

一种飞秒中红外激光脉冲的产生方法

高家利, 盘红霞, 汪 科

(重庆理工大学工程训练与经管实验中心, 重庆 400054)

摘 要: 由于能极型固体增益介质的缺乏, 利用增益介质的能阶特性直接产生中红外激光相对困难。设计了基于非线性频率变换的光参量放大法来产生中红外激光脉冲。利用发展成熟的高峰值功率近红外激光, 产生精准同步的泵浦光和信号光。利用 KTP 晶体的非线性效应进行光参量放大, 得到中红外波段的激光脉冲。实验结果表明: 产生的中红外闲频光中心波长为 3200 nm, 脉冲能量 14.9 μJ , 脉冲宽度 47 fs。

关键词: 中红外激光; 光参量放大; KTP 晶体; 泵浦光; 闲频光

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.006

Generation method of femtosecond mid-infrared laser pulse

GAO Jia-li, PAN Hong-xia, WANG Ke

(The Engineering Training and Economical Management Experiment Center, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Due to the lack of solid gain medium, it is relatively difficult to produce mid-infrared laser directly by using the energy level of the gain medium. To solve this problem, the optical parametric amplification method based on nonlinear frequency conversion was designed to produce mid-infrared laser pulse. The accurately synchronous signal and pump light are produced by using developed high peak power near infrared laser. Optical parametric amplification was carried out by using the nonlinear effect of KTP crystal, and the laser pulse in mid-infrared wave band was obtained. The experiment results show that the center wavelength of the generated mid-infrared idler light is 3200 nm; the pulse energy is 14.9 μJ ; the pulse width is 47 fs.

Key words: mid-infrared laser; optical parametric amplification; KTP; pump light; idler light

1 引 言

典型的中红外激光通常是指波长在 3 ~ 5 μm 的电磁辐射波, 这一波段刚好位于许多原子及分子基础化学键的吸收波段, 并且该波段是地球大气层中一个非常重要的高透过率“窗口”, 在大气层的烟雾和尘霾中具有较强的穿透力且衰减较小^[1-7]。因此, 超短脉宽的中红外激光脉冲在分子物理学和化学、远程通信、光谱分析、大气监测、激光医学和军事技术等方向有着非常重要的应用。特别是在当代军

事对抗领域, 由于红外预警系统和红外激光制导导弹所用的探测器均对中红外波段敏感, 具有瞬间高峰值功率的中红外激光可以使这些探测器的工作陷入瘫痪。

然而由于增益介质的严重缺乏, 中红外激光很难像可见光和近红外光那样利用增益介质的能阶特性来产生。目前常用的方法是利用非线性晶体的二阶非线性效应, 将高功率的近红外激光经非线性频率变换来产生中红外激光。主要方法包括光参

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (No. KJ1500930) 资助。

作者简介: 高家利 (1981 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光电子技术研究。E-mail: gjl@cqut.edu.cn

收稿日期: 2016-09-25; **修订日期:** 2016-10-27

量振荡(Optical Parametric Oscillation, OPO)、非线性差频(Difference Frequency Generation, DFG)和光参量放大(Optical Parametric Amplification, OPA)等^[8-10]。但光参量振荡法产生的脉冲能量小,振荡腔需要精准匹配。非线性差频法的转换效率较低,产生的最高脉冲能量也相对较小^[11-13]。随着近红外波段高峰值功率激光器的发展成熟和新型非线性晶体的不断涌现,利用高强度近红外激光作为泵浦光的光参量放大法成为近来国内外的研究热点。

2 光参量放大实验原理

光参量放大是利用非线性晶体的二阶非线性效应,三种频率的激光在非线性晶体内相互作用的过程^[14-16]。其原理如图 1 所示,频率为 ω_p 的高强度泵浦光和频率为 ω_s 低强度的信号光同时入射到非线性晶体内发生频率变换,这一过程中低功率信号光得到放大,同时产生频率为 ω_i 的中红外闲频光,混频过程中三束光的频率满足能量守恒定律,即:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i$$

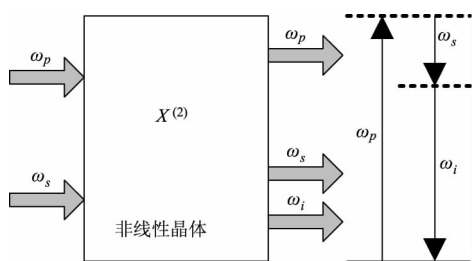


图 1 光参量放大物理过程

Fig. 1 The physical process of OPA

在光参量放大的过程中为了提高非线性频率的转换效率,三种光的载波包络相位(carrier-envelope phase, CEP)必须保持一致。然而非线性晶体存在色散特性,导致光线在晶体中传播的包络速度(群速度)与载波速度(相速度)不同,包络和载波在时间上会逐渐错开,特别是泵浦光与信号光的 CEP 不能保持一致,将极大影响闲频光的产生效率。

实验过程中,高强度的泵浦光是用近红外激光器来产生的,然而大功率近红外激光器的内部共振腔在产生激光时并不是完全静止的,许多光学元件会存在小幅的震动,这使得激光器发出的每一个脉冲的 CEP 都不一样,虽然长度非常微小,但对相位的影响是比较大的。因此,为了使泵浦光与信号光的 CEP 一致,实验选择利用泵浦光来产生信号光,这样泵浦光和信号光来自于同一个光源,它们的 CEP 将会保持同步。

3 光参量放大系统及实验设置

3.1 实验系统结构

实验采用 KMLabs 公司钛蓝宝石激光器产生的超短脉冲产生泵浦光,中心波长为 800 nm,波长范围 750 ~ 840 nm,最小脉宽 25 fs,最大单脉冲能量 3 mJ,重复频率 1 kHz。从泵浦光中分出一束聚焦在蓝宝石片 SP 上产生超连续谱,使其波长拓宽到 1064 nm 作为信号光来使用。波长为 800 nm 的泵浦光和 1064 nm 的信号光同时入射非线性晶体上,产生中心波长为 3200 nm 的中红外闲频光,搭建的实验光路图如图 2 所示。

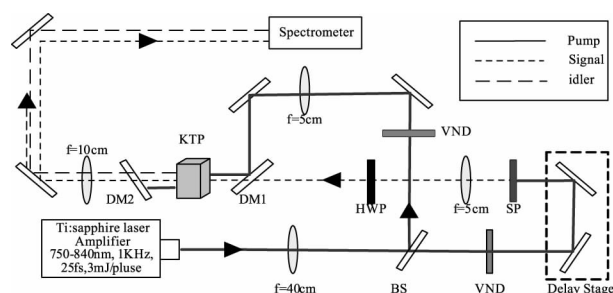


图 2 实验光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental light path

由于激光器的最大功率远大于非线性晶体的破坏阈值,为了不损坏晶体,入射光路上需加入分束镜 BS (R80/T20),反射的部分经可调式功率衰减片 VND 衰减作为泵浦光使用。透射的部分经衰减后,入射到 4 mm 厚的蓝宝石片上来产生信号光,调整 SP 位置可以改变信号光的强度。在信号光的光路中加入延迟单元用来调整其光程,使得信号光与泵浦光能同时入射到晶体中产生闲频光。由于实验采用的是二类相位匹配,在信号光的光路中还需放置半波片 HWP,使信号光的偏振方向与泵浦光的偏振方向垂直,从而达到最大转换效率。泵浦光和信号光经二向色镜 DM1 导入到晶体 KTP 中进行光参量放大,最终输出的闲频光和信号光送入光谱仪进行测量分析。

3.2 非线性晶体的选择与分析

OPA 所用非线性晶体的选择,主要考虑因素包括:晶体的损坏阈值、有效非线性系数、穿透率和性价比。由于实验采用高峰值功率的超短脉冲做泵浦光,并希望得到 3200 nm 的中红外光,结合价格因素,最终选择的晶体为磷酸钛氧钾(Potassium Titanium Oxide Phosphate, KTP)。KTP 具有较大的损坏阈值(200 ~ 400 GW/cm²),0.35 ~ 4.5 μm 波段有良好的穿透率,较高的非线性系数(约 5.22 pm/V),良好的机械加工性能以及高的导热率。

选定晶体后,更重要的是要确定晶体的切割角度与厚度。因为切角决定了晶体的折射率,进而影响波矢量失配量 Δk ,而光参量的放大增益与 Δk 有关($\Delta k = 0$ 时即为相位匹配,增益最大)。本实验采用共线的相位匹配方式,也就是泵浦光、信号光和闲频光是相互平行的,三束光的中心波长是已知的,由此可以得到增益与切角的关系如图 3 所示。从图中可知,当切角为 42° 附近时增益最大。

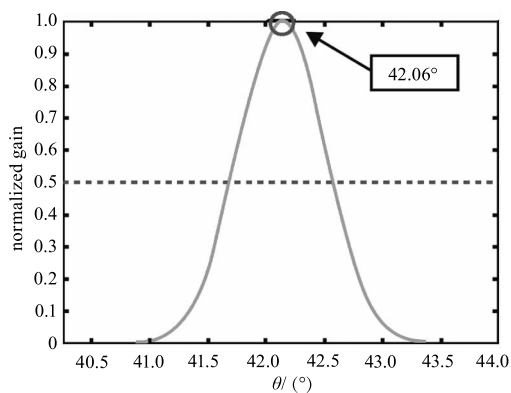


图3 增益与切角关系图

Fig. 3 The relationship of gain and tangent angle

通常晶体的厚度越厚,光子的转换效率就越高,但晶体太厚会使相位匹配带宽变窄,从而使产生的中红外脉冲的脉宽变宽。实验希望得到的闲频光最小脉宽能小于 50 fs,对晶体的厚度进行模拟分析和计算。结果显示当晶体切角为 42° ,厚度为 2 mm 时,能够得到最小脉宽为 50 fs、中心波长为 3200 nm 的中红外光。

3.3 实验结果与分析

泵浦光的脉冲宽度设定为 25 fs,能量 2.6 mJ/脉冲,中心波长 800 nm,重复频率 1 kHz。从泵浦光中透射出一部分光(能量 12 μJ /脉冲),用来产生信号光。经 OPA 放大后的信号光与闲频光的光谱图如图 4 所示。经测量,输出的参量光大小为 59.7 μJ ,其中信号光能量约 44.8 μJ ,中红外闲频光能量约 14.9 μJ 。产生的中红外脉冲中心波长 3200 nm,脉宽可以达到 47 fs。利用光参量放大方式,实验成功获得飞秒级的中红外激光脉冲。虽然系统能量转换效率较低,主要原因是实验选用了价格相对价廉的 KTP 晶体所致。此外,影响实验结果的因素还有:泵浦光的强度、KTP 晶体内的相位匹配、泵浦光与信号光的时空重合度等。实验所获得的激光脉冲

可进行二次或三次 OPA 放大,获取脉宽更短、能量更大的中红外激光脉冲。

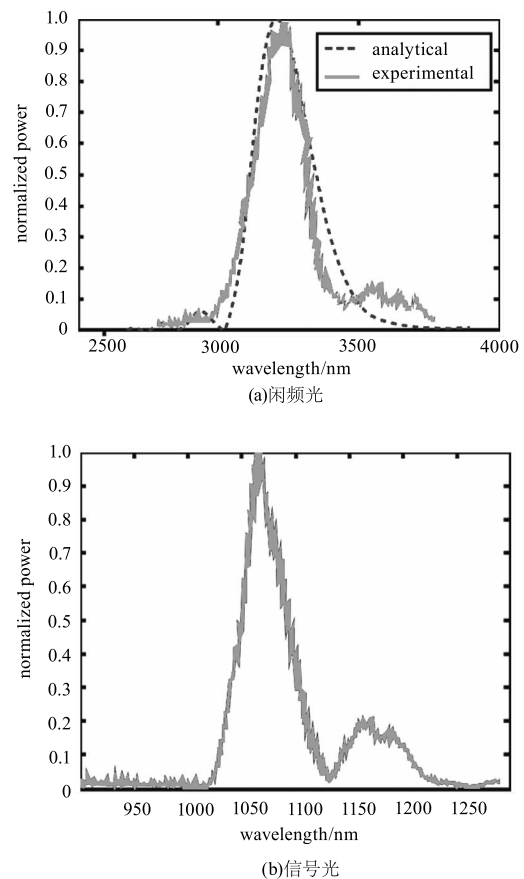


图4 OPA 放大后的光谱图

Fig. 4 The spectrum after OPA

4 结论

实验采用同一泵浦源来产生泵浦光与信号光,利于二者的精准同步,以达到最优的转换效率。实验设计的光路调整方便,无需严苛的对光。整个系统结构简单、紧凑,为实现中红外激光器的小型全固化设计提供了思路。实验产生的中红外激光可用于多光子激发显微、半导体光谱研究和光纤通信等多个方面。未来随着非线性晶体和高功率超短脉冲激光器的发展,利用光参量放大法结合光栅压缩技术将能够产生更加稳定的高功率超短中红外激光。

参考文献:

- [1] GUO Yue, CHANG Jianhua, GUI Shixin, et al. Progress of continuous-wave mid-infrared laser source based on difference frequency generation [J]. Laser Journal, 2015, 36 (12): 8-13. (in Chinese)

郭跃,常建华,桂诗信,等. 连续波中红外差频产生激

- 光光源研究进展[J]. 激光杂志, 2015, 36(12): 8-13.
- [2] H Ishizuki, T Taira. High-gain mid-infrared optical-parametric generation pumped by microchip laser[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1046-1052.
- [3] Iwakuni K, Okubo S, Tadanaga O, et al. Generation of a frequency comb spanning more than 3.6 octaves from ultraviolet to mid infrared [J]. Optics Letters, 2016, 41(17): 3980-3983.
- [4] Keisuke K, Nobuhisa I, Kengo T, et al. Generation of carrier-envelope phase-stable mid-infrared pulses via dual-wavelength optical parametric amplification [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8660-8665.
- [5] Yun Chen, Yanyan Li, Wenkai Li, et al. Generation of high beam quality, high-energy and broadband tunable mid-infrared pulse from a KTA optical parametric amplifier [J]. Optics Communications, 2016, 365: 7-13.
- [6] Y Baravets, P Honzatko, F Todorov, et al. Narrowband widely tunable CW mid-infrared generator based on difference frequency generation in periodically poled KTP and KTA crystals [J]. Optical & Quantum Electronics, 2016, 48(5): 1-6.
- [7] X Wei, Y Peng, W Wang, et al. High-efficiency mid-infrared laser from synchronous optical parametric oscillation and amplification based on a single MgO PPLN crystal [J]. Applied physics B, 2011, 104(3): 597-601.
- [8] Peng Y, Wei X, Luo X, et al. High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN [J]. Optics Letters. 2016, 41(1): 49-51.
- [9] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E, et al. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP2 [J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14263-14273.
- [10] AA Lanin, AM Zheltikov. Octave phase matching for optical parametric amplification of single-cycle pulses in the mid-infrared range [J]. Jetp Letters, 2016, 103(3): 167-170.
- [11] T Steinle, A Steinmann, R Hegenbarth, et al. Watt-level optical parametric amplifier at 42 MHz tunable from 1.35 to 4.5 μm coherently seeded with solitons [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9567-9573.
- [12] M Gebhardt, C Gaida, P Kadwani, et al. High peak-power mid-infrared ZnGeP optical parametric oscillator pumped by a Tm: fiber master oscillator power amplifier system [J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1212-1215.
- [13] ZHAO Kun. The generation of high peak-power tunable mid-infrared laser [D]. Shanghai: Fudan University, 2013. (in Chinese)
赵坤. 高峰值功率可调谐中红外激光的产生研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [14] Y H Liu, X J Lv, Z D Xie, et al. Amplification assisted optical parametric oscillator in the mid-infrared region [J]. Applied Physics B, 2012, 106(2): 267-270.
- [15] Tunable mid-infrared optical parametric oscillator with intracavity parametric amplification based on a dual-grating PPLN crystal [J]. Applied Physics B, 2012, 109: 567-571.
- [16] Shi Yong Feng, Zhang Wei Quan, Yang Fan, et al. Broadband non-collinear double QPM optical parametric amplification in mid-infrared wave [J]. Optics Communications, 2010, 283: 1138-1143.