

中图分类号: TN247

论文编号: 10006SY0917147

## 硕 士 学 位 论 文

# 光纤激光 PDH 稳频信号检测系统的 优化设计与实现

|        |                  |        |                   |
|--------|------------------|--------|-------------------|
| 作者姓名   | 苑丹丹              | 申请学位级别 | 工学硕士              |
| 指导教师姓名 | 马静               | 职 称    | 高级工程师             |
| 学科专业   | 光学工程             | 研究方向   | 激光稳频技术            |
| 学习时间自  | 2009 年 09 月 10 日 | 起至     | 2011 年 12 月 10 日止 |
| 论文提交日期 | 2011 年 12 月 01 日 | 论文答辩日期 | 2011 年 12 月 10 日  |
| 学位授予单位 | 北京航空航天大学         | 学位授予日期 | 年 月 日             |

## 关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得北京航空航天大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：苑丹丹

日期：2011年12月13日

## 学位论文使用授权书

本人完全同意北京航空航天大学有权使用本学位论文(包括但不限于其印刷版和电子版)，使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门(机构)送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：苑丹丹

日期：2011年12月13日

指导教师签名：马静

日期：2011年12月13日

## 摘 要

六十年代第一台激光器诞生以来,由于其良好的单色性和高能量密度,在精密干涉测量、激光通信、激光陀螺等领域中得到了广泛的应用。自由运转的激光器,由于受到外界温度变化、大气变化、机械振动及磁场的影响,激光频率不稳定。必须通过稳频技术来解决激光器的频率稳定性这一问题,稳频技术就成了现代精密测量应用中不可缺少的手段,其中相位调制光外差稳频技术具有明显的优势:稳频精度高,系统稳定,易实现。因此本文作者围绕相位调制光外差稳频技术,以单频光纤激光器为研究对象,开展相位调制光外差稳频的理论和实验研究,取得一定的成果。论文主要开展了以下几方面的工作:

1. 综合分析了各种稳频技术,基于被动稳频和主动稳频技术的区别——有无稳定的频率参考,并根据选用频率标准的不同进行分类;针对主动稳频技术综述激光稳频技术的国内外研究进展,分析了常用激光稳频技术的原理及能够达到不同稳频精度的根本原因;根据国内外关于主动稳频技术的实验研究报告,将其优缺点进行比较分析。

2. 相位调制光外差的理论研究。详细阐述了相位调制光外差稳频的原理,对频率稳定度、复现性、稳频激光器的数学模型、影响频率稳定性的因素及频率稳定性的测量方法等进行了理论研究,为本文研究工作的开展奠定了理论基础。

3. 稳频系统方案的确定。针对光纤激光相位调制光外差稳频系统的关键组成部分——光源、光路偏振态、系统参数等进行了全面系统的分析,优化设计了光纤激光相位调制光外差稳频系统,确定了稳频系统最终的方案。

4. 光外差信号检测优化系统的实现。根据系统需求,分析了优化前系统存在的问题,合理选取器件和电路参数,在充分考虑到干扰、噪声、增益带宽以及电路整体功能的基础上,设计了探测器前置放大电路和解调电路。通过大量的系统仿真及实验研究,确定了稳频电路方案,并对设计后的电路进行噪声分析。

5. 光外差信号检测优化系统实验研究和结果分析。对光纤激光器性能、光路偏振态的影响、电光相位调制谱的检测等进行实验研究。获得了鉴频曲线及误差信号,得到频率漂移的方差值为 $8.66 \times 10^{-13}$ 。

**关键词:** 相位调制光外差稳频、主动稳频、被动稳频、电光相位调制、解调

## Abstract

Since the birth of the first laser in sixties, laser is widely used in the precision interferometry, laser communications, laser gyro and other fields, because of its good color and high energy density. The frequency of free-running laser is unstable, due to the change of external temperature, atmospheric, mechanical vibrations and magnetic fields. Frequency stabilization technology should be used to make the laser output frequency stability. So, frequency stabilization technology has become an indispensable tool in modern precision measurement applications. And the phase modulation optical heterodyne frequency stability (PDH) has obvious advantages: high frequency stabilization precision, the stable system, easy to implement. So the theory and experiment research of the PDH technology are carried out, using single frequency laser as research object, and stated achievements are obtained. In this paper the following areas are mainly carried out:

1. Various frequency stabilization technologies are comprehensively analyzed. Based on the difference of passive and active frequency stabilization frequency stabilization technologies - having a stable frequency reference or not, classify according to the different selection of the frequency criteria. The research development of the active frequency stabilization technique at home and abroad is mainly summarized. The common principles of laser frequency stabilization techniques and the root reasons to achieve different accuracy of frequency stabilization are analyzed. Their advantages and disadvantages are comparative analyzed according to experimental research reports about active frequency stabilization technology at home and abroad.

2. The theory research of PDH. The principle of phase modulation optical heterodyne frequency stabilization is discussed in detail. Theory research is carried out aimed at the frequency stability, reproducibility, the mathematical model of laser frequency stabilization, the factors affecting the frequency stability and the measurement methods of frequency stability and so on. This has laid a theoretical foundation for the research work to carry out.

3. The confirmation of frequency stabilization system. The overall and systematic analysis is carried out aimed at the main components: the light source, optical polarization, the system parameter. The fiber laser phase modulation optical heterodyne frequency stabilization system



is optimized. The frequency stabilization system scheme is ultimately determined.

4. The implementation of optical heterodyne signal detection. According to system requirements, the pre-existing problems are summed up. The components and circuit parameters are rationally chosen. The optical receiver circuit and the demodulation circuit are designed after fully considering interferer, noise, gain bandwidth and the whole function of the circuit. The frequency stabilization circuit project is confirmed through a lot of simulations and experiments. The designed circuit is noise analyzed.

5. Experimental research and results analysis are carried out for the optimized optical heterodyne signal detection system. Experiment research is carried out on the performance of the laser, the influence of the polarization state, and the detection of the electro-optic phase modulation spectrum. The error signal and frequency discrimination slope are obtained. Allan variance is obtained to be  $8.66 \times 10^{-13}$ .

**Key Words:** Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization, Active frequency stabilization, Passive frequency stabilization, Electro-optical phase modulation, Demodulation

# 目 录

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 摘 要 .....                 | I   |
| Abstract .....            | II  |
| 目 录 .....                 | IV  |
| 图清单 .....                 | VII |
| 第一章 绪论 .....              | 1   |
| 1.1 课题研究的背景及意义.....       | 1   |
| 1.1.1 课题研究的背景.....        | 1   |
| 1.1.2 课题研究的意义.....        | 2   |
| 1.2 激光稳频技术 .....          | 3   |
| 1.2.1 被动稳频.....           | 3   |
| 1.2.2 主动稳频.....           | 4   |
| 1.2.3 常用稳频技术的对比分析.....    | 8   |
| 1.3 激光稳频技术发展动态.....       | 8   |
| 1.3.1 被动稳频国内外发展动态.....    | 8   |
| 1.3.2 主动稳频国内外发展动态.....    | 9   |
| 1.4 论文的研究思路及结构安排.....     | 13  |
| 第二章 光纤激光的稳频原理.....        | 15  |
| 2.1 PDH 激光稳频系统.....       | 15  |
| 2.1.1 相位调制光外差稳频系统原理.....  | 15  |
| 2.1.2 相位调制光外差原理.....      | 16  |
| 2.2 激光稳频相关特性 .....        | 17  |
| 2.2.1 频率的稳定性和复现性.....     | 17  |
| 2.2.2 频率变化的数学模型.....      | 19  |
| 2.2.3 影响激光频率稳定的因素.....    | 20  |
| 2.3 频率稳定度的测量 .....        | 21  |
| 2.4 本章小结 .....            | 22  |
| 第三章 光纤激光稳频系统的优化设计.....    | 24  |
| 3.1 稳频的对象—DFB 光纤激光器 ..... | 24  |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2 系统光路的优化 .....                      | 25        |
| 3.3 系统参数的选择 .....                      | 26        |
| 3.3.1 吸收曲线与色散曲线 .....                  | 26        |
| 3.3.2 线性动态范围分析 .....                   | 28        |
| 3.3.3 灵敏度分析 .....                      | 30        |
| 3.4 相位调制光外差稳频系统方案 .....                | 32        |
| 3.5 系统的噪声分析 .....                      | 33        |
| 3.6 本章小结 .....                         | 35        |
| <b>第四章 光外差信号检测优化系统的实现 .....</b>        | <b>36</b> |
| 4.1 系统优化的前提 .....                      | 36        |
| 4.1.1 探测器 .....                        | 36        |
| 4.1.2 解调电路 .....                       | 36        |
| 4.2 光电接收电路 .....                       | 38        |
| 4.2.1 光电二极管 .....                      | 38        |
| 4.2.2 前置放大电路 .....                     | 40        |
| 4.2.3 噪声分析 .....                       | 41        |
| 4.3 解调电路 .....                         | 43        |
| 4.3.1 器件选型与电路设计 .....                  | 43        |
| 4.3.2 延迟测量与补偿 .....                    | 49        |
| 4.3.3 噪声分析 .....                       | 48        |
| 4.4 解调电路的调试 .....                      | 46        |
| 4.5 本章小结 .....                         | 51        |
| <b>第五章 光外差信号检测优化系统的实验研究与结果分析 .....</b> | <b>53</b> |
| 5.1 实验装置 .....                         | 53        |
| 5.2 光纤激光器性能测试 .....                    | 54        |
| 5.3 光路偏振态的影响 .....                     | 55        |
| 5.4 电光相位调制谱检测 .....                    | 56        |
| 5.5 系统实验结果与分析 .....                    | 58        |
| 5.5.1 探测器信号检测 .....                    | 58        |
| 5.5.2 鉴频曲线检测 .....                     | 59        |
| 5.5.3 频率误差信号检测 .....                   | 60        |
| 5.6 本章小结 .....                         | 61        |

|                      |    |
|----------------------|----|
| 总结 .....             | 62 |
| 参考文献 .....           | 64 |
| 攻读硕士学位期间取得的学术成果..... | 68 |
| 致 谢 .....            | 69 |

## 图清单

|      |   |    |
|------|---|----|
| 图 1  | 激光稳频系统原理图.....                                    | 4  |
| 图 2  | 兰姆凹陷稳频原理图.....                                    | 5  |
| 图 3  | 实验装置示意图.....                                      | 6  |
| 图 4  | 典型的饱和吸收稳频原理图.....                                 | 7  |
| 图 5  | 偏频锁定技术的实验框图.....                                  | 7  |
| 图 6  | 相位调制光外差系统示意图.....                                 | 15 |
| 图 7  | 相位调制光外差原理图.....                                   | 16 |
| 图 8  | PDH 稳频系统光路偏振示意图.....                              | 25 |
| 图 9  | 稳频系统光路原理图.....                                    | 26 |
| 图 10 | 稳频系统光路原理图(优化后).....                               | 26 |
| 图 11 | 光外差解调吸收曲线及色散曲线.....                               | 27 |
| 图 12 | PDH 频率误差信号.....                                   | 28 |
| 图 13 | 误差信号及其导数.....                                     | 29 |
| 图 14 | $\Delta$ PDH 随调制频率变化图.....                        | 30 |
| 图 15 | 调制度 $\beta$ 与贝塞尔项 $J_0(\beta)J_1(\beta)$ 关系图..... | 31 |
| 图 16 | 调制度 $\beta$ 与光外差光谱信号的关系图.....                     | 32 |
| 图 17 | 单频激光 PDH 光外差信号检测系统结构图.....                        | 33 |
| 图 18 | PDH 稳频系统误差信号控制框图.....                             | 34 |
| 图 19 | 光电二极管 GT101 0.2 的光谱响应曲线.....                      | 36 |
| 图 20 | 利用信号发生器模拟解调过程的输出波形.....                           | 37 |
| 图 21 | 调制解调电路原理框图.....                                   | 38 |
| 图 22 | PIN 光电二极管的等效电路.....                               | 40 |
| 图 23 | 前置放大电路原理图.....                                    | 40 |
| 图 24 | 前置放大电路实物图.....                                    | 41 |
| 图 25 | 光外差信号解调电路原理图.....                                 | 46 |
| 图 26 | 光外差信号解调电路实物图.....                                 | 46 |
| 图 27 | 调制信号幅值为 1V 时解调电路输出结果.....                         | 47 |
| 图 28 | 调制信号幅值为 500mV 时解调电路输出结果.....                      | 47 |
| 图 29 | 调制信号幅值为 50mV 时解调电路输出结果.....                       | 48 |
| 图 30 | 调制信号幅值为 20mV 时解调电路输出结果.....                       | 48 |
| 图 31 | 驱动源延迟量测量.....                                     | 51 |
| 图 32 | 选频放大环节延迟测量.....                                   | 51 |
| 图 33 | 相位调制光外差系统框图.....                                  | 53 |
| 图 34 | 实验系统实物图.....                                      | 53 |
| 图 35 | 中心波长随时间波动示意图.....                                 | 54 |
| 图 36 | 输出功率随时间波动示意图.....                                 | 55 |
| 图 37 | 光纤激光器光谱图.....                                     | 55 |
| 图 38 | 稳频系统优化前后所测信号.....                                 | 56 |
| 图 39 | 激光调制光谱.....                                       | 58 |
| 图 40 | 原探测器响应曲线.....                                     | 59 |
| 图 41 | 重新设计后的探测器响应曲线.....                                | 59 |
| 图 42 | 色散曲线.....   | 60 |

图 43 激光稳频系统输出误差信号.....61



# 第一章 绪论

## 1.1 课题研究的背景及意义

### 1.1.1 课题研究的背景

窄线宽激光器作为现代科学技术重要标志之一,已经在精密干涉测量<sup>[1]</sup>、光频标<sup>[2]</sup>、激光通信<sup>[3]</sup>、激光陀螺<sup>[4]</sup>、激光雷达<sup>[5]</sup>等诸多领域得到了广泛的应用。在激光的众多应用领域中,激光频率稳定度是一个极其重要的指标参数。理想的激光器的输出频率是单一的,由于量子抖动、腔长变化、温度变化及其他噪声存在,导致激光具有一定的谱线宽度。在环境变化的情况下,激光器输出的频率也会发生变化。欲将激光器应用于上述诸领域,稳频技术成了现代精密测量技术中不可少的一种手段。因此,随着激光应用的发展,激光稳频技术成为基础科学研究的重要方向,在现代科学技术中发挥着越来越重要的作用。

频率稳定性( $S$ )表征频率稳定的程度,通常指激光器在连续运转时,在一定的时间间隔内平均频率( $\bar{\nu}$ )与该时间内频率的变化量( $\Delta\nu$ )之比。在技术上把 $S$ 的倒数称为稳定度。

自从1966年霜田光一等人提出用甲烷吸收线来稳定激光频率后,激光稳频的研究进入了一个新阶段,频率稳定度很快就达到了 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量级。随着研究的深入,人们发现了更多可以利用的谱线和稳频方法<sup>[6]</sup>。近年来,激光稳频技术得到了飞速发展,主要原因如下:

(1)米定义的复现要求。1997年9月,国际米定义咨询委员会(CCDM)总结了激光稳频技术的发展,推荐了用 $532\text{nm}$  Nd:YAG倍频激光稳定在碘的饱和吸收谱线上的频率和波长值<sup>[7]</sup>。推荐值共有9组,其激光波长值的范围为 $532.242 \sim 532.299\text{nm}$ ,相应于碘吸收线的标记为1111 $\sim$ 1104<sup>[8]</sup>。

(2)广义相对论效应,引力波等对当今科学具有极限意义的高精度测量需要极高信噪比信号源的要求。美国在1998年由麻省理工学院与加州理工学院联合建成两个LIGO(the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)中心,要在4公里长的测量臂上探测到厘米的微小变化。高稳定度的稳频激光器是实现其探测的先决条件。法国、意大利、英国、德国、日本以及澳大利亚也开始了这方面的努力。

(3)大容量光纤通信的要求。随着数据通信的迅速增长推动着密集型波分复用(DWDM)大容量光纤通信技术的飞速发展。减小不同激光波长间隔(即压缩信道间隔)可

增加传输信道的数目,使光纤通信传输的容量大幅度地提高。国际电联已制定了一个32信道波分复用传输标准,信道间隔仅为100GHz(0.8nm)。目前人们正在致力研究通道间隔仅为50GHz(0.4nm),甚至间隔小到2GHz的更高精度的密集波分复用传输系统<sup>[9]</sup>。

在波分复用系统中,为了保证信道质量,有较高的传输信噪比,必须有效地抑制不同波长通道间的串扰,这就要求系统中的所有元件都工作于指定的光谱范围内,无过频频移。因此在制造、安装、服务和维修阶段,都需要检测激光器、滤波器和光纤光栅等关键元件的波长特性。目前测试设备的精度已不能满足密集型波分复用光纤通信系统的要求。波分复用技术的快速发展已产生了对1.5 $\mu\text{m}$ 波段高精度稳频激光器的迫切需求。自90年代开始,日本东京理工学院开始了此方面的研究,并在近两年取得了巨大进展,采用气体分子饱和吸收稳频方法,已成功地实现了对1.5 $\mu\text{m}$ 波段可调谐激光二极管光源的高精度稳频,绝对精度达150kHz,长期稳定性为 $\pm 1\text{MHz}$ <sup>[10]</sup>。美国国家标准技术中心也采用此方法高精度地测量了光纤的一些特性参数,如模场直径、偏振光色散和光纤聚合物外包层的直径<sup>[11]</sup>。

此外,水下通信和海洋光学、相干测量与精密测量、光谱学和激光光谱、大气和环境监测等应用领域也需要频率稳定的激光器。

本文以单频光纤激光器为研究对象,探讨实现单频激光器光波频率稳定输出的控制原理和方法。

### 1.1.2 课题研究的意义

开展高功率单频光纤激光器的相关研究具有十分重要的科学意义和实用价值,主要表现在:单频、高功率激光在激光雷达、同位素分离等领域有着非常广泛的应用;在石油、地震监测等领域也需要高功率窄线宽单频激光器。

高功率光纤激光器的研究向高光束质量、窄线宽方向发展,但是其频率稳定性成为限制其应用的关键,小功率(几十mW量级)单频光纤激光器的频率稳定性已经达到200MHz/ $^{\circ}\text{C}$ ,在高功率条件下,如果不加频率控制,其频率稳定度在几个GHz的量级。即在高功率的条件下,不仅光纤激光器输出的光谱谱线宽度大幅度展宽,同时激光输出的稳定性也不高。

利用相位调制光外差稳频技术对光纤激光器进行稳频,是能够保证高功率单频激光器短期和长期稳定性一种有效的技术手段。但是,国内外关于高功率单频光纤激光频率漂移机理以及控制技术课题的研究稀少。

本课题以单频光纤激光器为研究对象,探讨实现激光器频率稳定输出的控制原理和控制方法。课题的目的是对激光进行功率放大,在大功率的条件下,激光输出的稳定性不高,稳频技术成为项目开展的关键技术。因此,本课题的研究工作瞄准学科前沿,有一定的学术价值。

## 1.2 激光稳频技术

频率稳定性通常指激光器在连续运转时,在一定的时间间隔内平均频率( $\nu$ )与该时间内频率的变化量( $\Delta\nu$ )之比。影响因素分为两类:外部影响因素主要包括温度、机械振动、大气变化和电磁场影响;内部因素主要包括放电气压变化、放电电流变化以及自发辐射造成无规噪声。稳频技术的实质是保持谐振腔光程长度的稳定性。

稳频技术主要有被动稳频<sup>[12]</sup>和主动稳频<sup>[13]</sup>。其区别主要在于是否有一个稳定的频率参考标准。

被动稳频技术就是尽量不增加激光器附加元件的情况下,采用一定的措施,减小或者消除环境温度的变化、机械振动等外界干扰对激光频率稳定性的影响,实现激光频率的稳定。这些直接的稳频办法主要有恒温、防震、密封隔声、稳定电源、构建外腔等。

主动稳频技术就是选取一个稳定的参考标准频率,当外界条件变化使激光频率偏离此标准频率时,利用鉴频装置检测误差信号,再通过反馈控制系统自动调节激光器谐振腔的腔长,将激光频率恢复到特定的标准频率上,最后达到稳频的目的。

常用的稳频频率参考标准主要有两类:一类是以原子或分子的跃迁谱线中心频率作为频率参考标准;另一类以光学谐振腔的共振频率作为频率参考标准<sup>[14]</sup>。因此又可分为兰姆凹陷稳频、原子光谱 Zeeman 效应稳频、饱和吸收稳频、偏频锁定稳频、相位调制光外差稳频(Pound-Drever-Hall),其中兰姆凹陷稳频、原子光谱 Zeeman 效应稳频与饱和吸收稳频是以原子或分子的跃迁谱线中心频率作为频率参考标准;相位调制光外差稳频和偏频锁定稳频则是以 F-P 谐振腔的谐振频率作为频率参考标准的。

### 1.2.1 被动稳频

被动稳频技术包括恒温、防震、密封隔声、稳定电源、构建外腔等手段,主要是通过改变环境来稳定频率。

环境温度的变化、机械振动等外界干扰对激光频率稳定性影响很大,因而最直接的方法就是隔离环境变化的影响,例如恒温、防震、密封隔声、稳定电源等,据相关文献

记载, CO<sub>2</sub>激光器的频率长期稳定性采用恒温、防震装置之后, 可达 $10^{-7}$ 量级。半导体激光器的频率稳定度最佳只能达到 $10^{-7}$ , 计算得出的绝对频差接近10MHz左右<sup>[15]</sup>。

对于光纤激光器来讲, 常用窄线宽的光纤光栅构成复合腔进行频率的稳定。在高功率条件下, 研究人员更多地采用体光栅, 构建外腔进行选频。应用体光栅外腔的结构有Littrow结构、Littman结构以及双光栅Littman结构, 其中线宽最窄的是双光栅结构, 但是得到的激光功率最小。Littrow结构与Littman结构得到的线宽几乎没有差别, 二者的区别在于Littrow结构输出光束的方向随着光栅的微调而发生变化, 而Littman则输出方向是固定不发生变化的。

光栅本身是色散元件, 具有选频特性, 因此外腔式LD比一般的LD线宽具有明显改善, 从这个方面来看是对激光器频率的一种稳定。外腔反馈光纤激光器出射的激光光谱较窄, 对于机械变化和温度波动比较敏感, 因此这种稳频技术的精度较差。

虽然被动稳频的种类较多, 但均只能在一定程度上压窄线宽, 很难保证频率长期稳定性和复现性, 频率稳定度只能达到 $10^{-7}$ 。也就是说, 若要实现更高精度的频率稳定度, 单单依靠被动稳频技术是无法实现的, 必须依靠主动稳频技术。

### 1.2.2 主动稳频

主动稳频技术就是选取一个稳定的参考标准频率, 当外界影响使激光频率偏离此特定的标准频率时, 设法鉴别出来, 再人为地通过控制系统自动调节腔长, 将激光频率恢复到特定的标准频率上, 从而实现稳频。具体的说, 就是采用电子伺服控制系统, 当激光频率偏离标准频率时, 鉴频器给出误差信号, 通过伺服系统和压电元件控制腔长, 使激光频率自动回到标准频率上。因而, 作为标准使用的参考频率的选择尤为重要。其条件要求: (1) 频率要具有较高的稳定度和复现性; (2) 线宽窄; (3) 有足够的信噪比; (4) 与受控激光频率匹配。

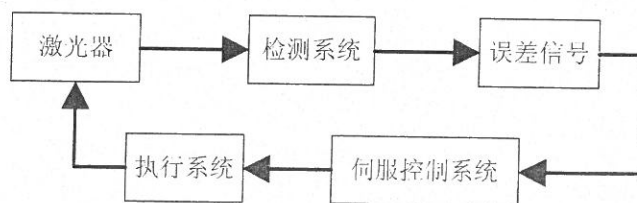


图 1 激光稳频系统原理图

稳频激光的频率稳定度和复现性, 最终取决于参考频率的稳定度和复现性, 电子伺服系统工作状态的好坏, 也直接影响激光频率的稳定性。

#### ◆ 兰姆凹陷稳频



兰姆凹陷稳频法是利用非均匀加宽线性增益曲线的烧孔效应<sup>[15]</sup>。如图2所示，以增益曲线中心频率 $\nu_0$ 作为参考标准频率，当外界影响使激光频率偏离时，输出一个误差反馈信号，通过电子伺服系统驱动压电陶瓷环来控制激光器腔长，连续改变激光振荡频率使其向中心频率 $\nu_0$ 靠近，当振荡频率位于 $\nu_0$ 处时，“原孔”和“像孔”合二为一，此时控制压电陶瓷的直流电压输出功率为最小，频率重新稳定于 $\nu_0$ 处。

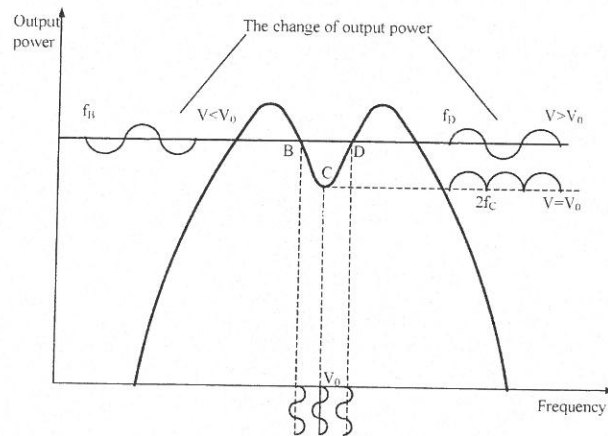


图 2 兰姆凹陷稳频原理图

这种方法的稳频装置虽然比较简单，但在应用中存在一定的局限，体现在：

- 1) 其中心频率 $\nu_0$ 容易受放电条件的影响，而且 $\nu_0$ 作为参考频率有一定的范围，不能稳定在一个点上，虽然频率稳定度可达 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ ，但是频率复现性较差；
- 2) 激光管外壁是用低膨胀石英玻璃或者微晶玻璃制作，用压电晶体控制腔长，价格昂贵。

#### ◆ 原子光谱 Zeeman 效应吸收稳频

原子光谱 Zeeman 效应吸收法是通过使用一个微弱磁场的 Zeeman 效应，分裂原子多普勒加宽吸收信号的内容<sup>[16][17]</sup>。谱线分裂为具有一定频差的右旋光和左旋光，即产生双频输出。随着光谱线的分裂，增益曲线和色散曲线也发生分裂。Zeeman 分裂后的有源腔频率 $\nu_q^0$ 对称地分布于 $\nu_0$ 的两侧，左旋光与右旋光具有相等的小信号增益系数，因此具有相同的输出功率曲线。 $\nu_q^0 < \nu_0$ 时，左旋光功率小于右旋光功率； $\nu_q^0 > \nu_0$ 时，左旋光功率大于右旋光功率。测出偏振光输出功率的差值作为鉴频的误差信号，再通过伺服系统控制激光器腔长。

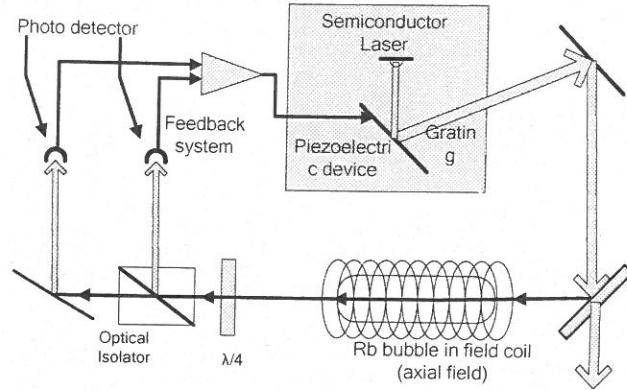


图 3 实验装置示意图

如图3所示，磁场和光的波数 $K$ 平行或者反向，光束必须是线性偏振的。两束输出光直接注入各自的光电二极管，两个二极管的输出电压是和气泡中的圆偏振光的强度成正比的，由此获得了一个差分信号。产生的信号通过零点，适合锁定。差分信号回馈到伺服锁定回路中，由此来稳定外腔的频率，当差分信号为零时，说明正好锁定。

此方法的优势明显，输出功率和频率均不需要低频调制，并且具有较强的抗干扰能力，可用于工业中的精密计量。但是其也存在缺陷，如体积大，价格高，适用激光系统种类较少，系统输出功率相对较低，稳定度一般在 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 。

#### ◆ 饱和吸收稳频

激光束通过分光板分成较强的泵浦光束 $I_1$ 和较弱的探测光束 $I_2$ 以及参考光束 $I_3$ 。前两光束通过反射镜反向并交叉入射于充有气体的吸收室。调谐激光频率 $\omega$ ，当 $\omega \neq \omega_0$ （原子吸收中心频率）时，由于多普勒效应，两个光束分别被运动速度方向相反的两群原子所吸收。当 $\omega = \omega_0$ 时，两个光束同时和速度方向相同（相对激光束方向）的一群原子相互作用，原子被强泵浦光束 $I_1$ 激励达到饱和状态，即吸收原子几乎全部被泵浦光束激励到高能态，探测光束几乎没有被原子吸收就通过了气体吸收室，因此在探测光强度 $I_2$ 和频率 $\omega$ 的关系曲线上，在 $\omega_0$ 处出现了尖峰效应，尖峰的宽度由低于吸收介质的均匀宽度决定，消除了多普勒加宽的影响，使尖峰的宽度变的十分狭窄，大大提高了激光的频率稳定度。



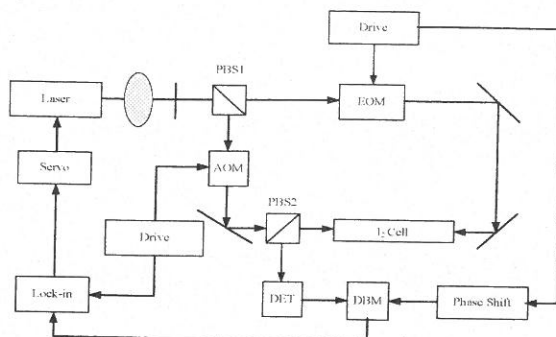


图 4 典型的饱和吸收稳频原理图

饱和吸收法的优点是频率稳定性和复现性高，这种方法频率稳定性不仅取决于吸收谱线的频率稳定性，也和谱线的宽度和信噪比有关，频率稳定度可以达到  $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 。缺点是输出波长受制于吸收介质，谱线频率覆盖范围有限，系统输出功率低<sup>[15][18][19]</sup>。

#### ◆ 偏频锁定技术

与相位调制光外差稳频技术不同，在偏频锁定技术中，鉴频信号产生时利用其透过曲线的斜率最大点对应的频率做参考频率，通常选用透射光强最大值的一半所对应的频率作为标准频率（实际上该点并不是透射曲线上斜率最大的点，但是易于标定），利用另一束激光构成差分系统消除激光器的功率起伏带来的影响，这样激光频率的变化会引起透射光强的变化。当激光频率为中心频率时，两个光电探测器的输出电流相互抵消，当激光频率偏离中心频率时，两个光电探测器输出电流不等。电流差通过伺服环路反馈到激光器，来保持透射光强为定值，从而维持激光频率稳定<sup>[20]</sup>。

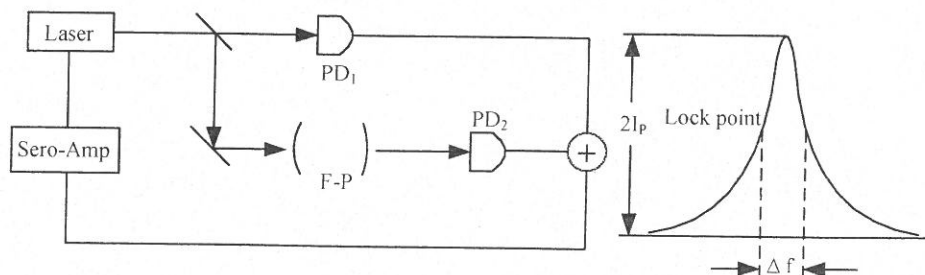


图 5 偏频锁定技术的实验框图

此方法系统抗干扰能力差，光频跳变会导致失锁，频率稳定度在  $10^{-8}$  量级，但是关于此种方法的相关研究才刚刚开始。

#### ◆ 相位调制光外差稳频(Pound-Drever-Hall, 简称 PDH)

相位调制光外差稳频（PDH稳频）技术是八十年代发展起来的激光稳频技术，它利用光学谐振腔的共振频率作为参考频率标准。该项技术的原理是激光器输出激光经位相调制后，入射到F-P腔上，反射光到达探测器上，经适当放大后和调制信号一起输入混频器进行混频解调，得到具有良好鉴频特性的色散型谱线，以及鉴频得到激光的频率与

F-P腔共振频率的误差信号，再通过伺服系统控制激光的腔长，进而改变激光的频率，将激光频率锁定在光学谐振腔的共振频率上以实现稳频。

### 1.2.3 常用稳频技术的对比分析

下表为对常用稳频方法的比较<sup>[21-31]</sup>：

表 1 常用稳频方法的比较

| 稳频方法               | 优点   | 缺点                                    | 稳定度                      |
|--------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|
| 被动稳频               | 原理简单   | 精度低，外腔稳频受外界干扰                         | $10^{-7}$                |
| 兰姆凹陷稳频             | 装置简单   | 预热时间长，输出光束中有低频调制信号，受光源内部多普勒加宽影响大，复现性差 | $10^{-9}$                |
| 原子光谱<br>Zeeman效应稳频 | 输出功率和频率均不需要低频调制  | 体积大、价格高，适用激光系统种类较少，系统输出功率较低           | $10^{-10} \sim 10^{-11}$ |
| 气体饱和<br>吸收稳频       | 频率稳定性和复现性高   | 谱线频率覆盖范围有限，输出波长受制于吸收介质，系统输出功率低        | $10^{-12} \sim 10^{-13}$ |
| 偏频锁定技术             |  | 系统抗干扰能力差，光频跳变会导致失锁                    | $10^{-8}$                |
| 相位调制<br>光外差稳频      | F-P腔可以有极高的Q值，能满足窄线宽稳频的要求，不受波段限制，能避开激光幅度噪声的影响，达到散粒噪声的极限 | F-P腔易受外界干扰                            | $10^{-12} \sim 10^{-16}$ |

通过对比，我们最终选择相位调制光外差稳频技术。

## 1.3 激光稳频技术发展动态

### 1.3.1 被动稳频国内外发展动态

1991年，Ball等人首次用写入布拉格光栅的方法实现了单频输出，输出波长 $1548\text{nm}$ ，线宽为 $47\text{kHz}$ <sup>[32]</sup>。

1993年，J.T.Kringlebotn等人采用 Er/Yb 共掺光纤制作短腔光纤激光器，腔长 $10\text{cm}$ ，以二向色镜和光纤光栅为端镜，输出波长 $1545\text{nm}$ ，功率为 $7.6\text{mW}$ ，用扫描F-P干涉仪测量证实为单频运转，采用 $50\text{km}$ 光纤延迟线的自外差方法测量线宽小于 $2.5\text{kHz}$ <sup>[33]</sup>。

1994年，以色列的Horowitz等人在线形腔光纤激光器腔内加入一段掺Er光纤饱和吸收体来抑制跳模，在 $1532\text{nm}$ 波长处获得了 $5\text{kHz}$ 窄线宽激光，光谱稳定时间为数分钟<sup>[34]</sup>。

1995年,英国南安普敦大学的Y.Cheng 等人报道环形腔掺Er光纤饱和吸收体窄线宽光纤激光器,得到输出功率 $6.2mW$ ,线宽 $0.95kHz$ ,波长 $1535nm$ 的窄线宽输出,频率漂移范围为一小时 $170MHz$ <sup>[35]</sup>。

1998年, W.H.Loh等人采用Er/Yb共掺光纤制作 $5cm$ 长分布反馈光纤激光器,波长 $1550nm$ ,功率 $4mW$ ,采用 $5km$ 光纤延迟线的自外差方法测量线宽 $18kHz$ <sup>[36]</sup>。

1999年,日本东京电子通讯大学的Naoto Kishi等人报道了采用外部光源注入的环形腔结构,掺Er光纤饱和吸收体压窄线宽的光纤激光器,输出波长 $1559nm$ ,功率 $1.4mW$ ,激光线宽 $7.5kHz$ ,频率漂移为每分钟 $15MHz$ <sup>[37]</sup>。

2001年,安徽大学的俞本立等人报道了使用掺Er光纤饱和吸收体的光纤环形腔激光器,获得了波长 $1539nm$ ,功率 $1dBm$ ,线宽小于 $0.5kHz$ 的激光输出<sup>[38]</sup>。

2003年, NP公司的Ch.Spiegelberg 等人采用超短腔结构得到功率超过 $100mW$ ,线宽小于 $2kHz$ 的 $1550nm$ 波长激光输出<sup>[39]</sup>。

2006年,英国格拉斯哥大学Zhou Meng等人报道了使用掺Er光纤饱和吸收体的光纤环形腔激光器,获得了波长 $1535nm$ ,功率 $4.7mW$ ,线宽小于 $1.5kHz$ 的线偏振激光输出,频率漂移范围为一小时 $250MHz$ <sup>[40]</sup>。

2007年,美国 University of Potsdam Institute of Physics 的 Andreas Jechow, Volker Raab, Ralf Menzel 等人利用 littrow 结构外腔的 V 型激光二极管进行频率稳定实验,得出衍射极限输出功率为  $1W$  情况下,线宽为  $1.7MHz$ <sup>[41]</sup>。

2007年, B.V. Zhdanov, T. Ehrenreich and R.J. Knize 等人利用 littrow 结构对激光二极管阵列进行稳频,得到输出波长  $832nm$ ,功率输出  $10W$ ,线宽为  $11GHz$ <sup>[42]</sup>。

### 1.3.2 主动稳频国内外发展动态

1946年,美国马萨诸塞州技术研究所的R.V.Pound,提出了利用谐振腔对微波进行稳频的思想,启发人们利用谐振腔对激光稳频<sup>[43]</sup>。

1964年,法国的RUSSELL TARG, L. M. OSTERINK, J. M. FRENCH等人利用KDP晶体相位调制器对 $50mW$ , He-Ne调频激光器进行频率稳定,最终得到的频率稳定度为 $10^{-8}$ <sup>[44]</sup>。

1966年,美国J.Kannelaud, D.G.Peterson等人利用氙原子谱线的Zeeman效应对输出波长 $2.65\mu m$ 氙激光器稳频,最终得到的频率稳定度为 $10^{-10}$ <sup>[45]</sup>。

20世纪80年代初, R.W.P.Drever和J.L.Hall等人成功地将激光频率锁定在光学参考腔

的共振频率上,取得了线宽小于 $100\text{Hz}$ 的稳频激光,以后人们一般把这种稳频方法称为 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频法<sup>[46]</sup>。

1984年, J.Hough与D.Hils等人通过把F-P腔放置在悬挂托架上,从而显著降低外界环境振动对腔体的影响,并把一台染料激光器锁定在此F-P腔上,通过对两套相同激光系统的输出光进行拍频,测得激光频率稳定度达到 $2.2 \times 10^{-13}$ , ( $1\text{s}$ 积分时间),线宽小于 $750\text{Hz}$ <sup>[47]</sup>。

1987年,美国的B.Dahmani等人利用F-P腔对 $850\text{nm}$ 进行稳频,其短期频率稳定在 $20\text{KHz}$ 左右<sup>[48]</sup>。

1990年,大连理工大学物理系吴桂林等人利用 $\text{CO}_2$ 气体饱和吸收产生的 $4.3\mu\text{m}$ 兰姆凹陷作为参考频率,饱和吸收池作为鉴频系统,得到鉴频曲线,用鉴频曲线估计的频率漂移为 $3 \times 10^{-8}$ <sup>[49]</sup>。

1991年,日本Y. Sakai, I. Yokohama, T. Kominato, S. Sudo 等人利用乙炔气体分子吸收线对 $1.5\mu\text{m}$ DFB激光二极管进行稳频,得到DFB激光二极管的中心频率漂移在 $10\text{MHz}$ 以内<sup>[50]</sup>。

1996年,韩国标准与科学研究院的Ho Seong Lee和Sung Hoon Yang,利用Ce原子吸收谱线对激光管稳频,在长达一周工作时间内,保证光源输出功率波动仅为 $0.03\%$ 的前提下,光源的频率漂移维持在 $\pm 0.5\text{MHz}$ 以内<sup>[51]</sup>。

1997年,德国的Stefan Seel等人利用液体He进行制冷的特制低温无源腔作为频率标准,对LD泵浦的Nd: YAG激光器进行稳频,稳频时间为 $20\text{s}$ ,其短期频率漂移为 $0.7\text{Hz}$ ,频率稳定度达到 $2.3 \times 10^{-15}$ <sup>[52]</sup>。

1999年, B.C.Young, F.C.Cruze等人把 $563\text{nm}$ 的染料激光器锁定在稳定且高精度的F-P腔上(精细度 $F > 150000$ ),并把F-P腔置于V型槽中固定,成功将激光线宽压缩到 $600\text{mHz}$ ,其频率稳定度为 $3 \times 10^{-16}$  ( $1\text{s}$ 积分时间)<sup>[53]</sup>。

2000年,美国加利福尼亚技术研究所的Eric D.Black等人系统介绍Pound-Drever-Hall稳频方法,给出了该法的理论推导并给出其色散曲线和吸收曲线<sup>[54]</sup>。

2000年,中科院武汉物理与数学研究所和安徽光学精密机械研究所的王瑾,柳晓军等人用饱和吸收光谱法对激光二极管进行稳频,使得激光器的等效线宽小于 $1\text{MHz}$ ,成功实现了Rb原子激光冷却与囚禁<sup>[55]</sup>。

2002年,日本Doshisha University的Shintaro Hisatake, Takahiro Kawamoto等人对应用



于相干通信光学锁相环系统的激光二极管,利用PDH方法进行稳频,输出35mW激光二极管光源线宽小于40MHz<sup>[56]</sup>。

2003年, Davi.R. Ortega, Victor.C. Magno and Flávio.Caldas.da.Cruz等人对外腔式激光二极管注入电流进行高速调制,采用ULE高精细常数F-P标准具,利用PDH方法稳频,将探测得到的误差信号经放大作用于PZT,以调节谐振腔,将激光频率锁定到F-P标准具谐振频率上,得到线宽低于2MHz,相对频率稳定度为120kHz<sup>[57]</sup>。

2004年,山西大学物理电子工程学院的赵建明、尹王保等人直接对半导体激光器的注入电流进行高速调制,将一路射频(RF)信号直接加在半导体激光器调制端口,一部分经过相移器后,与雪崩光电探测器(APD)所探测的饱和吸收光谱信号进行混频,经低通滤波器后产生了类色散曲线,将半导体激光器的输出频率稳定在铯原子D<sub>2</sub>线的6S<sub>1/2</sub>(F=4)→6P<sub>3/2</sub>(F'=5)的超精细跃迁线上,实验所测的10s积分时间内的频率跳动小于1MHz<sup>[58]</sup>。

2004年,中国科学院武汉物理与数学研究所江开军等人利用塞曼效应的稳频原理来对激光器进行稳频,原子在超精细塞曼能级间的吸收谱峰相对无磁场条件下的吸收谱峰有一定的移动,可以利用这一点使激光器的线宽不稳定小于1MHz<sup>[59]</sup>。

2005年,天津大学的李建功、金杰等人以乙炔气体饱和吸收谱线作为频率标准,并借助嵌入式系统处理误差信号反馈作用于15μmFBG外腔式激光二极管,使激光光源频率波动抑制在2MHz以内<sup>[60]</sup>。

2005年,美国Williams College的J.A.Kerckhoff, D.Bruzewicz等人利用TA原子谱线的纵向Zeeman效应对输出波长为1283nm的littrow结构的激光二极管进行稳频试验,结果得出在10ms至1h积分时间内的频率跳动为1MHz左右<sup>[61]</sup>。

2005年,陕西大学的严淑彬、杜致敬等人利用Ce原子谱线Zeeman效应对光栅外腔激光二极管稳频,试验结果为50s采样时间内的频率跳动±240kHz<sup>[62]</sup>。

2006年,清华大学林德娇,戴高亮等人利用横向Zeeman效应对He-Ne激光器频率稳定实验,并利用微处理器80C196,采用MPC算法对系统进行控制,得出在采样时间0.1s,光源频率稳定度达 $5.5 \times 10^{-11}$ <sup>[63]</sup>。

2006年,日本Niigata大学的Y.Ohta, T.Sato等人利用Rb原子饱和吸收谱线,对输出波长为780nm的半导体激光器进行频率稳定实验,最终得到结果在平均时间 $0.04s \leq \tau \leq 65s$ 内,相对光学频率稳定度为 $2.12 \times 10^{-12} \leq \sigma(2, \tau) \leq 5.88 \times 10^{-11}$ <sup>[64]</sup>。

2006年,日本Doshisha University的Hideyuki Yashiro, Yukio Miura等人以F-P谐振腔

为频率标准, 利用PDH技术对输出波长405nm的紫外激光二极管进行稳频, 经测试得出激光二极管工作0.5ms时间内的频率稳定度为 $1.71 \times 10^{-10}$ [65]。

2007年, 浙江传媒学院经过实验, Rb原子饱和吸收半导体激光器在自由运转10s频率漂移小于10MHz[66]。

2007, 意大利Gianluca Galzerano和Paolo Laporta等人利用水蒸气作为饱和吸收的介质, 对0.94 $\mu$ m波长的激光进行稳频, 在1~100s的时间内, 最小的频率不稳定性在30kHz左右, 频率稳定度能够达到 $10^{-10}$ [67]。

2008年, 燕山的李志全、苏凤燕等人设计了用乙炔吸收方法稳频1530nm光纤光栅外腔式半导体激光器的系统结构, 采用三次谐波锁定技术, 消除了背景功率的影响。利用锁定放大器闭环控制布拉格波长, 将激光器的输出波长锁定在乙炔气体1530.37nm的吸收峰上, 24h内频率稳定度达 $10^{-8}$ , 频率波动约为2MHz[68]。

2008年, 日本K.Nakano, S.Maehara, M.Yanagisawa等人设计出双光路反馈系统对用于板级干涉仪半导体激光器进行Rb饱和吸收谱线稳频, 得出在平均时间 $0.01s \leq \tau \leq 23s$ 内的频率稳定度 $9.07 \times 10^{-13} \leq \sigma(2, \tau) \leq 7.54 \times 10^{-10}$ [69]。

2008年, 美国科罗拉多大学John A. Smith等人以Na和K原子气体为吸收介质, 利用饱和吸收技术对谐振荧光多普勒雷达激光光源进行稳频, 测试得出1小时内频率漂移在 $\pm 1MHz$ 内[70]。

2008年, 哈尔滨工业大学的胡鹏程, 谭久彬等人研制了一种基于非对称热结构的激光热稳频系统。结构参数设计中使电热控制层的热惯性远小于于干扰吸收层, 可在保证电热控制效率的同时降低环境干扰的作用速度, 从而提高稳频系统的抗干扰性能。实验结果表明: 在实验室条件下稳频系统的频率稳定度优于 $1.8 \times 10^{-10}$ , 而在1m/s的持续气流扰动下其频率波动 $< 1.5 \times 10^{-9}$ [71]。

2008年, 上海光学与精密机械研究所的孙旭涛, 陈卫标等人通过对测风雷达系统的光源—1064nm, 200mW激光二极管泵浦主振Nd:YAG激光器, 采用线宽1.7MHz的F-P标准具进行稳频试验, 将误差信号反馈到激光二极管电流输入端口, 实现频率稳定。实验得出, 1s时间内频率跳到为 $\pm 25kHz$ , 1h内频率跳动为 $\pm 55kHz$ 。得到稳频系统绝对频率漂移小于1MHz, 满足测风雷达要求[72]。

2008年, 美国波茨坦大学Martin Ostermeyer, Alexander StraBer等人运用Pound-Drever-Hall技术对输出脉冲能量21mJ的注入式双Nd:YAG振荡调Q激光器稳频实



验, 经延迟自外差检, 测试线宽在 $1\text{MHz}$ 以内<sup>[73]</sup>。

2009年, 山西大学孟腾飞、武跃龙等人实现了利用铯分子饱和吸收峰对 $780\text{nm}$ 半导体激光器的稳频。实验中得到了 $800\text{s}$ 内频率漂移小于 $1.5\text{MHz}$ 的频率稳定度<sup>[74]</sup>。

2009年, 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究室的瞿荣辉, 蔡海文, 基于Littman结构和饱和吸收光谱稳频技术, 研制了稳频外腔半导体激光器系统, 输出波长为 $780.2\text{nm}$ , 频率稳定度 $1\text{MHz}$ , 不失锁时间大于 $12\text{h}$ 。利用边带稳频技术将分布反馈(DFB)激光器的输出波长稳定在Cs原子的吸收谱线的边带处, 引入数字信号处理器(DSP)全数字稳频控制技术, 实现了自动找频和稳频, 获得波长为 $852.3\text{nm}$ 的稳频激光输出,  $24\text{h}$ 内频率漂移为 $\pm 2\text{MHz}$ 。利用国产磷酸盐玻璃光纤作为增益介质, 实现了一台高功率单纵模光纤激光器, 制作的厘米级激光器实现了最大输出功率 $100\text{mW}$ , 利用外部光反馈实现单偏振运转, 测得输出线宽为 $2\text{kHz}$ , 偏振消光比优于 $35\text{dB}$ <sup>[75]</sup>。

2010年, Han Young Ryu, Sung Hun Lee, and Ho Suhng Suh等人报导了一个锁定在光频梳上的超稳定的外腔激光二极管,  $1\text{s}$ 频率稳定性达到 $1.1\times 10^{-12}$ <sup>[76]</sup>。

2010年, 土耳其Bilkent大学物理研究所的C. Ülgüdür和 F. Ö. İlday等人, 利用Ce原子吸收谱线对掺镱光纤激光器稳频, 长期频率稳定性达到 $2\times 10^{-14}$ <sup>[77]</sup>。

## 1.4 论文的研究思路及结构安排

本论文以单频光纤激光器为研究对象, 构建单频激光器 PDH 稳频系统的理论模型, 进行 PDH 稳频系统的光路搭建与实验研究。论文结构安排如下:

第一章: 绪论。指出本文研究的背景和意义, 介绍各种激光稳频技术的相关理论, 对其优缺点进行归纳分析, 并调研稳频技术的国内外研究现状。

第二章: 光纤激光的稳频原理。主要包括频率稳定性和复现性等相关概念、稳频激光器的数学模型、影响频率稳定性的因素及频率稳定性的测量方法等。

第三章: 光纤激光稳频系统的优化设计。首先对稳频系统的主要组成部分光源、光路偏振态、系统参数进行理论及仿真分析; 然后确定优化设计方案; 最后对系统进行噪声分析。

第四章: 光外差信号检测优化系统的实现。这是论文研究的重点, 首先, 对优化前系统进行详细分析, 找出问题及解决办法, 根据优化设计方案, 确定探测器电路及解调电路设计的主要功能模块; 然后, 完成对器件的选型; 最后, 完成电路的设计、加工与

制作，并进行噪声分析。

第五章：光外差信号检测优化系统的实验研究与结果分析。首先介绍系统的实验原理及装置，完成光纤激光器性能测试、光路偏振态影响分析及电光相位调制谱检测等实验；然后，对系统实验结果进行重点分析；最后，计算得到鉴频斜率、误差信号及阿伦方差。

最后：总结。针对第二、三、四、五章的研究内容，得出分析结论并提出下一步工作建议。

## 第二章 光纤激光的稳频原理

本章首先介绍相位调制光外差的稳频原理。对于一台自由运转的激光器和一台频率稳定输出的激光器，针对如何定量地判断它们频率稳定状态的优劣，引入频率的稳定性(又称稳定度)和复现性这两个物理量。激光器的输出频率易受到外界的影响，本章从理论推导出激光频率变化的数学模型，并分析影响激光输出频率稳定的各种因素，从而寻找稳频的方法，最后给出频率稳定度的测量方法。

### 2.1 PDH 激光稳频系统

#### 2.1.1 相位调制光外差稳频系统原理

PDH 稳频结构原理如图 7 所示。从单频光纤激光器输出的信号光经过准直器输出后，经过空间电光调制器(EOM)入射到 F-P 腔中。一般情况下，调制光谱的一对边带与载波外差产生的拍频电流等值反相完全抵消，输出为零。但是当该调制光束射入 F-P 腔时，这种平衡对称性将被破坏，拍频电流不再为零，于是可以得到频率为  $\nu$  的信号。F-P 腔的反射光信号经光电转换通过一个混频器来检测调节。对位相延迟的适当调节使得中央出现一级尖峰，以此作为鉴频信号。因此 F-P 腔的光外差色散谱线中心对称，中心(谐振点)为零，故具有很好的鉴频特性，可以用作理想的反馈控制信号，来调节激光器参数，进行激光稳频。鉴频曲线斜率很大，偏离谐振频率时，输出信号骤增，故控制灵敏度极高，具有很高的信噪比。这对提高稳频程度，压缩线宽极为有利。

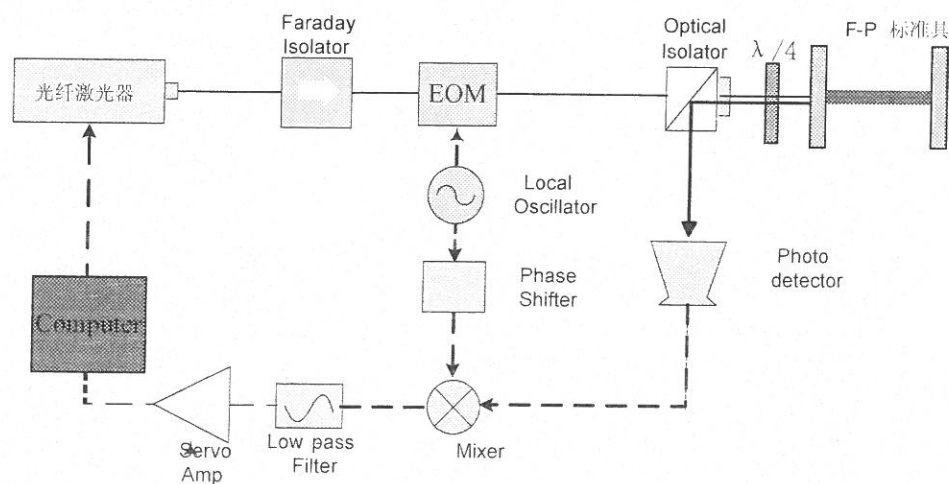


图 6 相位调制光外差系统示意图

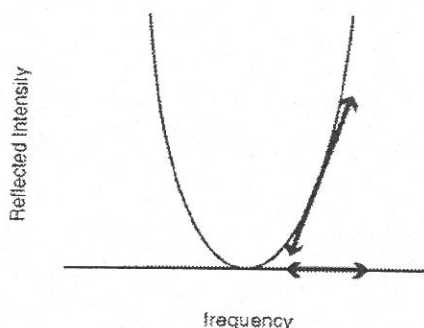


图 7 相位调制光外差原理图

反射光到达探测器上,调制光谱边带与载波拍频<sup>[78]</sup>。若激光频率等于参考谐振频率,调制边带平衡对称,拍频输出为零。反之,若激光频率偏离参考频率,但失谐量仍在参考腔的线宽内,边带的平衡对称性被破坏,则有拍频电流输出,将此误差信号适当放大后和射频参考信号一起输入平衡混频器,取适当的相移,使拍频信号与射频参考信号相位差为  $0^\circ$ 。混频解调后,得到色散型鉴频信号,它通过伺服系统,使激光频率的偏移量回复到零,从而将激光频率锁定在参考腔谐振频率上以实现稳频。

PDH 稳频技术避开了光频率调制带来的大部分缺点,能够在较高频率上实现误差信号的检测,因为在高频上系统的噪声远远低于低频噪声,其误差信号具有高信噪比和大获得带宽<sup>[79]</sup>。

### 2.1.2 相位调制光外差原理

单频激光经过电光相位调制后的光场为:

$$E(t) = E_0 e^{i(2\pi\nu t + \beta \sin ft)} \quad (2.1)$$

其中,  $E_0$  为入射光振幅,  $\nu$  为入射激光的角频率,  $f$  为电光相位调制器的调制频率,  $\beta$  为调制度。

利用贝塞尔函数将(2.1)式在频域展开,当调制度  $\beta$  小于 1 时,可取一阶近似:

$$\begin{aligned} E(t) &\approx E_0 [J_0(\beta) + 2iJ_1(\beta) \sin 2\pi ft] e^{i2\pi\nu t} \\ &= E_0 [J_0(\beta) e^{i2\pi\nu t} + J_1(\beta) e^{i2\pi(\nu+f)t} - J_1(\beta) e^{i2\pi(\nu-f)t}] \end{aligned} \quad (2.2)$$

根据无损谐振腔的反射系数和输出反射光场关系得到 F-P 标准具的反射光场为:

$$E_{ref}(t) = E_0 [J_0(\beta) F(\nu) e^{i2\pi\nu t} + J_1(\beta) F(\nu+f) e^{i2\pi(\nu+f)t} - J_1(\beta) F(\nu-f) e^{i2\pi(\nu-f)t}] \quad (2.3)$$

其中,无损谐振腔的反射系数  $F(\nu)$  为:

$$F(\nu) = \frac{\sqrt{R} \left( \exp(i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}}) - 1 \right)}{1 - R \exp(i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}})}$$

因此, 反射光束经过偏振分束, 入射到探测器, 经外差探测的反射光功率为:

$$\begin{aligned} I_{ref} = & P_0 J_0^2(\beta) |F(\nu)|^2 + P_0 J_1^2(\beta) [|F(\nu+f)|^2 + |F(\nu-f)|^2] \\ & + 2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \{ \text{Re}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \cos 2\pi f t \\ & - \text{Im}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \sin 2\pi f t \} + (2\Omega \text{ terms}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

其中,  $J_0^2(\beta)P_0$  为载波光功率,  $J_1^2(\beta)P_0$  为一阶边带光功率。  $\cos 2\pi f t$  项反应腔的吸收特性 ( $\omega \ll \Delta\nu_{fsr} / \text{Finesse}$ ), 而  $\sin 2\pi f t$  项反应腔的色散特性 ( $\omega \gg \Delta\nu_{fsr} / \text{Finesse}$ )。

光电流信号经过滤波放大等调理环节后输入到混频器 RF 端口, 解调得到的信号为:

$$e = 2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \text{Im}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \quad (2.5)$$

在 F-P 腔的近谐振状态, 同时调制频率约为谐振腔线宽的 20 倍以上, 经过近似得到误差信号为:

$$e = -2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \text{Im}[F(\nu)] \quad (2.6)$$

当激光频率处于 F-P 腔近谐振状态时, 由谐振腔的精细度及反射系数, 得到误差信号为:

$$e = -8P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \frac{\delta\nu}{\Delta\nu} \quad (2.7)$$

其中,  $\Delta\nu = \Delta\nu_{fsr} / \text{Finesse}$  是谐振腔的线宽, 误差信号为:

$$e = D \cdot \delta\nu \quad (2.8)$$

其中  $D$  定义为鉴频斜率, 表达式为:

$$D = -8J_0(\beta)J_1(\beta)P_0 / \Delta\nu \quad (2.9)$$

## 2.2 激光稳频相关特性

### 2.2.1 频率的稳定性和复现性

Schawlow 和 Townes 在理论上计算了单模激光的线宽, 他们的结论表明: 一台典型的单频连续气体激光器的输出线宽小于 1Hz! 如此窄的线宽在实际应用中从未观察到。因为一台自由运转的激光器因受到周围环境各种因素的扰动, 输出的激光频率不是稳定



的,而是经常随时间变动的。如果采取一定的稳频措施来自动补偿其外界扰动所引起的频率起伏,则能使输出频率的变化减至很小。但实际采用不同的稳频技术,所得到的稳频效果也不同。为此,引入频率的稳定性和复现性来表征频率稳定的程度<sup>[80]</sup>。

频率稳定性通常指激光器在连续运转时,在一定的时间间隔内平均频率( $\bar{\nu}$ )与该时间内频率的变化量( $\Delta\nu$ )之比,即

$$S = \frac{\bar{\nu}}{\Delta\nu} \quad (2.10)$$

显然,变化量  $\Delta\nu$  越小,则  $S$  越大,表示频率的稳定性越好。在技术上有时也把  $S$  的倒数称为稳定度,即

$$S^{-1} = \frac{\Delta\nu}{\bar{\nu}} \quad (2.11)$$

频率稳定度又可分为短期稳定度和长期稳定度,二者划分的基准是,以探测系统的响应(分辨)时间  $\tau_0$  与测量仪器的观测取样时间  $\tau$  之间的关系来定:当  $\tau \leq \tau_0$  时,测得的频率稳定度称为短期稳定度;当  $\tau > \tau_0$  时,测得的稳定度则属于长期稳定度。比较恰当的表现法是,在稳定度数值后面标明取样时间  $\tau$  值。

例如,  $S_{\nu(\tau)} = 10^{10} (\tau = 10s)$ 。

频率复现性是表示激光器在不同的时间、地点等条件下频率重复或再现的精度。比如平时用尺子测量长度,不但要求尺子的长度稳定,而且要求尺子本身的长度要符合标准。用激光进行精密测量也有类似的问题,如我们用同样方法稳频的甲激光器和乙激光器的频率可能有差别(尽管两台激光器的结构和运转条件等都相同)。或者用同一台稳频的激光器,在甲地使用时稳定度为  $10^{-8}$ ,频率稳定在  $\nu_1$  上,在乙地使用时稳定度不变,但是稳定在  $\nu_2$  上;或在同一地点测量时某一天频率稳定在  $\nu'$  上,相隔数天后稳定度不变,但频率却稳定在  $\nu''$  上。由于每次所稳定的频率值有微小的差别,则会使测量的数值不准确。我们把这种在不同地点、时间、环境下稳定频率的变化程度称之为频率复现性,用下式表示:

$$R = \frac{\delta\nu}{\bar{\nu}} \quad (2.12)$$

式中,  $\delta\nu$  表示在不同情况下的频率改变量,  $\bar{\nu}$  为不同条件下测量的平均频率。

由此可见,频率的稳定性和复现性是两个不同的概念。所以对一台稳频激光器,不仅要看其稳定度,而且还要看它的频率复现性如何。



### 2.2.2 频率变化的数学模型

从激光原理可知，激光振荡频率既受原子跃迁谱线频率  $\nu_m$  的影响，又受光学谐振腔谐振频率  $\nu_c$  的影响，若原子跃迁谱线的宽度为  $\Delta\nu_m$ ，谐振腔的谱线宽度为  $\Delta\nu_c$ ，则激光振荡频率可表示为

$$\nu = \frac{\nu_m \nu_c (\Delta\nu_m + \Delta\nu_c)}{\nu_m \Delta\nu_m + \nu_c \Delta\nu_c} \quad (2.13)$$

这是在小振幅时忽略了饱和效应的一次近似式。在近红外和可见光波段，其  $\Delta\nu_m$ （多普勒线宽）一般不小于  $10^8-10^9 \text{ Hz}$ ，而谐振腔的振荡线宽  $\Delta\nu_c$  约为  $10^6-10^7 \text{ Hz}$  量级，所以式 (2.13) 可简化为

$$\nu = \nu_c + \frac{(\nu_m - \nu_c) \Delta\nu_c}{\Delta\nu_m} \quad (2.14)$$

上式说明：激光器的振荡频率是由原子跃迁谱线频率及谐振腔的谐振频率共同决定的，二者的变化均会引起激光频率的不稳定。谱线对振荡频率的影响由式 (2.14) 中的第二项以频率牵引效应表示出来，牵引效应的比例系数为  $\frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_m}$ ，在一般情况下，频率牵引效应很小，而谐振腔的谐振频率对环境影响很敏感，故激光频率的稳定性主要取决于谐振腔谐振频率的稳定性。

在不考虑原子跃迁谱线频率微小变化的情况下，激光振荡频率主要由谐振腔的谐振频率决定，即有

$$\nu = q \frac{c}{2nL} \quad (2.15)$$

式中， $L$  为腔长； $c$  为光速； $n$  为腔内介质的折射率； $q$  为纵模的序数。从式中可以看出，若腔长或腔内的折射率  $n$  发生变化，则激光振荡频率也将变化。

$$\Delta\nu = -qc \left( \frac{\Delta L}{2nL^2} + \frac{\Delta n}{2n^2 L} \right) = -\nu \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right) \quad (2.16)$$

即

$$\left| \frac{\Delta\nu}{\nu} \right| = \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta n}{n} \right| \quad (2.17)$$

故激光频率的稳定问题，可以归结为如何设法保持腔长和折射率稳定的问题。

### 2.2.3 影响激光频率稳定的因素

从以上分析可以看出,凡是对激光器谐振腔的长度和折射率产生影响的因素,都会影响到激光输出频率的稳定性。总结起来有以下几个主要外界因素。

#### (1) 温度变化的影响

环境温度的起伏或者激光管工作时发热,都会使腔材料随着温度的改变而伸缩,以至引起频率的漂移,由于其变化系缓慢进行,故主要影响频率的长期稳定性。在半导体泵浦的固体激光器中,激光二极管的温度变化会影响其输出功率,而激光晶体和倍频晶体的温度变化不仅影响其折射率,而且会影响到彼此之间的匹配,造成输出功率以及频率的不稳定。

#### (2) 大气变化的影响

对于外腔式激光器,其谐振腔除了放电管以外,有一部分是暴露在大气中的,大气的温度、气压、湿度的变化都会引起大气折射率的变化,从而导致激光振荡频率的变化。实验证明:外腔式激光器由于通风引起的空气扰动,能在几秒钟内产生几兆赫的快速脉动,所以要求外腔激光器暴露在大气中的部分应尽可能减少,并且必须屏蔽直接通风。

#### (3) 机械振动的影响

外界的机械振动,如建筑物的振动、车辆的通行、声响等都会引起谐振腔的支架振动,因而使谐振腔的光学长度改变,导致振荡频率的漂移。如一个 10 厘米长的氩氖激光管,由于机械振动使腔的反射镜片振动位移 4 埃(1 埃= $10^{-10}$  米),就会引起振动频率约 1 兆赫的变化量。因此,为了克服机械振动的影响,稳频激光器必须采取良好的防震措施。

#### (4) 磁场的影响

为了减小温度影响,激光谐振腔间隔器多采用殷钢材料,但殷钢的磁致伸缩性质可能引起腔长的变化,因而地磁场效应和周围电子仪器的杂散磁场对高稳定激光器或由磁场效应稳频的激光器的影响必须加以考虑。

#### (5) 激光管放电噪声的影响

放电噪声属内部影响,这是由于激光管内等离子体振荡造成放电电流的变化,引起激光上能级粒子数脉动,从而使激光输出的频谱中产生白噪声,其量级为总功率的百分之几。激光的直流电源、镇流电阻与激光管形成的回路中的振荡常产生千赫范围内的强度变化,也会产生功率百分之几量级的变化。尤其在 10Hz-1MHz 的低频范围内,经常出现尖峰,这与放电中的移动辉纹有关。改变放电电流,输出中的噪声谱会发生变化,

从而可以选择最佳放电电流来取得最小噪声的输出频谱，由此获得较高的频率稳定度。

#### (6) 内部光反馈的影响

反馈光在谐振腔内的综合效应会对稳频激光产生十分不利的影 响，严重时 会破坏频率的稳定。但如果反馈光来自于激光器自身，例如激光反射镜后表面所产生的反射光重新进入谐振腔的情况，可以使镜片两个平面间具有一定的楔角，就可避免这种类型的光反馈。其次，由于热效应会引起镜子温度的变化，使反射光的相位改变，这虽然对稳频时的频率稳定度并无直接的影响，但它使激光功率产生很大的波动，严重时功率波动可高达 50%。

光反馈效应引起的反射率变化使腔内功率产生波动外，还会引起输出功率调谐曲线的不对称性，使增益线中心或兰姆凹陷中心发生偏移，从而影响作为参考的频率复现性。

综上所述，环境温度的变化、机械振动等外界干扰对激光频率稳定性影响很大，因而，最直接的稳频方法就是恒温、防震、密闭隔声、稳定电源等。然而，由于激光频率对环境影响的极端敏感，即使采取严格的措施，自由运转的激光器频率稳定性和复现性也不能达到  $10^{-8}$  量级<sup>[81]</sup>。为了进一步改善频率稳定性和复现性，必须使用电子伺服系统对激光器进行自动控制，即主动稳频的方法。由上式(2.17)可知，在保持折射率不变的情况下，稳频技术的实质就是保持谐振腔光学长度的稳定。主动稳频就是选取一个稳定的参考频率，当外界影响使激光频率偏离特定的参考频率时，可以通过频率鉴别，由电子伺服系统自动调节腔长，将激光频率回复到特定的参考频率而达到稳频的目的。

### 2.3 频率稳定度的测量

频率稳定度的测量一般有两种方法：频谱仪法和拍频法。

所谓频谱仪法就是通过频谱仪观察在长时间运行情况下激光频率随时间的变化情况，并根据式(2.11)计算出频率的稳定度，是最常用的一种方法。

由于激光的频率极高，直接测量频率的稳定度是很困难的，用一般电子仪器也无法将极高的光频变化显示出来，所以利用“拍频”的方法进行相对测量。这有些类似电子技术中的差频技术，将两列光波进行混频，所得差频信号为射频信号，可以用电子仪器进行测量、显示，其数据则采用阿仑(Allan)方差进行处理。

利用激光的相干性，当两束激光叠加在一起时，所出现的初相位的差值是一个暂时稳定或缓变的关系，因此会产生干涉现象。从两束不同频率的光波之间的可相干性提供了一种测量光波频率稳定性的方法，称之为“拍频”技术。

设有频率相差很小的两束光波，一束的角频率为  $\omega_1$ ，另一束为  $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$ ，则其合成振动为

$$y(t) = A_c \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_c \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2.18)$$

令

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) = \omega_1 + \frac{1}{2}\Delta\omega \quad (2.19)$$

$\bar{\omega}$  为平均频率，并且  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  都不随时间变化，应用三角函数的和差化积公式，则上式可以写成

$$y(t) = 2A_c \cos\frac{1}{2}(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \cos(\bar{\omega}t + \bar{\varphi}) \quad (2.20)$$

式中， $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ， $\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\varphi_2 + \varphi_1)$ ，上式仍然可以看成是一个高频的准简谐振动，其频率为  $\bar{\omega}$ ，其振幅是随时间缓慢变化的函数  $2A_c \cos\frac{1}{2}(\Delta\omega t + \Delta\varphi)$ ，其极大值为  $2A_c$ ，极小值为零。将振幅平方就是这个合成振动的光强

$$I(t) = 4A_c^2 \cos^2\frac{1}{2}(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (2.21)$$

可知光强也是随时间周期地变化着，两次零光强之间的间隔时间是  $T = 2\pi/\Delta\omega$ ，即叠加之后的光强是以频率为  $\Delta\omega/2\pi$ 、幅度从 0 到  $4A_c^2$  之间变化着，这个频率称为“拍频”。拍频现象也说明了两束不同频率的波动叠加以后是能够产生干涉的。

用拍频技术测量激光的频率稳定度，用双取样阿兰方差的表达式为

$$S_v = \frac{\sqrt{\sigma^2(2, \tau)}}{\bar{\nu}} = \frac{1}{\bar{\nu}} \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (v_{2i} - v_{2i-1})^2}{2N}} \quad (2.22)$$

式中， $\bar{\nu}$  为激光平均频率， $v_{2i}$ ， $v_{2i-1}$  是相邻差频信号的频率， $\tau$  是取样平均时间， $1/2$  是假定每一台激光器对差频频率起伏具有相同作用的因子。因此，只要在数字频率计上测出  $N$  组相邻差频频率序列，通过上式即可计算出取样时间内每台激光器的频率稳定度。

## 2.4 本章小结

本章确定了激光器的稳频方案——相位调制光外差稳频，全面系统地推导了稳频的原理，并引入频率的稳定性和复现性两个物理量，对影响激光器输出频率的外界因素进

行了详细的阐述，理论推导出激光频率变化的数学模型。本章对相位调制光外差稳频系统的理论分析，为后续的实验设计与实现奠定了良好的基础。



## 第三章 光纤激光稳频系统的优化设计

本章对光纤激光相位调制光外差稳频系统（以下简称系统）的关键组成部分，包括光纤激光器、系统光路、系统参数等，进行详细的分析。对光纤激光器的波长、功率及光谱进行实验研究；针对系统光路，提出优化设计方案；对误差曲线的线性动态范围及灵敏度，通过实验仿真进行定量讨论和优化，确定稳频系统调制参数。最后确定光纤激光稳频系统的优化设计方案。

### 3.1 稳频的对象—DFB 光纤激光器

光纤激光器具有寿命长，模式好，体积小，免冷却等一系列其他激光器无法比拟的优点，近年来受到了来自电子信息、工业加工和国防科技等研究开发领域的高度关注。

高功率光纤激光器与同等功率水平的其他类型激光器相比较，其具有效率高、体积小、冷却温度低和光束质量好等优点，因此高功率光纤激光器一直是光纤激光器领域中最热门的研究方向。

对于激光器来说，如果只允许一个纵模振荡，则形成单频激光器，其输出光具有极高的时间相干性。该类型激光器具有很高的实用价值，所以窄线宽光纤激光器就成为光纤激光器研究领域的另一个热点，它以线宽窄、低噪声等优点广泛应用于光纤传感、光纤遥感、高精度光谱及光纤通信领域。

利用光纤激光器实现单模运转，主要有几种方案：一是采用环形激光器，其不足之处是所用有源光纤较长，模式间隔小，容易发生模式跳变；二是采用线性直腔激光器，它主要包括 DBR 光纤激光器和 DFB 光纤激光器，它们不但能提供稳定的单纵模激光运行，并且具有窄线宽、微型化、可调谐等特点，是一种很有前途的新型光源。

DFB 光纤激光器是利用直接在稀土掺杂光纤写入的光栅构成谐振腔，有源区与反馈区同为一体。它优于 DBR 之处在于它只用一个光栅就能实现反馈和波长选择，容易获得单纵模、窄线宽工作，而且频率稳定性更好。但是 DFB 光纤激光器输出功率小，为了实现大功率激光输出就必须对其出射激光进行放大，然而在放大的过程中，光纤激光器输出的光谱谱线宽度大幅度展宽，同时激光输出的稳定性也不高，需要对其进行稳频。

课题稳频的对象为 DFB 光纤激光器，在实验初，对其性能进行了测试，详细见 5.2 节。

### 3.2 系统光路的优化

PDH 稳频系统中, 光路的偏振态至关重要<sup>[82]</sup>。由于 EOM 的剩余幅度调制将会引起光谱信号的基线偏离零电平, 而剩余幅度调制又随环境和实验条件的改变而变化。因此, 克服剩余幅度调制对提高稳频效果很重要。在实验中通过调节入射光的偏振方向, 使其与晶体切割方向有很好的匹配, 可有效地消除剩余幅度调制, 使电光调制器达到最大调制效率。我们所选用的调制器, 要求垂直于水平方向的偏振光为有效偏振光, 因此在调制器前放置一个  $1/4$  波片, 一个  $1/2$  波片, 两波片作为起偏器, 信号光经过两波片以后得到消光较高的垂直于水平面方向的线偏振光。

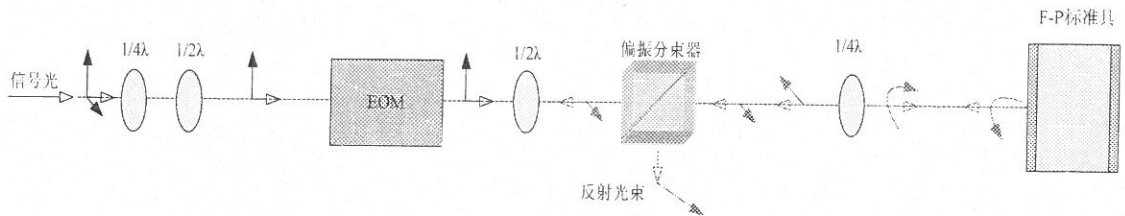


图 8 PDH 稳频系统光路偏振示意图

如图 8 所示, 信号光通过起偏镜组后, 得到具有消光比较高的垂直于水平面的偏振光, 经调制器调制, 垂直线偏光经过  $1/2$  波片, 通过旋转波片改变主轴方向角度, 得到适合于偏振分束棱镜(PBS)的水平方向线偏光, 透过偏振分束器, 经四分之一波片, 线偏光变为右旋圆偏振光射入 F-P 腔, 其反射光束为左旋偏振光, 再经四分之一波片, 偏振态变为水平线偏光, 但相对入射线偏振光转向  $90$  度, 经偏振分束棱镜后入射到探测器中, 实现检测 F-P 腔反射光束的目的。 $1/2$  波片,  $1/4$  波片与 PBS 组合使用既实现了对光路偏振态的改变, 又起到光隔离器的作用, 避免 F-P 腔的反射光束对激光光源造成损害, 此外, 通过偏振器件能较容易得到试验所需反射光束。

基于以上偏振态分析, 电光相位调制器要求入射光偏振方向为垂直于水平面方向, 所以需要在光源的输出端口光轴上加入偏振元件, 系统中在输出端口处加入  $1/4$ 、 $1/2$  波片, 得到垂直于水平面方向的线偏光。所选用的偏振分束棱镜对水平方向线偏光产生透射, 垂直方向产生反射, 因此在调制器输出端口光轴上加入  $1/2$  波片, 以使调制光通过偏振分束棱镜, 如上所述, 偏振棱镜后方的光轴加上  $1/4$  波片实现光隔离, 探测 F-P 反射光目的。图 9 为稳频系统光路原理图。



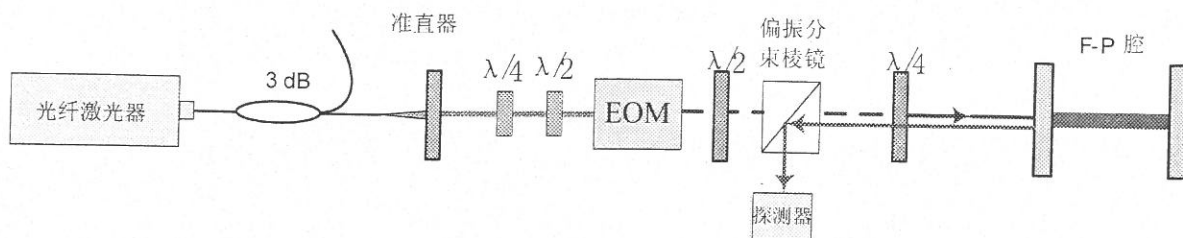


图 9 稳频系统光路原理图

然而，上述所述的是建立在在信号光为圆偏光的基础之上的，可我们所用光纤激光器输出的光是没有偏振态的，所以按上述所搭的光路存在一定问题，因此，提出需要使用偏振片而非波片来获取线偏光，如下图所示：

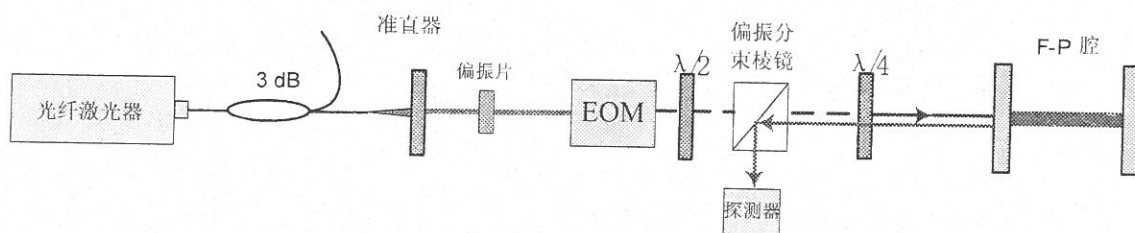


图 10 稳频系统光路原理图（优化后）

此外，在光路的调节流程以及标准具的调节方法上进行了优化，通过对优化前后所观测到的信号的对比，能够看出有明显的改善，见 5.3 节。

### 3.3 系统参数的选择

#### 3.3.1 吸收曲线与色散曲线

Fabry-Perot 谐振腔的反射传递函数<sup>[83]</sup>为：

$$F(\nu) = \frac{\sqrt{R} \left( \exp(i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}}) - 1 \right)}{1 - R \exp(i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}})} \quad (3.1)$$

其中  $R$  为镜面反射率。

根据无损谐振腔的反射系数和输出反射光场关系得到 F-P 标准具的反射光场为：

$$E_{ref}(t) = E_0 [J_0(\beta)F(\nu)e^{i2\pi\nu t} + J_1(\beta)F(\nu+f)e^{i2\pi(\nu+f)t} - J_1(\beta)F(\nu-f)e^{i2\pi(\nu-f)t}] \quad (3.2)$$

因此，反射光束经过偏振分束，入射到探测器，经外差探测的反射光功率为：

$$\begin{aligned} I_{ref} = & P_0 J_0^2(\beta) |F(\nu)|^2 + P_0 J_1^2(\beta) [|F(\nu+f)|^2 + |F(\nu-f)|^2] \\ & + 2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \{ \text{Re}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \cos 2\pi ft \\ & - \text{Im}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \sin 2\pi ft \} + (2\Omega \text{ terms}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

其中,  $J_0^2(\beta)P_0$  为载波光功率,  $J_1^2(\beta)P_0$  为一阶边带光功率。 $\cos 2\pi ft$  项反应腔的吸收特性( $\omega \ll \Delta\nu_{fsr} / \text{Finesse}$ ), 而  $\sin 2\pi ft$  项反应腔的色散特性( $\omega \gg \Delta\nu_{fsr} / \text{Finesse}$ )。

当对激光频率扫描时, 调制光的载波和边带相对腔的谐振曲线的位置不同, 从而引起激光幅度和相位的相应变化。探测器接收到该反射信号, 边带与载波的光外差拍频产生频率为调制频率的光电流信号。根据上式, 可知光电流:

$$\begin{aligned} i &\propto |E|^2 \\ &= 2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \{ \text{Re}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \cos 2\pi ft \\ &\quad - \text{Im}[F(\nu)F^*(\nu+f) - F^*(\nu)F(\nu-f)] \sin 2\pi ft \} \end{aligned} \quad (3.4)$$

当改变调制频率  $f$ , 可分别探测到(3.4)式中第一项、第二项。对上式的数值计算模拟结果如下图所示。

图 11 虚线代表的谱线具有吸收型特征, 实线代表的谱线具有色散型特征<sup>[84]</sup>。

从图我们可以看出该光谱线型具有良好的鉴频特性, 中心对称, 左右  $\Delta f$  范围内对称且反相, 可以用来将激光频率锁定在色散谱线中心过零点。探测透射光时, 由于腔的线宽较窄, 当激光偏离谐振频率中心时边带只有很小一部分能通过。而当探测反射光时, 即使激光频率不在谐振频率中心附近, 仍会有足够的反射光强, 因而拍频信号较强, 所以一般探测的是反射信号。

此外, 对比两图可以看出, 色散曲线中心频率处斜率很大, 说明这种稳频方法具有较高的灵敏度, 另外控制范围比较大, 是调制频率的两倍, 因此是一种理想的稳频方法。

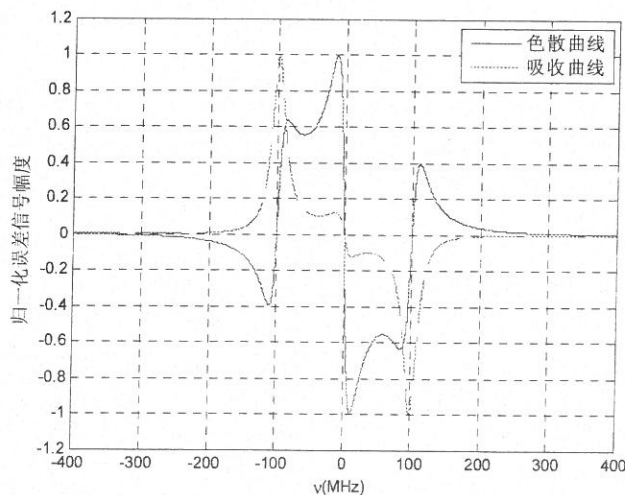


图 11 光外差解调吸收曲线及色散曲线

F-P 腔是稳频系统中最重要元件, 选取具有窄线宽的 F-P, 可以大大降低稳频后激光的频率噪音, 因此实验中最好采用共焦 F-P, 一方面对于相同长度的 F-P, 共焦 F-P

自由光谱范围更小,另一方面由于受面型和校正的影响较小,共焦 F-P 腔的精细度可以达到很高,因此相比于平面 F-P 线宽更窄,稳频效果更佳。

参考腔的共振频率由腔长决定,而腔长又易受外界的影响。腔镜材料的长度随着温度的伸缩,也会导致共振频率的变化。根据国内 F-P 谐振腔调研情况,选用清华大学制作的 F-P 扫描干涉仪作为稳频系统的 F-P 标准具,主要技术参数:长度为  $20.412\text{mm}$ ,自由光谱区  $\nu_{fsr}$  为  $7.349\text{GHz}$ ,精细度  $F$  为  $950$ ,分辨率  $\Delta\nu$  为  $7.735\text{MHz}$ 。F-P 干涉仪采用温度系数为  $6 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}$  的石英玻璃制作,当外界温度变化为  $0.001 \text{ }^\circ\text{C}$ ,腔长变化  $1.22472 \times 10^{-11}\text{m}$ ,其共振频率变化为  $173.684\text{KHz}$ 。

### 3.3.2 线性动态范围分析

解调得到的误差信号如 (2.5) 式所示,令  $\nu = \omega/2\pi$ , 得到

$$e = 2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \text{Im} [F(\nu) F^*(\nu+f) - F^*(\nu) F(\nu-f)] \quad (3.5)$$

$e$  就是可以用来鉴频的误差信号,将其通过伺服系统,反馈控制激光器,使激光频率偏移量回复到零,从而将激光频率锁定在谐振腔频率上以实现稳频。误差信号的典型波形,如下图所示。

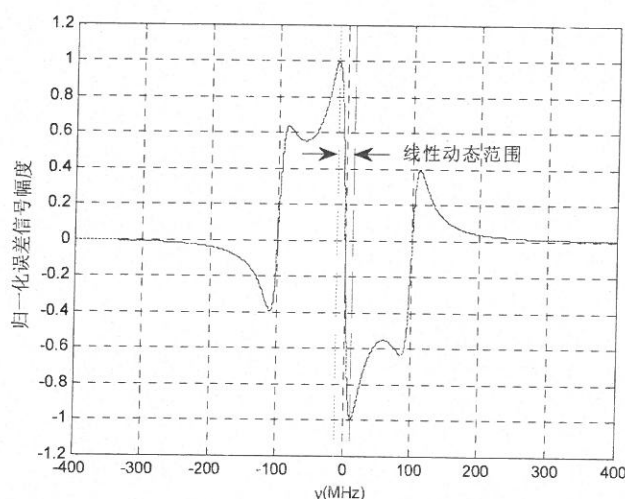


图 12 PDH 频率误差信号

从图中可以看出,在谐振频率附近,即频率误差接近零处,有一个很陡的线性区域。这个区域的范围被定义为 PDH 稳频误差信号的线性动态范围  $\Delta\text{PDH}$ 。系统利用这个范围内的误差信号进行反馈控制,线性动态范围的大小反映了系统对激光频率偏移的可控制范围,如果这个值过小,当激光频率的偏移超出了这个范围,系统就失去对频率进行稳定的作用,即失锁。以下对 PDH 稳频的线性动态范围进行理论和仿真分析。

因为线性动态范围为误差曲线零点两端振幅最大值与最小值间的频率横轴范围,且

式 (3.5) 式连续可微的, 可以通过对误差信号求关于频率误差的导数来确定线性动态范围的精确值。对式 (3.5) 取导数:

$$\frac{de}{d\nu} = 2P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \frac{d}{d\nu} \text{Im} [F(\nu) F^*(\nu+f) - F^*(\nu) F(\nu-f)] \quad (3.6)$$

将  $\omega = 2\pi\nu$ , 自由光谱宽度  $\Delta\nu_{fsr} = c/2L$ , 带入式 (3.1), 并对  $F(\nu)$  进行简化:

$$\begin{aligned} F(\nu) &= \sqrt{R} \left[ \exp\left(i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}}\right) - 1 \right] / \left[ 1 - R \exp\left(i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}}\right) \right] \\ &\approx \frac{\sqrt{R} \left( 1 - i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}} - 1 \right)}{1 - R \left( 1 - i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}} \right)} = \frac{-i\sqrt{R} \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}}}{1 - R \left( 1 - i \frac{2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}} \right)} \\ &= \frac{-i\sqrt{R} 2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr} (1 - R) - i2\pi\nu R} \end{aligned} \quad (3.7)$$

将式 (3.7) 代入式 (3.6) 中, 并令误差信号导数等于零, 可得式 (3.6) 的解中靠近零点的正负两个点即为动态范围的两个端点值, 两点间的距离为线性动态范围。从式 (3.5) 可以看出, 线性动态范围和  $F(\nu)$  与调制频率  $f$  有关, 但求导后的式子太过复杂, 以下将进行逐一分析和讨论。

首先取 FP 腔镜的反射率  $R=0.99$ , 其品质因数为  $Finesse=950$ , 自由光谱范围  $\Delta\nu_{fsr}=7.349\text{GHz}$ , 调制频率  $f=100\text{MHz}$ , 忽略腔受到的外界影响, 得到误差信号及其导数如下图所示。

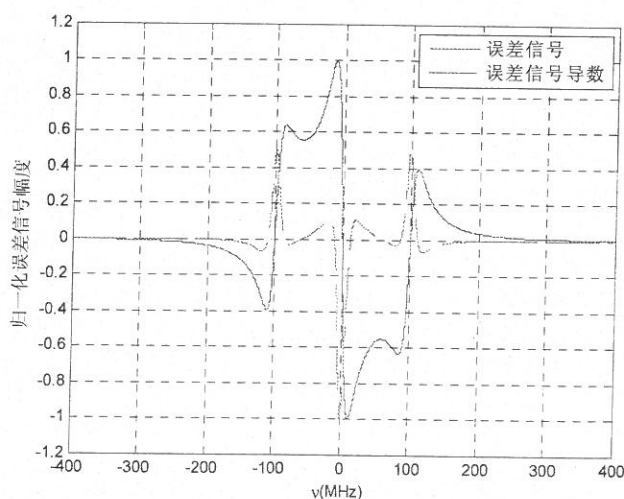


图 13 误差信号及其导数

保持其他条件不变, 仿真误差信号及其导数的波形, 得到  $\Delta\text{PDH}$  随调制频率的关

系如下图所示。

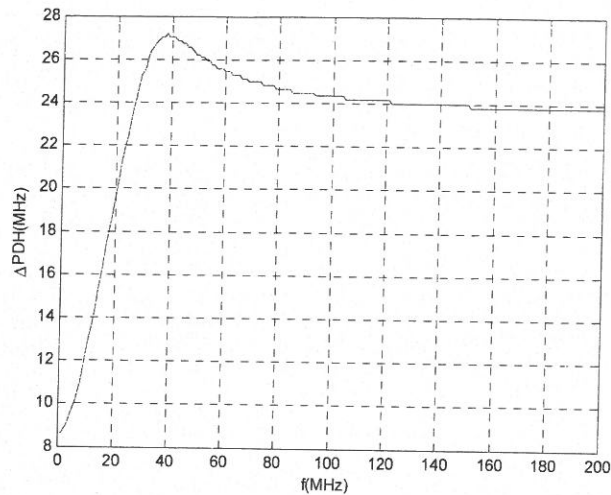


图 14  $\Delta$ PDH 随调制频率变化图

从图中可以看出，为了增大线性动态范围，调制频率应选择 40MHz。标准意义上的 PDH 系统要求调制频率远远大于 FP 腔谱峰值宽度  $\Delta\nu_{res}$ ，而  $\Delta\nu_{res} = \Delta\nu_{fsr} / \text{Finesse} = 7.735\text{MHz}$ ，考虑到电光调制器、光电探测器、放大器和双平衡混频器等单元器件，提高频率对元件的选取和单元器件设计制作带来困难。通过总体考虑调制频率在 100MHz 比较理想。

### 3.3.3 灵敏度分析

线性动态范围内曲线的斜率定义为误差信号的灵敏度 ( $M_{PDH}$ )。灵敏度对信噪比的提高有重要作用，决定着激光频率稳定的精度。在小频率误差情况下，也即频率偏移小于 FP 标准局谱线的半高全宽  $\Delta\nu_{res}$ ，根据式 (3.7)， $F(\nu)$  可简化为：

$$F(\nu) = \frac{-i\sqrt{R}2\pi\nu}{\Delta\nu_{fsr}(1-R) - i2\pi\nu R} \approx -\frac{i2\nu\text{Finesse}}{\Delta\nu_{fsr}} \quad (3.8)$$

其中，品质因数  $\text{Finesse} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ ，将式 (3.8) 代入式 (3.6) 中，并假定在  $\nu \rightarrow 0$  时，

$F(\nu \pm f) \rightarrow -1$ ，则得到灵敏度：