli@163.com

用空间光学器件耦合的方法来实现大能量、高峰值功率的脉冲激光输出以保证高效的倍频转换,但一定程度上降低了实验系统的稳定性和紧凑性,未能凸显脉冲光纤激光器作为抽运源的自身优势。

本文利用实验室自主搭建的全光纤结构线偏振啁啾脉冲放大器^[7]输出高峰值功率、高光束质量的超短脉冲抽运 KTP(磷酸钛氧钾)晶体来实现高效的非线性倍频。与含有空间光结构的脉冲激光器相比,全光纤结构的脉冲激光器作为抽运源时实验系统更加紧凑,稳定性更好。KTP 晶体为非线性晶体,非线性系数较大^[8],具有稳定的化学和热学性能^[9],透光范围较宽,特别是在 1064 nm 处晶体的吸收损耗率较低^[9],实现 1064 nm 激光的高效非线性倍频转换时具有极大的潜力。本文对比了抽运激光在不同平均功率、脉宽和光斑直径情况下的倍频转换效率,并且初步研究了高功率超短脉冲作用下 KTP 晶体受损的原因。

2 实验装置

实验利用文献^[7]中搭建的偏振啁啾脉冲放大器作为抽运源,输出准直的线偏振激光脉冲,光斑直径约为 8 mm,中心波长为 1064 nm,光谱宽度约为 10 nm,重复频率为 80 MHz,脉冲宽度为 650 ps。保偏光纤放大器最高输出平均功率为 600 W,此时输出光束的质量因子(M^2)约为 1.5,其时域特性和光谱特性如图 1 所示。实验中所用非线性晶体为福晶科技公司生产的 KTP 晶体(4 mm×4 mm×3 mm),晶体的前后端面经过抛光处理后对 1064 nm 和 532 nm 的激光高透(反射率 $R < 10\%$)。采用 II 类非临界相位匹配方式($\theta = 90^\circ, \varphi = 23.5^\circ$),此时 KTP 晶体的有效非线性系数为 3.58 pm/V。

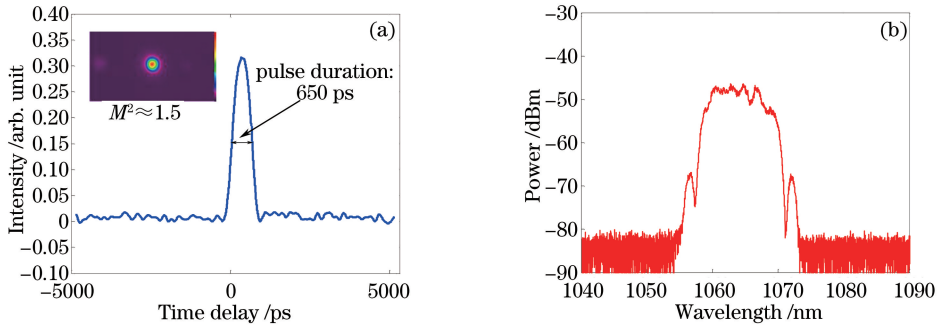


图 1 脉冲光纤激光器脉宽为 650 ps 时的(a)时域特性和(b)光谱特性

Fig. 1 (a) Temporal property and (b) spectrum property of pulsed fiber laser when pulse duration is 650 ps

超短脉冲单程抽运 KTP 晶体倍频的实验结构如图 2 所示。首先,将 KTP 晶体放置在三维调整架上,保偏光纤放大器的输出激光入射至偏振片中心,调节偏振片使其满足 KTP 晶体内部最佳的相位匹配角度。然后,用焦距为 300 mm 的透镜将透过偏振片的 1064 nm 抽运光聚焦于 KTP 晶体的前端面中心,并以此位置作为基准。由于倍频转换效率与抽运光在晶体内的作用距离有关,为了获得更高的倍频转换效率,通过调节三维调整架对聚焦光斑在 KTP 晶体中的位置再次进行微调,使最终输出 532 nm 倍频光的功率最大,认为此时聚焦光斑位于 KTP 晶体内倍频光输出功率的最佳位置。当激光正入射到透镜前表面时,利用公式 $d = 2\lambda f / \pi\omega$ 可估算出聚焦光斑大小^[10],其中 λ 为入射激光波长, f 为透镜焦距, ω 为激光入射到透镜表面的光斑半径,经过估算可得,KTP 前端面中心的聚焦光斑直径约为 0.05 mm。最后,用二色镜将剩余的 1064 nm 抽运光与 532 nm 倍频光分

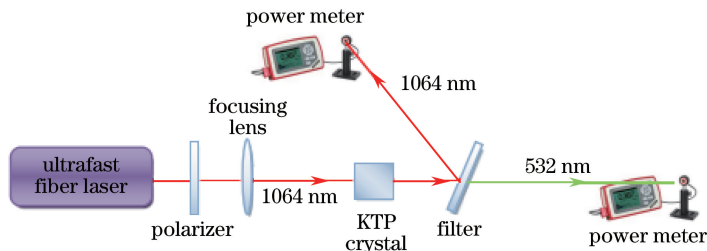


图 2 超短脉冲抽运 KTP 晶体的实验结构图

Fig. 2 Experimental setup of ultrashort pulse laser pumping KTP crystal

离,用功率计分别测量两者的输出功率,并用热像仪实时监测 KTP 晶体表面的温度变化。

3 结果与讨论

实验测试了不同抽运光功率情况下 532 nm 倍频光的输出功率,即平均功率,将其换算为单脉冲能量后得到 532 nm 倍频光输出能量随 1064 nm 抽运光能量的变化曲线,如图 3 所示。随着 1064 nm 抽运光能量的提高,经过 KTP 晶体倍频后输出 532 nm 倍频光的能量呈单调增长趋势。当抽运光的单脉冲能量达到 3.8 μJ ,输出 532 nm 的激光能量为 90.4 nJ,单程倍频的光光转换效率为 2.4%。倍频转换效率随抽运光平均功率的变化如图 4 所示,随着抽运激光平均功率的增加,KTP 晶体的倍频转换效率逐渐从 0.8% 提高到 2.4%。当抽运光平均功率小于 166 W 时,倍频转换效率曲线的斜率为 0.014,晶体温度基本保持在 26 $^{\circ}\text{C}$ 。随着抽运光平均功率从 229 W 增加到 304 W,倍频转换效率的曲线斜率逐渐减小至 0.003,并且晶体表面温度从 46 $^{\circ}\text{C}$ 剧烈上升至 71 $^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,在抽运激光平均功率过高的情况下,热效应导致 KTP 晶体温升严重,限制了 KTP 晶体倍频转换效率的进一步提高。因此,在不改变重复频率的情况下,提升单脉冲能量有助于提高 KTP 晶体的倍频转换效率,但是随着单脉冲能量的提高,热效应导致的 KTP 晶体剧烈温升会制约转换效率的进一步提升。

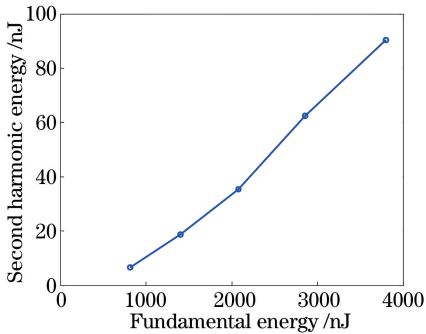


图 3 1064 nm 抽运光能量与 532 nm 激光输出能量曲线

Fig. 3 Measured output energy curve of 1064 nm pump laser and 532 nm laser

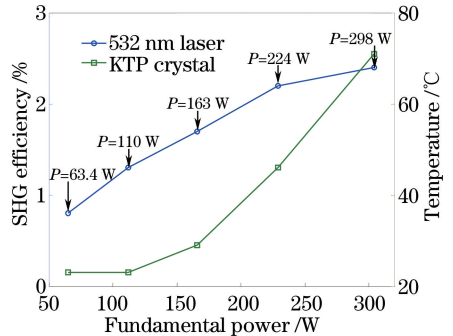


图 4 KTP 晶体温度和倍频转换效率与抽运激光平均功率的关系

Fig. 4 Variation in temperature of KTP crystal and SHG efficiency with average pump power

另一方面,从图 4 可知,抽运光平均功率较低时(小于 166 W),晶体的温升并不明显,倍频转换效率基本呈线性增长趋势,但是由于入射晶体表面的抽运光峰值功率密度较低,晶体倍频转换效率并不理想(低于 1.7%)。为了避免热效应导致的晶体倍频转换效率滞涨,在较低平均功率下,从时域和空域两个方面提高入射晶体表面抽运光峰值功率密度,可以进一步提高倍频效率。

首先,在时域上,通过压缩超短脉冲的脉宽提升脉冲峰值功率,可以在较低平均功率下实现峰值功率的大幅度提高,以此提高入射晶体表面抽运光峰值功率密度。实验中,通过光栅将 650 ps 的脉冲压缩至脉宽为 1 ps 的超短脉冲,压缩后的脉冲时域图如图 5 所示^[7]。对脉冲进行时域上的压缩,根据傅里叶变换可知脉冲在频域上会得到相应展宽,但由于抽运光在一定波长范围内对 KTP 晶体都具有倍频增益,因此抽运光基于时域压缩后的光谱展宽对 532 nm 激光的倍频增益影响较小,对倍频转换效率的影响也较小。

用压缩后的超短脉冲激光抽运 KTP 晶体,当抽运光平均功率为 39.5 W 时,输出能量为 493.8 nJ,是压缩之前单脉冲能量的一半,但峰值功率为压缩之前的 396 倍,此时输出 532 nm 倍频光的能量为 41.3 nJ,倍频转换效率为 8.4%。与压缩脉宽之前的结果相比,倍频效率提升了近 10 倍(0.8%)。在观察 532 nm 输出功率的同时监测晶体表面温度,晶体表面温度无明显变化,输出激光功率稳定。因此,通过压缩抽运光脉冲宽度提升其输出峰值功率,可以在较低平均功率下,实现较高的倍频转换效率。但当抽运光平均功率进一步提升至 73.8 W 时,峰值功率密度变为 24.97 GW/cm^2 ,KTP 晶体被迅速击穿,此时晶体表面仍未出现明显温升。文献[11]中报道的普通 KTP 晶体抗激光损伤阈值约为 GW/cm^2 量级,说明此时抽运光的峰值功率密度远超出晶体的损伤阈值,过高的抽运光峰值功率密度是导致晶体出现光致损伤效应的主要原因。

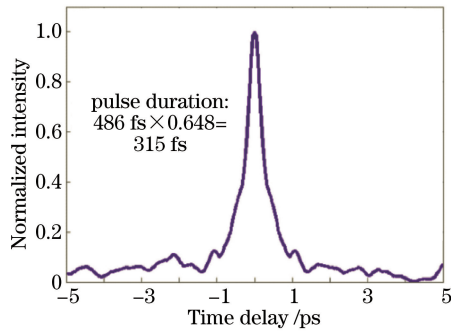


图 5 输出功率为 300 W 时压缩后脉冲的自相关迹^[7]

Fig. 5 Measured autocorrelation trace of compressed pulses at maximum output power of 300 W^[7]

其次,在空域上,通过缩小晶体表面的光斑直径,可以进一步提高晶体表面的功率密度。实验中,将 $f = 300$ mm 的聚焦透镜换成 $f = 200$ mm 的聚焦透镜,经过透镜聚焦到晶体前端面的抽运激光光斑估算直径从 0.05 mm 缩小至 0.03 mm,入射到晶体前端面中心的功率密度由 0.063 GW/cm^2 变为 0.177 GW/cm^2 。保持实验结构不变(抽运光脉宽 650 ps,重复频率 80 MHz),在抽运光平均功率为 65 W 时,输出 532 nm 倍频光能量为 31.3 nJ,相比于缩小光斑直径之前,KTP 晶体的倍频转换效率由 0.8% 增加至 3.8%。由此可见,缩小晶体表面的抽运光光斑直径,也可以在较低抽运光平均功率下,实现倍频转换效率的大幅度提升。然而,抽运光平均功率提升至 112 W 时,峰值功率密度变为 0.305 GW/cm^2 ,KTP 晶体被 1064 nm 激光击穿。结合之前的实验数据可推断,实验中所用 KTP 晶体的激光损伤阈值约为 0.2 GW/cm^2 ,与文献[11]中报道的 KTP 晶体性能基本接近,因此实验中晶体产生光致损伤的主要原因是抽运光功率密度超出晶体的激光损伤阈值范围。

4 结 论

脉冲光纤激光器以其高平均功率、高峰值功率和高光束质量等特点成为当前实现晶体非线性频率变换的优秀抽运源。采用高功率 1064 nm 超短脉冲光纤激光器抽运 KTP 晶体成功实现了单程倍频。实验结果表明,在重复频率不变的情况下,提高单脉冲能量可以提高 KTP 晶体的倍频转换效率,但是随着单脉冲能量的增大,热效应导致的 KTP 晶体温升会制约转换效率的进一步提升。通过压缩脉冲宽度和缩小晶体表面入射抽运光光斑直径,可以进一步提高 KTP 晶体倍频转换效率,但过高的峰值功率密度容易导致 KTP 晶体出现光致损伤(击穿),这些因素都限制了 KTP 晶体在实验中倍频转换效率的进一步提升。综上所述,为获得 KTP 晶体的高倍频转换效率,实现高功率和高光束质量的 532 nm 激光输出,需要同时优化脉冲光纤激光器的抽运激光单脉冲能量、脉冲宽度和输出光斑大小等参数。KTP 晶体自身的热效应、灰迹效应以及激光损伤阈值也是突破现有倍频转换效率水平的关键所在。合理控制晶体温度,改善 KTP 晶体在高功率激光抽运条件下的性能在今后探索倍频转换效率的极限中具有重要作用和实际研究价值。

参 考 文 献

- 1 di Teodoro F, Brooks C D. 1.1 MW peak-power, 7 W average-power, high-spectral-brightness, diffraction-limited pulses from a photonic crystal fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2005, 30(20): 2694-2696.
- 2 Teh P S, Lewis R J, Alam S, et al. 200 W diffraction limited, single-polarization, all-fiber picosecond MOPA[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25883-25889.
- 3 Shi W, Fang Q, Fan J. 700 kW peak power monolithic nanosecond pulsed fiber laser [C]. CLEO: Science and Innovations, 2014: STu2N.2.
- 4 Heidt A M, Li Z, Sahu J, et al. 100 kW peak power picosecond thulium-doped fiber amplifier system seeded by a gain-switched diode laser at 2 μm [J]. Optics Letters, 2013, 38(10): 1615-1617.
- 5 Apurv C N, Aadhi A, Singh R P, et al. Type-I frequency-doubling characteristics of high-power, ultrafast fiber laser in thick BIBO crystal[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5419-5422.

- 6 Gan Y, Gu X, Koo J Y C, *et al.* Second harmonic generation using an all-fiber Q-switched Yb-doped fiber laser and MgO:c-PPLN[J]. *Advances in Optoelectronics*, 2008, 2008: 956908.
- 7 Yu Hailong, Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, *et al.* 300 W linearly polarized femtosecond all-fiber chirped pulse amplification system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(5): 050101.
于海龙, 王小林, 张汉伟, 等. 300 W 线偏振飞秒全光纤啁啾脉冲放大系统[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(5): 050101.
- 8 Zhang Yandong. Study of the growth and properties of the KTP crystal[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
张彦栋. KTP 晶体的生长与性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- 9 Hu Jing. Research on growth of high quality KTP crystal and its properties[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
胡 静. 高品质非线性光学晶体 KTP 的生长及性能研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- 10 Chen Jiabi. Laser principles and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
陈家璧. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- 11 Huang Haitao. Study on the single and mixed nonlinear frequency conversions based on the gray-tracking resistance KTP [D]. Jinan: Shandong University, 2011.
黄海涛. 基于抗灰迹 KTP 晶体的单一及复合非线性频率转换研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.