



2016 届 硕 士 学 位 论 文

用于原子-光耦合系统的光学  
锁相环的设计

作者姓名	马志军
指导教师	张俊香 教授
学科专业	光 学
研究方向	量子光学
培养单位	量子光学与光量子器件国家重点实验室 山西大学光电研究所
学习年限	2013 年 9 月至 2016 年 6 月

二〇一六年六月



山西大学

2016 届硕士学位论文

# 用于原子-光耦合系统的光学 锁相环的设计

作者姓名	马志军
指导教师	张俊香 教授
学科专业	光 学
研究方向	量子光学
培养单位	量子光学与光量子器件国家重点实验室 山西大学光电研究所
学习年限	2013 年 9 月至 2016 年 6 月

二〇一六年六月

**Thesis for Master's degree, Shanxi University, 2016**

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

Student Name	Zhijun Ma
Supervisor	Prof. Jun-xiang Zhang
Major	Optics
Specialty	Quantum Optics
Department	State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices Institute of Opto-Electronics Shanxi University
Research Duration	2013.09-2016.06

June, 2016

# 目 录

中 文 摘 要.....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言.....	1
1.2 半导体激光器基础介绍.....	2
1.2.1 外腔反馈.....	2
1.2.2 Littrow 外腔反馈结构.....	3
1.2.3 Littman 外腔反馈结构.....	4
1.3 对 ECDL 锁相的可行性分析.....	6
1.3.1 引起 ECDL 频率抖动的因素.....	6
1.3.2 激光锁相的可行性分析.....	6
1.4 论文的主要内容.....	7
<b>第二章 锁相环基础</b> .....	9
2.1 引言.....	9
2.2 锁相环路的基本构成.....	9
2.3 鉴相器.....	10
2.3.1 模拟乘法鉴相器.....	11
2.3.2 异或门鉴相器.....	12
2.3.3 J-K 触发器鉴相器.....	14
2.3.4 鉴频鉴相器.....	17
2.4 小结.....	21
<b>第三章 用于原子-光耦合系统的光学锁相环的设计</b> .....	23
3.1 引言.....	23
3.2 光学锁相环的设计方案.....	24
3.2.1 光学锁相环的设计原理.....	24
3.2.2 外差和零差锁相法.....	25
3.2.3 分频法光学锁相环.....	26

3.3 OPLL 的电路设计 .....	27
3.3.1 ADF41020 的结构和原理 .....	28
3.3.2 基于 ADF41020 的 OPLL 电路设计 .....	30
3.4 OPLL 编程控制的设计 .....	30
3.5 小结 .....	33
第四章 总结与展望 .....	35
参考文献 .....	37
攻读硕士学位期间获得的研究成果 .....	43
致 谢 .....	45
个人简历及联系方式 .....	46
承 诺 书 .....	47
学位论文使用授权声明 .....	48

# Contents

<b>Chinese Abstract</b> .....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>Chapter 1 Overview</b> .....	1
1.1 Introduction .....	1
1.2 Introduction of diode lasers basics .....	2
1.2.1 External cavity feedback structures .....	2
1.2.2 Littrow feedback structure of ECDL .....	3
1.2.3 Littman feedback structure of ECDL .....	4
1.3 The feasibility analysis of ECDL phase-locked .....	6
1.3.1 Factors cause frequency instability of ECDL .....	6
1.3.2 The feasibility analysis of phase-locked of lasers .....	6
1.4 Main contents of this thesis .....	7
<b>Chapter 2 Basics of PLL</b> .....	9
2.1 Introduction .....	9
2.2 Basic structure of PLL .....	9
2.3 Phase discriminators .....	10
2.3.1 Analog multiplication phase discriminators .....	11
2.3.2 XOR gate phase discriminators .....	12
2.3.3 J-K flip-flop phase discriminators .....	14
2.3.4 Phase frequency detectors .....	17
2.4 Summary .....	21
<b>Chapter 3 Design of OPLL for atoms-lights coupling systems</b> .....	23
3.1 Introduction .....	23
3.2 Design schemes of OPLL .....	24
3.2.1 Design principle of OPLL .....	24
3.2.2 Heterodyne and homodyne phase locking methods .....	25
3.2.3 Frequency-dividing OPLL .....	26

3.3 Circuits design of OPLL.....	27
3.3.1 Stucture and operation principle of ADF41020.....	27
3.3.2 Circuits design of OPLL based on ADF41020.....	29
3.4 Design of programming control for OPLL.....	30
3.5 Summary.....	33
<b>Chapter 4 Conclusion and outlook.....</b>	<b>35</b>
<b>References.....</b>	<b>37</b>
<b>Research achievements.....</b>	<b>43</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>45</b>
<b>Personal profiles.....</b>	<b>46</b>
<b>Letter of commitment.....</b>	<b>47</b>
<b>Authorization statement.....</b>	<b>48</b>

## 中文摘要

在量子光学的研究领域，激光的稳频和锁相一直都是实验中的重要技术手段，特别是在光与原子的相互作用等实验中，光场必须耦合在原子的跃迁线上或者附近，以及多光场之间的相干性，或者说光场之间的相位的同步。光学锁相环是激光相位锁定的一种有效方法，它是基于光电探测器、鉴相器以及配套的电路，通过反馈回路控制激光器的电流模块和压电陶瓷扫描模块，使一台激光器的频率（相位）锁定在另一台激光器上。光学锁相环还广泛地应用在引力波探测、原子干涉仪、精密光谱、量子信息等领域。光学锁相环借助现代数字频率合成芯片等技术，便具备了简便性，集成性和自动控制性。

本论文中阐述了一种锁定不同激光器之间频率和相位的光学装置和配套电路。首先对外腔半导体激光器的内部结构和调谐原理进行介绍，从原理上分析了半导体激光器进行相位锁定的可行性，经过分析半导体的注入电流模块和压电陶瓷扫描模块可以作为频率相位调节的反馈接口。然后我们介绍了锁相环的结构和原理，重点分析了鉴相器的鉴频和原理，分别对 J-K 触发器型鉴相器、异或门型鉴相器、鉴频鉴相器分析讨论了鉴相原理和鉴相时序图。我们选用 ADF41020 为鉴频鉴相器，给出光学锁相环的设计结构，通常光学锁相环的方法有外差和分频法两种，综合考虑这两种方法，我们最终选择高频处理部分更为简单的分频法，并且 ADF41020 内部集成了可用软件编程的分频计数器，更加易于控制。我们基于锁相环路芯片 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 4GHz-18GHz。利用 ADF41020 的同步串行接口，我们可以通过单片机等微机对其进行编程控制，最后我们给出了控制的程序。

**关键词：**光学锁相环；鉴频鉴相器；分频法；编程控制



## ABSTRACT

Frequency stabilization and phase locking always play important roles in experiments in the research field of quantum optics. Especially in the experiments of interaction of lights and atoms and so on, the lights must be coupled to the transition lines of atoms or nearby. In addition, the coherence between lasers, in other words, the phase locking of two lasers could affect the results of the experiments. The optical phase locking loop is an effective method to realize phase-locked of lasers. The OPLL is based on photoelectric detectors, phase discriminators and the 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 optical phase-locked loop is also widely used in the gravitational wave detection, atom interferometer, precision spectroscopy, quantum information, etc. With the development of digital electronic technology, the development of optical phase-locked loop also gradually tends to be digital, simplified, and controllable.

The goal of this dissertation is to realize phase locked between two semiconductor lasers. Firstly, we introduced the structures and operation principle of the external cavity semiconductor lasers. The feasibility of phase locked between semiconductor lasers was also analyzed basing on the operation principle. With the analysis, a conclusion was reached that the injection current module and piezoelectric ceramic scanning module could be used as the feedback interfaces for frequency stabilization and phase locking. Then the structure and operation principle of phase lock loop were introduced and we give priority to analyze the working principle of phase discriminators in a PLL. The principle of digital phase detectors were discussed and analyzed by the examples of xor gate phase discriminators, J-K flip-flop phase discriminators, and phase frequency detectors. We chose a discriminator ADF41020 as our phase detector and the structure of optical

phase locked loop was presented. Usually, the optical phase locked loop has two kinds of design methods: heterodyne and frequency division. Considering these two methods synthetically, we finally chose the method of frequency division because of the simpler processing of high frequency parts. Besides, the frequency divider available of software programming is integrated in the internal of ADF41020, which is easier to control. A new OPLL circuit was designed based on the phase locked loop chip ADF41020, and the designed frequency difference range of two lasers to be locked is 4GHz-18GHz. By using the serial peripheral interface of ADF41020, we can control it by using microcontroller for example single chip microcomputer through programming. Finally, we gave the programming procedure.

**Key words:** Optical phase locked loop; Phase frequency detector; Frequency division method; Programming control

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

六十年代出现的红宝石激光器给人类的生产和生活带来了巨大的变革，现在我们身边的大多数高科技产品的出现都直接或者间接得益于激光器的帮助。爱因斯坦在 1917 年基于量子力学的思想提出了光与物质的相互作用理论，即受激辐射和受激吸收，这个理论的出现催生了光放大的设想，后来经过梅曼等人的不断研究和尝试，六十年代激光器终于现世。从获得第一束激光开始，它的优秀的单色性、相干性和方向性便吸引了科学家的目光，从此激光作为新的科学概念和手段，影响了物理等其他理工领域的成长。

长寿命的、能在室温下连续工作的半导体激光器 (Diode Lasers, DL) 出现在 70 年代末<sup>[1-4]</sup>，因此国际上关于半导体激光的稳频和锁相的研究是从 80 年代开始的<sup>[5-9]</sup>。因为半导体激光器具有窄线宽、体积小和寿命长等特点，而被广泛应用到量子光学的实验中，特别是电磁诱导透明<sup>[10-11]</sup>这类光与多能级原子耦合的实验，还有四波混频<sup>[12-13]</sup>等。DL 通过采用电流泵浦 PN 结的方式，这里的泵浦电流在我们后面阐述的稳频和锁相中很关键。外腔半导体激光器(即 ECDL)是目前最为常见的半导体激光器。典型的 ECDL 结构有 Littrow 反馈结构和 Littman 反馈结构，它们的具体介绍会在本文后续给出。除此之外，由于 DL 中的二极管温度敏感元件，因此 DL 的工作温度同样会影响输出波长。基于外腔半导体激光具有以上三个可调谐的输入接口，即注入电流，压电陶瓷 (PZT) 和工作温度，我们可以通过调制控制这三个输入量来实现对半导体激光器输出波长的控制，甚至是实现稳频和锁相的目的。

激光器的锁相研究的想法来源于电子学锁相，同电子学中射频锁相环一样，激光锁相也采用反馈式的相位锁定环路 (Phase-Locked Loop, PLL) 的设计。电子学锁相的概念最早可以追溯到三十年代，电子学锁相环的最初的广泛应用是在四十年代的无线电发射中，用于改善电视接收的同步，提高抗干扰能力。从五十年代开始，由于航天技术方面的需求，锁相的理论和技术得到了极大的推动，之后数字频率合成器的出现更使得锁相环被广泛地应用在工业的各个领域中。激光锁相的思路源于电子学锁相的发展，最早可以追溯到 1965 年<sup>[14]</sup>，L. H. Enloe 等人利用分束器 (BS)、光电倍增管探测器和低通滤波器构成一个简单光学锁相环路，初步实现了两台同频率 He-Ne 激光器的相位锁定，这是 (He-Ne) 激光器锁相的最初尝试。关于 DL 的稳频和锁相实际报道始于八十年代，1990 年 H. R. Telle 等人利用电子学锁相环路(PLL)

实现了两台波长均为 842nm 的半导体激光器的相位锁定研究<sup>[15]</sup>，将两台 DL 的输出经拍频后收集到光电探测器，之后通过反馈回路后分为两路：频率较高的一路信号反馈到半导体激光器的注入电流部分，频率较低的一路信号反馈到半导体腔镜的压电陶瓷上，这种分路反馈的方法可以将得到的误差信号更准确地反馈回激光器，后续的很多类似工作都采用了这种方法，我们设计的光学锁相环装置也采纳此方法。以上介绍的研究都是同频率的 DL 间相位同步，即零差光法<sup>[16-18]</sup>。此外还有外差光学相位锁定的研究，例如 1993 年 G. Santarelli 等人研究了两台频率相差 9.19GHz 的 DL 的相位锁定<sup>[19]</sup>，与零差不同的是，外差相位锁定在获得拍频之后需要再同一个频率为 9.19GHz 的信号进行混频，配合电子学处理反馈回需锁定的激光器。

以上所提到的光学锁相的设计中获得误差信号的方法都是采用模拟电路，随着数字电子技术的发展，如数字鉴频鉴相器（Phase and Frequency Detector, PFD）的出现，为锁相环的设计提供了一种新的办法，数字电路抗干扰性强等优点也同样吸引研究者们把注意力转移到数字电路技术上。1995 年，M. Prevedelli 等人利用数字鉴频鉴相器设计了光学锁相环<sup>[20]</sup>，分别从理论和实验上以数字 PFD 形成的光学锁相环，并和经典的乘法鉴相器进行了对比，得出数字 PFD 更加可靠的结论。之后还有很多利用 PFD 设计的光学锁相环的研究<sup>[21-24]</sup>。

## 1.2 半导体激光器基础介绍

### 1.2.1 外腔反馈

半导体激光器（Diode Lasers, DL）工作理论基础是半导体受激辐射理论，核心工作部分是半导体增益介质，详细的原理可见参考教材<sup>[25-26]</sup>。DL 出现在六十年代，但 ECDL 的研究是从八十年代开始。

ECDL 是指用光栅或高反与激光二极管后表面组成一个腔（即称外腔）。通常光栅因为结构简单，易调谐和效率高等优点，而被广泛应用，我们常见的 ECDL 都是基于光栅的。它的工作原理是，在电流注入激光二极管的 PN 结，热平衡被破坏，导带内的电子和价带里的空穴发生受激辐射，从前表面发出激光，激光二极管输出的激光是多纵模的，为了得到目标单模激光输出，需要将增益带宽内部感兴趣的模式滤去或者叫做模式抑制，使目标模式单模输出，其选模过程可见图 1.1，现在实验室用到的半导体激光器多为商业可调谐 ECDL。典型的外腔设计方案有 Littrow 型和 Littman 型，它们是 ECDL 频率调谐控制的基础，接下来会详细讨论。

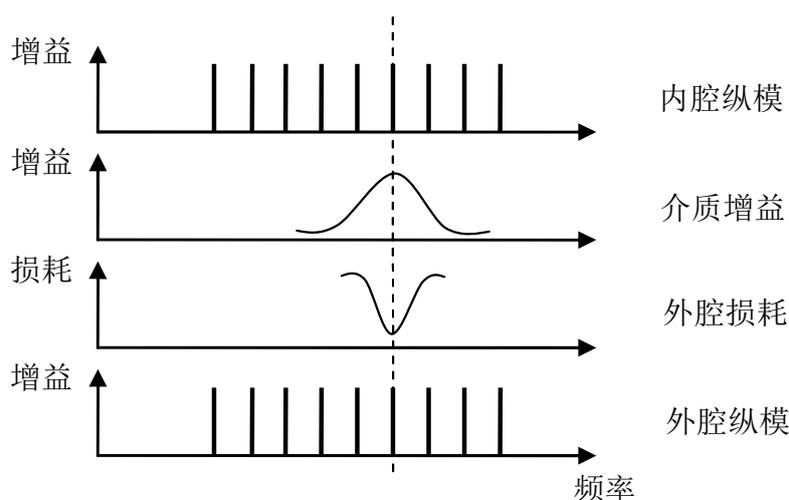


图 1.1 外腔模式选择理想过程

### 1.2.2 Littrow 外腔反馈结构

Littrow 结构由 Otto von Littrow 提出，示意图可见图 1.2。DL 输出的光束在透镜上整形，在光栅上衍射，1 级衍射光原光路返回，与 DL 组成外腔，腔长  $L$ ，0 级光作为输出。按照光栅方程，衍射规律为：

$$a(\sin \vartheta_i + \sin \vartheta_d) = m\lambda \quad (1.1)$$

其中， $a$  是光栅常数， $\vartheta_i$  是入射角， $\vartheta_d$  是衍射角， $m$  是衍射级数，入射角  $\vartheta_i$  与闪耀光栅偏离水平角  $\vartheta_g$  的关系为  $\vartheta_i = 90^\circ - \vartheta_g$ ，我们在图 1.1 中标出了入射角、1 级衍射角和 0 级衍射角分别是  $\vartheta_i$ 、 $\vartheta_{d1}$ 、 $\vartheta_{d0}$ 。考虑 0 级光，将  $m=0$  代入 1.1 式中可以得到，

$$\vartheta_{d0} = -\vartheta_i \quad (1.2)$$

即入射光与 0 级光不在一侧。再考虑 1 级光，我们的目的是使 1 级光返回 LD，即

$$\vartheta_{d1} = \vartheta_i \quad (1.3)$$

按此关系，我们将 1.3 式代入 1.1 式，并使得  $m=1$ ，得到反馈回激光二极管的光波长满足如下的关系式：

$$\lambda_r = 2a \sin \vartheta_i \quad (1.4)$$

此时表明，当光栅常数  $a$  和  $\vartheta_i$  确定的情况下，在外腔共振的光的波长也是一定的，而其他波长的光由于无法返回外腔而损耗很大，因此只有波长为  $\lambda_r$  的激光损耗最小，对应图 1.1 的外腔损耗示意图，故此利用闪耀光栅与激光二极管形成的外腔可以实现选模的目的。通过以上分析我们可以知道，光栅的移动会影响  $\lambda_r$ ，即影响外腔的损耗轮廓，此时需同时改变外腔，否则出现跳模。跳模可以理解为，光栅的位置的改变导致了损耗最低点的蓝移或者红移，如果此时外腔的纵不变，即与损耗轮廓的变

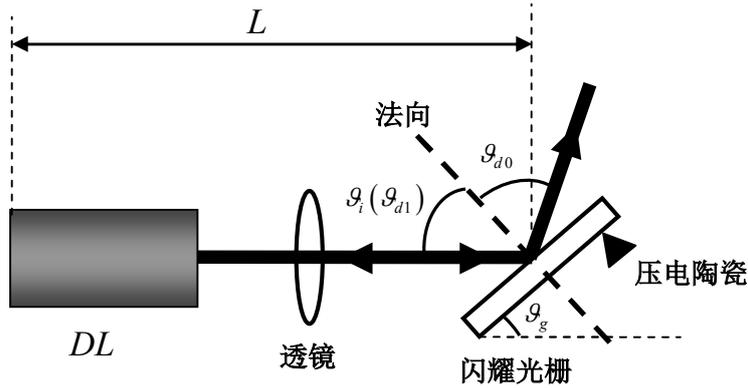


图 1.2 采用 Littrow 结构的 ECDL

化不能保持同步，就会造成跳模。外腔纵模表达式为

$$\lambda_q = 2L/q \quad (1.5)$$

$L$  是外腔的腔长， $q$  是纵模系数，为正整数，由此式可知，改变腔长可以导致外腔纵模的移动。光栅位置的改变方式通常有平移和旋转两种，借助压电陶瓷，或者复杂一点的是平移和旋转的结合，一些文章已经对此研究<sup>[27-28]</sup>。所以我们得出这样一个结果，即通过调制改变光栅位置的压电陶瓷可以实现对激光波长的调谐。

上面讨论的是外腔纵模和外腔损耗对半导体激光输出波长的影响，但要实现最终的激光输出可调谐的目的，还必须考虑图 1.1 中的内腔模式和增益轮廓。半导体介质的增益轮廓是由半导体材料本质决定的，选定一种材质的二极管，它的增益曲线的范围就一定了，而峰值处的增益主要是由注入电流和温度决定的，所以单一的激光二极管如果在温度一定的情况下很难实现调谐。

经过介绍和分析 Littrow 结构，我们来小结一下采用 Littrow 结构的 DL 调谐波长的原理，在图 1.2 中转动光栅或者改变光栅的位置，是通过压电陶瓷来实现的，它的原理是当在压电陶瓷上施加电压后，会随着不同的电压而产生不同的机械形变，相应地改变光栅的角度和位置，由 1.4 式可知这样就可以实现激光波长的调谐。但是通常来说，压电陶瓷的响应频率（即机械振动响应频率）是有限的，一般在 kHz 量级。与此相反，注入激光二极管的电流通常可以达到 MHz 量级，注入的电流可以改变半导体二极管的内腔模式，实现对输出的连续调谐。针对这两者频率的不同，即一个是低频，一个是较高频，这就需要在设计稳频锁相的实际中考虑采用两个通道，即低速通道和快速通道，这两个通道分别借用压电陶瓷的电压输入端和注入电流的输入端，通过输入连续的调制信号来锁定相位。

### 1.2.3 Littman 外腔反馈结构

另外一种外腔反馈结构为 Littman 结构，由 Littman 等人提出<sup>[29-30]</sup>。他们指出，

同样是选用光栅来形成反馈外腔的情况下，如果再增加一个合适的旋转反射镜，也可以改变外腔的腔长和衍射的角度。

从图 1.3 中可以看出，Littman 结构与 Littrow 结构区别在于闪耀光栅是固定不动的，并且增加了一个旋转反射镜。外腔是由 DL，反射镜，以及光栅组成，只不过调谐的部分为反射镜。

图 1.3 中反射镜的移动轴由 Micheal G. Littman 等人给出<sup>[30]</sup>，其中  $L_t = L_0 \sin \vartheta_{dm}$ 。

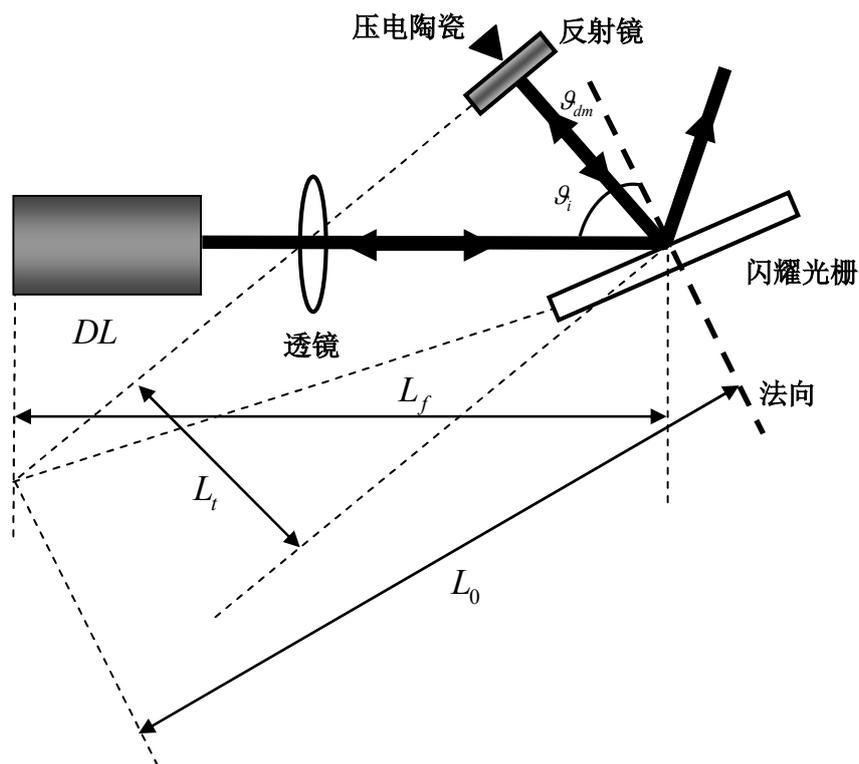


图 1.3 采用 Littman 结构的 ECDL

外腔的纵能够表示成：

$$\lambda_q = 2(L_f + L_t) / q = 2(L_f + L_0 \sin \vartheta_{dm}) / q \quad (1.6)$$

其中  $q$  是正整数的纵模系数，而根据光栅方程，衍射光波长可以表示成：

$$\lambda_r = a(\sin \vartheta_i + \sin \vartheta_{dm}) / m \quad (1.7)$$

比较 1.5 式和 1.6 式，如果使  $\lambda_r$  等于纵模数为  $q$  的外腔纵模，那么就可以利用外腔实现选模的目的，此时应该满足如下的两个关系式：

$$2L_0 / q = a \quad (1.8)$$

$$2L_f / q = a \sin \vartheta_i / m \quad (1.9)$$

Micheal G. Littman 等人指出 Littman 结构与 Littrow 结构相比，反馈引起的损耗轮廓更窄，这样有利于获得线宽更窄的激光输出，但是由于增加了一个旋转反射镜，

它的位置要求精度较高，加大了 Littman 结构的复杂度<sup>[30]</sup>。

通过对 Littman 结构与 Littrow 结构的分析，我们已经得知了外腔半导体激光器的调谐原理，它的内部调谐主要分为三个部分：PZT，电流以及温度。机械调谐的频率较慢，通过 PZT 来实现，属于小信号调制；电流调制和温度调制可以移动半导体介质的增益轮廓，获得更精细的调谐，其中电流调制的频率较大。

### 1.3 对 ECDL 锁相的可行性分析

#### 1.3.1 引起 ECDL 频率抖动的因素

在实验中激光器的频率输出需要在某一特定频率范围内稳定，例如在原子吸收线上，或者在小失谐量附近，然而自由运转的激光器的频率会由于机械振动和温度变化等因素发生频率漂移，这就无法达到一些精密的光学实验的要求，例如原子反射仪，引力波探测和精密光谱测量等领域。同时在量子光学实验中，通常需要两束或者以上的相干光场与原子系统耦合，光场间的相干性会直接影响实验的结果，这就要求激光器之间的锁相，这部分我们首先讨论引起激光器频率不稳定的因素<sup>[31]</sup>：

1. 机械振动，它主要来自建筑的振动，地面的微型晃动，声音的振动通过空气传导，间接改变腔长。机械振动的频率较低，一般在几十赫兹到几万赫兹。
2. 温度变化，DL 对温度反映灵敏，环境温度的抖动和 DL 工作时散发的热量，都会导致频率的抖动。此外温度也会引起腔内光学元件的膨胀和收缩，元件的膨胀系数随材质的不同而不同，例如一般的石英玻璃为  $6 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ，硬质玻璃为  $10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，殷钢为  $9 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ 。所以 ECDL 内部选用石英材质的光学元件，以及殷钢的外壳。
3. 注入电流的稳定度，半导体介质的峰值增益和注入电流是近似线性的关系，不同的电流对应不同的增益，而增益轮廓的峰值对应我们选择的目标模式，注入电流调制的是半导体内部载流子的密度，频率较快，在 MHz 量级。
4. 大气，还有来自地球磁场的地磁效应，会对激光器中的金属部分发生磁致伸缩效应，引起腔长的变化，导致输出频率的改变。

#### 1.3.2 激光锁相的可行性分析

前面的部分我们介绍了 ECDL 的结构和调谐原理，分析了影响激光器输出频率的因素。本文旨在设计一种稳定的光学锁相环，这里的锁相是指两束激光间的相对相位的锁定，即实现两台激光器的相位同步。通过上面的分析，我们知道了 ECDL 拥有三个可调谐频率的选择，即温度，注入电流和 PZT 的电压，我们这里用表格 1.1

来总结一下。

影响因素	调制频率	幅度（灵敏度）	反馈控制途径
温度变化	响应很慢	几十GHz/°C	温度调节模块
机械振动	MHz量级	GHz/mA(压电陶瓷)	压电陶瓷模块
注入电流	GHz量级	几百MHz/mA	注入电流模块

表 1.1 频率抖动的三种外因的比较

因为考虑到温度调制的灵敏度高，调制时易失调，在实际中一般会保持比较稳定的状态，所以在设计光学锁相环使采用了两个反馈通道：注入电流和压电陶瓷电压。本设计总的思路是让两台激光器通过光-电结合的反馈系统，反馈信号的得到可以借鉴电子学锁相环的原理，首先将光转变为电信号，把两束光的相位差信息转变成点相应的电信号，之后利用锁相环得到误差控制信号，此处锁相环中的关键部分相位检测器可以采用 PFD 芯片。在电子学锁相环的基础上完成对两束光的锁相，这样使得此设计的合理性得到保证。

## 1.4 论文的主要内容

本文在分析半导体激光器的结构原理和频率调谐原理的基础上，以电子学锁相环的知识为背景，将其拓展成光学锁相环（OPLL），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，来锁定两台激光的频率和相位。我们介绍了光学锁相环的结构、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，设计锁定频率差的范围为 4GHz-18GHz。论文一共分为四章：

第一章：绪论

以 ECDL 的结构为基础，分析了 Littrow 型和 Littman 型反馈结构的工作原理，及 ECDL 频率调谐的原理，在此基础上分析了 ECDL 可用于相位锁定的可行性。

第二章：锁相环的基本原理

介绍 PLL 的结构，分析 PLL 的工作原理，并对 PLL 中的主要部分-相位检测器(PD)

进行了详细的论证，给出了影响 PD 工作性能的主要因素，以数字型 PD 为例，重点研究了异或门 PD、J-K 触发器 PD 和 PFD 的工作原理。

### 第三章：光学锁相环的设计

通过阐述光学锁相环的主要的两种设计方案：外差法和分频法，给出了我们的设计方案，采用内部集成了可编程分频器和 PFD 的数字频率合成芯片 ADF41020 作为锁相环的鉴相器，并设计了光学锁相环电路，数字鉴相器 ADF41020 可用单片机控制其工作状态，最后给出控制的程序。

### 第四章：总结与展望

## 第二章 锁相环基础

### 2.1 引言

本章我们主要讨论 OPLL 的基础，即电子学 PLL 的构造和鉴相过程。锁相环 (Phase Locked Loop, PLL)，主要用来比较两路信号之间的相位关系，通过相位检测器（也叫鉴相器）产生与相位差对应的误差信号，反馈控制使两者达到同频或者同相。锁相的理论早在上世纪 30 年代就出现了，最早是由 Bellescize 提出的同步检波理论，但是受限制于当时有限的电子技术，锁相电路没有得到普及应用。直到 40 年代和 50 年代，锁相技术被应用到了电视机的同步信号电路中，因为其提高了彩色电视的接收性能才得到广泛的普及。到 60 年代，集成技术的出现加快了锁相环的发展，集成锁相环的成本的降低和其优异的性能使得锁相环在无线通信、国防航天、电视和 IT 等领域被广泛应用。现在的锁相环已经具备了集成化、数字化、可编程等优点，在 IT 行业和工业领域中日渐成熟。

借鉴电子学锁相环的快速发展和成熟的技术，光学领域的研究者们也开始使用锁相环来实现光学中的锁相，光学锁相环的发展也已有很多成熟的经验和优秀的工作，但是由于光学实验的特殊性，特别是在量子光学和原子分子物理领域中，对相干光的要求也不尽相同，各个研究组设计和使用的锁相环都只能在某些特殊的条件下达到要求。与电子学 PLL 相比，光学 PLL 的信号不是电学信号，而是光场，反馈控制激光器，这种将 PLL 用于锁定激光相位的装置，常被称作光学锁相环 (Optical Phase Locked Loop, OPLL)，在后面的章节中我们将会重点讨论 OPLL 的设计。

### 2.2 锁相环路的基本构成

典型的 PLL 如图 2.1，它是由一个相位检测器 (Phase Detector, PD)、一个环路滤波器 (Loop Filter, LF)、一个压控振荡器 (Voltage -Controlled Oscillar, VCO) 和一个参考信号源组成的。这里我们假设参考信号源和 VCO 的相位都是关于时间的函数，分别表示成  $\phi_{\text{ref}}(t)$  和  $\phi_{\text{VCO}}(t)$ ，PD 的输出与两路信号的相位差成比例，

$$V_{PD} = K_{PD} \cdot [\phi_{\text{ref}}(t) - \phi_{\text{VCO}}(t)] \quad (2.1)$$

这里的  $K_{PD}$  是相位探测器的增益因子。

PD 的输出会通过 LF 反馈到 VCO。LF 的功能是过滤掉高频部分，抑制噪声。VCO 频率受直流电压  $V_c(t)$  控制，VCO 产生的频率与中心频率的差是

$$\Delta\omega(t) = K_{VCO} \cdot V_c(t) \quad (2.2)$$

这里的  $K_{VCO}$  是 VCO 的增益因子。VCO 的相位在锁相过程中逐渐朝参考信号的相位靠近，直至相同，即 VCO 输入  $V_C(t)=0$ ，此时其发出的是固定频率的信号。

整个环路是一个负反馈控制系统，VCO 的输出总是朝着减小两路信号差的方向变化，两者频率达到一致时我们称之为锁定。由非锁定状态（失锁）进入锁定状态的过程叫做捕捉过程。在从失锁进入锁定的频率牵引过程中，锁相环路能自行锁定的输入信号的最大频率范围叫做捕捉带；另外，在锁定状态下，环路中 VCO 输出能自动跟踪参考源信号的频率变化，并且能始终保持锁定的最大的变化范围叫做同步带。

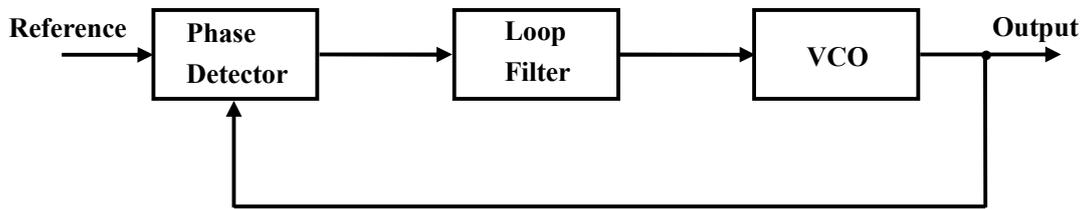


图 2.1 锁相环框图

## 2.3 鉴相器

鉴相器（Phase Detector, PD）在 PLL 中的作用是产生锁定两路信号相位差对应的误差信号。PD 的性能影响 PLL 的工作精度和稳定度。PD 有以下几个主要的性能值：

第一，鉴相灵敏度  $k_d$ 。是指 PD 输出  $V_{PD}$  与输入的相位差  $\Delta\phi$  的关系特性的斜率

$$k_d = \frac{dU_d}{d\Delta\phi} \quad (2.3)$$

通常来说，鉴相曲线的斜率即  $k_d$  越大越好，因为这样可以更加有效地抑制相位噪声和信号中的杂散成分，使锁相环路更加稳定的工作。

第二，输出波纹。也叫做鉴相泄露，是指 PD 的输出不仅包含能反映这两路信号相位差信息的有用信号，还同时带有一些其他的谐波成分和鉴相器噪声，这些不需要的成分虽然会经过滤波器的处理，但是实际情况并不能将其全部滤除，因此这些噪声会对 VCO 的工作造成干扰和错误的引导，从而对锁相环的性能造成直接的影响，这些噪声是由鉴相器直接引入的，因此叫做鉴相泄露，或者鉴相器的输出波纹。在 PD 的选择上，一般要求该值尽可能小。

第三，零点漂移。指当 PD 输入的信号值为零时，理想情况下输出为零，但是经

常会在零点之上出现一个小电压，这个小电压信号就被称作零点漂移。零点漂移是由鉴相器内部电路的不稳定造成的，在选择鉴相器时，通常选择零点漂移尽可能小的鉴相器，保证其对锁相环路的影响达到最小。

第四，电学噪声。凡是电子线路组成的器件都会自带电子学噪声，鉴相器也不例外，这其中包括电阻的热噪声，是由于导体内的电子在不同的温度下总是会无规则的热运动，这种热运动的方向和大小都是随机的，是一种起伏噪声，可能会出现在各个频率分段上，这种连续均匀的噪声谱与白光的光谱类似，因此也叫作白噪声；还有散粒噪声和闪烁噪声等。

PD 的分类，总的可以分为模拟型 PD 和数字型 PD 两大类。模拟型 PD 主要由乘法器构成。数字 PD 又分为：1.异或门型；2. J-K 触发器型；3.鉴频鉴相器 (PFD) 等。

### 2.3.1 模拟乘法鉴相器

通常有两部分组成，如图 2.2。我们假设输入信号  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  互为正弦信号，用下两式表示：

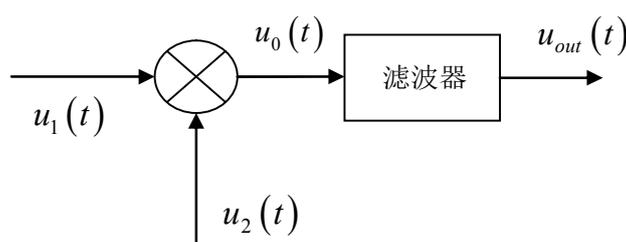


图 2.2 模拟乘法鉴相器的示意图

$$u_1(t) = U_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (2.4)$$

$$u_2(t) = U_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (2.5)$$

这里的  $U_1$  和  $U_2$  是幅度， $\omega_2$  和  $\omega_1$  是频率， $\phi_1$  和  $\phi_2$  是初相位。输出  $u_0(t)$  为两者的乘积，即

$$\begin{aligned} u_0(t) &= K_{PD} u_1(t) \cdot u_2(t) \\ &= K_{PD} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \cos(\omega_2 t + \phi_2) \\ &= \frac{1}{2} K_{PD} U_1 U_2 \left[ \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) + \sin((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$K_{PD}$  是 PD 的增益系数，当经过滤波器时和频部分  $\omega_1 + \omega_2$  被滤去，那么

$$u_{out}(t) = \frac{1}{2} K_{PD} U_1 U_2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)) \quad (2.7)$$

通常情况下两路信号的频率也相同，即  $\omega_1 = \omega_2$ ，那么 2.7 式就变为

$$u_{out} = \frac{1}{2} K_{PD} U_1 U_2 \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.8)$$

得到的此时是不含有时间分量的，即是直流分量的，此处我们假定在某一瞬态它们的相位是个固定值，但相位实际上是随时间变化的量，锁相环的目的就是纠正相位，使相位保持一致。

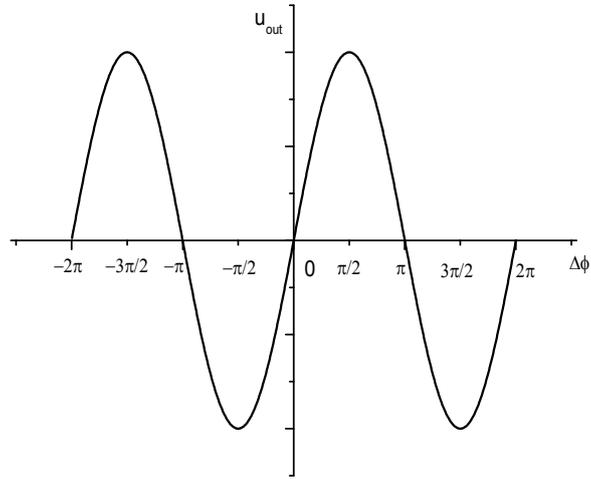


图 2.3 乘法型 PD 的鉴相曲线

图 2.3 是根据 2.8 式画出的乘法型 PD 的鉴相曲线，为正弦型，从该图中我们可以看出它在  $-\frac{\pi}{2}$  到  $\frac{\pi}{2}$  之间是接近线性的，也就是在大于  $-\frac{\pi}{2}$  并且小于  $\frac{\pi}{2}$  的范围内，PD 可以线性地反映出相位差的信息，我们可以认为乘法型 PD 的鉴相范围是小于  $\pi$  的，当然这只是一种不精确的近似说法。

### 2.3.2 异或门鉴相器

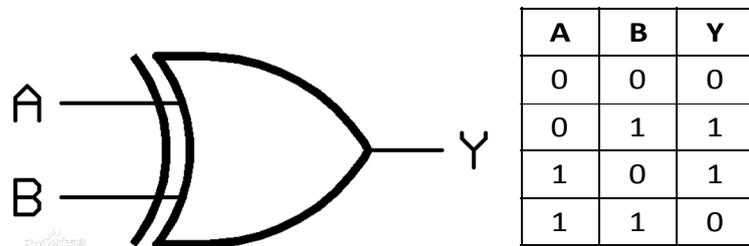


图 2.4 异或门符号及其真值表

数字型 PD 处理的信号类型是方波信号，异或门型 PD (Exclusive-OR Phase Detector, XOR-PD) 就是采用数字逻辑中实现逻辑异或功能的相位检测器，它的符号和真值表如图 2.4。异或门是电平触发，它的逻辑是当输入的信号相异时，输出高电平 1，当输入的信号相同时，则输出低电平 0。对于两路输入同频时，我们可以分三种情况看它的鉴相输出：

第一种情况如图 2.5，当两路同频率的信号的相位保持同不时，鉴相输出为占空比为 0 的信号，即始终为低电平，这个信号转换为模拟信号（直流信号）后依然为 0。

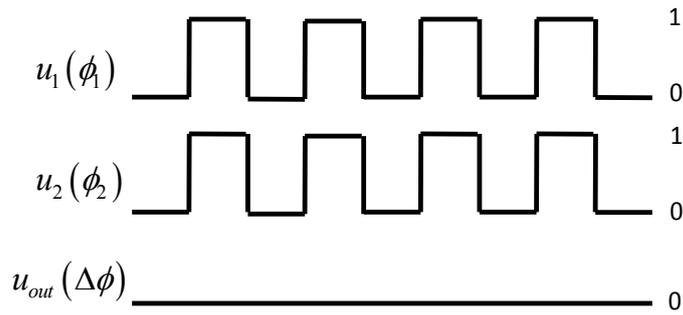


图 2.5 异或门输入相位同步的信号时的输出情况

第二种情况如图 2.6，当两路同频率的信号相位恰好相反时，鉴相输出为占空比为 1 的信号，即始终为高电平，这个信号转换为模拟信号（直流信号）后将达到最大的直流电压。

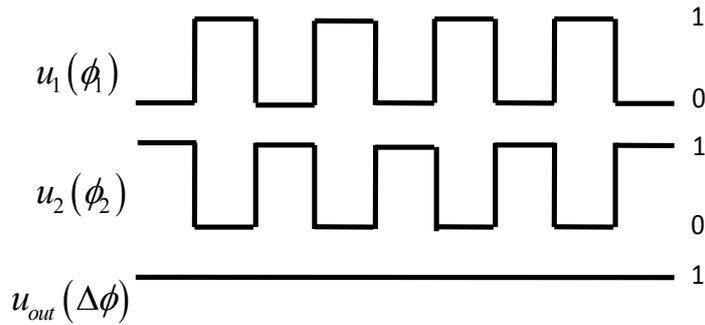


图 2.6 异或门输入相位相反的信号时的输出情况

第三种情况如图 2.7，当两路同频信号之间的相位差为任意的  $\Delta\phi$  时，PD 输出具有一定占空比的信号，这个信号在转换成模拟信号（直流信号）后会对应一定电压的直流信号。

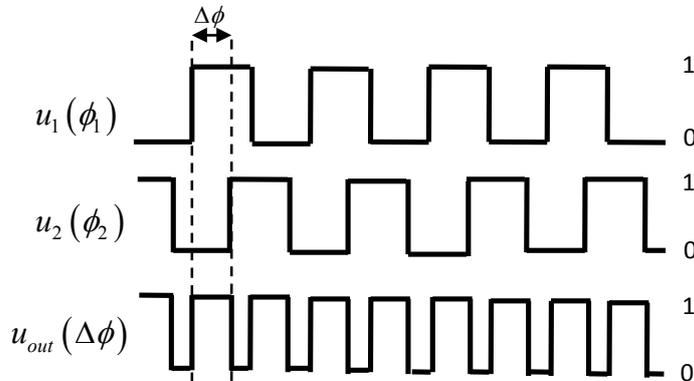


图 2.7 异或门输入具有一定的相位差的信号时的输出情况

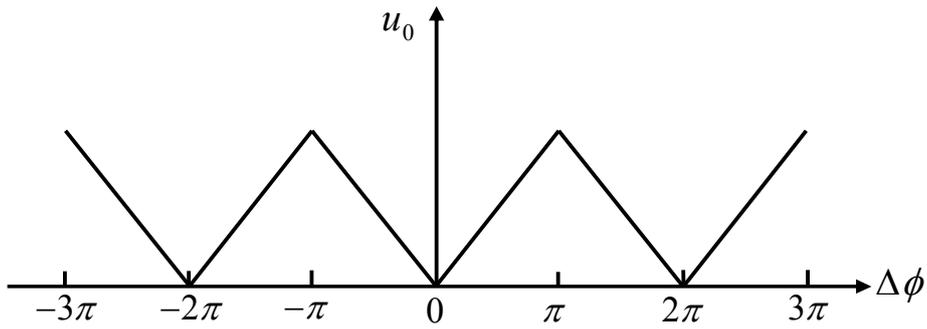


图 2.8 异或门型 PD 的鉴相曲线

通过以上三种情况的讨论，我们可以得知当异或门型 PD 输入的相位差越大时，输出的信号的占空比越大，即对应的直流信号的电压值越大，这个直流电压就作为反馈信号控制 VCO 的输出频率做出改变，直到二者相位同步。图 2.8 是异或门型 PD 的鉴相曲线，从图中可以看出在相位差从 0 到  $\pi$  的范围内，PD 输出是线性的，所以它的鉴相范围就是从 0 到  $\pi$ ，为锯齿状。

### 2.3.3 J-K 触发器鉴相器

这一节我们讨论 J-K 触发器鉴相器，首先有必要介绍一下 J-K 触发器，如图 2.9 是下降沿触发的 J-K 触发器，CP 是时钟输入，J 和 K 可以叫做输入信号， $Q$  和  $\bar{Q}$  是输出，其中  $Q$  是正相输出， $\bar{Q}$  是反相输出， $Q^n$  和  $Q^{n+1}$  分别是现在的输出状态和下一时刻的输出状态。下降沿触发的方式决定了 J-K 触发器只有在时钟信号 CP 由高电平转变为低电平时，输出  $Q$  和  $\bar{Q}$  才会发生状态的变化，其输出可以表示为  $Q^{n+1} = \bar{K}Q_n + J\bar{Q}_n$ ，具体的工作原理是：

1. 当时钟 CP 是低电平 0 和高电平 1 时，触发器为稳定状态，输出  $Q$  不变；
2. 当时钟 CP 由 0 变为 1 时，即上升沿到来时，此时触发器的输出也不会变，但会为接收 J 和 K 信号做好准备；
3. 当时钟 CP 由 1 变为 0 时，即下降沿出现时，假设此时  $J = K = 0$ ，则  $Q$  维持上一时刻的状态；假设此时  $J = 0, K = 1$ ，则  $Q$  会在时钟下降沿出现时马上置 0，相反会马上置 1；假设此时  $J = 1, K = 0$ ，则  $Q$  会在下降沿出现时马上置 1，相反会马上置 0；假设此时  $J = K = 1$ ，则  $Q$  和  $\bar{Q}$  的状态都会在下降沿出现时马上翻转，即 0 变 1, 1 变 0。

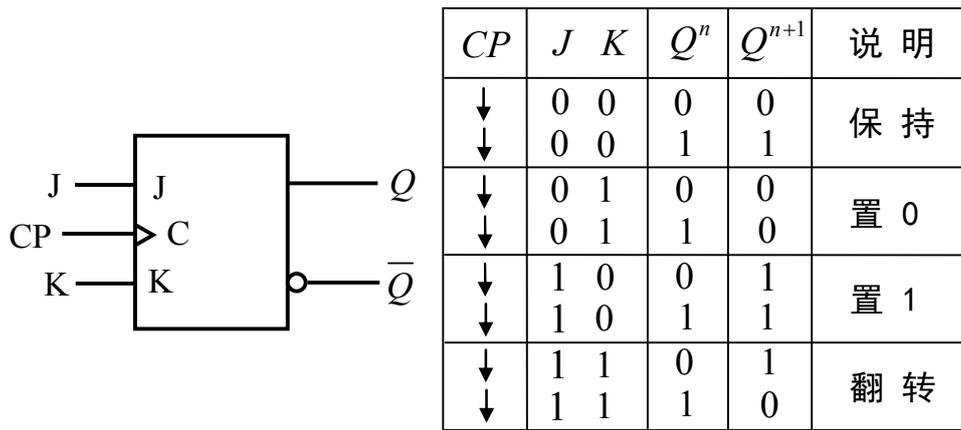


图 2.9 J-K 触发器的图形符号及逻辑真值表

J-K 触发器的时序举例可见图 2.10，图中假设  $Q$  的开始状态为 0。

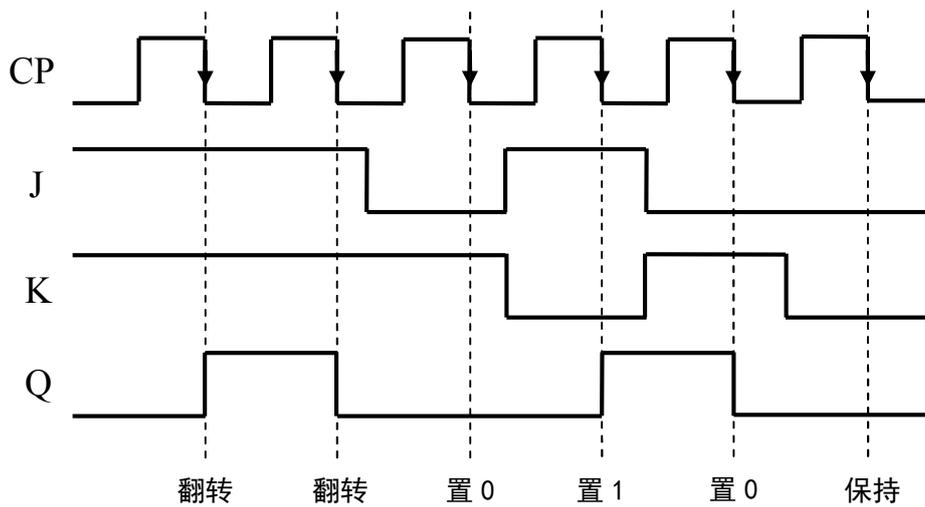


图 2.10 J-K 触发器的工作时序举例

由 J-K 触发器构成的鉴相器的结构如图 2.11，它是由两个触发器和一个与门构成，鉴相输入信号分别进入两个 J-K 触发器的时钟输入端，在输入信号的下降沿到来时会引起鉴相器的输出变化，

$$\text{当 } u_1 \text{ 下降沿到时有 } Q_1^{n+1} = \bar{K}_1 Q_1 + J_1 \bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 Q_1 + \bar{Q}_2 \bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 \quad (2.9)$$

$$\text{当 } u_2 \text{ 下降沿到时有 } Q_2^{n+1} = \bar{K}_2 Q_2 + J_2 \bar{Q}_2 = \bar{Q}_1 Q_2 + \bar{Q}_1 \bar{Q}_2 = \bar{Q}_1 \quad (2.10)$$

$$\text{而鉴相输出为 } u_0 = Q_1 \& Q_2 \quad (2.11)$$

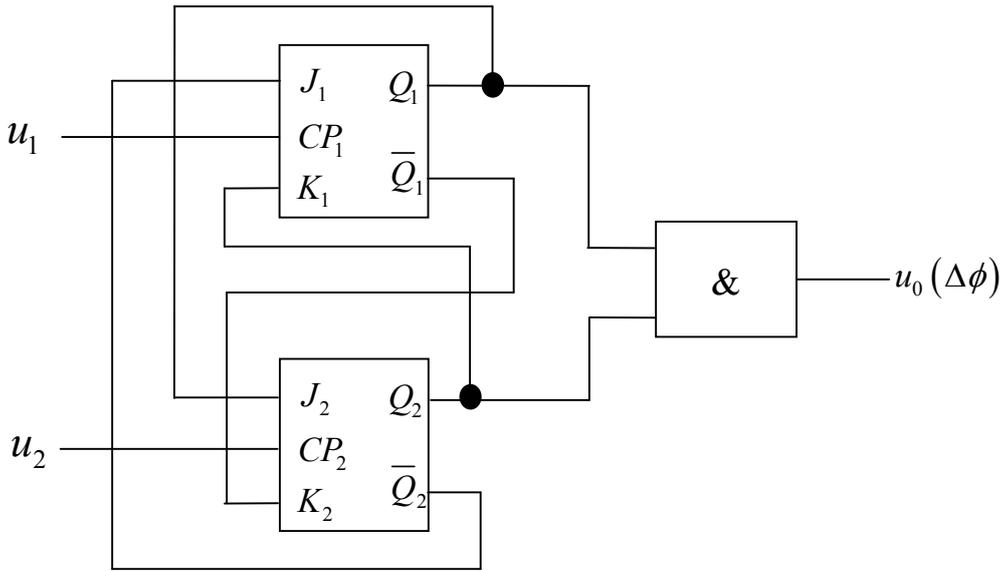
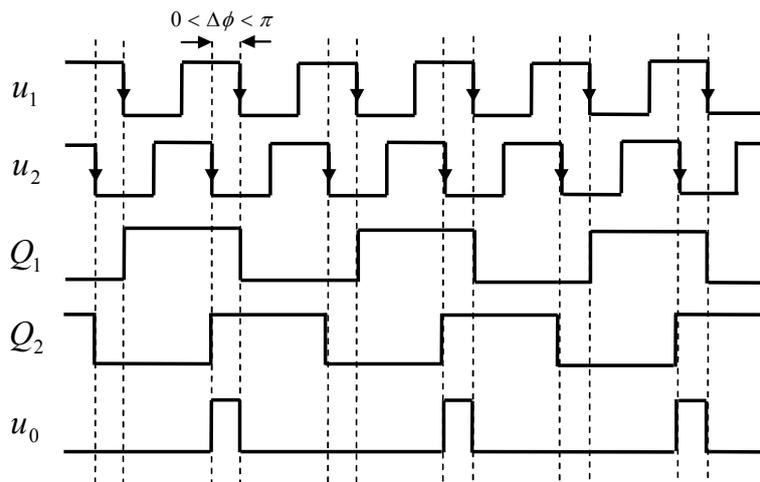
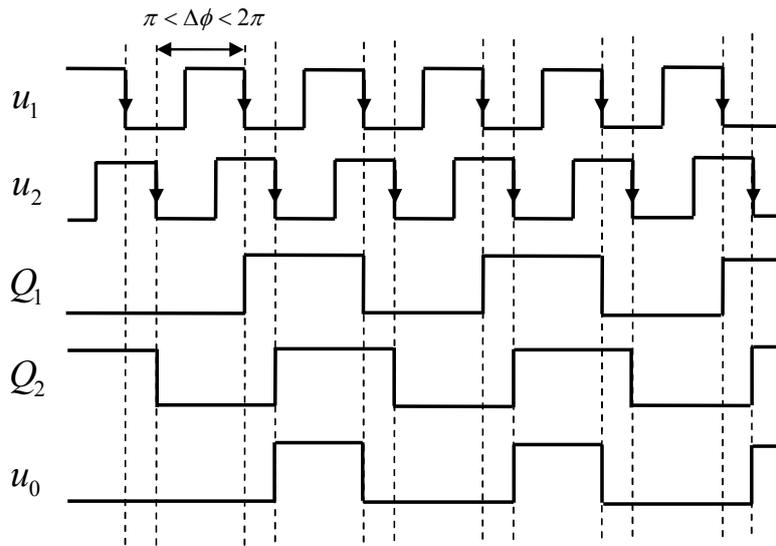


图 2.11 由 J-K 触发器构成的 PD 结构

它的鉴相过程可以通过图 2.12 来说明, 此处我们假设触发器 1 的初始输入为 0, 触发器 2 的初始输入为 1, 分两种情况讨论: 如图 2.12 (a) 中的  $0 < \Delta\phi < \pi$  和图 2.12 (b) 中的  $\pi < \Delta\phi < 2\pi$ 。J-K 触发器型 PD 在  $\Delta\phi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots$  处的鉴相输出是不确定的, 这也可以通过时序图来分析, 例如在 0 点附近,  $\Delta\phi < 0$  和  $\Delta\phi > 0$  时它的鉴相输出是不同的, 我们可以把这些点叫做鉴相器的奇点。它的鉴相范围  $0 < \Delta\phi < 2\pi$ , 同异或门型 PD 相同, 也为锯齿状, 鉴相曲线可见图 2.13。与异或门型 PD 相比, J-K 触发器型 PD 的鉴相范围扩大了一倍, 并且抗干扰能力更高。



(a) 当  $0 < \Delta\phi < \pi$  时的时序图



(b) 当  $\pi < \Delta\phi < 2\pi$  时的时序图  
图 2.12 J-K 触发器型 PD 的时序图

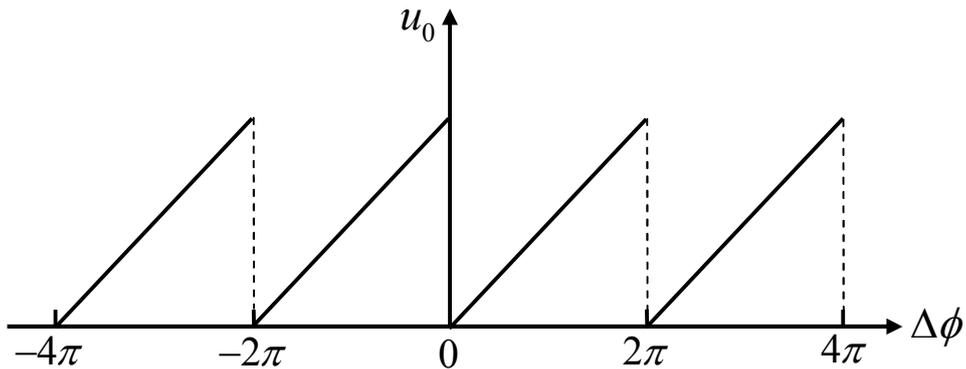


图 2.13 J-K 触发器型 PD 的鉴曲线

### 2.3.4 鉴频鉴相器

现在的 PLL 的设计与研究, 大部分采用的是我们接下来所介绍的 PFD, 图 2.14 是 PFD 的结构图, PFD 经常与电荷泵 (Charge Pump, CP), 滤波器组合在一起, 实现鉴相和控制 VCO 的功能, 它的鉴相部分主要由两个边沿触发异步清零的 D 触发器、一个与门和一个延时模块组成。两个 D 触发器的数据输入端 D1 和 D2 始终接高电平, 两个时钟端分别作为 PD 的输入端, 触发器 1 的输出记做 UP, 触发器 2 的输出记做 DN, D 触发器为上升沿触发。PFD 的输出直接与电荷泵 CP 相连, 图 2.14 中所示的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 分别是高电平时, 场效应管会关闭, 电荷泵内部的电容 (图中未画出) 会完成充电或者放电。

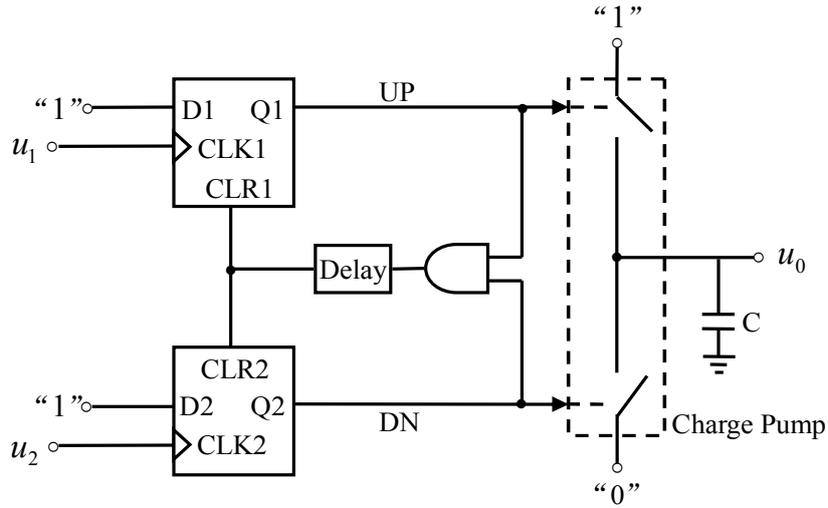


图 2.14 PFD 简化结构示意图

PFD 的输出状态的转变又由输入的脉冲信号的上升沿决定，假设初始时刻  $Q1=Q2=0$ ，可以参见图 2.15，当输入信号  $u_1$  的上升沿出现时，触发器 1 的输出  $Q1$  会在此刻置 1，即 UP 此时为 1，直到输入信号  $u_2$  的上升沿出现时，此时触发器 2 的输出  $Q2$  会置 1，即 DN 此时为 1，并且由于此时 UP 和 DN 都为 1，两者经过与门后为 1，导致此高电平信号会同时激活两个触发器的异步清零端，所以这两个触发器的输出  $Q1$  和  $Q2$  又都马上置 0，以此循环。在这个过程中，UP 和 DN 的状态组合有四种，即 00、01、10、11，但其中当  $UP=DN=1$  时，就会马上触发清零，所以第四种状态被称作不稳定状态，我们将其他三种状态简单记为：

当  $UP=0, DN=0$  时，记为状态 I；

当  $UP=0, DN=1$  时，记为状态 II；

当  $UP=1, DN=0$  时，记为状态 III。

PFD 内触发器的输出通常会与电荷泵，滤波器连接，如图 2.14 中所示。PFD 不仅可以鉴别出相位差的大小，还可以鉴别出相位差的正负符号，这一点可以通过分析 PFD 驱动电荷泵的原理（图 2.16）得知：1.当 PFD 处于状态 III 时，P 沟道的场效应管会打开，而 N 沟道的场效应管会关闭，电荷泵会给电容充电，VCO 会得到一个电压值；2.当 PFD 为状态 II 时，P 沟道的场效应管会关闭，而 N 沟道的场效应管会打开，电容会通过场效应管向接地端放电，VCO 会得到另一个电压值；3. 当 PFD 为状态 I 时，

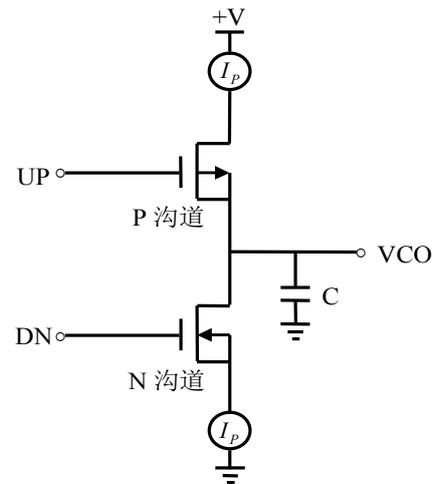


图 2.16 电荷泵的原理图

P 沟道和 N 沟道的场效应管均会关闭，电容和 VCO 的电压值会保持。UP 和 DN 的高电平即反映出了相位差的正负性，具体表现在电容充放电的过程中，流经电荷泵的电流  $I_d$  的方向是不同的，可参见图 2.18。

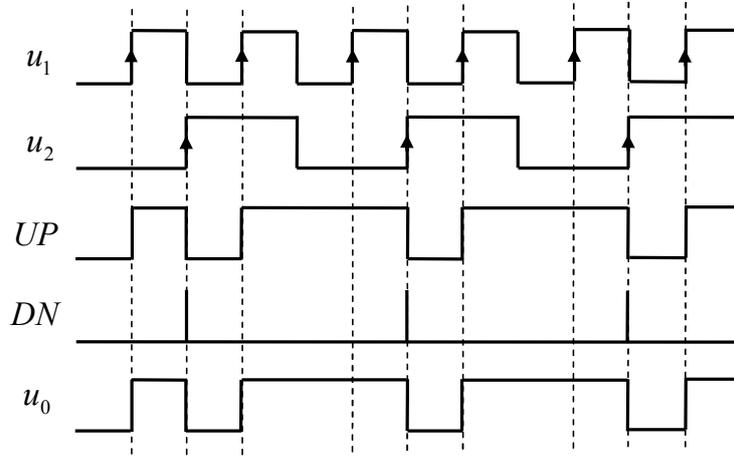


图 2.15 PFD 输入信号的频率不同时的工作时序图

图 2.15 分析的 PFD 输入信号的频率不同时，会得到一个误差信号，表征 PFD 拥有鉴频的能力，当然 PFD 还具有鉴相的能力，如图 2.17 所示，图 (a) 是  $u_1$  相位超前  $u_2$  的相位，图 (b) 是  $u_2$  相位超前  $u_1$  的相位，图中我们画出的  $u_0$  的形式相同，但是根据前段的分析，PFD 可以鉴别出相位差的正负。

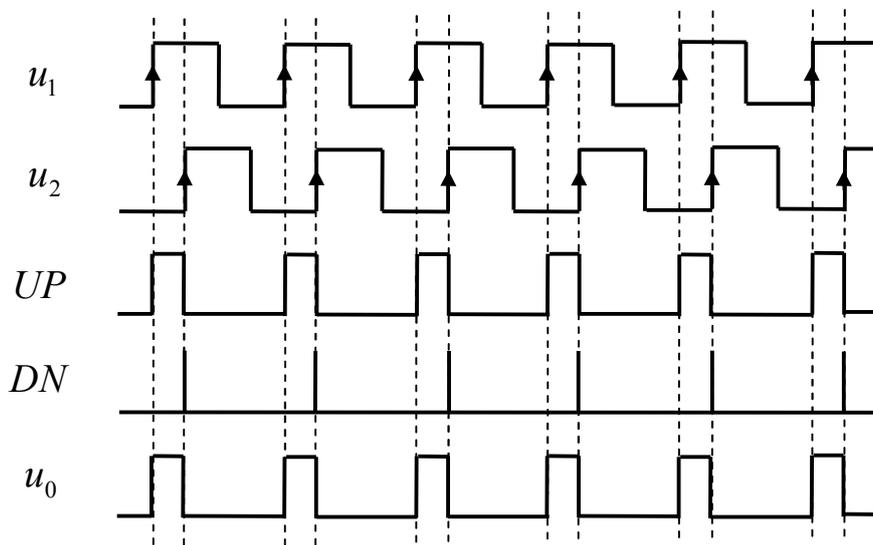


图 (a) 当  $u_1$  相位超前  $u_2$  时的情况

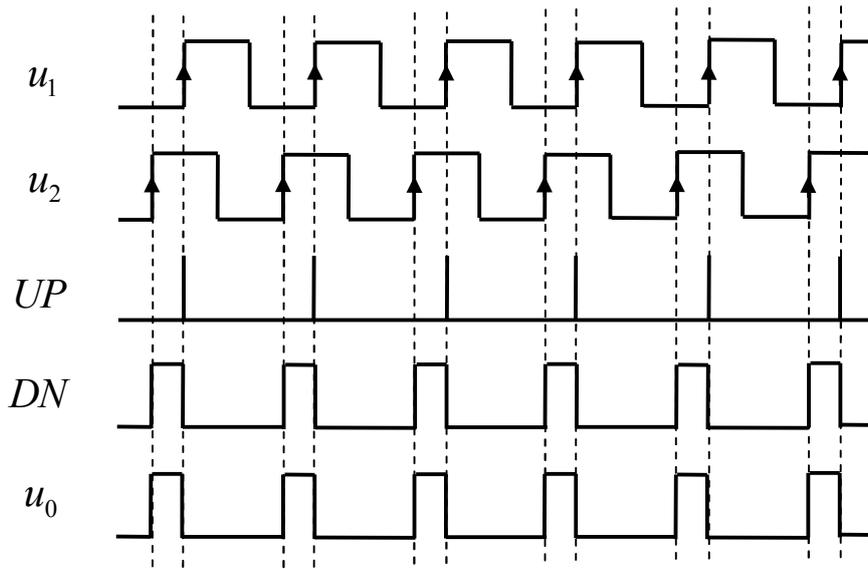


图 (b) 当  $u_2$  相位超前  $u_1$  时的情况

图 2.17 PFD 输入频率相同，但相位不同时的工作时序图

PFD 的鉴相特性曲线可以用图 2.18 表示，在全范围内是线性的，鉴相的范围为  $4\pi$ ，即  $-2\pi < \Delta\phi < 2\pi$ ，是锯齿状，图中  $I_d$  表示在充放电过程中流经电荷泵和电容的电流的大小， $I_d$  的正负反映相位差的正负， $I_d$  的大小反映相位差的大小。另外，当 UP 和 DN 同时处于高电平时，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 2.15 和图 2.17 中的极短暂的毛刺信号，这些毛刺会被延时模块消除，在这里我们不再赘述。

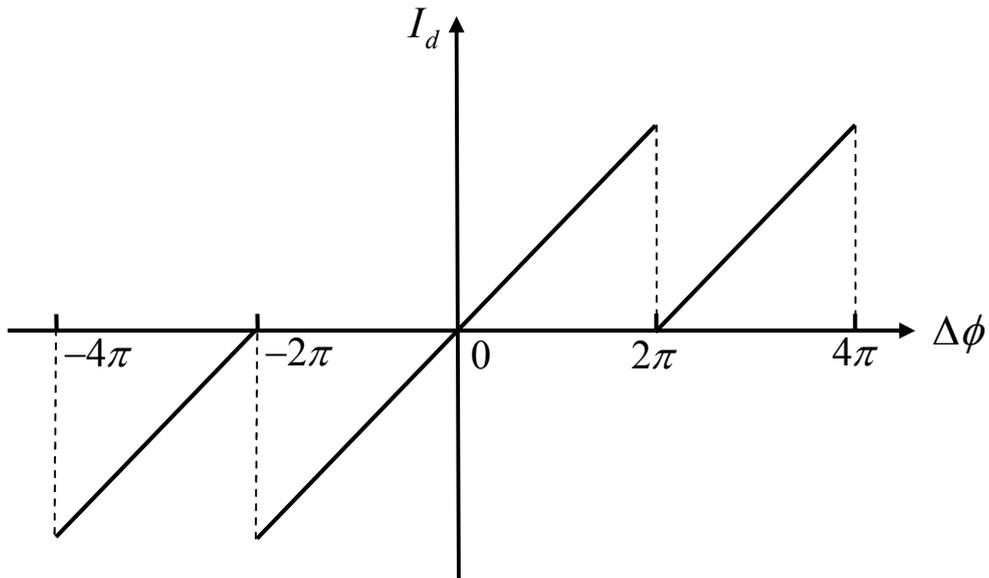


图 2.18 PFD 的鉴相曲线

## 2.4 小结

本章我们从锁相环的结构和原理出发，介绍了锁相环的基本结构和组成部分，并在此基础上分析了锁相环的工作原理，然后重点讨论了锁相环的最重要的组成部分-鉴相器。从 PD 的分类出发，首先介绍了模拟乘法型 PD，分析其工作过程。然后详细讨论了三种数字鉴相器：异或门型 PD、J-K 触发器型 PD 和鉴频鉴相器，分别从它们的结构原理出发分析了工作的原理，以工作时序图为例给出了它们工作的模式，经过比较得到 PFD 线性鉴相范围最大，达到  $4\pi$ ，并且能够检测出相位差的大小和方向。综合以上优点，我们也选用以 PFD 为鉴相器的鉴相芯片 ADF41020 作为我们所设计的光学锁相环的鉴相部分，在下一章中，我们会进行光学锁相环的设计。



## 第三章 用于原子-光耦合系统的光学锁相环的设计

### 3.1 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<sup>[32-33]</sup>和光与原子相互作用<sup>[34-36]</sup>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%<sup>[37]</sup>。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<sup>[38]</sup>。2008年，Alberto M. Marino 小组设计并实现了 ECDL 的相位锁定系统，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<sup>[39]</sup>。2013年，张靖老师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<sup>[40]</sup>。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<sup>[41-43]</sup>。

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<sup>[44]</sup>，这样就能保证两个光场之间的高相干性，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（Rb85 的基态频率分裂差为 3.03GHz<sup>[45]</sup>，Rb87 的基态频率分裂差为 6.83GHz<sup>[46]</sup>，Cs133 的基态频率分裂差为 9.19GHz<sup>[47]</sup>），并且宽带的 AOM 和 EOM 的效率低，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；第二种方法是纯光学的方法--注入锁定半导体激光器<sup>[48-52]</sup>，在一些量子光学实验中，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 DL 的输出功率很低，强制高功率工作时容易出现多模运转，解决此问题的方法把低功率的激光作为种子注入到另一台 DL 中，当两者匹配成功时，这台 DL 的工作频率就会和种子激光器的频率相同，此时即二者锁定；第三种是采用两个独立的光源，利用光电探测器采集拍频信号，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<sup>[53-55]</sup>，此方法易于控制。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，将两束光的拍频锁定到参考信号源上，可输入拍频信号的范围为 4GHz-18GHz。

### 3.2 光学锁相环的设计方案

光学锁相环的设计思路来源于电子学 PLL，同电子学 PLL 相比，它的不同之处在于处理的待同步的两路信号不是电信号，而是光信号，通过将光收集在光电探测器上转换为电信号，再将此电信号进行锁相。此外，锁相环的反馈控制的部分不再是 VCO，而是由激光器代替。经过在第一章的讨论我们反馈控制的是半导体激光器的压电陶瓷模块和电流模块。光学锁相环的设计在其发展史上也出现了几种设计方案：零差法和外差法，以及分频法。

#### 3.2.1 光学锁相环的设计原理

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<sup>[56]</sup>、频率链<sup>[57]</sup>和锁模激光<sup>[58]</sup>等领域。光学锁相环主要包括：PFD，滤波器和激光器。

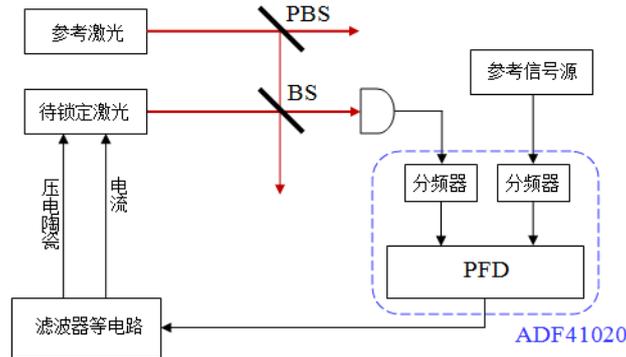


图 3.1 光学锁相环装置图

图 3.1 是 OPLL 的装置原理图，参考激光器通过饱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：

$$E_{ref}(t) = E_{ref} \cos(2\pi\nu_{ref}t + \phi_{ref}) \quad (3.1)$$

$$E_{loc}(t) = E_{loc} \cos(2\pi\nu_{loc}t + \phi_{loc}) \quad (3.2)$$

其中  $E_{ref}$ ， $E_{loc}$  为振幅， $\nu_{ref}$ ， $\nu_{loc}$  为频率， $\phi_{ref}$ ， $\phi_{loc}$  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：

$$\begin{aligned}
A_d &= R_d \left[ E \cos(2\pi\nu_{ref}t) + E \cos(2\pi\nu_{loc}t) \right]^2 \\
&= R_d E^2 \left[ \cos^2(2\pi\nu_{ref}t) + \cos^2(2\pi\nu_{loc}t) + 2 \cos(2\pi\nu_{ref}t) \cos(2\pi\nu_{loc}t) \right] \\
&= R_d E^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos(4\pi\nu_{ref}t) + \frac{1}{2} \cos(4\pi\nu_{loc}t) + \cos(2\pi t(\nu_{ref} + \nu_{loc})) + \cos(2\pi t(\nu_{ref} - \nu_{loc})) \right]
\end{aligned} \tag{3.3}$$

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大，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，所以式 3.3 可以简化为：

$$A_d = R_d E^2 \left[ 1 + \cos(2\pi t(\nu_{ref} - \nu_{loc})) \right] \tag{3.4}$$

若将参考激光器锁定在固定频率上，即认为  $\nu_{ref}$  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。将得到的拍频信号和参考信号源产生的信号同时送入到 ADF41020（图 1 中的蓝色虚线框部分）中，ADF41020 内部集成了分频器和 PFD 等功能部分。我们这里所采用的是分频法的锁相方法，在提到分频法锁相的时候，有必要介绍几种光学锁相的方法：外差和零差锁相法，分频锁相法。

### 3.2.2 外差和零差锁相法

我们这里所讨论锁相方法的分类是基于处理两光的拍频的方法，在实验的具体操作中，特别是在光与原子相互作用的实验中，需要锁定的两束光的频率差通常是与原子跃迁频率相关的，例如前面所提到的 Rb85 的基态频率分裂差为 3.03GHz，Rb87 的基态频率分裂差为 6.83GHz，Cs133 的基态频率分裂差为 9.19GHz，我们需要把拍频频率为几个 GHz 的信号与参考信号进行鉴频鉴相，但是几乎所有的鉴相器输入频率的范围不会达到这样大的频率，即无法工作。这就需要一些处理，想办法把频率变小，即下转换，使之达到鉴相器的工作范围（通常最大在 100MHz 左右）。外差法就是早先出现的常用方法，而所谓的零差法实际指两束频率相同的激光的相位锁定，这在光学锁相的发展史上也有相关研究。如图 3.2 是零差法光学锁相环的结构示意图，图 3.3 是外差法光学锁相环的结构示意图。

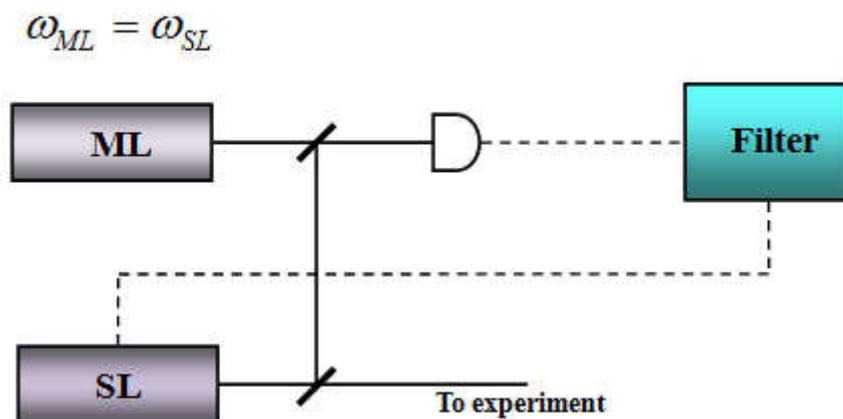


图 3.2 零差法光学锁相环的结构

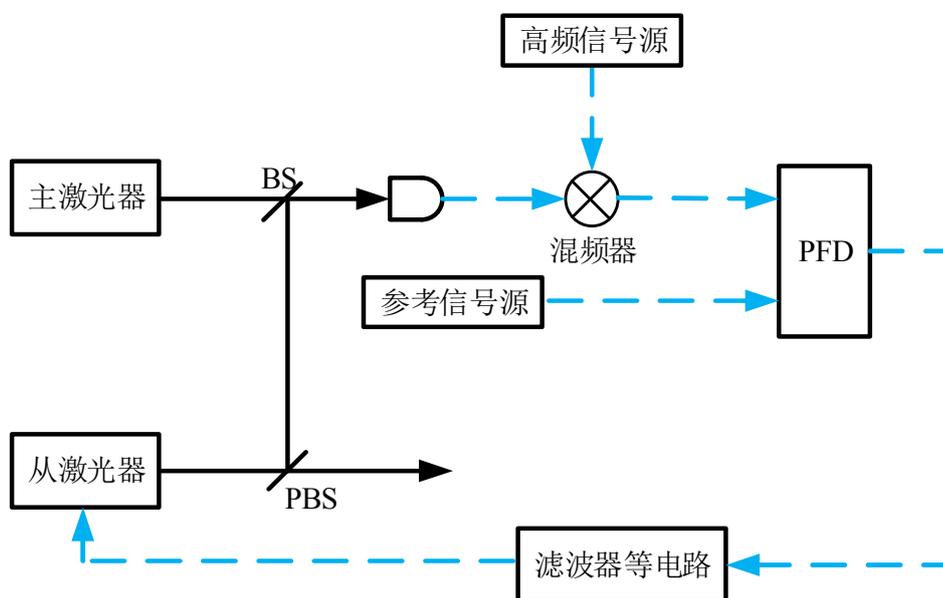


图 3.3 外差法光学锁相环的结构

外差法也被称之为频率转移法，就是通过混频器等元件使拍频信号与高频信号源产生的参考信号进行混频，下转换，其实两束激光器进行拍频也是进行下转换，毕竟如果我们把将两束激光进行鉴频，同样由于工作频率问题，也是行不通的。故通常大家的做法都是通过拍频之后，使用外差或者分频的办法，使拍频信号与参考信号进行鉴相。外差法的缺点是需要一个高稳定的高频信号源作为下转换的信号源，而高频信号源的价格十分昂贵，另外高频的信号在实际制作电路的时候考虑因素较多。

### 3.2.3 分频法光学锁相环

以上分析外差法还是存在一些缺点，另外一种将频率下转换的方法就是分频法，如图 3.4 简单来说就是将两束激光的拍频信号在进入 PFD 之前进行分频，通过分频

器实现此功能,有些鉴相芯片内部会集成分频器,例如我们设计中用到的 ADF41020,而且它的分频比可以通过编程控制。图 3.4 就是 ADF41020 在分频和鉴相的结构流程图。图中的 RF 表示输入的拍频信号, Reference 表示参考信号, R 和 N 分别为它们的分频比。

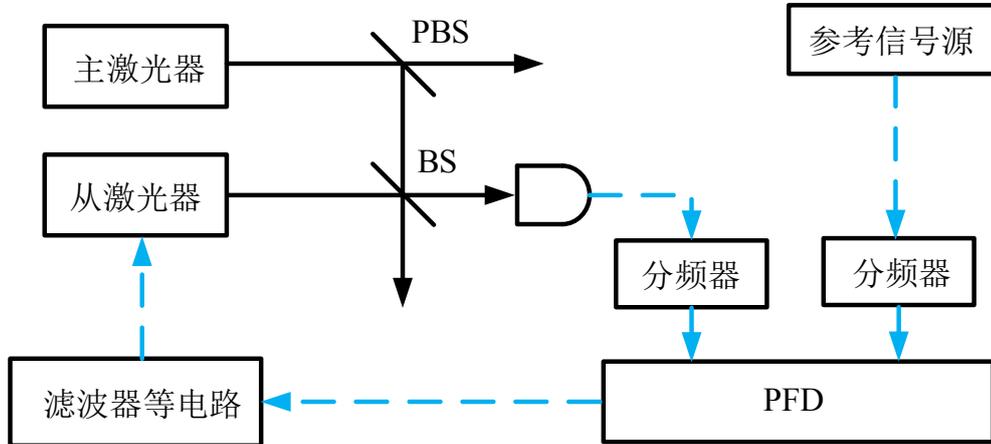


图 3.4 (a) 分频法光学锁相环的结构

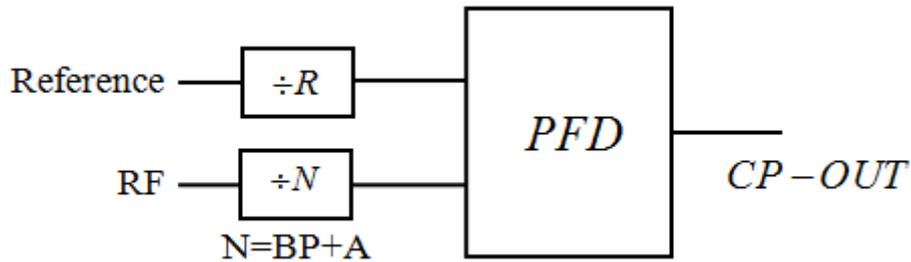


图 3.4 (b) ADF41020 分频后进入 PFD 的示意图

### 3.3 OPLL 的电路设计

本文选用的锁相环芯片是美国 ADI 公司的 ADF41020 的微波锁相环频率合成器,它是由低噪声的数字鉴频鉴相器 (PFD)、电荷泵和可编程的分频器组成,并且拥有频率可达 18GHz 的 RF 输入端口。ADI 公司现在拥有同系列 ADF4106、ADF4107、ADF4108 和 ADF41020,它们的主要差别在于射频输入的频率范围不同,其中 ADF4106 为 0.5GHz-6GHz, ADF4107 为 1GHz-7GHz, ADF4108 为 1GHz-8GHz, ADF41020 为 4GHz-18GHz。我们本文的设计选用的是输入频率范围最大的 ADF41020。

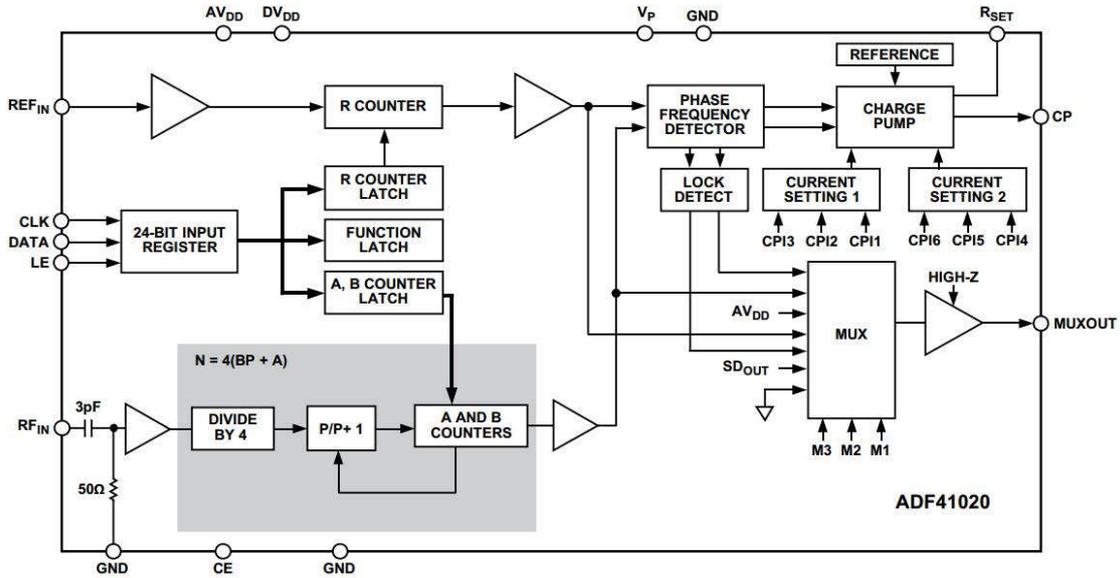


图 3.5 ADF41020 内部结构图

### 3.3.1 ADF41020 的结构和原理

图 3.5 是它的内部结构图（摘自芯片资料），它的内部主要包含以下几个部分：

#### 1. N 分频器

我们这里将芯片的 RF 输入端（即我们设计中的拍频信号的输入端）的分频器叫做 N 分频器，它主要由两部分组成：预分频器和计数器，图可见 3.6(摘自芯片资料)。其中预分频器为双预分频器，这是它与同系列芯片的不同，通过内部多集成一个固定分频比为 4 的预分频器来实现高达 18GHz 的工作频率，第二个预分频器以 4 分频器的输出作为输入，实现双模预分频器 (P/P+1)。预分频器之后是计数器 A 和 B，这样通过双预分频器和计数器 A 和 B 实现大分频比，分频比为：

$$N=4(BP+A) \tag{3.5}$$

其中 A 是二进制 6 位计数器的预设值，其可设分频比为 0 到 63；B 是二进制 13 位计数器的预设值，其可设分频比为 2 到 8191, 且 B 必须大于 A；P 是双模预分频器的预设模式数，其可设置为 8/9、16/17、32/33、64/65。这些数值的设置都是可以通过软件编程来完成。

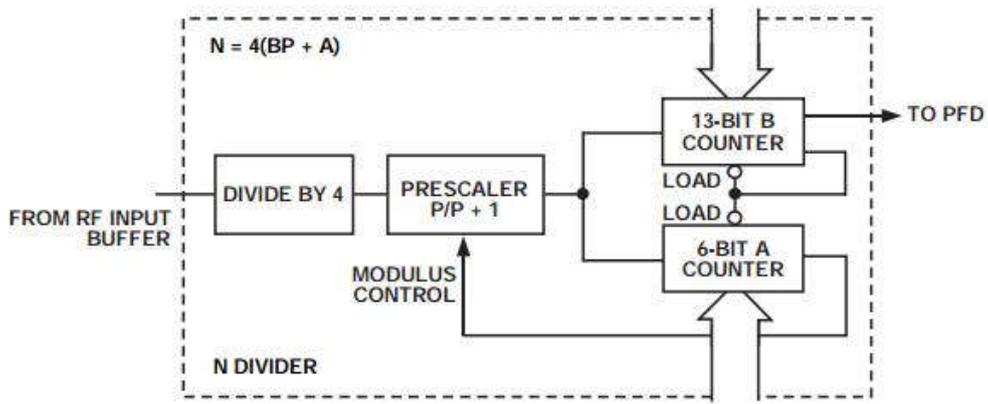


图 3.6 由双预分频器、计数器 A 和 B 组成的 N 分频器的结构示意图

## 2. R 分频器

参考信号的输入端即芯片的 REF 输入端，它的分频器我们称之为 R 分频器，主要是通过一个 14 位的二进制计数器实现，可分频比为 1 到 16383。

## 3. PFD

鉴频鉴相器 PFD 以 N 分频器和 R 分频器的输出为输入，产生与二者的频率和相位差成正比的输出。PFD 的工作原理已在第二章中详细分析，这里不再赘述。

## 4. 输入移位寄存器

ADF41020 拥有一个 24 位的移位寄存器，它是数字编程控制的输入端口，编程控制数据先会写进这个 24 位的移位寄存器，数据在 CLK 的每个上升沿时逐个输入 24 位移位寄存器。数据输入方式是高位优先 (MSB)。在 LE 上升沿到来时，数据从移位寄存器传输到三个锁存器 (R 计数器、N 计数器、函数锁存器) 之一，目标由 24 位移位寄存器中的两个控制位 (C1 和 C2) 的状态决定，如表 3.1。

控制位		数据锁存器
C2	C1	
0	0	R 计数器
0	1	N 计数器 (A 和 B)
1	0	函数锁存器 (包括预分频器)

表 3.1 C1 和 C2 控制真值表

### 3.3.2 基于 ADF41020 的 OPLL 电路设计

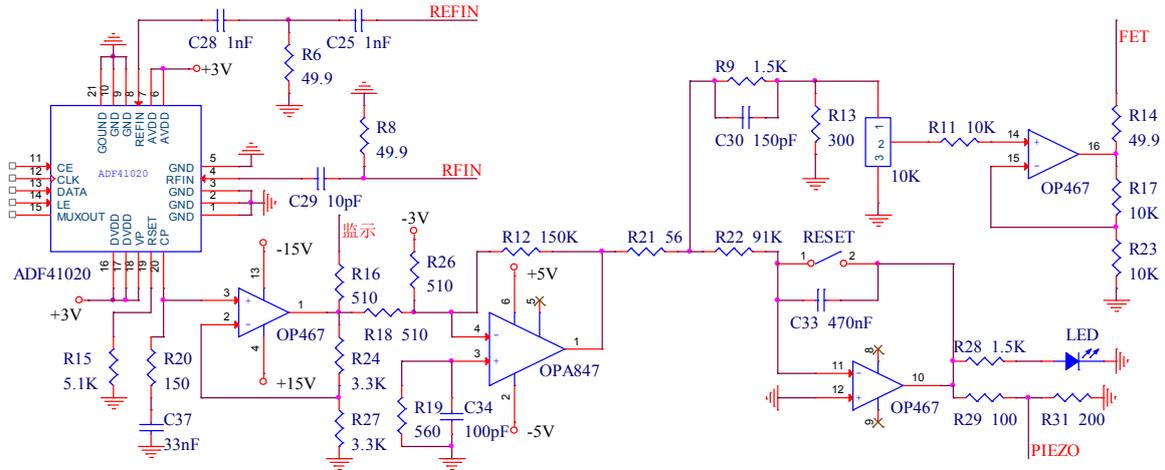


图 3.7 OPLL 电路原理图

图 3.7 是我们设计的 OPLL 电路原理图，采用 ADF41020 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 1.8V 和 3V 兼容的 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。

### 3.4 OPLL 编程控制的设计

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。

我们设计使用的单片机是 ATmega128A, 程序的主要部分如下:

```
#include<math.h>
#include<reg51.h>
#include<stdio.h>
设置单片机的输出端口
sbit LE=P1^5;           //定义单片机端口 P1.5 输出 LE 信号
sbit DATA=P1^6;       //定义单片机端口 P1.6 输出数据 DATA 信号
sbit CLK=P1^7;         //定义单片机端口 P1.7 输出时钟信号
void delay(int);
void main()
{
unsigned long int register0,register1,register2,register3,temp1;
int i;
register1=0xN1;         //功能锁存器
register2=0xN2;         //R 锁存器
register3=0xN3;         //N 锁存器  N1、N2、N3 都是 6 位的十六进制数
temp1=0x800000;
//单片机输出初始化
CLK=1;                 //时钟信号输出
DATA=0;                 //数据信号初始输出为 0
LE=0;                   //LE 首先下拉
//单片机将数据通过移位寄存器送入 ADF41020 中的函数锁存器中
for(i=0;i<24;i++)
{
if((temp1&register1)==0x0)
DATA=0;
```

```

else
    DATA=1;
CLK=0;
delay(100);
CLK=1;
delay(100);
temp1=temp1>>1;
}
temp1=0x800000;
LE=1;
delay(1000);
LE=0;
//单片机将数据通过移位寄存器送入 ADF41020 中的 R 计数器中
for(i=0;i<24;i++)
{
    if((temp1&register2)==0x0)
        DATA=0;
    else
        DATA=1;
    CLK=0;
    delay(100);
    CLK=1;
    delay(100);
    temp1=temp1>>1;
}
temp1=0x800000;
LE=1;
delay(1000);
LE=0;
//单片机将数据通过移位寄存器送入 ADF41020 中的 N 计数器中
for(i=0;i<24;i++)

```

```
{
  if((temp1&register3)==0x0)
    DATA=0;
  else
    DATA=1;
  CLK=0;
  delay(100);
  CLK=1;
  delay(100);
  temp1=temp1>>1;
}
temp1=0x800000;
LE=1;
while(1);
}
//延时函数
void delay(int length)
{
while(length>=0)
  length--;
}
```

### 3.5 小结

通过介绍光学锁相环的主要的两类设计方案：外差法和分频法，给出了我们的设计方案，采用内部集成了分频器和 PFD 的数字频率合成芯片 ADF41020 作为锁相环的鉴相器，并给出了光学锁相环电路，数字鉴相器 ADF41020 可用单片机控制其工作状态，最后给出控制的程序。



## 第四章 总结与展望

本文介绍和分析了光学锁相环的基本原理,提出了基于 18GHz 频率鉴相器 ADF41020 的光学设计方案,该方案是以电子学锁相环为基础,针对光学领域的特点,在第一章中通过研究半导体激光器的结构和工作原理,光场的相位信息等特点,分析了激光器稳频和调谐的原理,我们得到外腔半导体激光器可以用于频率和相位调谐的三个接口,即温度、压电陶瓷和注入电流,并以此为基础分析了半导体激光器可用于相位锁定的可行性。

第二章从物理的原理出发,以数字鉴相器,特别是鉴频鉴相器(PFD)为例,详细讨论了两束激光实现相位锁定的物理过程。以 PFD 作为鉴相器可以线性地得到两束激光相位的误差信号,其线性的鉴相范围为  $4\pi$ 。

第三章我们通过介绍和分析了用于光学锁相环的常见的两种设计方案,即外差法和分频法,鉴于分频法对高频信号的处理更为简单,所以我们设计也采用了分频法作为整体设计思路,并且选用内部集成了分频器和 PFD 的频率合成芯片 ADF41020 作为鉴相器,围绕 ADF41020 设计了锁相环的电路,ADF41020 的分频比可用单片机等微型控制器进行编程控制,给出了用于控制的程序。

光学锁相环作为量子光学等领域的重要技术手段,其研究具有实用和潜在的价值。本文给出了一种可锁定频率差 4GHz-18GHz 的光学锁相环路,该锁频范围覆盖了铷原子和铯原子的基频分裂差,使用软件编程等手段可控制其工作的频率。目前该设计的电路设计,绘图,制板的工作已经完成,下一步的工作就是使用该装置锁定两台商业半导体激光器的相位。



## 参考文献

- [1] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, *et al.* Coherent Light Emission From GaAs Junctions [J]. *Phys Rev Lett*, 1962, **9**(9): 366~368
- [2] M. I. Nathan, W. P. Dumke, Geral Burns, *et al.* Stimulated Emission of Radiation from GaAs PN Junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 1962, **1**(3): 62~64
- [3] T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, *et al.* Semiconductor Maser of GaAs [J]. *Applied Physics Letters*, 1962, **1**(4): 91~92
- [4] N. Holoyk JR, S. F. Bevacqua. Coherent (Visible) Light Emission From Ga(As-xPx) Junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 1962, **1**(4): 82~83
- [5] B. Dahmani, L. Hollberg, and R. Drullinger. Frequency Stabilisation of Semiconductor lasers by resonant optical feedback [J]. *Optics Letters*, 1987, **12**(11): 876~878
- [6] H. Li, H. R. Telle. Efficient Frequency Noise Reduction of GaAlAs Semiconductor Lasers by Optical Feedback From an External High Finesse Resonator [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1989, **25**(3): 257~264
- [7] Motoichi Ohtsu. Frequency Stabilization in Semiconductor Lasers [J]. *Optical Quantum Electron*, 1988, **20**(4): 283~300
- [8] H. Li, N. B. Abraham. Analysis of the Noise Spectra of a Laser Diode with Optical Feedback From a High-Finesse Resonator [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1989, **25**(8):1782~1793
- [9] H. Olesen, G. Jacobsen. A Theoretical and Experimental Analysis of Modulated Lasers Fields and Spectra [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1982, **18**(12): 2069~2080
- [10] Junxiang Zhang, Jin Cai, Yunfei Bai, *et al.* Optimization of the Noise Property of Delayed Light in Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Physical Review A*, 2007, **76**(3): 033814-1~033814-6
- [11] Yuan Li, Zhonghua Li, Dan Wang, *et al.* Manipulation of Squeezed State in Electromagnetically Induced Transparency System via Dynamic Stark Effect [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, **29**(11): 3177~3182
- [12] Haitao Zhou, Dawei Wang, Dan Wang, *et al.* Efficient Reflection via Four-Wave Mixing in a Doppler-Free Electromagnetically Induced Transparency Gas System [J]. *Physical Review A*, 2011, **84**(5): 053835-1~053835-6

- [13] Haitao Zhou, Dan Wang, Miaojun, Guo, *et al.* Controllable Optical Mirror of Cesium Atoms with Four-Wave Mixing [J]. *China Physics B*, 2014, **23**(9): 093204-1~093204-6
- [14] L. H. Enloe, J. L. Rodda. Lasers Phase-Locked Loop [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, **53**(2): 165~166
- [15] H. R. Telle, H. Li. Phase-Locking of Laser Diodes [J]. *Electronics Letters*, 1990, **26**(13): 858~859
- [16] L. G. Kazovsky, D. A. Atlas. A 1320-nm Experimental Optical Phase-Locked Loop: Performance Investigation and PSK Homodyne Experiments at 140 Mb/s and 2Gb/s [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, **8**(9): 1414~1425
- [17] L. G. Kazovsky. Balanced Phase-Locked Loops for Optical Homodyne Receivers: Performance Analysis, Design Considerations, and Laser Linewidth Requirements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, **LT-4**(2): 182~195
- [18] Chul-Ho Shin and Motoichi Ohtsu. Homodyne Optical Phase Locking of Resonant Cavity Coupled Semiconductor Lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1993, **29**(2): 374~385
- [19] G. Santarelli, A. Clairon, S. N. Lea, *et al.* Heterodyne Optical Phase-Locking of extended-Cavity Semiconductor Lasers at 9 GHz [J]. *Optics Communications*, 1994, **104**(4-6): 339~344
- [20] M. Prevedelli, T. Freegarde, T. W. Hänsch. Phase Locking of Grating-Tuned Diode Lasers [J]. *Applied Physics B*, 1995, **60**: S241~S248
- [21] L. Cacciapuoti, M. de Angelis, M. Fattori, *et al.* Analogy + Digital Phase and Frequency Detector for Phase Locking of Diode Lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**(5): 053111-1~053111-7
- [22] N. Beverini, M. Prevedeli, F. Sorrentino, *et al.* An Analogy + Digital Phase-Frequency Detector for Phase Locking of a Diode Laser to Optical Frequency Comb [J]. *Quantum Electronics*, 2004, **34**(6): 559~564
- [23] J. Le Gouët, J. Kim, C. Bourassin-Bouchet, *et al.* Wide Bandwidth Phase-Locked Diode Laser with An Intra-Cavity Electro-Optic Modulator [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(5): 977~980
- [24] Li Lu-Ming, Tang Wen-Zhuo, Hu Zhen-Yan, *et al.* Realization of Optical Phase

- Locked Loop at 9.2 GHz Between Two Independent Diode Lasers [J]. *Chin Phys Lett*, 2008, **25**(9): 3253~3256
- [25]周炳琨等. 激光原理. 北京, 国防工业出版社, 2012, 305~322
- [26]B. E. A. Saleh and M. C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. New York City, John Wiley & Sons, 2007, 3~14
- [27]L. Levin. Mode-Hop-Free Eletro-Optically Tuned Diode Laser [J]. *Optics Lett*, 2002, **27**(4): 237~239
- [28]M. de Labachellerie and G. Passadat. Mode-Hop Suppression of Littrow Grating-tuced Lasers [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(3): 269~274
- [29]Shoshan. I, N. N. Danon, U. P. Oppenheim. Narrowband Operation of a Pulsed Dye Laser without Intracavity Beam Expansion [J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, **48**(11): 4495~4497
- [30]Michael G. Littman. Single-Mode Operation of Grazing-Incidence Pulsed Dye Laser [J]. *Opt Lett*, 1978, **3**(4): 138~140
- [31]蓝信钜等. 激光技术. 北京, 科学出版社, 2013, 224~226
- [32]Mark Kasevich, Steven Chu. Laser Cooling Below a Photon Recoil with Three-Level Atoms [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(12): 1741~1744
- [33]M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, *et al.* Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atom Vapor [J]. *Science*, 1995, **269**(5221): 198~201
- [34]D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, *et al.* Storage of Light in Atomic Vapor [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**(5): 783~786
- [35]Junxiang Zhang, Haitao Zhou, Dawei Wang, *et al.* Enhanced Reflection Via Phase Compensation From Anomalous Dispersion in Atomic Vapor [J]. *Phys Rev A*, 2011, **83**(5): 053841-1~053841-7
- [36]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
- [37]Baolong Lü, W. H. Burkett, Min Xiao. Electromagnetically Induced Transparency With Variable Coupling-Laser Linewidth [J]. *Phys Rev A*, 1997, **56**(1): 976~979
- [38]Baolong Lü, W. H. Burkett, Min Xiao. Frequency Matching Effect in Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Opt Commun*, 1997, **141**(6): 269~272
- [39]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): 013014-1~013014-8
- [40] 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): 0714001-1~0714001-6
- [41] 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
- [42] Luming Li, Hong Guo, Peng Xiao, *et al.* Control of Light in an M-type Five-Level Atomic System [J]. *J. Opt. Sci. Am. B*, 2005, **22**(6): 1309~1313
- [43] M. Bajcsy, A. S. Zibrov, M. D. Lukin. Stationary Pulses of Light in an Atomic Medium [J]. *Nature*, 2003, **426**(1): 638~641
- [44] 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
- [45] Daniek A. Steck, "Rubidium 85 D Line Data," available online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 0.1.1, 2 May 2008)
- [46] Daniek A. Steck, "Rubidium 87 D Line Data," available online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.4, 23 December 2010)
- [47] Daniek A. Steck, "Cesium D Line Data," available online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.4, 23 December 2010)
- [48] S. Kobayashi, T. Kimura. Injection Locking in AlGaAs Semiconductor Laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1981, **QE-17**(5): 681~689
- [49] S. Kobayashi, J. Yamada, S. Machida, *et al.* Single-mode Operation of 500 Mbit/s Modulated AlGaAs Semiconductor by Injection Locking [J]. *Electron Lett*, 1980, **16**(19): 746~748
- [50] F. Mogensen, H. Olesen, G. Jacobsen. FM Noise Suppression and Linewidth Reduction in an Injection-locked Semiconductor Laser [J]. *Electron Lett*, 1985, **21**(16): 696~697
- [51] P. Spano, S. Piazzolla, M. Tamburrini. Frequency and Intensity Noise in Injection-locked Semiconductor Lasers: Theory and Experiments [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1986, **QE-22**(3): 427~435

- [52]K. Iwashita, K. Nakahawa. Suppression of Mode Partition Noise by Laser Diode Light Injection [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1982, **QE-18**(10): 1669~1674
- [53]S. Brandt, A. Nalel, R. Wynands, et al. Buffer-gas-induced Linewidth Reduction of Coherent Dark Resonances to Below 50 Hz [J]. Phys. Rev. A, 1997, **56**(2): R1063~R1066
- [54]D. S. Weiss, B. C. Young, S. Chu. Precision Measurement of  $h/mCs$  Based on Photon Recoil Using Laser-cooled Atoms and Atomic Interferometry [J]. Appl Phys B, 1994, **59**(3): 217~256
- [55]G. Santarelli, A. Clairon. Heterodyne Optical Phase-Pocking of Extended-Cavity Semiconductor Lasers at 9 GHz [J]. Opt Commun, 1994, **104**(4): 339~344
- [56]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
- [57]H. R. Telle, D. Meschede, T. W. Hänsch. Realization of a New Concept for Visible Frequency Division: Phase Locking of Harmonic and Sum Frequencies [J]. Opt Lett, 1990, **15**(10): 532~534
- [58]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



## 攻读硕士学位期间获得的研究成果

已发表的文章：

- [1] **马志军**, 王丹, 武晋泽, 张俊香, 用于原子-光耦合系统的光学锁相环的设计, 量子光学学报, 2016, 22(2).



## 致 谢

当我写下这段话的时候，不知不觉中已经在山西大学待了近七年，四年的本科和三年的硕士。回想那年第一次踏进山西大学，古朴的毛泽东雕像和文瀛宿舍给我留下了不一样的印象；回想本科时第一次拿到奖学金，内心泛起过小小的激动和波澜；回想每一次四六级考试，既能体会到痛苦也会感受到成长；回想保研以后第一次踏进光电所，浓浓的学术氛围震撼了无知的我；回想研究生三年的点点滴滴，有过迷茫，也有过不忘初心的执着。我时常在回想自己这些年走过的路，我自我批评。作为学生，我不是一名称职的学生，会懒惰，会有情绪；作为人子，我经常会让父母失望，未尽肖道。白云苍狗，还未及唏嘘时光的流转，已是离开的时候，那些年，那些成长，我感谢那些一路陪伴我的人。

感谢彭老师和谢老师，两位老师严谨的科学态度和无私奉献的科学精神深深地折服了我，是我一生学习的榜样。在此表达我诚挚的敬意，愿二位老师身体健康，永远年轻。

感谢我的导师张俊香教授，感谢您三年多的指导和帮助。张老师学识渊博、物理直觉敏感，对待科研一丝不苟，工作态度严谨。三年来，张老师谆谆的教诲为我的学习和生活指明了方向。感谢张老师在我遇到困难时的鼓励，在我犯错误时的理解与包容。

感谢电子车间王老师和李老师在电路方面的指导和帮助，感谢机加工车间的师傅们，感谢研一时所有的代课老师悉心地传授知识。

感谢实验室小组的周海涛老师，已毕业的郭苗军师兄，姜其畅师兄，黄静波师兄，王红丽师姐的鼓励和帮助，感谢王丹和马荣师姐的照顾和帮助，感谢张岩，武晋泽，刘超师兄的指导，感谢肖长顺，刘晋宏，张丽文，韩宇宏等小组成员的帮助，在这里衷心地祝愿你们工作学习顺利，生活如意。

最后特别感谢我的父母在生活上和学习上的无尽关怀，感谢父母对我毕业的支持与鼓励，感谢我的姐姐们对我的关心和鼓励。

还有很多未提及的同届的同学和朋友们，衷心地谢谢你们，祝愿你们的人生扬帆起航，一帆风顺。

马志军  
2016年3月

## 个人简历及联系方式

### 个人基本信息

姓 名：马 志 军

性 别：男

出生年月：1988 年 9 月

籍 贯：山西省大同市矿区

联系电话：15135111286

电子信箱：mazj\_sxdx@163.com

### 学习和受教育经历

2013.9-2016.7 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

专业：光学（硕士）

2009.9-2013.7 山西大学，物理电子工程学院

专业：电子信息科学与技术（学士）

## 承 诺 书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是在导师指导下独立完成的，学位论文的知识产权属于山西大学。如果今后以其他单位名义发表与在读期间学位论文相关的内容，将承担法律责任。除文中已经注明引用的文献资料外，本学位论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写过的成果。

作者签名：

2016 年 月 日

## 学位论文使用授权声明

本人完全了解山西大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关机关或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等手段保存、汇编学位论文。同意山西大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播论文的全部或部分内容。

保密的学位论文在解密后遵守此协议。

作者签名：

导师签名：

2016 年 月 日