

光学锁相环的研究进展

张超超^{1,2}, 王建波², 殷 聪², 张宝武¹, 刘若男^{1,2}, 席 路², 李孟瑶^{2,3}

1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;
2. 中国计量科学研究院, 北京 100013;
3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 光学锁相环 (OPLL) 根据其锁定的两束激光间是否存在频差可分为零差光学锁相环和外差光学锁相环。主要介绍了外差光学锁相环的研究进展, 它是一种通过鉴频鉴相方式使激光间的频率差保持相对稳定的偏频锁定方法。相较于其他激光偏频锁定方法, 光学锁相环具有结构简单、伺服频率带宽大、频率偏置范围宽、锁定准确度高等优势, 在原子相干、冷原子系统、相干功率合成以及外差干涉测量等领域都得到了越来越广泛的应用。首先介绍了激光偏频锁定的主要方法及光学锁相环的特点; 其次介绍了光学锁相环的基本模型, 分析了光学锁相环的误差反馈过程, 并按照光学锁相环实现方法的不同详细介绍了其采用的关键技术和研究进展, 对近年来光学锁相环在不同领域的应用进展做了简要介绍; 最后对该方法的发展路线进行了总结和展望。

关键词: 光学锁相环; 偏频锁定; 光相位锁定; 激光稳频

中图分类号: O439; TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210156

Research progress of optical phase-locked loop

Zhang Chaochao^{1,2}, Wang Jianbo², Yin Cong², Zhang Baowu¹, Liu Ruonan^{1,2}, Xi Lu², Li Mengyao^{2,3}

1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. National Institute of Metrology, China, Beijing 100013, China;
3. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to whether there is frequency difference between two laser beams locked by an optical phase-locked loop (OPLL), it can be divided into homodyne optical phase-locked loop and heterodyne optical phase-locked loop. The progress of heterodyne optical phase-locked loop was mainly introduced, which could keep the frequency difference between lasers relatively stable through frequency discrimination and phase discrimination. Compared with other laser offset locking methods, optical phase-locked loop has the advantages of simple structure, large servo bandwidth, wide offset range and high locking accuracy. It plays a very important role in atomic coherence, cold atom system, coherent beam combining, heterodyne interferometry and other fields, and has received more and more extensive attention. The main method of laser offset locking and the characteristics of optical phase-locked loop were introduced firstly, then the basic model of optical phase-locked loop was introduced, and the basic error model of optical phase-locked loop was analyzed. According to the different realization methods of OPLL, the key technologies and research progress of OPLL were introduced in detail. Then the application progress of OPLL in different fields in recent years was introduced. Finally, the

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-05-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFF0200302); 国家自然科学基金 (62075165)

作者简介: 张超超, 男, 硕士生, 主要从事激光频率锁定技术方面的研究。

导师简介: 王建波, 男, 副研究员, 博士, 主要从事稳频激光波长基准及其精密测量方面的研究。

development of this method was summarized and prospected.

Key words: optical phase-locked loop; offset locking; optical phase locking; laser frequency stabilization

0 引言

基于光学锁相环 (Optical Phase-Locked Loop, OPLL) 的偏频锁定是激光稳频的重要方法。通常情况下激光稳频是将激光频率或波长稳定在某一绝对频率参考上,例如将原子或分子的跃迁谱线中心频率作为参考频率的兰姆凹陷稳频和饱和吸收稳频,或是将光学谐振腔的共振频率作为参考频率的 Pound-Drever-Hall(PDH) 稳频等^[1-4]。但是在许多研究或实验中需要保持两激光器频率的相对稳定,比如在冷原子系统中需要激光频率相对于原子跃迁线有一定失谐且频率稳定^[5];在电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 等量子相干效应的实验中,为实现双光子共振需要不同的激光之间有固定的频率差^[6];在激光外差干涉测量时也要求两激光的频率差保持相对稳定等^[7]。因此,激光偏频锁定方法具有重要的应用价值。激光偏频锁定简单来说就是利用负反馈环路控制从属激光频率以固定数值的偏置频率锁定到高稳定度的参考激光频率上,它不仅传递参考激光的高频率稳定度,还可以实现大功率、无调制以及精密调谐的激光输出。

实现激光偏频锁定有多种方法,一种是利用声光调制器 (Acousto-Optic Modulators, AOM) 或电光调制器 (Electro-Optic Modulators, EOM),通过改变射频的驱动功率来产生高阶调制边带,实现激光器频率偏频锁定至 AOM 或 EOM 产生的调制边带上^[8-9]。该方法可以避免外部反馈输入电流或压电陶瓷 (PZT) 电压引起的频率或功率抖动,但是其偏频锁定范围受调制边带频率范围的限制,无法实现更大范围的频率锁定。另外,有学者提出一种基于延迟线的偏频锁定方案^[10-13],由于拍频信号通过不同长度的同轴线缆传播时会产生与频率相关的相移,以此作为锁相环路的误差信号可进行偏频锁定。此外,还可利用 EIT 的透射峰来实现激光偏频锁定^[14-15],EIT 透射峰的信号由于线宽较窄,可以实现较高的锁频精度,但是这种方法存在偏频锁定时捕获范围较小的问题。

除上述方法外,OPLL 也是一种被广泛采用的方法,它是利用鉴相器将待锁激光和参考激光的拍频信

号与本振频率参考信号进行鉴相,鉴相产生的误差信号经锁相环路处理后反馈至待锁激光器进行调谐,从而实现待锁激光相对于参考激光的偏频锁定。在光学锁相环中,锁定后的拍频频率稳定度、环路带宽、捕获范围和环路传播延迟等是评价光学锁相环性能的关键参数,关于光学锁相环的研究主要针对上述参数进行优化和改进。首先,采用窄线宽、高稳定度的参考激光源是提高光学锁相环锁定精度的关键。OPLL 通常采用稳频激光器作为参考激光源,除此之外也可将调制激光器产生的边带或光频梳 (Optical Frequency Comb, OFC) 的梳齿作为频率参考^[16-18]。其次,所使用的本振频率参考源的稳定度对光学锁相环的性能也有至关重要的影响。光学锁相环具有结构简单、锁定精度高以及伺服频率带宽大等优点,它不仅能够实现数十 GHz 频率范围的偏频锁定,还可进行偏频锁定频率的快速精密调谐,在诸多精密测量场合具有重要的应用潜力。目前,利用光学锁相环偏频锁定方法实现的拍频频率稳定度可高达 10^{-19} (1000 s 平均时间)^[16]。

文章第二节主要介绍了光学锁相环的组成及其工作原理,第三节则阐述了光学锁相环中采用的关键技术和实现方法,第四节介绍了光学锁相环在诸多重要前沿研究领域中的应用,第五节对光学锁相环的发展路线进行了总结和展望。

1 OPLL 工作原理

OPLL 具有与传统电学锁相环 (PLL) 相类似的结构,如图 1 中 (a) 和 (b) 所示,传统电学锁相环主要包含鉴相器 (Phase detector)、环路滤波器 (Loop filter) 与压控振荡器 (VCO) 三部分。而在光学锁相环中,鉴相器之前还需增加光电探测器,将两束激光的拍频信号转换为电信号。此外,传统电学锁相环中的压控振荡器在光学锁相环中为待锁定的可调谐激光器,经锁相环路实现其相对于参考激光的偏频锁定。

光学锁相环的基本工作原理为:待锁定激光器的激光频率与参考激光器的激光频率之间存在一定的频差时,两束激光相干混合后可由光电探测器探测到其拍频信号,然后由鉴相器对该拍频信号与已设定为

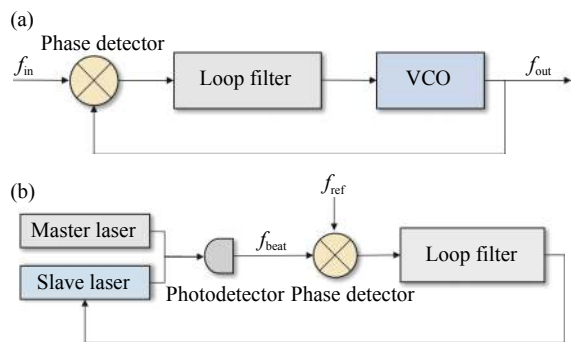


图 1 光学锁相环与电学锁相环结构对比。(a) 电学锁相环结构示意图; (b) 光学锁相环结构示意图

Fig.1 Structural comparison of OPLL and PLL. (a) Diagram of PLL structure; (b) Diagram of OPLL structure

预期偏频率值的参考频率信号进行鉴频鉴相处理, 得到与相位差成比例的鉴相误差电压信号, 经环路滤波器处理后反馈至待锁定激光器进行调谐, 从而使待锁定激光器的频率始终跟随参考激光器频率变化, 实现两激光器之间的偏频锁定。

假设参考激光和待锁定激光是两个沿z轴传播的单色波, 频率分别为 ω_1 和 ω_2 , 则它们的波函数可写为:

$$E_1 = a \cos(k_1 z - \omega_1 t) \quad (1)$$

$$E_2 = a \cos(k_2 z - \omega_2 t) \quad (2)$$

两激光束合成后的光波强度为:

$$I = A^2 = 4a^2 \cos^2(k_m z - \omega_m t) = 2a^2 [1 + \cos 2(k_m z - \omega_m t)] \quad (3)$$

式中: $\omega_m = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$; $k_m = \frac{1}{2}(k_1 - k_2)$ 。

由此可见, 合成波的光强随时间和传播距离在 $0 \sim 4a^2$ 之间变化, 这种光强交替变化的现象就是“拍频”。由上式可知, 拍频频率为 $2\omega_m$, 由于 $\omega_m = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$, 因此拍频频率即为参考激光频率与待锁定激光频率之差。为了便于分析, 我们假设参考激光的频率是不变的, 且不考虑其他干扰因素, 此时拍频信号的频率和相位仅受待锁定激光器频率和相位变化的影响。因此, 完成拍频信号与本振频率参考信号之间频率和相位的锁定即可实现待锁定激光相对于参考激光的频率和相位锁定。

光学锁相环的反馈部分则与传统电学锁相环类似, 因此可以直接采用电学锁相环的理论对光学锁相环的电路部分进行分析。光学锁相环复频域的基本框图如图 2 所示。

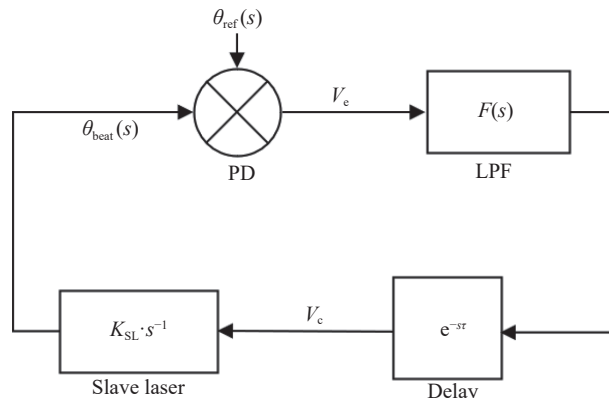


图 2 光学锁相环的复频域模型

Fig.2 Complex frequency domain model of OPLL

在拉普拉斯变换域中, 设输入到鉴相器的拍频信号为 $\theta_{beat}(s)$, 频率参考源信号为 $\theta_{ref}(s)$, 则鉴相器输出的鉴相误差信号为:

$$V_e(s) = K_{PD}(\theta_{ref} - \theta_{beat}) \quad (4)$$

鉴相误差信号经传输特性函数为 $F(s)$ 的环路滤波电路以及环路传播延迟 $e^{-s\tau}$ 后, 反馈给待锁激光器, 从而实现拍频信号的频率和相位锁定至频率参考源。

整个系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_{PD}K_{SL}F(s)e^{-s\tau}}{s} \quad (5)$$

则对应的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_{PD}K_{SL}F(s)e^{-s\tau}}{s + K_{PD}K_{SL}F(s)e^{-s\tau}} \quad (6)$$

以及误差传递函数为:

$$E(s) = \frac{1}{1+G(s)} = 1 - H(s) = \frac{s}{s + K_{PD}K_{SL}F(s)e^{-s\tau}} \quad (7)$$

2 OPLL 的研究进展

光学锁相环可以实现待锁定激光器相对于高精度频率参考源的锁定, 在对激光频率稳定度要求很高的应用和研究中有重要作用。1964 年, Enloe 等人首次利用激光锁相环装置成功实现了两路单频 He-Ne 激光器的锁定^[19], 此后随着激光技术的发展, 基于光学锁相环的激光偏频锁定方法也在不断进步。下面按照光学锁相环实现方法的不同对其采用的关键技术进行介绍。

2.1 模拟鉴相技术

模拟鉴相是早期光学锁相环广泛采用的一种鉴相技术方式^[20-22], 其基本结构如图 3 所示。

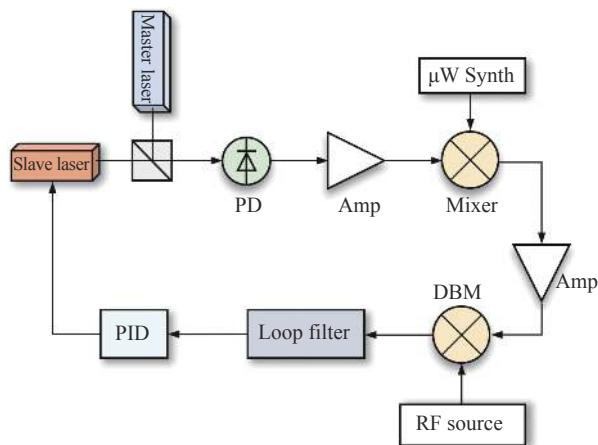


图 3 采用模拟鉴相技术的 OPLL 结构图

Fig.3 OPLL structure diagram using analog phase discrimination technology

该鉴相技术主要是通过采用以双平衡混频器 (DBM) 为代表的模拟鉴相器进行鉴相,并在偏频锁定频率较大时,在鉴相器之前增加另一 DBM 的方式对高频信号进行频率下转换,将信号的频率降到模拟鉴相器的可处理范围内。值得注意的是, DBM 要实现鉴相功能需要其中频为直流耦合,且只有当混频器两输入端口的信号频率相同时才可进行鉴相。鉴相器的中频端可输出与两输入信号的相位差成比例的鉴相误差电压,经环路滤波单元进行滤波和放大等处理后反馈至待锁定激光器进行调谐。1989 年, Williams 等人采用八次谐波混频器对频率进行下转换,采用 DBM 作为鉴相器,实现了 6~34 GHz 大偏频范围的 OPLL,将两 Nd:YAG(掺钕钇铝石榴石)激光器的拍频线宽保持在 mHz 量级^[20]。1992 年, Gliese 等人介绍了一种基于模拟鉴相技术的 OPLL,偏频频率范围为 3~18 GHz,残余相位误差方差为 0.04 rad²,并将其用于 131 Mbit/s 的 QPSK/DQBSK(正交相移键控/差分四相相移键控)微波通信系统^[22]。由于模拟鉴相技术采用无源器件,所以受自身噪声影响较小,具有很高的鉴相灵敏度,但是抗干扰能力相对较差。此外该方法所用器件体积较大不便于移动,且需要两个高稳定度的本振频率参考源,成本较高。

2.2 数字鉴相技术

随着数字鉴相器和锁相环芯片等集成电路的出现,光学锁相环越来越多地采用基于鉴频鉴相器 (PFD) 的数字鉴相技术^[23-26]。与模拟鉴相技术不同,在数字鉴相中, PFD 要求输入的信号通常为方波形式,利用

高低电平的触发和跳变进行工作。采用数字鉴相方式的 OPLL 基本结构如图 4 所示。

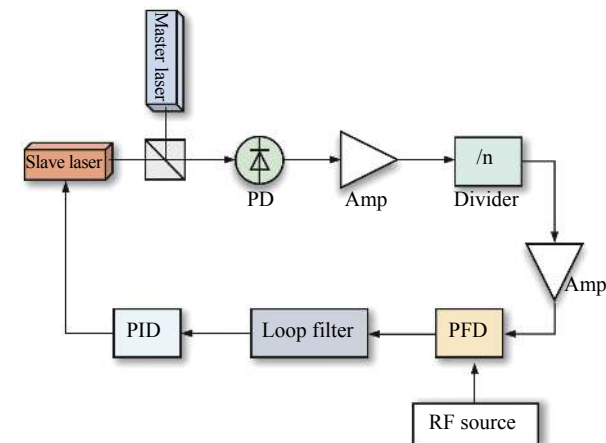


图 4 采用数字鉴相技术的 OPLL 结构图

Fig.4 OPLL structure diagram using digital phase discrimination technology

其主要包括分频器、鉴频鉴相器和环路滤波器等部分。其中分频器的作用是将高频拍频信号进行分频,取代了模拟鉴相技术中利用混频器进行频率下转换的方法,大大降低了成本。2008 年, Marino 等人在原子相干实验中采用了基于数字鉴相方法的 OPLL,通过差分电路对 PFD 输出的反映两信号相位超前滞后情况的 UP/DOWN 脉冲序列进行运算后得到误差信号^[24]。2009 年, Höckel 等人在 EIT 实验中同样采用了基于数字鉴相方法的 OPLL,所选用的数字鉴相器在偏频 10 kHz 时具有 -153 dBc/Hz 的极低相位噪声,实现了残余相位噪声小于 0.02 rad² 的 OPLL 系统^[25]。2014 年, Sternkopf 等人采用集成了 PFD 的商用 OPLL 芯片搭建了光学锁相环系统,将外腔半导体激光器偏频锁定至 633 nm He-Ne 激光器,实现了 3.2×10⁻⁹ 的相对频率稳定度^[26]。采用数字鉴相技术的 OPLL 相较于模拟鉴相 OPLL 具有体积小、成本低、抗干扰能力强等优点,是目前光学锁相环中应用最广泛的方法。

2.3 基于 FPGA 技术的 OPLL

随着 FPGA 技术的不断发展,其凭借处理速度快、延时低以及功能丰富等优点,被逐渐应用到光学锁相环中。Numata 等人率先在对分布式反馈 (DFB) 激光器与数字-超模分布布拉格反射式 (DS-DBR) 激光器进行偏频锁定研究时引入 FPGA 对光学锁相环各部分进行控制^[27]。如图 5 所示,该研究中 FPGA 并

不直接参与锁相环路的鉴相及 PID 控制等工作,而是主要用来生成前馈信号以及动态控制 OPLL 的环路参数,如 PFD 的锁定逻辑、电荷泵 (CP) 电流的增益和符号、直接数字频率合成器 (DDS) 的频率以及分频器的分频因数等。这种光学锁相环可在 40 GHz 的范围内实现精确快速的调谐。

此后 Xu 等人设计了一种基于半导体激光器的 OPLL 用于原子干涉测量^[28-29],如图 6 所示。其中,虚线框 a 中 PFD、Loop Filter 和 PID 三部分均通过 FPGA 实现。虚线框 b 部分可视为等效的数控振荡器 (DCO),它与 FPGA 的数字控制电路相结合构成全数字锁相

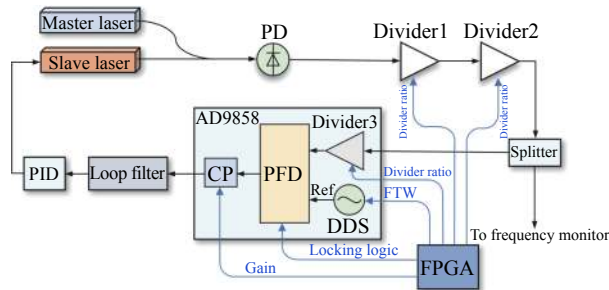


图 5 基于 FPGA 的 OPLL 偏频锁定系统

Fig.5 OPLL offset locking system based on FPGA

环。该锁相环可以实现小于 1 Hz 的拍频线宽,残余相位误差方差为 0.14 rad²。

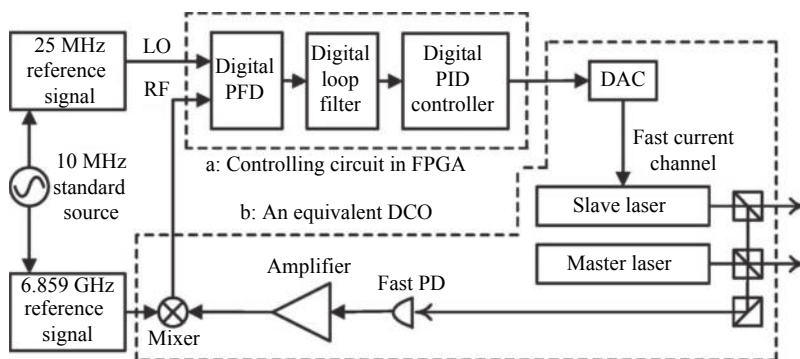


图 6 基于 FPGA 的全数字 OPLL 结构示意图^[28]

Fig.6 Schematic diagram of all digital OPLL based on FPGA^[28]

Yao 等人在基于 FPGA 的激光偏频锁定方案中采用了上升沿和下降沿同时计数的判别方法,以及高概率均值滤波算法和变步长与分段逼近算法,最终实现拍频频率波动范围在±10 Hz 以内^[30]。

浙江理工大学的谢建东等人基于锁相放大原理,实现了利用 FPGA 进行鉴频鉴相及相位锁定的 OPLL,使外腔半导体激光器 (ECDL) 在 10 nm 波长范围均可偏频锁定至光频梳,锁定后的拍频信号频率波动被控制在±3 Hz 以内,激光器频率波动在±6 kHz 左右^[31]。

目前,基于 FPGA 的 OPLL 在激光偏频锁定中已有越来越多的研究和应用,FPGA 在系统中主要实现各器件的低延时控制,或对拍频进行计数等工作,而超高频信号的鉴频鉴相工作仍需由专门的鉴频鉴相器件来完成。随着 OPLL 偏频锁定系统功能的不断丰富,对逻辑控制的要求不断提高,将 FPGA 应用于 OPLL 系统是未来的发展趋势。

2.4 光路集成化技术

光学锁相环的集成化是通过在磷化铟 (InP) 基底

上刻蚀光通道,加工集成激光器和光电探测器来实现光子集成电路 (PIC)^[17, 32-34],如图 7 所示。在该 PIC 中,待锁激光二极管、光电探测器和两个 Y 形结构的光波导集成在长度为 3.1 mm 的 InP 基底上,参考激光和待锁定激光分别通过特制光纤引入 PIC 中进行拍频。此外,也可将参考激光与待锁激光同时集成在 InP 上,实现全集成化的 OPLL 方案^[35-37]。

另一种完整的集成 OPLL 结构如图 8 所示,参考激光与待锁激光在 PIC 中完成拍频,集成的光电探测器将拍频信号输出至电子集成电路 (EIC) 中进行处理,最后反馈至集成的待锁激光器对其进行调谐。这样,整个 OPLL 系统的体积得到了很大程度的减小,完成了对 OPLL 系统整体的集成化。

Steed 等人报道的单片集成 OPLL 可以实现 0.6~6.1 GHz 的偏频可调谐范围,集成的半导体激光器拥有 1.1 MHz 的线宽,在大于 20 kHz 偏频锁定时的相位噪声小于 -90 dBc/Hz, 10 GHz 带宽下的残余相位误差方差为 0.04 rad²^[38]。Lu 等人采用取样光栅分布布

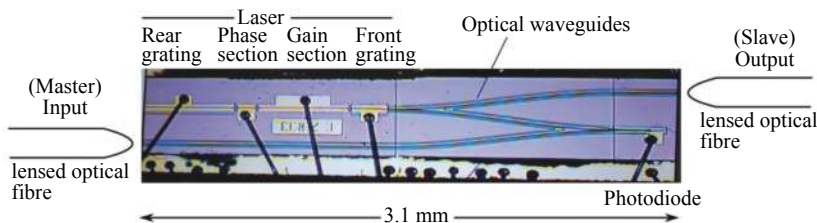


图 7 OPLL 集成光路^[38]

Fig.7 Integrated optical path for OPLL^[38]

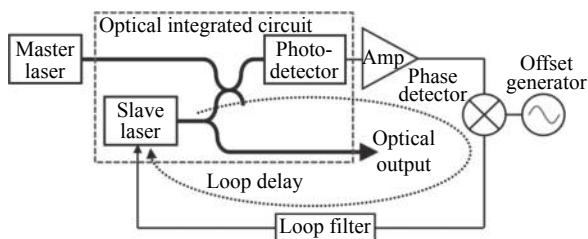


图 8 集成 OPLL 偏频锁定系统^[39]

Fig.8 Integrated OPLL offset locking system^[39]

拉格反射式 (SG-DBR) 激光器实现了宽带宽调谐范围的集成 OPLL, 其线宽为 10 MHz, 可调谐范围高达 16.5 GHz, 具有 0.12 ns 的环路传播延时, 环路带宽 1.1 GHz。利用该集成 OPLL, 可以将激光器的

10 MHz 线宽压缩至 100 kHz^[40]。Balakier 等人介绍了一种采用铸造方法和现成的电子元器件制作的光子集成 OPLL, 在 4~12 GHz 之间的偏移频率内实现了稳定的锁定, 在偏频 10 kHz 时, 外差相位噪声低于 -100 dBc/Hz^[41], 达到了目前光子集成 OPLL 领域中非常高的水平。

由于集成在芯片上的激光器以及光电探测器等在性能上较传统器件还有一定差距, 目前仍处于实验阶段, 并未得到广泛的实际应用, 但光子集成 OPLL 是光子芯片前沿研究的热点方向之一, 对于未来实现大规模光子集成具有重要意义。

表 1 总结了上述几种不同类型的 OPLL 的结构、

表 1 不同 OPLL 偏频锁定系统的结构和关键参数

Tab.1 Structure and key parameters of different OPLL offset locking systems

Time	Laser		Offset range	Type of phase discriminator	Loop bandwidth	Linewidth	Phase noise level	Phase error variance	Optical structure
	Master	Slave							
1989 ^[20]	Nd:YAG	Nd:YAG	6-34 GHz	DBM	-	<1 mHz	-	-	Space light
1992 ^[42]	DFB	DFB	3-18 GHz	DBM	180 MHz	-	<102 dBc/Hz	0.04 rad ² (1 GHz bandwidth)	Space light
1994 ^[43]	ECDL	ECDL	<10 GHz	DBM	3.7 MHz	50 kHz	-	<0.004 rad ²	Space light
1999 ^[44]	DFB	DFB	7-14 GHz	DBM	70 MHz	-	-95 dBc/Hz (50 MHz offset)	0.05 rad ² (1 GHz bandwidth)	Space light
2008 ^[24]	ECDL	ECDL	250 kHz-20 GHz	DBM+PFD	-	<10 Hz	-	<0.04 rad ²	Space light
2008 ^[25]	ECDL	ECDL	0.01-1.3 GHz	PFD	-	500 kHz	-153 dBc/Hz (10 kHz offset)	<0.02 rad ²	Space light
2012 ^[39]	-	SG-DBR	-9-7.5 GHz	PFD	400 MHz	-	-	-	Integrated optical circuit
2012 ^[27]	DFB	DS-DBR	<40 GHz	PFD	100 kHz (open-loop unity-gain bandwidth)	-	-	-	Space light
2014 ^[26]	He-Ne Laser	ECDL	80 MHz-1.4 GHz	PFD	-	3.2×10 ⁻⁹ (stability)	-	-	Space light
2017 ^[17]	OFC	SG-DBR	<26 GHz	XOR phase discriminator	-	-	-80 dBc/Hz (200 Hz offset)	0.08 rad ² (1 kHz-1 GHz bandwidth)	Integrated optical circuit
2018 ^[41]	ECDL	DBR	4-12 GHz	analog phase discriminator	100 MHz	-	-100 dBc/Hz >(10 kHz offset)	0.012 rad ²	Integrated optical circuit

性能参数以及实验结果。可以看到,光学锁相环的光源可以为多种不同类型的激光器,但基本要求是作为激光参考源的主激光器应具有较高的频率稳定度,而从激光器应具有可调谐功能。此外,随着时间的发展和技术的进步,在光学锁相环的鉴相方式和光路结构上,也表现出了明显的数字化、集成化趋势。

3 OPLL 的应用

基于光学锁相环的激光偏频锁定是使两激光器之间保持固定频率差的常用方法,相比于其他偏频锁定方法具有结构简单、偏置锁定范围大、能在锁频的基础上实现锁相等优势,得到了更为广泛的应用。下面对近年来 OPLL 在相关领域中的应用情况分别进行介绍。

3.1 原子相干实验研究

德国洪堡大学的 Hockel 等人利用 OPLL 进行的 EIT 实验如图 9 所示,该系统采用两个 Littrow 结构的 ECDL 分别产生泵浦光和探测光,其中探测光激光器采用 Cs 原子调频光谱 (FMS) 装置进行稳频,并与泵浦光激光器通过 OPLL 实现了 100 MHz 的偏频锁定,系统锁定后的残余相位误差方差小于 0.02 rad^2 [25]。

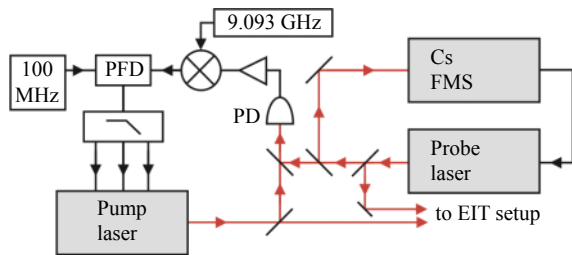


图 9 用于 EIT 实验的 OPLL 偏频锁定系统^[25]

Fig.9 OPLL offset locking system for EIT experiment^[25]

美国罗切斯特大学的 Marino 等人提出了一种用于原子相干实验的 OPLL 系统,如图 10 所示。该系统由三台工作在 795 nm 附近的 ECDL 激光器组成,其中参考激光器采用二色性原子蒸气激光频率锁定 (DAVLL) 技术进行稳频,通过 OPLL 实现与第二台主激光器的锁相,而待锁定激光器则通过另一 OPLL 锁相至主激光器。整套系统的残余相位噪声小于

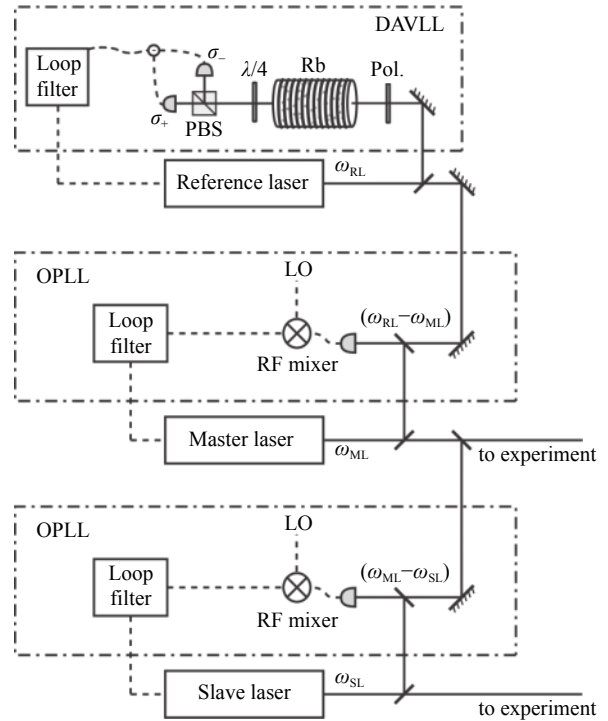


图 10 用于原子相干实验的 OPLL 偏频锁定系统^[24]

Fig.10 OPLL offset locking system for atomic coherence experiments^[24]

0.04 rad^2 , 在 Rb 原子的 EIT 实验中,使吸收系数降低了 92%^[24]。

3.2 激光外差干涉测量

光学锁相环在外差干涉测量领域中有着广泛的应用,利用它可以提供实验需要的高稳定外差激光光源。2012 年, Sternkopf 等人提出了一种基于外差干涉仪的 He-Ne 激光光源 OPLL 偏频锁定系统^[23],如图 11 所示。在该系统中,主激光器采用了一种申请专利的双模稳定技术进行稳频,从激光器则采用了商用数字锁相环芯片将频率和相位锁定到主激光器上,

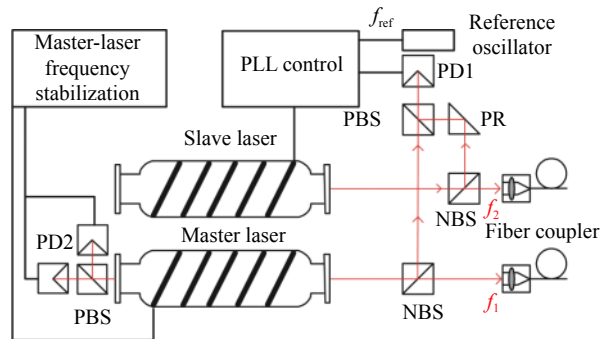


图 11 He-Ne 激光光源 OPLL 偏频锁定系统^[23]

Fig.11 OPLL offset locking system for He-Ne laser source^[23]

最终实现该系统的主激光器频率稳定度为 1×10^{-8} , 拍频的稳定度约为 4.5×10^{-5} 。

2014 年, 该团队提出了一种利用 OPLL 将 ECDL 偏频锁定至 He-Ne 激光器的外差干涉测量光源系统^[26], 如图 12 所示。该系统同样采用了商用锁相环芯片, 结合二阶有源低通滤波电路对 ECDL 进行 PZT 调谐和电流调谐, 实现了 3.2×10^{-9} 的长期拍频频率稳定度。

浙江理工大学的吴凯悦等人利用图 13 所示的 OPLL 系统将可调谐激光以 65 MHz 的偏置频率锁定至碘稳频 He-Ne 激光相位调制生成的重频为 250 MHz 的 +3 阶边带上, 得到了频差为 815 MHz 的稳频光源。利用该系统进行了纳米精度的位移测量实验, 结果表明该系统可实现亚纳米级的测量不确定度^[45]。

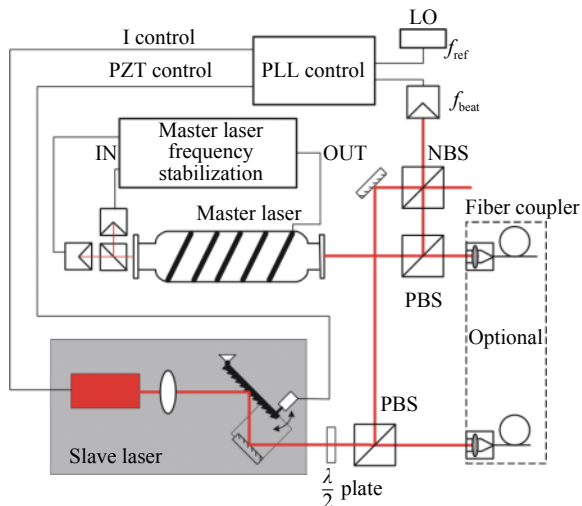


图 12 ECDL 激光器的 OPLL 偏频锁定系统^[26]

Fig.12 OPLL offset locking system for ECDL^[26]

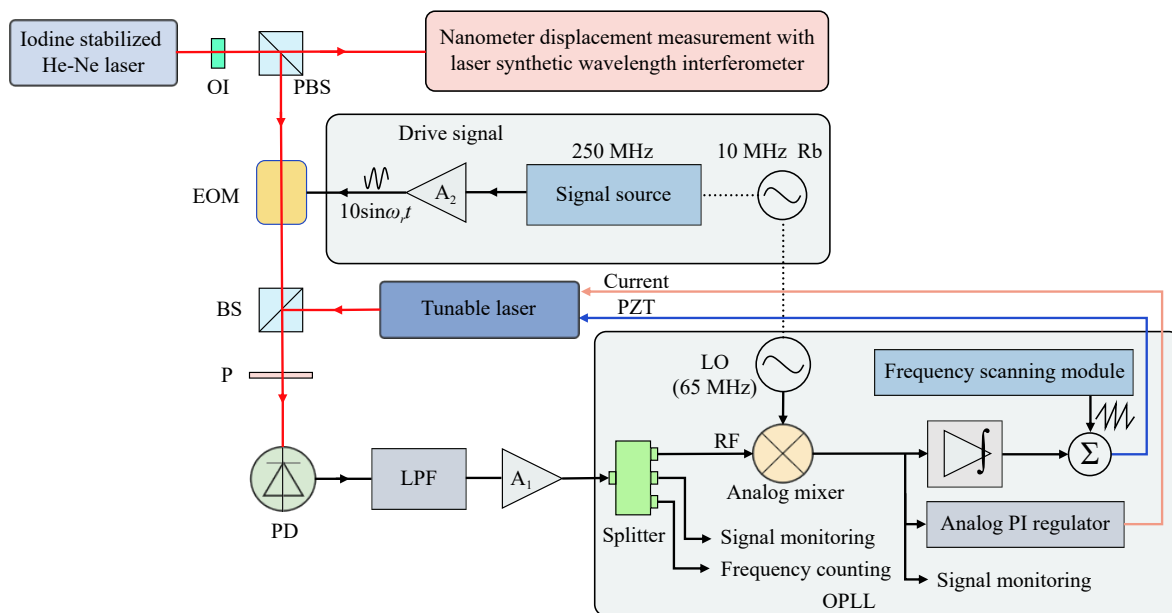


图 13 激光外差干涉测量光源 OPLL 锁定系统^[45]

Fig.13 OPLL locking system for laser heterodyne interferometry source^[45]

3.3 相干功率合成

相干功率合成技术是大功率激光器研究领域中的一项目关键技术。近年来, 有研究人员将 OPLL 应用到了激光的相干功率合成中, 用以解决单台激光器实现高功率输出时存在的光束质量差、系统稳定性低、以及工作介质的光学损伤和热损伤等问题。

加州理工学院的 Liang 等人利用两个锁相环路同时将两个 DFB 激光器以 1.5 GHz 的偏置频率锁定至同一参考激光源上, 实验装置如图 14 所示。由于两

个锁相环路采用了同一频率参考源和激光参考源, 因此两 DFB 激光器可以获得很好的相干性。该系统相干功率合成效率达到了 87%, 锁定后两激光器之间的均方根差分相位误差约为 30° ^[46]。

同年, 该课题组同样利用 OPLL 实现了 MOPA (Master-oscillator-power-amplifier) 半导体激光器相干功率合成, 并在系统中增加了移相器和辅助采集电路 (AAC)^[47], 如图 15 所示, 实现了对两激光器锁相后相位误差的补偿且具有提升锁相环路带宽的功能。

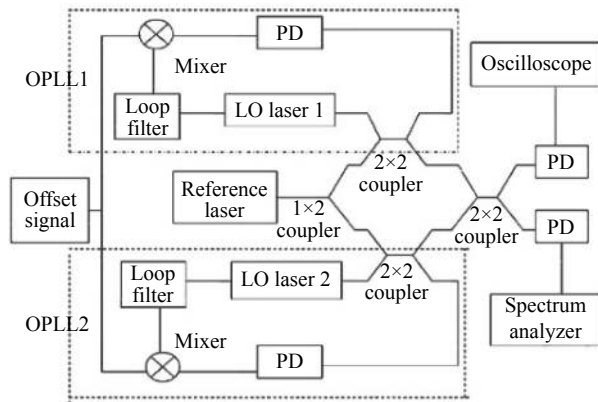


图 14 相干光束合成 OPLL 系统^[46]

Fig.14 OPLL system for coherent beam combining^[46]

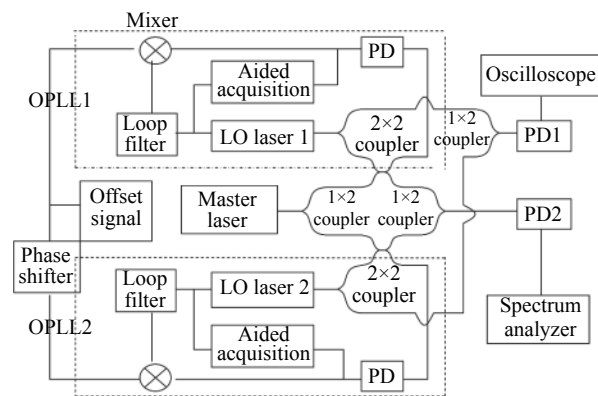


图 15 改进后的相干功率合成 OPLL 系统^[47]

Fig.15 Improved OPLL system for coherent power combining^[47]

3.4 其他

除上述领域外,光学锁相环在其他领域也有重要的应用。2018 年,法国国家科学研究院的 Guionic 等人在 1.5 μm 全光纤微波源的实验研究中采用光学锁相环来稳定 DFB 光纤激光器的两个正交偏振模间的拍频,实现了 1 GHz 和 10 GHz 的双频 DFB 光纤激光器。该 OPLL 锁定后,将自由运行时 3 kHz 的拍频线宽稳定到了 1 Hz 以下,100 Hz 偏频时的相位噪声为 -75 dBc/Hz ^[48]。2020 年,中国空气动力学研究与发展中心魏春华等人在 ^{87}Rb 原子的冷却与俘获实验中利用数字 OPLL 将两台分别用于产生泵浦光和捕获光的 ECDL 以 6.8 GHz 的固定频差进行了锁定,使得该系统每 7.5 s 可以产生 2×10^6 个凝聚态原子^[49]。2020 年,印度理工学院的 Ashok 等人在相干光链路载波相位恢复与补偿研究中提出了一种基于载波偏置补偿的光学锁相环结构,采用基于互相关器的鉴相器、四能级量化器和相位调制器进行相位补偿,用于实现 8-

PSK(相移键控)相干光链路的同步^[50]。此外,OPLL 在光时分复用(OTDM)、时钟恢复(CR)等领域中也有着非常重要的应用^[51-55]。在相干光通信领域中光学锁相环还发展出了如平衡锁相环、科斯塔斯(Costas)锁相环、决策驱动锁相环、同步位锁相环以及振荡锁相环等多种不同类型,不过相干光通信领域中的这几类光学锁相环通常采用零差工作模式,其应用和研究进展在相关文献中已有详细介绍^[56-57],因此文中不再赘述。

4 结束语

光学锁相环相较于其他激光偏频锁定方法,具有结构简单、锁定精度高等优势,因此得到了越来越广泛的研究和应用。参考激光的线宽和频率稳定性、鉴相器的性能、环路滤波器的参数以及外部频率参考源的频率稳定度等都对光学锁相环的偏频锁定性能有着重要的影响。采用数字鉴相技术的 OPLL 凭借灵活方便、低成本、抗干扰能力强等特点,成为近年来最普遍采用的一种光学锁相环方案。但是采用模拟鉴相技术的 OPLL 由于在噪声抑制和环路传播延迟方面具有一定优势,在某些场合仍有重要作用。基于 FPGA 技术的全数字锁相环适用范围更广,运行速度更快,是光学锁相环今后主要发展趋势。在光路集成的 OPLL 中由于其集成的激光器和光电探测器等部件与传统器件相比在性能和稳定性上还有较大差距,目前仍处于实验阶段,但光路集成 OPLL 是当前集成光子学研究的前沿领域,也是未来光子集成芯片研究的重要组成部分,具有广阔的应用潜力。总的来说,光学锁相环的数字化和集成化是未来研究的重点方向,也是科技发展的必然趋势。

参考文献:

- [1] Li Tianchu, Qian Jin, Zhang Xiaoping, et al. The linear absorption frequency stabilization of 1.5 μm Acetylene ($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$) of DFB-LD at NIM [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2001(3): 161-163. (in Chinese)
- [2] Zhang Jing, Tao Ye, Wei Dong, et al. A laser diode system stabilized on the saturated absorption lines of rubidium atoms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003(2): 197-201. (in Chinese)
- [3] Jin Jie, Zhang Jianwei, Yang Yu, et al. ECDL at 1.5 μm with acetylene saturated-absorption frequency stabilization [J]. *Laser*

- Technology*, 2007, 31(4): 341-343. (in Chinese)
- [4] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Resonator [J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [5] 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]. *Applied Physics B*, 1994, 59(3): 217-256.
- [6] Eisaman M D, Andre A, Massou F, et al. Electromagnetically induced transparency with tunable single-photon pulses [J]. *Nature*, 2005, 438(7069): 837-841.
- [7] Zhao Hui, Pu Zhaobang, Liu Guodong. High precision straightness device based on double-frequency laser interference technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(7): 637-640. (in Chinese)
- [8] Peng Wencui, Zhou Lin, Long Shitong, et al. Locking laser frequency of up to 40GHz offset to a reference with a 10GHz electro-optic modulator [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2998-3001.
- [9] Li Zhiqian, Chen Xi, Zhu Guofang, et al. Modulation-free frequency locking of a laser based on acousto-optic frequency-shifting method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1): 110-114. (in Chinese)
- [10] Hisai Y, Ikeda K, Sakagami H, et al. Evaluation of laser frequency offset locking using an electrical delay line [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(20): 5628-5634.
- [11] Schünemann U, Engler H, Grimmet R, et al. Simple scheme for tunable frequency offset locking of two lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 242-243.
- [12] Li Yun, Bao Xiaoyi, Ravet F, et al. Distributed Brillouin sensor system based on offset locking of two distributed feedback lasers [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(2): 99-102.
- [13] Rutt H N. A heterodyne frequency offset locking technique for pulsed or CW lasers [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1984, 17(8): 704-709.
- [14] Wang Hanmu, Cheng Hong, Zhang Shanshan, et al. Laser frequency offset-locking using electromagnetically induced transparency spectroscopy of ^{85}Rb in magnetic field [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(9): 1-5.
- [15] Ying Kang, Niu Yueping, Chen Dijun, et al. Laser frequency offset locking via tripod-type electromagnetically induced transparency [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(12): 2632-2637.
- [16] Seishu Y, Hasegawa T. Robust offset locking of laser frequency with electronically tunable LC circuits for sub-millihertz uncertainty [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(8): 142.
- [17] Arafat S, Simsek A, Kim S K, et al. Towards chip-scale optical frequency synthesis based on optical heterodyne phase-locked loop [J]. *Opt Express*, 2017, 25(2): 681-695.
- [18] Balakier K, Shams H, Fice M J, et al. Optical phase lock loop as high-quality tuneable filter for optical frequency comb line selection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 36(19): 4646-4654.
- [19] Enloe L H, Rodda J L. Laser phase-locked loop [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(2): 165-166.
- [20] Williams K J, Goldberg L, Esman R D, et al. 6–34 GHz offset phase-locking of Nd: YAG 1319 nm nonplanar ring lasers [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(18): 1242-1243.
- [21] Harrison J, Mooradian A. Linewidth and offset frequency locking of external cavity GaAlAs lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(6): 1152-1155.
- [22] Gliese U, Nielsen T N, Bruun M, et al. Coherent optical generation of a 6 GHz microwave signal with directly phase locked semiconductor DFB lasers[C]// European Microwave Conference, 1992.
- [23] Sternkopf C, Diethold C, Gerhardt U, et al. Heterodyne interferometer laser source with a pair of two phase locked loop coupled He–Ne lasers by 632.8 nm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(7): 1-6.
- [24] Marino A M, Stroud C R. Phase-locked laser system for use in atomic coherence experiments [J]. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79(1): 013104.
- [25] Höckel D, Scholz M, Benson O. A robust phase-locked diode laser system for EIT experiments in cesium [J]. *Applied Physics B*, 2008, 94(3): 429-435.
- [26] Sternkopf C, Goellner S, Manske E. Frequency stabilization of an external-cavity diode laser by offset frequency locking to a stabilized He-Ne laser[C]// SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9134: 91341C.
- [27] Numata K, Chen J R, Wu S T. Precision and fast wavelength tuning of a dynamically phase-locked widely-tunable laser [J]. *Opt Express*, 2012, 20(13): 14234-14243.
- [28] Xu Z, Zhang X, Huang K, et al. A digital optical phase-locked loop for diode lasers based on field programmable gate array [J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83(9): 093104.
- [29] Xu Z, Huang K, Lu X. A digital optical phase-locked loop based on field programmable gate array and its applications[C]// International Conference on Information Science. IEEE, 2014.
- [30] Yao R, Li Q, Xue K, et al. Investigation on offset frequency locking system for a short-pulse laser[C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7382: 77.
- [31] Xie Jiandong, Yan Liping, Chenbenyong, et al. Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(2): 211-219. (in Chinese)
- [32] Balakier K, Fice M J, Ponnampalam L, et al. Monolithically integrated optical phase lock loop for microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3893-

- 3900.
- [33] Lu M, Park H C, Parker J S, et al. A heterodyne optical phase-locked loop for multiple applications[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013, IEEE, 2013.
- [34] Coldren L A, Lu M, Park H C, et al. New Opportunities for Optical Phase-Locked Loops in Coherent Photonics[C]// Optical Fiber Communication Conference & Exposition & the National Fiber Optic Engineers Conference. IEEE, 2013.
- [35] Ristic S, Bhardwaj A, Rodwell M J, et al. An optical phase-locked loop photonic integrated circuit [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 526-538.
- [36] Ristic S, Bhardwaj A, Rodwell M J, et al. Integrated optical phase-locked loop[C]//2009 Conference on Optical Fiber Communication, 2009: 1-3.
- [37] Arafin S, Simsek A, Lu M, et al. Heterodyne locking of a fully integrated optical phase-locked loop with on-chip modulators [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(19): 3745-3748.
- [38] Steed R J, Pozzi F, Fice M J, et al. Monolithically integrated heterodyne optical phase-lock loop with RF XOR phase detector [J]. *Opt Express*, 2011, 19(21): 20048-20053.
- [39] Steed R J, Ponnampalam L, Fice M J, et al. Hybrid integrated optical phase-lock loops for photonic terahertz sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 210-217.
- [40] Lu M, Park H, Bloch E, et al. Highly integrated optical heterodyne phase-locked loop with phase/frequency detection [J]. *Opt Express*, 2012, 20(9): 9736-9741.
- [41] Balakier K, Ponnampalam L, Fice M J, et al. Integrated Semiconductor Laser Optical Phase Lock Loops [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 24(1): 1-12.
- [42] Gliese U, Nielsen T N, Bruun M, et al. A wideband heterodyne optical phase-locked loop for generation of 3-18 GHz microwave carriers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(8): 936-938.
- [43] Santarelli G, Clairon A, Lea S N, et al. Heterodyne optical phase-locking of extended-cavity semiconductor lasers at 9 GHz [J]. *Optics Communications*, 1994, 104(4-6): 339-344.
- [44] Langley L N, Elkin M D, Edge C, et al. Packaged semiconductor laser optical phase-locked loop (OPLL) for photonic generation, processing and transmission of microwave signals [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(7): 1257-1264.
- [45] Wu Kaiyue. Study on nanometer displacement measurement with laser synthetic wavelength interferometer based on offset-frequency locking[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018. (in Chinese)
- [46] Liang W, Yariv A, Kewitsch A, et al. Coherent combining of the output of two semiconductor lasers using optical phase-lock loops [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 370-372.
- [47] Liang W, Satyan N, Yariv A, et al. Coherent power combination of two Master-oscillator-power-amplifier (MOPA) semiconductor lasers using optical phase lock loops [J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 3201-3205.
- [48] Guionie M, Frein L, Carre A, et al. Beat note stabilization in dual-polarization DFB fiber lasers by an optical phase-locked loop [J]. *Opt Express*, 2018, 26(3): 3483-3488.
- [49] Wei Chunhua, Yan Shuhua. Simple and robust method for rapid cooling of ^{87}Rb to quantum degeneracy [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(6): 244-248.
- [50] Ashok R, Ananth G S, Gupta S. Optical phase-locked loop based carrier phase recovery and compensation for 8-PSK coherent optical links[C]//2019 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP). IEEE, 2020.
- [51] Zhu G, Wang Q, Dong H, et al. 80Gb/s clock recovery with phase locked loop based on LiNbO_3 modulators [J]. *Opt Express*, 2004, 12(15): 3488-3492.
- [52] Jhon Y M, Ki H J, Kim S H. Clock recovery from 40 Gbps optical signal with optical phase-locked loop based on a terahertz optical asymmetric demultiplexer [J]. *Optics Communications*, 2003, 220(4-6): 315-319.
- [53] Kim D H, Kim S H, Jo C H, et al. Ultrahigh-speed clock recovery with optical phase lock loop based on four-wave-mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *Optics Communications*, 2000, 182(4-6): 329-334.
- [54] Kim D H, Kim S H, Jo C H, et al. 40 GHz optical PLL based on four-wave-mixing in a semiconductor optical amplifier[C]//1999 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings. LEOS'99. 12th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1999 Annual Meeting (Cat. No.99CH37009), 1999, 1: 347-348.
- [55] Okamura Y, Takada A. Simultaneous carrier extraction from wavelength-division-multiplexed phase-conjugated twin waves by using sum-frequency generation with second-order optical nonlinear medium for phase-sensitive optical amplifier repeaters [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SJ): S1A04.
- [56] Zhao Yi, Tong Shoufeng, Song Yansong, et al. Research progress of optical phase locked loop in space laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 20-28. (in Chinese)
- [57] Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean, et al. Optical phase locked loop in intersatellite coherent optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(4): 25-33. (in Chinese)