

doi:10.3788/gzxb20144309.0914004

# 偏频技术锁定压缩光产生中的光学参量振荡腔

曲文艳<sup>1,2</sup>, 宋家争<sup>1</sup>, 冯飞<sup>1</sup>, 薛玉郎<sup>1</sup>, 张同意<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:** 为了解决机械振动、空气流动等外界因素引起的光学参量振荡腔的不稳定问题, 利用偏频锁定技术稳定光学参量振荡腔. 首先从理论上分析偏频锁定点的选取与压缩度的关系, 得出透射峰值一半的位置为最佳锁定点. 然后在实验上实现了光学参量振荡腔的锁定, 并对锁定后的光学参量振荡腔进行了稳定性测量. 实验结果表明, 光学参量振荡腔的腔长在 2 h 以内的锁定精度为 7.27 nm, 最长稳定时间可达 3.8 h, 能够满足对压缩光的探测需要.

**关键词:** 压缩态光场; 偏频锁定技术; 光学参量振荡腔; 积分器; 误差信号

中图分类号: O437.4; O431.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0914004-6

## Stabilizing the Optical Parametric Oscillator Cavity by Fringe-locking Technique in Preparation of Squeezed State of Light

QU Wen-yan<sup>1,2</sup>, SONG Jia-zheng<sup>1</sup>, FENG Fei<sup>1</sup>, XUE Yu-lang<sup>1</sup>, ZHANG Tong-yi<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China)

**Abstract:** A fringe-locking technique was employed to stabilize the optical parametric oscillator cavity, which would be affected by external environmental disturbance, such as vibration and airflow. First, how the locking point influence the squeezing degree was analyzed theoretically, the results show that position at half of the transmission peak could be the best locking point. Then the fringe-locking technique was applied to achieve the resonance between the optical parametric oscillator cavity and the injected infrared light experimentally. The experimental results show that the length variance of the cavity in continuous operation over 2 h is 7.27 nm and the longest locking time is 3.8 h, which is sufficient for the detection of the squeezed states of light.

**Key words:** Squeezed State of Light; Fringe-locking; Optical parametric oscillator; P-I controller; Error signal

**OCIS Codes:** 140.3425; 230.4910; 040.5570

## 0 引言

压缩态光场是量子光学领域中一种重要的非经典光场, 它可以广泛地应用于量子光学的诸多研究领域, 如: 量子雷达<sup>[1]</sup>、量子传输<sup>[2]</sup>、纠缠态光场的产生<sup>[3-4]</sup>、量子通信<sup>[5-6]</sup>. 实验上可以通过多种方法制备压缩态光场, 其中通过光学参量振荡腔 (Optical Parametric

Oscillator, OPO) 的参量过程制备压缩态光场是最有效的方法之一<sup>[7-8]</sup>. 然而, 在压缩态光场的制备实验中, 空气的流动和实验台震动等外界干扰引起的实验装置不稳定会导致产生的压缩光源压缩度不高、稳定性不好、难探测等问题, 因此维持整个 OPO 腔的机械稳定性和抗干扰能力对后期制备高质量稳定压缩态光场尤为重要.

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61176084, 11174282, 11204367) 资助

第一作者: 曲文艳 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为压缩光制备实验中的锁定技术. Email: quwenyan@opt.cn

导师 (通讯作者): 张同意 (1968-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为量子光学测量与量子信息技术. Email: tyzhang@opt.ac.cn

收稿日期: 2014-01-14; 录用日期: 2014-04-04

<http://www.photon.ac.cn>

在稳定压缩态光场的制备实验中,使用最多的是 Pound-Drever-Hall(PDH) 锁定技术和抖动锁定技术<sup>[9]</sup>. PDH 技术最初是由 Drever 和 Hall 等人提出,他们受 Pound 微波稳频系统<sup>[10]</sup>的启发,提出利用 F-P 标准具的反射光进行激光稳频,被称为 PDH 稳频法<sup>[11]</sup>. 在用 PDH 技术稳定 OPO 腔长的实验中,激光器输出的激光经相位调制后入射到 OPO 腔上,反射光被探测器接收后,与调制信号一起输入混频器进行同频解调,得到具有鉴频特性的误差信号,最后,通过伺服系统将 OPO 透射峰值对应的频率锁定在激光频率上,实现锁腔. 虽然利用 PDH 技术锁定后的谐振腔稳定度高,但是该方法需要多种元器件,且锁定过程复杂. 抖动锁定技术是从锁相放大器信号源输出一个调制信号加载到 OPO 后腔镜的压电陶瓷(PZT)上,通过抖动腔长调制光场,透射信号光经探测器接收送入锁相放大器的输入端口,在锁相放大器内部与调制信号实现同频解调及滤波,误差信号经锁相放大器输出端口输出,然后经过伺服系统将 OPO 透射峰值对应的频率锁定在激光频率上. 抖动锁定技术的突出优点是使用一个锁相放大器可以实现调制、同频解调及滤波,但是这种方法产生的误差信号非常微弱,不易提取. 另外,PDH 技术及抖动锁定技术都是通过调制信号光得到误差信号,当调制信号的频率小于腔的线宽时,产生的压缩光携带调制信息,不利于后期压缩态光场的应用<sup>[12]</sup>.

偏频锁定技术源于两台激光器输出频率的相对稳频,它将一台激光器的频率通过鉴频系统和频率调节系统以一定的偏置频率差锁定到另一台激光器的频率上<sup>[13]</sup>. 1982 年, J. Helmcke 等人提出利用偏频锁定技术将激光器频率锁定在高精度 F-P 腔的透射曲线斜坡上实现稳频<sup>[14]</sup>. 本文通过偏频技术锁定 OPO 腔,其基本原理是利用谐振腔的透射光强偏差稳定腔长,该方案相对简单易行,避免了常规锁频技术中对信号直接进行频率调制引入的额外噪声,也无需使用昂贵的锁相放大器进行同步相敏检波,同时,谐振腔的透射光场未携带调制信息,有利于无调制信息压缩态光场的应用. 整个锁定系统调节好后, OPO 腔腔长在 2 h 以内的锁定精度为 7.27 nm,最长稳定时间可达 3.8 h.

## 1 理论分析

### 1.1 光学参量振荡腔

实验中用到的简并光学参量振荡腔如图 1 所示,  $a_{in}$  代表入射泵浦场,  $b_{in}$  代表入射信号场,周期性极化 KTP 晶体置于两腔镜组成的谐振腔之间,泵浦光和信号光从输入镜  $M_1$  注入谐振腔,泵浦光双次穿过晶体,从输入镜输出;信号光在腔内共振,从输出镜  $M_2$  输出. 这样两腔镜和晶体就形成了信号光共振、泵浦光双次穿过晶体的简并光学参量振荡腔,通过参量下转换

过程产生压缩态光场.

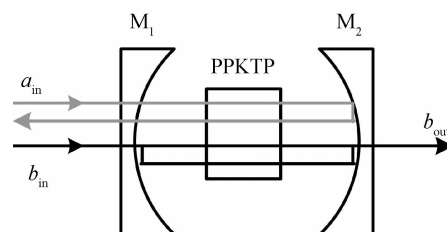


图 1 简并光参量振荡腔

Fig. 1 Degenerate optical parametric oscillation cavity

当泵浦光功率在 OPO 腔的阈值以下,控制泵浦光和信号光的相对相位为零,使其处于参量缩小状态时,得到正交振幅压缩光,此时的正交振幅噪声<sup>[8]</sup>为

$$V^+(\Omega) = 1 - \eta_{esc} \eta_{det} \eta_{hom} \frac{4 \sqrt{P/P_{th}}}{(\Omega/\gamma)^2 + (1 + \sqrt{P/P_{th}})^2} \quad (1)$$

正交相位噪声为

$$V^-(\Omega) = 1 + \eta_{esc} \eta_{det} \eta_{hom} \frac{4 \sqrt{P/P_{th}}}{(\Omega/\gamma)^2 + (1 - \sqrt{P/P_{th}})^2} \quad (2)$$

式中,  $\eta_{esc} = T/(T+L)$ , 表示 OPO 腔的逃逸效率;  $\eta_{det}$  表示探测器的探测效率;  $\eta_{hom}$  表示平衡零拍探测的匹配效率;  $\Omega$  是测量频率;  $\gamma = c(T+L)/(2d)$ , 代表 OPO 腔总的延迟系数;  $T$  是输出镜的透射率;  $L$  表示 OPO 内腔损耗;  $P_{th}$  是泵浦光的阈值,  $P$  是入射泵浦光的功率.

信号场正交分量噪声随内腔损耗的变化如图 2 所示,实线代表信号场的正交振幅噪声,虚线代表正交相位噪声. 由图可见,内腔损耗越小,正交振幅压缩度越高. 当损耗较小时,压缩度随损耗的增大明显减小;当损耗达到 0.06 时,压缩度随损耗的变化趋于平缓.

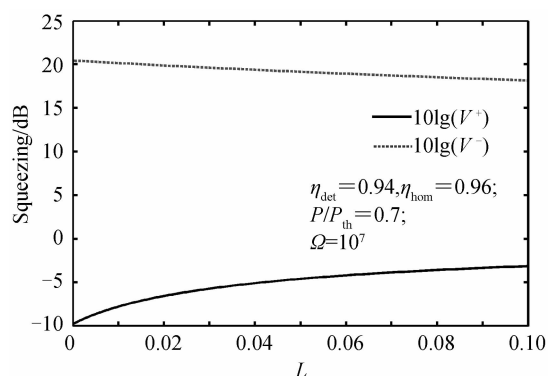


图 2 正交分量噪声随损耗的变化曲线

Fig. 2 The quadrature noise varying with losses of the OPO cavity

在压缩态光场的制备实验中,温度变化和实验台震动等外界干扰引起的 OPO 腔长不稳定会导致内腔损耗增加,使制备的压缩态光场压缩度大大降低,甚至泯灭压缩度. 因此,为了减小内腔损耗对压缩度的影响,需要采用偏频锁定技术稳定 OPO 腔.

### 1.2 偏频锁定技术的原理

根据谐振腔的共振理论,当入射光频率与谐振腔

腔长满足条件

$$\nu = q \frac{c}{2d} \quad (3)$$

式中,  $q$  为正整数,  $d$  为 OPO 腔腔长, 入射光会在腔内形成共振, 此时 OPO 腔输出光会有最大透过率. 当扫描 OPO 腔腔长时, 其透射光功率为<sup>[15]</sup>

$$P_t = \frac{P_0}{1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (4)$$

式中,  $P_0$  是入射光功率,  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2d$  为相位因子,  $F =$

$\frac{4 \cdot \sqrt{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}$  表示 OPO 腔的精细度,  $R_1$ 、 $R_2$  分别表示

OPO 腔输入镜和输出镜的反射率.

图 3 是 OPO 腔的透射功率谱. 为了将 OPO 腔的输出稳定在较大透射率上, 可以采用偏频技术进行锁定. 由图可见, OPO 腔的透射光功率随腔长变化, 是腔长  $d$  的函数; 在透射峰的一个上升沿(下降沿)所对应的频率范围内, 透射光功率与腔长一一对应, 因此, 可以通过控制 OPO 透射光功率实现腔长的锁定. 图 3 表示将锁定点选在 OPO 腔透射峰值一半对应的位置,  $P_m$  是锁定点透射光功率.

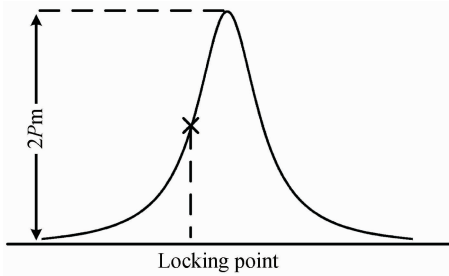


图 3 偏频锁定技术原理图

Fig. 3 The theory of the fringe-locking technique

偏频技术锁定 OPO 腔的基本原理是: 以激光频率为参考频率, 将谐振腔透射曲线斜坡上某点对应的频率锁定到激光频率上. 当选择透射峰斜率最大点为锁定点时, 偏频锁定的精度最高, 但是, 由于该斜率最大点不易标定, 实验中通常选取谐振腔透射峰值一半对应的频率锁定 OPO 腔长<sup>[16]</sup>. 当锁定点选在 OPO 腔的透射峰值一半时, 对应的误差信号如图 4. 由图 4 可见,

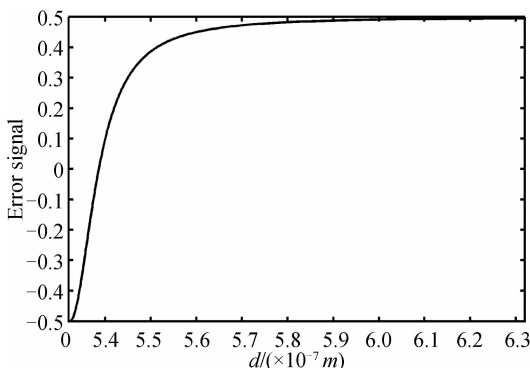


图 4 偏频锁定技术的误差信号

Fig. 4 The error signal of the fringe-locking technique  
偏频锁定技术的控制范围为透射峰一个上升沿(下降沿)所对应的频率范围, 所以 OPO 腔的带宽越宽, 偏频锁定的控制范围越大, 锁定系统越不易跳变.

利用偏频技术锁定 OPO 腔时, 需要考虑该方案对 OPO 腔透射率的影响, 即用偏频技术将 OPO 腔锁定在不同的透射功率时, 此时的 OPO 腔透射率相应的由  $T$  变为  $mT$ , 锁定点的位置由锁定因子  $m$  ( $0 < m < 1$ ) 表征, 因此式(1)、(2)可以表示为

$$V^{\pm}(\Omega) = 1 \mp \frac{m \cdot T}{m \cdot T + L} \cdot \frac{4 \cdot \eta_{\text{det}} \cdot \eta_{\text{hom}} \cdot \sqrt{P/P_{\text{th}}}}{[\Omega \cdot 2d / (m \cdot T + L)]^2 + (1 + \sqrt{P/P_{\text{th}}})^2} \quad (5)$$

图 5 是信号场正交分量噪声随锁定因子  $m$  的变化曲线. 实线代表信号场正交振幅噪声, 虚线代表正交相位噪声. 由图可见, 在偏频技术锁定 OPO 腔的过程中, 可以通过改变 OPO 腔对信号场的透射率进而改变压缩度; 锁定点功率越接近透射峰值功率, 压缩度越大, 同时, 锁腔系统越容易跳变, 稳定时间越短.

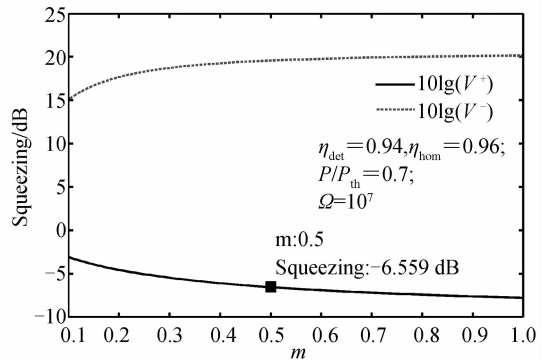


图 5 正交分量噪声随锁定因子的变化曲线

Fig. 5 The quadrature noise varying with the locking factor  
为了保证整个系统既有长时间的稳定性又有较大的压缩度, 实验中选择将 OPO 腔长锁定到透射峰值一半对应的频率附近, 当损耗  $L=0.01$  时, 理论模拟得到的压缩度约为  $-6.56$  dB.

## 2 实验

实验中用到的激光器是德国 Innolight 公司生产的二极管泵浦全固化连续双波长(内部含有倍频腔) Nd:YAG 激光器, 输出基频波长为  $1064$  nm, 功率为  $400$  mW, 倍频波长为  $532$  nm, 功率为  $800$  mW; 两束光的长期功率稳定性小于  $\pm 0.5\%$ , 频率漂移小于  $2$  MHz/min, 激光模式为  $TEM_{00}$  ( $M^2 < 1$ ), 光谱线宽小于  $1$  kHz, 相干长度大于  $1$  km.

OPO 腔的输入镜对  $1064$  nm 红外光高反, 反射率  $99.5\%$ , 对  $532$  nm 绿光透射率约为  $70\%$ ; 输出镜对  $532$  nm 高反, 对  $1064$  nm 部分透射, 透射率约为

13.5%。OPO腔的腔长为  $d=60$  mm,此光学参量谐振腔的自由光谱范围为  $FSR=c/2d=2\ 500$  MHz。探测器是 Epitaxx 公司的 ETX-500T InGaAs 光电管,它在 1 064 nm 处的量子效率为 94%,响应时间为 10 ns,暗电流小于 20 nA。

扫描光参量振荡腔,当光参量振荡腔共振时,透射谱如图 6。由图 6 知相邻两个透射峰的间隔为  $\Delta t_1=18.6$  ms,每个峰的半高宽时间间隔为  $\Delta t_2=1.8$  ms,根据腔的自由光谱范围  $FSR=2\ 500$  MHz,可以得到

$$OPO \text{ 腔的线宽为 } \Delta\delta = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} FSR = \frac{1.8}{18.6} \cdot 2500 =$$

242 MHz。

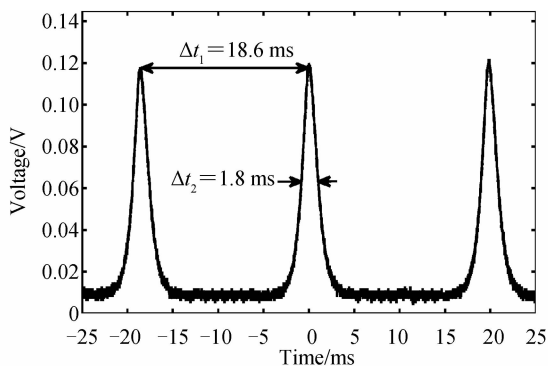


图 6 光参量振荡腔的透射峰

Fig. 6 The transmission signal of the OPO cavity

图 7 是偏频技术锁定 OPO 腔的实验过程。激光器输出基频光经分束器 (PBS) 分为两部分,一束入射到 OPO 腔,另一束激光直接入射到探测器  $D_1$  并与 OPO 腔的透射光构成差分系统,用来选取频率锁定点,同时消除激光器本身的强度起伏。当锁定点频率等于激光频率时,两探测器的输出电流相互抵消,积分器 (PI) 输出控制电压为零;当参量振荡腔的腔长改变时,两探测器的输出电流因不能相互抵消而产生电流差,此电流差通过伺服回路(由高压放大器 HV 和积分器组成)产生控制电压反馈到 OPO 腔后腔镜的压电陶瓷 (PZT) 上,将参量振荡腔的腔长稳定在锁定点。

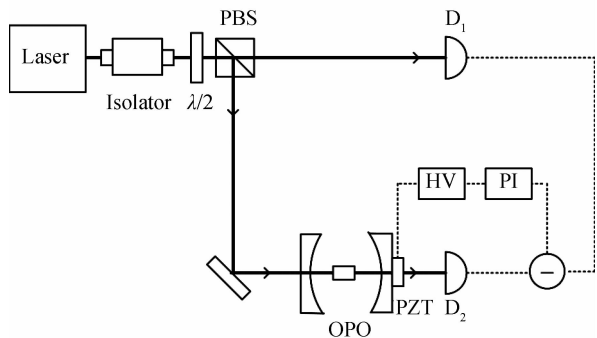


图 7 偏频锁定技术实验框图

Fig. 7 Schematic of the fringe-locking technique

图 8 是偏频技术锁定 OPO 腔实验中所用的积分

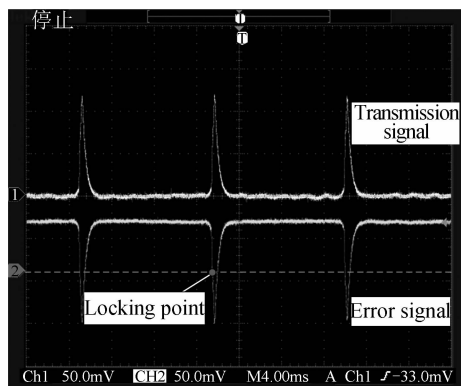
控制器。该积分器由 New Focus 公司制造,有两个输入端口 A、B,用来将探测器  $D_1$ 、 $D_2$  接收的电压信号输入到积分器 A、B 两端口,积分器内部兼有一个减法器,它可以将 A、B 两端口的输入信号作差,同时,积分器内部赋予该差值一个偏置电压  $V_C$ ,通过连续调节偏置电压  $V_C$  的大小,从而将 OPO 腔长锁定到不同的锁定点上。因此,偏频锁定技术的误差信号为:  $Error\ Signal = V_A - V_B - V_C$ 。



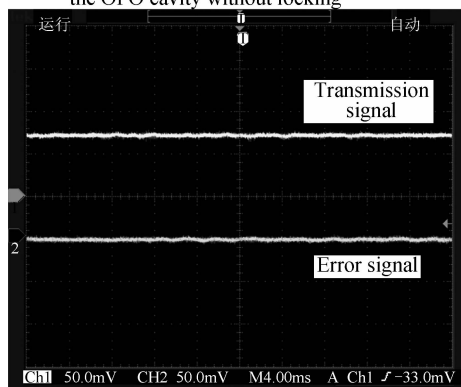
图 8 积分控制器

Fig. 8 PI servo controller

在偏频技术锁定 OPO 腔的实验中,积分器的作用是获得并优化误差信号。打开积分器前,必须对积分器进行重置,此时 Acquire Switch 位于 Lock Off 的位置;当连接好电路,打开积分器,将 Acquire Switch 移动到 LFGL 的位置,此时积分器指示灯是红色,连续调节偏置电压  $V_C$  的大小,确定锁定位置(如图 9(a)所示),然



(a) The transmission signal and error signal of the OPO cavity without locking



(b) The transmission signal and error signal with the fringe-locking technique

图 9 锁定前后 OPO 腔透射曲线和误差信号

Fig. 9 The transmission signal and error signal when the system is locking and out of locking

后通过调节 P-I Corner、Gain 和 LF Gain Limit 旋钮分别改变滤波器角频率、积分增益以及伺服环路的低频增益限制,当积分器指示灯变成绿色时,关掉扫描信号,将 Acquire Switch 移动到 Lock On 的位置;最后缓慢的调节偏置电压  $V_c$  和 Gain 旋钮,优化误差信号,优化锁定的方法是增大 Gain 的数值,直到透射强度曲线出现振荡,然后缓慢减小 Gain,当曲线趋于平缓时,得到最稳定的锁定点。

积分器内部有一个滤波器,误差信号产生后送入积分电路进行积分,产生的积分信号经滤波器去除直流偏置信号,由积分器 OUT 端口输出,最后,控制信号经过高压直流放大器后加载到 OPO 后腔镜的 PZT 上稳定腔长。

图 9(a)是锁定前扫描 OPO 腔得到的透射曲线和误差信号,锁定点的选取可以通过调节积分器的输入偏置 C 实现,如图选择透射峰值一半的位置作为锁定点;图 9(b)是锁定后的 OPO 腔透射强度和误差信号的值;锁定前 OPO 腔透射峰-峰值是 130 mVpp 左右,锁定后透射电压稳定在 70 mV 左右。

实验中,通过调节偏置电压  $V_c$  的大小,将 OPO 腔锁定到不同的频率点,并记录锁定系统在不同锁定点时的稳定时间(表 1)。

表 1 锁定系统在不同锁定点的稳定时间

Table 1 The stabilization time of the locking system with different locking point

Locking point/mV	Stabilization time/h
40	4
70	3.8
100	2
120	0.5
130	0

由表 1 可见,偏频锁定技术有较大的捕获范围,在 40~120 mV 之间都能实现较长时间的锁定,但是,为了保证整个系统既有长时间的稳定性又有较大的透射功率,实验中选择将 OPO 腔长锁定到透射峰值一半对应的频率附近,此时整个锁定系统的稳定时间能达到 3.8 h,当锁定点频率不断靠近 OPO 腔共振频率时,锁定系统的稳定时间不断变短;当选择锁定点为透射峰值对应的振荡频率点时,系统立即跳变,不能实现锁定。

OPO 腔锁定之后,对 OPO 腔的稳定性进行了测量.图 10 为室温 21.5 °C 的条件下,通过计算机监测到的 OPO 的透射情况.图 10(a)和(b)分别是 OPO 腔在 4 h 和 2 h 以内的稳定情况.由图 10 可知,本次实验中锁定系统在 3.8 h 处失锁,OPO 腔的最长稳定时间为 3.8 h,在 2 h 和 3.8 h 以内 OPO 腔透射功率的相对变化量分别为

$$\frac{0.0706 - 0.0658}{0.068} = 7.06\%,$$

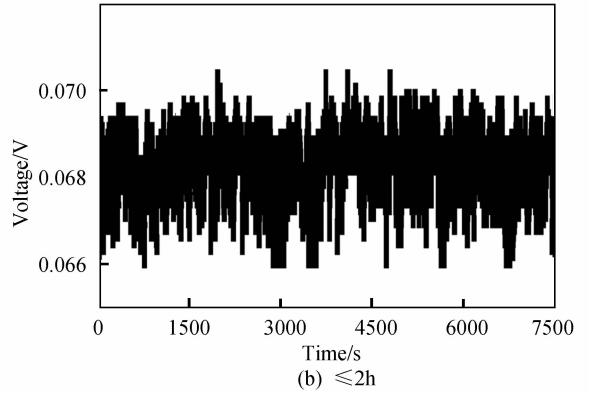
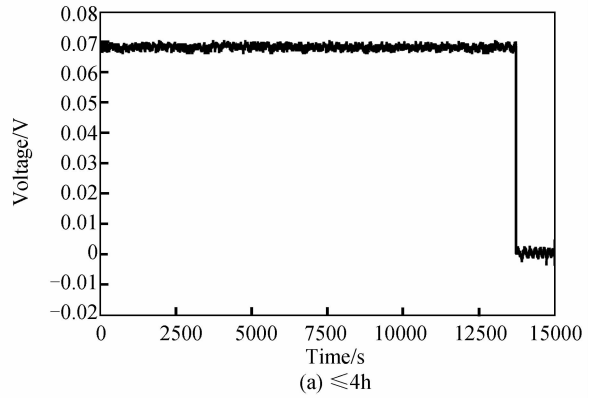


图 10 OPO 腔透射功率

Fig. 10 The transmission power of the OPO cavity

$$\frac{0.0708 - 0.0658}{0.068} = 7.35\%.$$

由于腔的透过功率下降 50% 时,频率变化为一个半高宽  $\Delta\delta$ ,因此可粗略地计算出,当腔的透过功率下降 7.35% 和 7.06% 时,频率变化分别为

$$\Delta\nu_1 = \frac{7.06\%}{50\%} \cdot 242 = 34.17 \text{ MHz},$$

$$\Delta\nu_2 = \frac{7.35\%}{50\%} \cdot 242 = 35.57 \text{ MHz}.$$

根据公式<sup>[17]</sup>  $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta d}{d}$ ,可估算出 OPO 腔腔长  $d$  的变化范围分别为

$$\Delta d_1 = \frac{\Delta\nu_1}{\nu} \cdot d = \frac{34.17 \times 10^6}{2.82 \times 10^{14}} \cdot 0.06 = 7.27 \times 10^{-9} \text{ m},$$

$$\Delta d_2 = \frac{\Delta\nu_2}{\nu} \cdot d = \frac{35.57 \times 10^6}{2.82 \times 10^{14}} \cdot 0.06 = 7.57 \times 10^{-9} \text{ m}.$$

实验结果表明,在利用偏频技术锁定光学参量振荡腔的实验中,将 OPO 腔长锁定到透射峰值一半对应的频率附近处,整个锁定系统的精度较高. OPO 腔在 2 h 和 3.8 h 以内的腔长稳定精度分别为 7.27 nm 和 7.57 nm. 因为锁定系统在 2 h 以内的锁定精度较高,而且 2 h 的稳定时间足以满足后期压缩态光场的探测需要,因此偏频锁定技术可以应用在压缩态光场的探测实验中,此时 OPO 腔的锁定精度至少可达 7.27 nm.

### 3 结论

压缩光源的稳定性问题是压缩态光场制备过程中的一个关键问题. 本文在理论上分析了锁定点与压缩度的关系, 当锁定点选在透射峰值一半, 内腔损耗取 0.01 时, 压缩度可达 -6.56 dB, 这为下一步稳定压缩态光场的制备提供了理论指导. 在偏频技术锁定 OPO 腔的实验中, OPO 腔腔长在 2 h 以内的锁定精度为 7.27 nm; 腔长最长稳定时间为 3.8 h, 锁定精度为 7.57 nm. 而 OPO 腔腔长在 2 h 以内的锁定精度较高, 且 2 h 的稳定时间足以满足后期压缩态光场的探测需要; 另外该锁定方法产生的压缩态光场未携带调制信息, 对稳定压缩态系统的探测有重要作用, 因此偏频锁定技术可以应用在压缩态光场的探测实验中.

#### 参考文献

- [1] DUTTON Z, SHAPIRO J H, GUHA S, LADAR resolution improvement using receivers enhanced with squeezed-vacuum injection and phase-sensitive amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, **27**(6): A63-A72.
- [2] BOWEN W P, TREPS N, BUCHLER B C, *et al.* Experimental investigation of continuous-variable quantum teleportation[J]. *Physical Review A*, 2003, **67**(3): 032302.
- [3] URSIN R, TIEFENBACHER F, *et al.* Entanglement-based quantum communication over 144km [J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(7): 481-486.
- [4] RAIMOND J M, BRUNE M, HAROCHE S. Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2001, **73**(3): 565-582.
- [5] NEERGAARD-NIELSEN J S, NIELSEN B M, HETTICH C, *et al.* Generation of a superposition of odd photon number states for quantum information networks[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(8): 083604.
- [6] URSIN R, TIEFENBACHER F, SCHMITT-MANDERBACH T, *et al.* Entanglement-based quantum communication over 144km[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(7): 481-486.
- [7] VAHLBRUCH H, MEHMET M, CHELKOWSKI S, *et al.* Observation of squeezed light with 10-dB quantum-noise reduction[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(3): 033602.
- [8] AOKI T, TAKAHASHI G, FURUSAWA A. Squeezing at 946nm with periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(15): 6930-6935.
- [9] LI Ying, LUO Yu, PAN Qing, *et al.* Experimental generation of bright green light in amplitude-squeezed state via extracavity frequency doubler [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5030-5035.  
李莹, 罗玉, 潘庆, 等. 用外腔谐振倍频产生明亮绿光振幅压缩态光场[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5030-5035.
- [10] POUND R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1946, **17**(11): 490-505.
- [11] DREVER R W P, HALL J L. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, **31**(2): 97-105.
- [12] ZHANG Yan, YU Xu-dong, DI Ke, *et al.* Locking the phase of balanced homodyne detection system for squeezed light [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(8): 084204.  
张岩, 于旭东, 邸克, 等. 压缩态光场平衡零拍探测的位相锁定 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(8): 084204.
- [13] WANG Qi, LU Wei, GAO Ming, *et al.* Current development of optical pulse offset frequency locking techniques [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(4): 255-257.  
王骥, 陆威, 高明, 等. 激光脉冲偏频锁定技术的发展 [J]. *激光技术*, 2002, **26**(4): 255-257.
- [14] HELMCKE J, LEE S A, HALL J L. Dye laser spectrometer for ultrahigh spectral resolution; design and performance [J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(9): 1686-1694.
- [15] 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 65-67.
- [16] SUN Xu-tao, CHEN Wei-biao. Theoretical study on laser frequency stabilization in reference to Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2219-2222.  
孙旭涛, 陈卫标. 基于法珀标准具的激光稳频方法理论研究 [J]. *光子学报*, 2008, **36**(12): 2219-2222.
- [17] LIU Min, CUI Xiao-hong, QIAN Jin. The study of the length controlling of Fabry-Perot cavity depending on stabilized laser [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(3): 361-364.  
刘敏, 崔小虹, 钱进. 利用稳频激光稳定 F-P 腔腔长的研究 [J]. *光学技术*, 2010, **36**(3): 361-364.