

用于原子-光耦合系统的光学锁相环的设计

马志军, 王丹, 武晋泽, 张俊香[†]

(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: 光学锁相环(OPLL)是电子学锁相环在光学领域的拓展,它是基于光电探测器、鉴相器以及配套的电路,通过反馈回路控制半导体激光器的电流模块和压电陶瓷扫描模块,以达到锁定两束激光的频率和相位的目。介绍了光学锁相环的结构、鉴频鉴相器(PFD)的工作原理,并基于锁相环路芯片 ADF41020 设计了一种光学锁相电路,设计锁定两束激光的频率差的范围为 4 GHz—18 GHz。

关键词: 光学锁相环; 鉴频鉴相器; 锁相电路

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1007-6654(2016)02-0193-06

0 引言

由于半导体激光器具有窄线宽、体积小、良好的相干性等优点,而被广泛地应用到激光技术^[1-2]和光与原子相互作用^[3-5]等实验中。在电磁诱导透明(EIT)和四波混频(FWM)等实验中,通常需要两束或者多束相干光,而且光束之间相干性会直接影响到实验的效果。1997年,肖敏小组在理论和实验上的研究证明,耦合光的线宽可以影响和控制探测光在 EIT 峰处的吸收减弱的程度,在 Rb 原子的 EIT 实验中观测到当耦合光的线宽在几 MHz 到 100MHz 变化时,EIT 的吸收减弱系数的变化范围为 15% 到 70%^[6]。同年,肖敏小组实验上研究证明探测光线宽对 EIT 效应的影响,当探测光的线宽增大时会减弱 EIT 效应,说明探测光和耦合的相位锁定的重要性和潜在应用价值^[7]。2008年,Alberto M. Marino 等人研究了用于外腔半导体激光器的相干相位锁定系统,

实现了相位锁定状态下可连续扫描几十 GHz 的相对频率范围,并且利用该相位锁定系统在 Rb 原子的 EIT 实验中观测到 92% 的吸收减弱系数^[8]。2013年,张靖小组使用数字锁相环芯片设计了锁频带宽为 1~7GHz 的光学锁相系统,并将该系统用于 EIT 实验中成功观察到 EIT 现象^[9]。另外,在快慢光存储的研究中,光场的高相干性的重要性也得到了验证^[10-12]。

实验中获得相位相干的两束光的方法通常有三种:第一种方法是采用同一光源,例如在 EIT 实验中选择窄线宽的激光作为唯一的光源,再通过 AOM 或者 EOM 移频获得探测光或者耦合光^[13],这样就能保证两束光之间的高相干性,但是 AOM 和 EOM 的移频范围有限,较难覆盖 Rb 原子或 Cs 原子的基态频率差(⁸⁵Rb 的基态频率分裂差为 3.03 GHz^[14],⁸⁷Rb 的基态频率分裂差为 6.83 GHz^[15],¹³³Cs 的基态频率分裂差为 9.19 GHz^[16]),并且宽带的 AOM 和 EOM 的

^② 收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(11274210;61108003);高等学校博士学科点专项科研基金(20131401110013);国家自然科学基金创新群体项目(61121064)

作者简介: 马志军(1988—),男,山西大同,硕士研究生,主要从事量子光学研究。E-mail:mazj-sxdx@163.com

[†]通信作者: 张俊香,教授,博士生导师,E-mail:junxiang@sxu.edu.cn

效率低,且带宽越大价格越昂贵,基于以上事实这种方法无法被广泛应用;第二种方法是注入锁定半导体激光器^[17-21],在激光冷却和原子俘获实验中,要求用于冷却的激光具有高功率、窄线宽等特点,然而单模窄线宽的半导体激光器一般工作于低功率状态,当激光器输出高功率时容易出现多模运转,解决此问题的方法就是将一个低功率、窄线宽的激光器作为种子源注入高功率激光器中,当注入光有效地匹配到高功率激光中时,高功率激光器自由运转时的振荡模式就会被抑制,从而跟随种子激光器的频率运转,达到注入锁定的目的,因此注入锁定是半导体激光器获得高功率的一种有效方法;第三种是采用两个独立的光源,通过光电探测器得到拍频信号,经过负反馈的光学锁相环(OPLL)将拍频信号(即两束激光的相对频率和相对相位)锁定到参考信号源上,达到锁定这两束激光的频率和相位的目的^[22-24],此方法易于控制,并且随着半导体集成芯片的发展,更加趋向于数字化和可编程化。本文所设计的光学锁相环即属于第三种,主要基于ADI公司的ADF41020锁相环芯片设计了光学锁相环电路,将两台激光器的拍频信号锁定到参考信号源上,可输入拍频信号的范围为4GHz-18GHz。

1 光学锁相环的原理

光学锁相环是在电子学锁相环的基础上发展而来,现已被广泛地应用在干涉测量^[25]、频率链^[26]和锁模激光^[27]等领域。光学锁相环主要包

$$\begin{aligned}
 A_d &= R_d [E \cos(2\pi\nu_{ref}t) + E \cos(2\pi\nu_{loc}t)]^2 \\
 &= R_d E^2 [\cos^2(2\pi\nu_{ref}t) + \cos^2(2\pi\nu_{loc}t) + 2\cos(2\pi\nu_{ref}t)\cos(2\pi\nu_{loc}t)] \\
 &= R_d E^2 \left[1 + \frac{1}{2}\cos(4\pi\nu_{ref}t) + \frac{1}{2}\cos(4\pi\nu_{loc}t) + \cos(2\pi t(\nu_{ref} + \nu_{loc})) + \cos(2\pi t(\nu_{ref} - \nu_{loc})) \right]
 \end{aligned}$$

其中 R_d 为探测器的灵敏系数,由于和频项和倍频项频率很高,超出了探测器的频率响应范围,故只能探测到这两部分的时间平均值,且余弦函数的时间平均值为 0,所以上式可以简化为:

$$A_d = R_d E^2 [1 + \cos(2\pi t(\nu_{ref} - \nu_{loc}))]$$

若将参考激光器锁定在固定频率上,即认为 ν_{ref} 不变,那么待锁定激光器的频率漂移就会唯一影响到拍频信号,所以理论上拍频信号的线宽就可以衡量锁相环的工作质量。将得到的拍频信

括三个部分: PFD(鉴频鉴相器),滤波器和激光器。

图 1 是 OPLL 的装置原理图,参考激光器通过饱和和吸收等方法锁定频率,待锁定激光器自由运行,两台激光器在分束器上产生拍频信号,通过高速探测器转换成电信号,这里假设参考激光为 $E_{ref}(t)$,待锁定激光为 $E_{loc}(t)$,表达式为:

$$\begin{aligned}
 E_{ref}(t) &= E_{ref} \cos(2\pi\nu_{ref}t + \phi_{ref}) \\
 E_{loc}(t) &= E_{loc} \cos(2\pi\nu_{loc}t + \phi_{loc})
 \end{aligned}$$

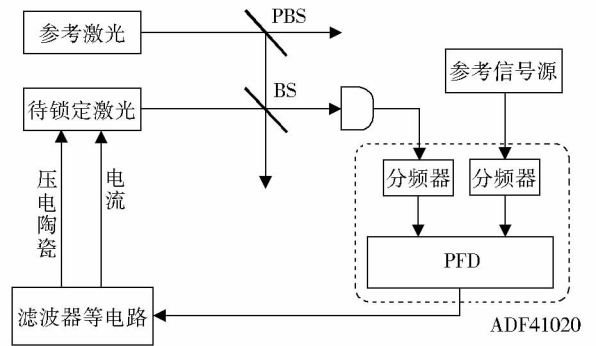


Fig. 1 OPLL setup schematic

图 1 OPLL 装置原理图

其中 E_{ref}, E_{loc} 为振幅, ν_{ref}, ν_{loc} 为频率, ϕ_{ref}, ϕ_{loc} 为初相位,为了方便推导我们不妨设两束光强度相同,即 $E_{loc} = E_{ref} = E$,同时使它们的初相位都为 0,即 $\phi_{loc} = \phi_{ref} = 0$,这样光电探测器输出的电信号幅度 A_d 为:

号和参考信号源产生的信号同时送入到 ADF41020(图 1 中的虚线框部分)中,这两路信号经过 ADF41020 内部的分频器,之后同时输入到 PFD 中,一个简化的 PFD 的结构如图 2。PFD 由两个异步清零的 D 触发器,一个与门和一个延时模块组成。D 触发器的数据输入端始终接高电平,时钟触发端分别接入输入信号,这里,REF 表示参考信号源产生的信号,BEAT 表示拍频信号,这两路信号在进入 ADF41020 后都被转换成

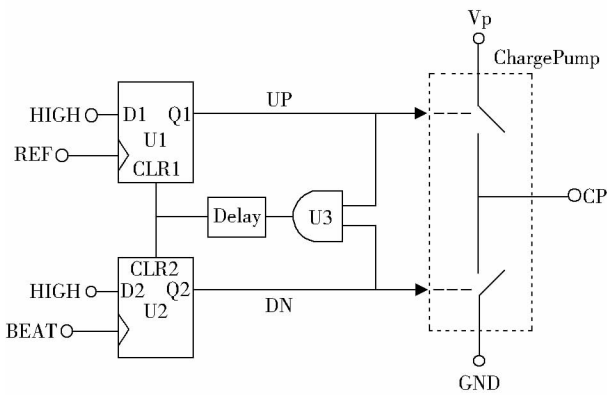


Fig. 2 Simplified structure of PFD and charge pump

图 2 PFD 和电荷泵的简化结构图

类似方波的阶跃信号，D 触发器输出 Q1 标记为 UP，Q2 标记为 DN，D 触发器为上升沿触发。PFD 的输出与电荷泵相连，图中所示开关在实际中分别为 P 沟道的场效应管和 N 沟道的场效应管，当 UP 和 DN 为高电平时，场效应管关闭，对应 CP 端的电容(图中未画出)会进行充电或者放电。

PFD 的理想波形图如图 3 所示，图 (a) 和图 (b) 为 REF，BEAT 频率相同，相位不同步的情况；图 (c) 为 REF，BEAT 频率不相同的情况；图

(d) 为 REF，BEAT 频率相同且相位同步时的情况。具体的工作原理为：(1) 首先，由于 PFD 的输入频率的限定范围为小于 100MHz，所以根据拍频信号和参考源信号的频率，编程设置分频率，使其分频后的频率都是在 100MHz 内；(2) 频率不同的 REF 信号和 BEAT 信号(图 3(c) 所示) 经过 PFD 产生一个脉冲输出，它的脉冲宽度反映了频率差的大小，此脉冲信号会反馈并驱动激光器改变频率，使 BEAT 信号的频率与 REF 信号的频率相同；(3) 当二者频率相同时，图 (a) 表示 REF 的相位超前，UP 产生脉冲输出，驱动电荷泵输出正电压脉冲，驱动激光器提高工作频率(相位)；图 (b) 表示当 BEAT 的相位超前，DN 将产生脉冲输出，驱动电荷泵输出负电压脉冲，驱动激光器降低工作频率(相位)；(4) 经过以上的反馈之后，两台激光器相位锁定，也就是拍频信号锁定在了参考源信号上，如图 (d) 中所示，此时 PFD 的输出为 0，保持锁定。当 UP 和 DN 同时为高电平时，两个 D 触发器会同时异步清零，但是由于器件的不完美同步会出现图 3 中的极短暂的毛刺信号，这些毛刺会被延时模块消除。

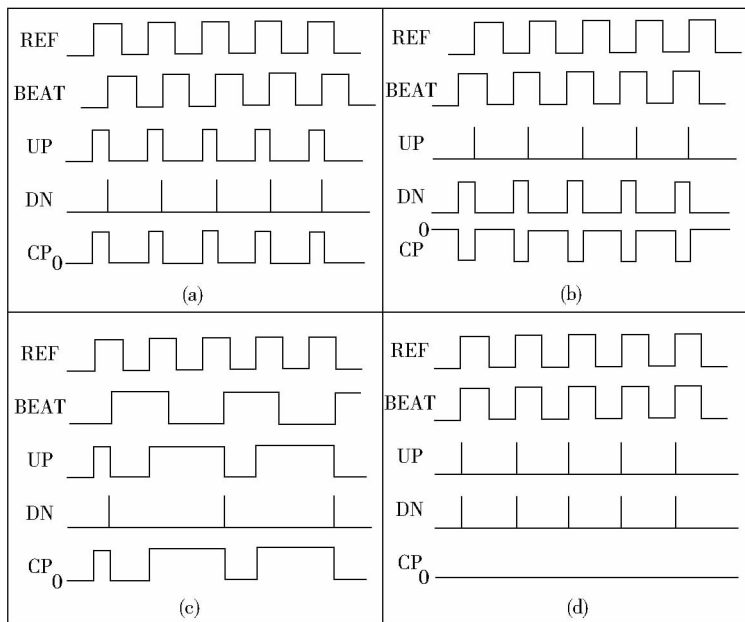


Fig. 3 The ideal waveform of PFD

图 3 PFD 理想波形图

2 电路设计

图 4 是我们设计的 OPLL 电路原理图，采用

ADF401020 作为锁相环芯片，它有两个输入：射频输入端和参考输入端，射频输入端(即对应本

文的拍频输入)的频率范围 4GHz—18GHz,参考输入端的频率范围为 10MHz—400MHz。ADF41020 主要包含分频器和数字 PFD 两个部分,它具有一个 3V 的 SPI 串行接口(CE, CLK, DATA 引脚),通过该接口可与微型控制器(如单片机)相连,实现对分频器的设置和数据写入等功能。拍频信号和参考源信号输入到 ADF41020 中,通过芯片内部分频、数字鉴相等过程产生一个与频率差或者相位差对应的误差信号(CP 引脚),这个信号的电压范围为 0—3V,该信号经过 R20 和 C37 组成的积分器后,被 OP467 和

OPA847 运放组成的二级放大电路放大,第一级的放大增益为 2,所以此时误差信号的范围为 0—6V,为了使误差信号在零点左右对称(这样在锁定状态下,误差信号就为 0,能稳定保持锁定),在误差信号进入第二级放大器前加入 -3V 的直流偏置,所以此时的误差信号电平范围为 -3V—3V,第二级放大增益为 300,之后误差信号分成慢速反馈(压电陶瓷)和快速反馈(电流反馈)反馈到激光器,电流反馈信号接入半导体激光器的电流控制模块来改变激光频率,压电陶瓷反馈信号改变腔长来改变激光频率。

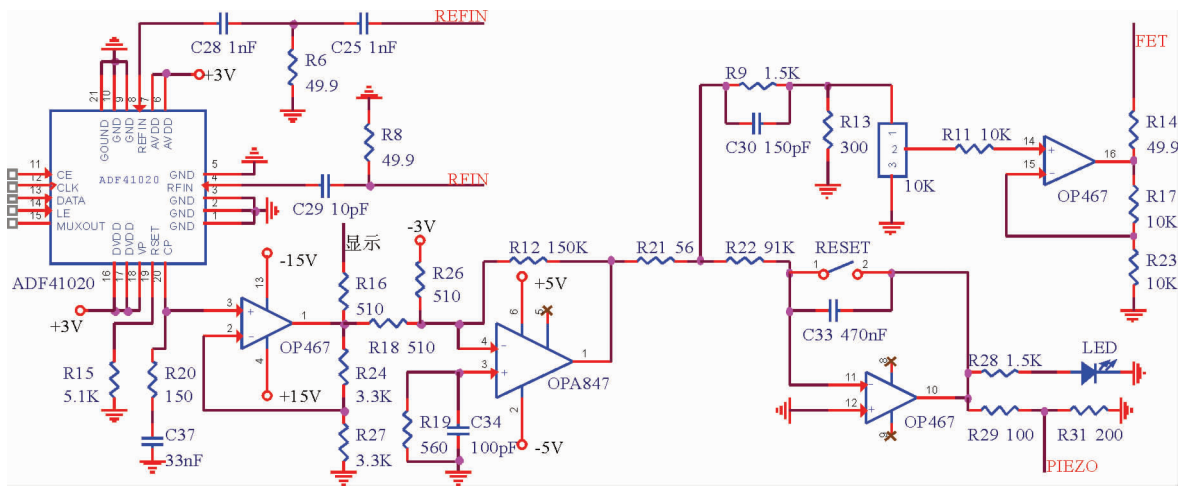


Fig. 4 The electric schematic of OPLL

图 4 OPLL 电路原理图

3 编程控制

锁相环路芯片 ADF41020 拥有三个分频器,通过这三个分频器可以将两个输入信号的频率降低到百兆赫兹以下,第一个分频器是固定分频比为 4 的预分频器,其余两个分频器的分频比可以通过编程来控制。ADF41020 具有一个 1.8V 和 3V 兼容的串行接口(SPI),SPI 主要包括三根线:时钟 CLK,数据 DATA 和写入使能信号 LE,我们将 ADF41020 的 SPI 接口与单片机的 SPI 口连接,实现对其的数据写入控制。ADF41020 的数字写入存储器件包括一个 24 位输入移位寄存器、一个 R 计数器、一个 N 计数器(N 对应 BEAT 信号的分频比,R 对应 REF 信号的分频比)。在

CLK 每个上升沿将 24 位数据逐位写入对应输入寄存器,当 LE 变为高电平时,数据传输至对应的计数器中。

4 结论

研究了光学锁相环电路的设计,阐述了光学锁相环的基本原理,对其核心部件鉴频鉴相器 PFD 的工作原理做了具体的分析,并考虑在不同情况下其工作的状态和结果,最后设计出基于锁相环芯片 ADF41020 的锁相环电路,当下电路板的设计和制作都已完成,下一步的工作是实现两台激光器的相位锁定。

参考文献:

- [1] Mark Kasevich, Steven Chu. Laser Cooling Below a Photon Recoil with Three-Level Atoms [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(12):1741-1744. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.1741>.
- [2] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, *et al.* Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atom Vapor [J]. *Science*, 1995, **269**(5221):198-201. DOI: [10.1126/science.269.5221.198](http://dx.doi.org/10.1126/science.269.5221.198).
- [3] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, *et al.* Storage of Light in Atomic Vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(5):783-786. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.783>.
- [4] ZHANG Jun-xiang, ZHOU Hai-tao, WANG Da-wei, *et al.* Enhanced Reflection via Phase Compensation from Anomalous Dispersion in Atomic Vapor [J]. *Phys Rev A*, 2011, **83**(5):053841. DOI: [10.1103/PhysRevA.83.053841](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.83.053841).
- [5] 郭苗军, 王丹, 周海涛, 等. 光子晶体特性在 EIT 介质中的实验实现 [J]. *量子光学学报*, 2014, **20**(2):148-153. DOI: [10.3788/asqo20142002.0148](http://dx.doi.org/10.3788/asqo20142002.0148).
- [6] LÜ Bao-long, Burkett W H, Min Xiao. Electromagnetically Induced Transparency with Variable Coupling-Laser Linewidth [J]. *Phys Rev A*, 1997, **56**(1):976-979. DOI: [10.1103/PhysRevA.56.976](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.56.976).
- [7] LÜ Bao-long, Burkett W H, Min Xiao. Frequency Matching Effect in Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Opt Commun*. 1997, **141**(6):269-272. DOI: [10.1016/S0030-4018\(97\)00258-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018(97)00258-7).
- [8] Alberto M. Marino and C. R. Stroud Jr. Phase-Locked Laser System for Use in Atomic Coherence Experiments [J]. *Rev Sci Instrum*. 2008, **79**(1):013014. DOI: [10.1063/1.2823330](http://dx.doi.org/10.1063/1.2823330).
- [9] 孟增明, 张靖. 相位锁定的激光器系统用于电磁诱导透明光谱实验 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(7):0714001. DOI: [10.3788/aos201333.0714001](http://dx.doi.org/10.3788/aos201333.0714001).
- [10] Michael M. Kash, Vladimir A. Stautenlov, Alexander S. Zibrov, *et al.* Ultraslow Group Velocity and Enhanced Nonlinear Optical Effects in a Coherently Driven Hot Atomic Gas [J]. *Phys Rev Lett*. 1999, **82**(26):5229-5232. DOI: [10.1103/PhysRevLett.82.5229](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.5229).
- [11] LI Lu-ming, GUO Hong, XIAO Peng, *et al.* Control of Light in an M-Type Five-Level Atomic System [J]. *J Opt Sci Am B*, 2005, **22**(6):1309-1313. DOI: [10.1364/JOSAB.22.001309](http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.22.001309).
- [12] Bajcsy M, Zibro A S, Lukin M D. Stationary Pulses of Light in an Atomic Medium [J]. *Nature*. 2003, **426**(1):638-641. DOI: [10.1038/nature02176](http://dx.doi.org/10.1038/nature02176).
- [13] Sang Eon Park, Taeg Yong Kwon, Ho Seong Lee. Production of Raman Laser Beams Using Injection-Locking Technique [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*. 2003, **52**(2):277-279. DOI: [10.1109/TIM.2003.809911](http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2003.809911).
- [14] Daniek A. Steck, "Rubidium 85 D Line Data" [Z/OL] Available Online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 0.1.1, 2 May 2008).
- [15] Daniek A. Steck, "Rubidium 87 D Line Data" [Z/OL] Available Online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.4, 23 December 2010).
- [16] Daniek A. Steck, "Cesium D Line Data" [Z/OL] Available Online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.4, 23 December 2010).
- [17] Kobayashi S, Kimura T. Injection Locking in AlGaAs Semiconductor Laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron*. 1981, **QE-17**(5):681-689. DOI: [10.1109/JQE.1981.1071166](http://dx.doi.org/10.1109/JQE.1981.1071166).
- [18] Kobayashi S, Yamada J, Machida S, *et al.* Single-Mode Operation of 500 Mbit/s Modulated AlGaAs Semiconductor by Injection locking [J]. *Electron Lett*. 1980, **16**(19):746-748. DOI: [10.1049/el:19800530](http://dx.doi.org/10.1049/el:19800530).
- [19] Mogensen F, Olesen H, Jacobsen G. FM Noise Suppression and Linewidth Reduction in an Injection-Locked Semiconductor Laser [J]. *Electron Lett*. 1985, **21**(16):696-697. DOI: [10.1049/el:19850492](http://dx.doi.org/10.1049/el:19850492).
- [20] Spano P, Piazzolla S, Tamburrini M. Frequency and Intensity Noise in Injection-Locked Semiconductor Lasers: Theory and Experiments [J]. *IEEE J. Quantum Electron*. 1986, **QE-22**(3):427-435. DOI: [10.1109/JQE.1986.1072982](http://dx.doi.org/10.1109/JQE.1986.1072982).
- [21] Iwashita K, Nakahawa K. Suppression of Mode Partition Noise by Laser Diode Light Injection [J]. *IEEE J. Quantum*

- Electron.* 1982, QE-18(10); 1669-1674. DOI:10.1109/JQE.1982.1071415.
- [22] Brandt S, Nalel A, Wynands R, *et al.* Buffer-Gas-Induced Linewidth Reduction of Coherent Dark Resonances to Below 50 Hz [J]. *Phys Rev A*, 1997, **56**(2): R1063. DOI:10.1103/PhysRevA.56.R1063.
- [23] Weiss D S, Young B C, Chu S. Precision Measurement of h/m_c Based on Photon Recoil Using Laser-Cooled Atoms and Atomic Interferometry [J]. *Appl Phys B*, 1994, **59**(3): 217-256. DOI: 10.1007/BF01081393.
- [24] Santarelli G, Clairon A. Heterodyne Optical Phase-Locking of Extended-Cavity Semiconductor Lasers at 9 GHz [J]. *Opt Commun*, 1994, **104**(4): 339-344. DOI: 10.1016/0030-4018(94)90567-3.
- [25] David S. Weiss, Brenton C. Young, Steven Chu. Precision Measurement of Photon Recoil of an Atom Using Atomic Interferometry [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, **70**(18): 2706-2709. DOI:10.1103/PhysRevLett.70.2706.
- [26] Telle H R, Meschede D, Hänsch T W. Realization of a New Concept for Visible Frequency Division; Phase Locking of Harmonic and Sum Frequencies [J]. *Opt Lett*, 1990, **15**(10): 532-534. DOI: 10.1364/OL.15.000532.
- [27] Steven T. Cundiff, Jun Ye, John L. Hall. Optical Frequency Synthesis Based on Mode-Locked Lasers [J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, **72**(10): 3749-3771. DOI: http://10.1063/1.1400144.

Design of Optical Phase Locked Loop for Atoms-Lights Coupling Systems

MA Zhi-jun, WANG Dan, WU Jin-ze, ZHANG Jun-xiang

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

Abstract: The optical phase locked loop (OPLL) is obtained from the electronics phase locked loop, which also affects the optics with its developing. The OPLL is based on photoelectric detectors, phase discriminator and matched electric circuits. The current module and piezoelectric ceramics scaling module of the semiconductor laser to be locked are controlled by the feedback loop. By this way, the frequency and phase of two lasers could be locked by the OPLL. The structure of the OPLL and the operating principle of phase frequency detector (PFD) were introduced in this paper. A new OPLL circuits was designed based on the phase locked loop chip ADF41020, and the designed frequency difference range of two lasers to be locked was 4 GHz—18 GHz.

Key words: optical phase locked loop; phase frequency detector; phase locked circuits