

相位锁定的激光器系统用于电磁诱导透明光谱实验

孟增明 张 靖

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 使用数字锁相环 ADF4107 芯片, 设计了锁频带宽为 1~7 GHz 的光学锁相环(OPLL)。通过光学探测器得到两台外腔半导体激光器的拍频信号, 经过 OPLL, 产生两种误差信号, 它们分别被加载到半导体激光器的光栅压电陶瓷和反馈电流上, 从而将拍频信号的噪声由兆赫兹降低到赫兹量级。将该系统应用到电磁诱导透明光谱实验中, 成功地观察到电磁诱导透明现象。该方法还可应用到超冷原子拉曼光谱实验中。

关键词 激光光学; 锁相环; 鉴相器; 相位噪声; 拍频; 电磁诱导透明

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0714001

Phase-Locked Laser System Used for Electromagnetically Included Transparency Spectral Experiments

Meng Zengming Zhang Jing

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract We design an optical phase locked loop (OPLL) whose bandwidth is 1~7 GHz with ADF4107. Through a fast photo-detector, we can obtain a beat signal of two external cavity diode lasers. Then, two kinds of error signal are generated while passing OPLL, which are respectively loaded into the grating piezoelectric ceramics and feedback current of semiconductor lasers to reduce the noise of the beat signal from MHz to Hz. The system is successfully used in electromagnetically induced transparency (EIT) spectral experiment. This method can be also applied to the Raman spectroscopy experiments of ultra-cold atoms.

Key words laser optics; phase locked loop; phase-frequency detector; phase noise; beat frequency; electromagnetically induced transparent

OCIS codes 020.1670; 140.2020; 140.3518; 250.4110; 270.1670

1 引 言

在 20 世纪 60 年代, 光学锁相环(OPLL)被发明和使用^[1-2], 目前使用光学锁相环锁定的激光器相位差已经可以达到 $0.1 \mu\text{rad}/\text{Hz}$ ^[3]。通过使用光学锁相环, 可以产生相位相干的激光。到目前为止, 光学锁相环已被应用在相干光学通信、精密光谱和激光稳频等领域。

近年来相位相干的激光已经应用到量子光学中^[4-5], 被作为与原子相干介质相互作用的光源。

原子相干性具有非常重要的应用, 利用激光来改变光学介质特性的方法可应用到电磁诱导透明光谱^[6]、量子光学通信^[7]和四波混频^[8]等实验中, 所以产生相位相干的激光是非常重要的^[9-10]。

两束相位相干的激光在频率相差较小的情况下, 可以直接使用声光调制器对一束单频激光频移获得两束相干的激光。但是, 当频率相差大时, 该方法便不太适用, 而锁相环可以弥补这个不足, 锁相环系统可以很好地锁定两台激光器的相对频率和相

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国家 973 计划(2011CB921601)

作者简介: 孟增明(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事超冷波色费米混合气体等方面的研究。

E-mail: zmmeng01@163.com

导师简介: 张 靖(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事超冷波色费米混合气体等方面的研究。

E-mail: jzhang74@yahoo.com(通信联系人)

位,从而得到相对相位起伏极低的两束激光^[11]。本文使用 Analog 公司生产的锁相环芯片^[12],该锁相环芯片内部使用了数字可编程控制的分频器件和内嵌式的鉴相器,这样通过编程器件就可得到所需要的频率,经过内嵌鉴相器很容易得到误差信号,由于整个锁定回路都在一个电路板上,可以避免引入额外噪声,从而使得锁相环精准化、数字化和易操作。通过高速光学探测器得到拍频信号,然后经过锁相环将两台光栅反馈半导体激光器的相对频率和相位锁定到参考信号源上,很好地抑制了相位噪声。之后,将锁相环成功应用到电磁诱导透明光谱实验中。

2 锁相环原理

锁相环电路是使一个正弦信号源与非常稳定的参考信号在相位和频率上实现同步的电路,锁相环主要由三个模块组成:鉴相器(PFD)、环路滤波器和

压控振荡器(VCO),如图 1 所示。鉴相器是用来鉴别参考信号 u_1 和正弦信号源分频后 u'_2 之间的相位差,输出信号 u_d 与二者的相位差成比例。环路滤波器主要是用来通低频、阻高频。压控振荡器就是可电压控制的正弦信号源,电压 u_f 可以控制输出频率 ω_2 ,而光学锁相环就是两台激光器的拍频信号替代压控振荡器输出的正弦信号。除 N 计数器($1/N$ counter)是将压控振荡器输出的正弦信号 u_2 转换为较低频率的正弦波 u'_2 。

在锁相环的模块中,鉴相器是一个核心部件,图 2 是 PFD 内部结构图,它是由两个 D 触发器、非门、与门、COMS 管构成。ADF4107 芯片其中就包含有鉴相器、可编程 N 计数器等。其中 D 触发器为上升沿寄存数据,在 PFD 内部 D1、D2 始终接高电平, U1、U2 相当于时钟信号,而 CLR1、CLR2 端口为 D 触发器的清零端。

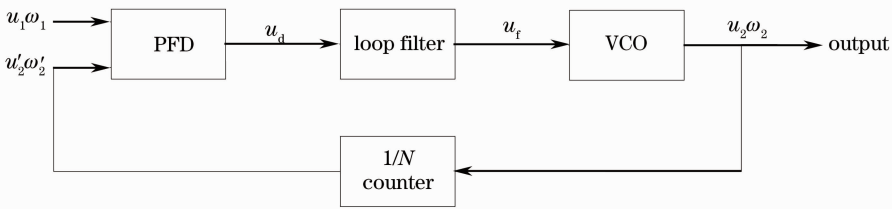


图 1 锁相环模块

Fig. 1 Phase lock loop module

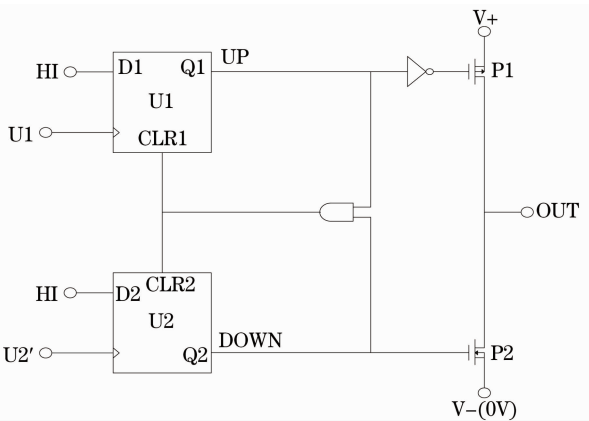


图 2 PFD 内部结构

Fig. 2 Internal structure of PFD

假设 PFD 为下面三种状态:

- UP 为 0, DOWN 为 0: state 为 0;
- UP 为 0, DOWN 为 1: state 为 -1;
- UP 为 1, DOWN 为 0: state 为 1;
- UP 为 1, DOWN 为 1;

PFD 在 $[1, 0]$ 的状态时, P1-CMOS 管导通, 输出为

$V+$; 在 $[0, 1]$ 的状态时, P2-CMOS 管导通, 输出为 $V-$; 在 $[0, 0]$ 的状态, P1 和 P2 均截止, 输出为高阻态; 由于在 Q1 和 Q2 之间接了一个“与门”, 所以第四种状态 $[1, 1]$ 是被禁止的。

所有的锁相环都是首先锁频, 然后再实现锁相。现在分两种情况讨论 PFD 的输出, 第一种是未锁定状态(U1 与 U2 的频率差很大), 第二种频率锁定(U1 与 U2 的频率差很小), 但是相位未达到锁定状态。

在下面的图中看到的均是方波, 而不是正弦波, 这是因为 D 触发器需要比较陡的上升沿, 当正弦信号进入 PFD 之前, 通过内置的积分电路等将其转换为方波信号^[13]。

第一种: 频差很大。如图 3 所示, 由于 U1 的频率与 U2 的频率相差很多, 那么 PFD 的 OUTPUT 长时间处于高电压状态 $V+$ (低电压状态 $V-$)。在实际应用中, PFD 的 OUTPUT 是与 VCO 的 INPUT 相连的, 通过长时间的电压调频, U2 的频率就很接近 U1 的频率了, 基本上达到锁频的目的。

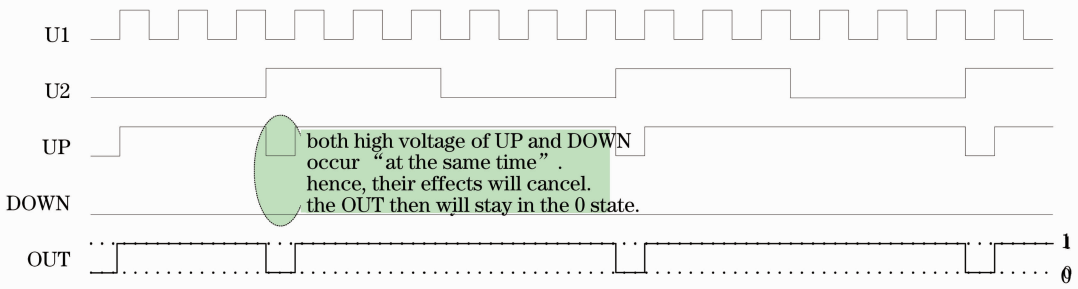


图 3 $\omega_{u1} \gg \omega_{u2}$, 鉴相器的输出

Fig. 3 $\omega_{u1} \gg \omega_{u2}$, output of PFD

第二种：频差很小，但是相位未锁定。由于 U1 的频率与 U2 的频率差基本上为 0，但是二者的相位差并不是 0，现在设 U1 和 U2 之间的相位差为 θ ，当 U1 相位超前于 U2 时，PFD 将在 0 和 1 的状态之间跳转。如果 U1 处于相位滞后的情况，那么 PFD 将在 -1 和 0 的状态之间跳转。当二者的相位差为正并且接近于 360° 时， U_{PFD} 将达到最大值；当二者的相位差为负并且接近于 -360° 时， U_{PFD} 将达到最小值，输出图 4 所示的三角锯齿图形。在实际应用中， U_{PFD} 通过对 VCO 的反馈，将会使 U2 的频率和相位接近于 U1，从而达到锁频和锁相的目的。在实验中，将使用噪声很小的信号源来作为基准频率 U1，拍频信号作为 U2，将 U_{PFD} 作为反馈信号输入到激光器中，使得两台激光器的拍频信号的频率和相位噪声降低。

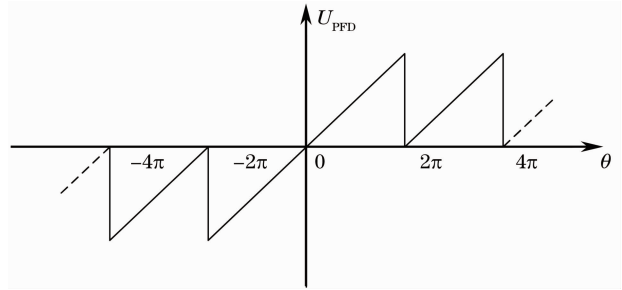


图 4 PFD 输出波形

Fig. 4 Output waveform of PFD

会使得空穴与电子复合不能稳定，从而导致受激辐射出的激光相位和频率不稳定；光栅的角度是由压电陶瓷调节的，通过调节角度，可以调节输出激光的频率，如果光栅的角度发生不必要抖动，将不可避免地导致频率发生变化。因此，半导体激光器的频率和相位将不可避免地有所起伏。

3 光学锁相环

半导体激光器是通过加载电流激励二极管产生激光，通过光栅组成谐振腔，然后输出大功率激光。但是，在这个过程中，电流会发生不必要的抖动，将

OPLL 与电子类锁相环(PLL)最大的不同就是将 PLL 中的 VCO 替换成单频激光器。整个锁相环路如图 5 所示，其中主激光器的频率为 ω_M ，从激光器的频率为 ω_S 。通过快速探测器产生两台激光器的拍频信号，然后将拍频信号($\Delta\omega$)与信号源产生的

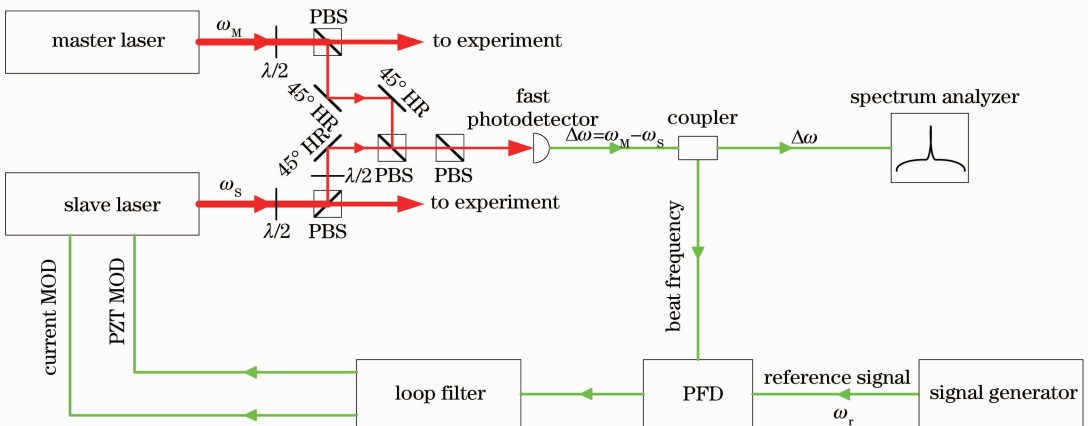


图 5 实验原理图

Fig. 5 Schematic diagram of experiment

信号(ω_r)输入光学锁相环中,这将产生两路调制信号,它们分别是对其中一台激光器进行压电陶瓷调制(PZT MOD)和电流调制(current MOD)。由于信号源产生的信号相位和频率噪声起伏都非常低,通过给激光器加载调制信号,使得拍频信号相对于信号源产生的信号具有相同的相位,这样就锁定了两台单频激光器的拍频信号的频率和相位(相对于信号源)。

由于 Rb 原子的基态频率差都在千兆赫兹以上,那么锁相环的带宽都应该满足这个要求,ADF4107 的带宽为 1~7 GHz,达到了实验要求。

实验装置如图 5 所示,主激光器(master laser)和从激光器(slave laser)均为德国 Toptica 公司生产的光栅外腔反馈式半导体激光器,分别为 TA100 和 DL100,波长为 780 nm。TA100 作为主激光器;DL100 作为从激光器,主要是因为它有两个调制输入口,分别为压电陶瓷调制和电流调制,前者的调制是加载到压电陶瓷上控制外腔反馈光栅,用来在大范围内改变输出波长,带宽约为 7 kHz,反应速度比较缓慢,能用于稳定频率,但是不能降低相位噪声;后者可直接调制激光二极管电流,它的带宽达 20 MHz,可以有效地降低相位噪声,从而达到压窄线宽的目的。在实验中,主激光器和从激光器分别

处于⁸⁵Rb 的 D₂ 线; $F=3 \rightarrow F'=3$ 和 $F=2 \rightarrow F'=3$, 它们的频差大致为 3.035732439 GHz。首先将主激光器和从激光器输出的激光通过 50/50 分束器(PBS)耦合,一束光注入多模光纤中,二者的总光强大概为 0.4 mW,将其导入一个快速探测器(NEW FOCUS 1554A)中,探测器输出二者的拍频信号,拍频信号通过直接耦合器将信号分为两部分,一部分通过放大输入 OPLL,一部分通过频谱分析仪进行观测。OPLL 通过与参考信号(reference signal)比较输出误差信号,通过滤波处理分为两路分别加载到压电陶瓷和电流调制上,压电陶瓷调制为低频调制,通常为千赫兹量级,误差信号的低频部分作为输入构成慢速反馈回路。对于电流调制通常为高频调制,通常为兆赫兹量级,误差信号的高频部分作为输入构成为快速反馈回路。实验中通常是首先加载慢速反馈,然后加载快速反馈。

4 实验结果

当比较两台激光器自由运转和只加载慢速反馈情况时,拍频信号的频宽并没有发生约为兆赫兹量级的变化,只是锁定后拍频信号中心频率固定不动,如图 6(a)所示,这是因为慢速反馈只是简单地把二

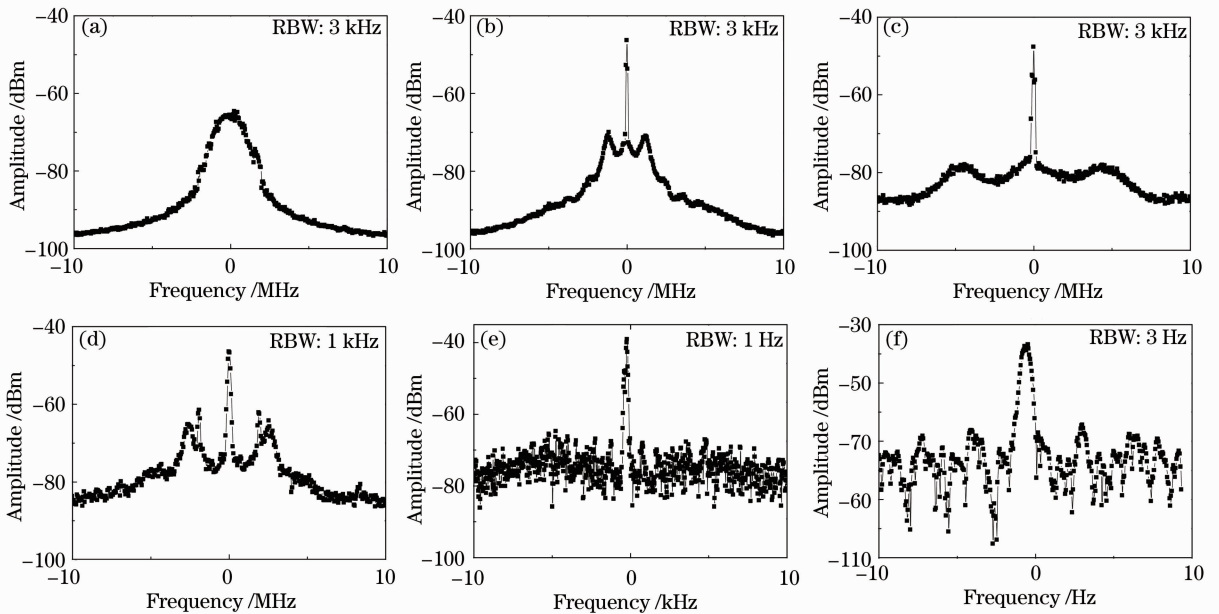


图 6 中心频率为 3.035 GHz 的拍频功率谱。(a)锁定频率;(b)~(e)锁定相位

Fig. 6 Power spectra of the beat signal with center frequency of 3.035 GHz. (a) Frequency locked; (b)~(e) phase locked

者的差频锁定,相位噪声并没有得到抑制。同时加载慢速反馈和快速反馈时[如图 6(b)~(f)],调节频谱分析仪的分辨率带宽(RBW),可以看到两台激光器的相位噪声得到很好地抑制和降低,激光器的线宽被压窄到赫兹量级。

5 PLL 在 EIT 中的应用

使用 ADF4107 设计的锁相环可以很好地锁定两台激光的差频,这一点可以很好地应用到电磁诱导透明光谱等(EIT)实验中去。

EIT 是由量子干涉导致的,图 7 是典型地用于产生 EIT 效应的 Λ 型三能级系统,频率为 ω_p 的探测光作用于能级 $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$,频率为 ω_c 的耦合光作用于能级 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$,其中能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 为基态的两个能级, $|3\rangle$ 是激发态能级。当探测光和耦合光的频率与基态二能级跃迁频率失谐为零时,探测光可以无吸收地通过介质,即介质对探测光是透明的,这就是 EIT 现象。实验中,选用⁸⁵Rb 的超精细结构 D₂ 线:

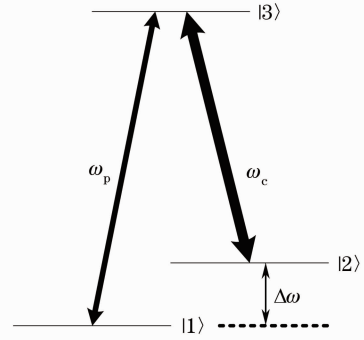


图 7 Λ 型三能级系统

Fig. 7 Λ -type three-level system

基态 $5S_{1/2}, F=2, 3$, 激发态 $5P_{1/2}, F'=3$ 。

实验原理如图 8 所示,主激光器发出的光作为耦合光,从激光器发出的光作为探测光。首先将主激光器使用饱和吸收稳频系统锁定在某一个跃迁线上,分别通过两种方法来扫描频率 ω_p , 第一种:通过激光器自带的扫描电流功能,达到扫描频率 ω_p 的目的,第二种:在 OPLL 锁定的情况下,通过扫描参考信号的频率 ω_r , 进而达到扫描频率 ω_p 的目的。

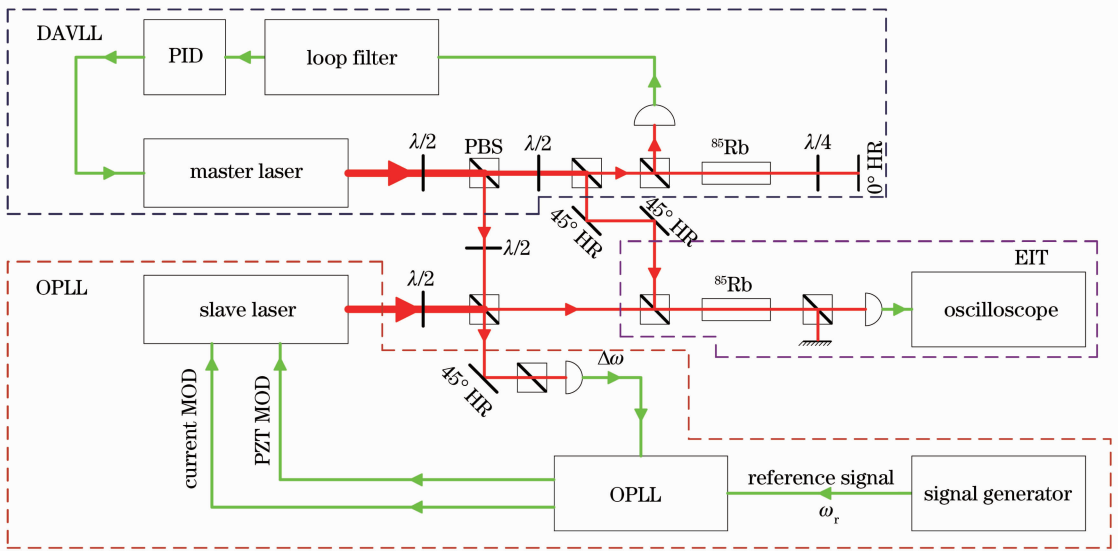


图 8 EIT 实验原理图

Fig. 8 Schematic diagram of EIT

对于图 9(a), (b), 主激光器都是锁定在⁸⁵Rb D₂ $F=2 \rightarrow F'=3$ 的跃迁线上,但是前者从激光器是使用激光器自带的扫描电流功能来达到频率扫描,没有进行相位锁定;后者(从激光器)是在相位锁定的情况下,用信号发生器来扫描参考频率,从而达到扫描 $\Delta\omega$ 的目的。对于图 9(c), (d), 主激光器都是锁定在⁸⁵Rb D₂ $F=3 \rightarrow F'=3$ 的跃迁线上,同样,前者

从激光器是使用激光器自带的扫描电流功能来达到频率扫描,没有进行相位锁定;后者从激光器是在相位锁定的情况下,用信号发生器来扫描参考频率。

从图 9 中可以清晰地看出在相位锁定的情况下,用信号发生器扫描 $\Delta\omega$ 也可以清楚地观察到 EIT 现象。

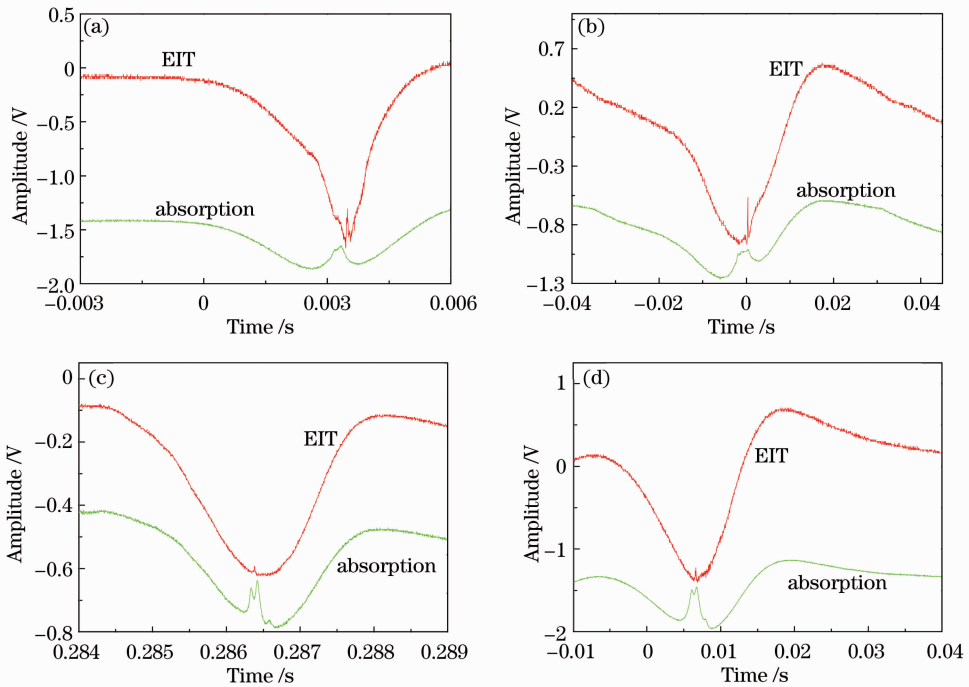


图 9 EIT 曲线。(a)主激光器锁定在 ^{85}Rb D_2 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁线,扫描从激光器;(b)主激光器锁定在 ^{85}Rb D_2 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁线,锁定相位,扫描参考信号;(c)主激光器锁定在 ^{85}Rb D_2 $F=3 \rightarrow F'=3$ 跃迁线,扫描从激光器;(d)主激光器锁定在 ^{85}Rb D_2 $F=3 \rightarrow F'=3$ 跃迁线,相位锁定,扫描参考信号

Fig. 9 EIT curves. (a) Master laser is locked in ^{85}Rb D_2 $F=2 \rightarrow F'=3$, scan slave laser; (b) master laser is locked in ^{85}Rb D_2 $F=2 \rightarrow F'=3$, phase locked, scan reference signal; (c) master laser is locked in ^{85}Rb D_2 $F=3 \rightarrow F'=3$, scan slave laser; (d) master laser is locked in ^{85}Rb D_2 $F=2 \rightarrow F'=3$, phase locked, scan reference signal

6 结 论

使用两台光栅外腔反馈式半导体激光器,一台为主激光器,一台为从激光器,将主激光器锁定在 ^{85}Rb D_2 $F=3 \rightarrow F'=3$ 的跃迁线上,通过探测器得到主激光器和从激光器之间的拍频信号,通过 OPLL 将从激光器很好地锁定在规定的频率差上,并且很好地抑制了二者的相位噪声,将线宽由原来的兆赫兹压窄到赫兹量级。在 EIT 实验中使用了 OPLL,并且成功地观察到 EIT 现象。该装置可用于开展在原子系统中的拉曼光谱、四波混频等现象的实验研究。

参 考 文 献

- 1 P Rabinowitz, J Latourrette, G Gould. AFC optical heterodyne detector [J]. IEEE, 1963, 51(5): 857-858.
- 2 L H. Enloe, J L Rodda. Laser phase-locked loop [J]. Proc IEEE, 1965, 53(2): 165-166.
- 3 J Ye, J L Hall. Optical phase locking in the microradian domain; potential applications to NASA spaceborne optical measurements [J]. Opt Lett, 1999, 24(24): 1838-1840.
- 4 W Liang, A Yariv, A Kewitsch, *et al.*. Coherent combining of the output of two semiconductor lasers using optical phase-lock loops [J]. Opt Lett, 2007, 32(4): 370-372.
- 5 A M Marino, C R Stroud. Phase locked laser system for use in atomic coherence experiments [J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79

(1): 013104.

- 6 D Hockel, M Scholz, O Benson. A robust phase locked diode laser system for EIT experiments [J]. Appl Phys B, 2009, 94 (3): 429-435.
- 7 L Ricci, M Weidemuller, T Esslinger, *et al.*. A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics [J]. Opt Commun, 1995, 117(5-6): 541-549.
- 8 S Sternklar, S Weiss, M Segev, *et al.*. Beam coupling and locking of laser using photorefractive four-wave mixing [J]. Opt Lett, 1986, 11(8): 528-530.
- 9 L Cacciapuoti, M de Angelis, M Fattori, *et al.*. Analog digital phase and frequency detector for phase locking of diode lasers [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76(5): 053111.
- 10 Cheng Fengyu, Meng Zengming, Zhang Jing. Experiment of laser phase lock with source locking cw microwave frequency counter [J]. Journal of Shanxi University, 2012, 35 (1): 79-84.
- 程峰钰, 孟增明, 张 靖. 利用微波锁相频率计数器实现激光相位锁定的实验研究 [J]. 山西大学学报, 2012, 35(1): 79-84.
- 11 T. J. Kane, E. A. P. Cheng. Fast frequency tuning and phase locking of diode pumped Nd: YAG ring lasers [J]. Opt Lett, 1988, 13(11): 970-972.
- 12 J Appel, A MacRae, A I Lvovsky. A versatile digital GHz phase lock for external cavity diode lasers [J]. Meas Sci Technol, 2009, 20(5): 055302.
- 13 Kang Huaguang, Chen Daqin. Fundamentals of Electronic Technology (Analog Circuit Part) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 421-423.
- 康华光, 陈大钦. 电子技术基础(模拟部分) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 421-423.