

摘 要

在现代科学研究及检测领域中，光学仪器都起到了至关重要的作用。光学仪器的核心部分是光学系统，而光学系统则是通过各种光学元件组成例如各类光学镜片等。镜片透过率的准确性直接影响整个光学系统的性能，所以对于镜片透过率的准确测量是测试各类光学系统的先决条件。

传统单通道测量方法是镜片透过率的常见测量方法，这种方法虽然结构简单，操作易行，但是由于其原理是通过将空载和放入被测镜片时整个系统光通量的比值来作为被测物体的透过率，这就需要更换镜片对系统进行前后两次的测量，因此该方法对实验环境的要求很高，重复操作极易产生较大误差。

本文从激光自混合干涉原理出发，通过提出一种基于二次反馈激光自混合干涉原理的镜片透过率测量方法来测量镜片透过率，利用激光谐振的三镜腔模型对激光自混合系统进行分析，在激光自混合理论的基础上推出基于二次反馈激光自混合干涉的镜片透过率测量的理论公式，结合理论公式说明产生二次反馈的形成原因；根据实验要求选取合适的仪器，搭建测量镜片透过率的实验平台，分析实验平台的相关参数对实验结果的影响；根据理论公式利用 Matlab 进行仿真并对仿真结果进行分析，并和实验所得的具体数据进行分析对比；最后对实验精度影响的因素进行系统的分析，得出不确定度为 0.23%。

关键词：光学系统、透过率、激光自混合干涉

ABSTRACT

In the field of modern scientific research and detection, optical instruments have played a vital role. The core part of optical instruments is the optical system, which is composed of various optical elements, such as various optical lenses. The accuracy of lens transmittance directly affects the performance of the whole optical system, so the accurate measurement of lens transmittance is the prerequisite for testing all kinds of optical systems.

The traditional single channel measurement method is a common measurement method of lens transmittance. Although this method has simple structure and easy operation, its principle is to take the ratio of no-load and the luminous flux of the whole system when put into the measured lens as the transmittance of the measured object, so it is necessary to replace the lens to measure the system twice before and after. Therefore, this method has high requirements for the experimental environment, and repeated operation is very easy to produce large errors.

Based on the principle of laser self mixing interference, this paper proposes a lens transmittance measurement method based on the principle of secondary feedback laser self mixing interference to measure the lens transmittance, analyzes the laser self mixing system by using the three mirror cavity model of laser resonance, and deduces the theoretical formula of lens transmittance measurement based on secondary feedback laser self mixing interference. Combined with the theoretical formula, the causes of secondary feedback are explained; Select appropriate instruments according to the experimental requirements, build an experimental platform to measure the lens transmittance, and analyze the influence of the relevant parameters of the experimental platform on the experimental results; According to the theoretical formula, the simulation is carried out with MATLAB, and the simulation results are analyzed and compared with the specific data obtained from the experiment; Finally, the factors affecting the experimental accuracy are systematically analyzed, and the uncertainty is 0.23%.

Key words: Optical system, Transmittance, Laser self mixing interference

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究意义.....	1
1.2 激光自混合测量技术的进展.....	1
1.2.1 激光自混合技术概述及特点.....	1
1.2.2 激光自混合技术的研究现状.....	2
1.3 常用镜片透过率检测方法.....	4
1.3.1 概述.....	4
1.3.2 常用的透过率检测方法.....	4
1.4 常用测试方法对比.....	4
1.5 本文主要工作.....	8
第 2 章 二次反馈激光自混合的基本理论.....	10
2.1 二次反馈激光自混合技术的理论.....	10
2.1.1 激光自混合干涉理论模型.....	10
2.1.2 三镜腔理论模型.....	10
2.2 二次反馈激光自混合干涉形成过程.....	13
2.3 本章小结.....	15
第 3 章 二次反馈激光自混合测量实验的整体设计.....	16
3.1 二次反馈激光自混合测量平台的实验仪器的选取.....	16
3.2 目标物的选取.....	17
3.3.1 目标物选取的依据.....	17
3.3.2 滤光片的选取.....	17
3.3.3 中性密度滤光片的性能检测.....	22
3.3 实验参数对信号的影响.....	22

3.4 本章小结.....	27
第 4 章 实验以及实验数据的分析.....	28
4.1 工作原理.....	28
4.2 数据分析.....	28
4.2.1 仿真数据.....	28
4.2.2 实验数据.....	34
4.3 本章小结.....	38
第 5 章 误差和不确定度分析.....	39
5.1 误差与不确定度.....	39
5.1.1 误差.....	39
5.1.2 不确定度.....	40
5.1.3 合成标准不确定度.....	41
5.2 本实验的误差和不确定度分析.....	42
5.3 本章小结.....	46
结 论.....	47
参考文献.....	48
致 谢.....	52
攻读硕士学位期间所取得的科研成果.....	53

第1章 绪论

1.1 研究意义

目前,随着科技的发展,各行各业对于镜片品质的需求越来越高,而透过率这一参数是评判光学镜片品质好坏的一个重要依据。对于这一课题的研究国内外的科研机构和学者都投入极大的时间与精力在里面,镜片透过率的测量已经取得了一些实质性的进展,但也有些缺陷需要改善。例如常用的单通道测试法,这种方法是将测得的光束通过被测物体与光束自身的光通量比值作为被测量系统的透过率^[1]。该检测方法有很多优点例如结构简单,成本较低而且对操作的要求不高,但是该检测方法的缺点也很突出,对环境条件的依赖性很强,极易受到杂散光的影响,该方法需要在放入被测物体和未放入被测物体时的状态分别进行测量,这样不是在同等条件下的两次测量的值会有很大误差^[2]。再者单通道测量法在为了满足入射光线的稳定性通常通过在外加一个透镜来实现,这不仅加深光学系统的复杂程度还降低了光学系统的可靠性,同时也增加了误差几概率降低了测量精度。

总的来说,由于对透过率检测精度的需求度在不断提高,所以就迫切需要找出一种对光学系统透过率测量范围以及测量精度高的测量方法。本文所设计的基于激光自混合干涉镜片透过率测量系统可以补足传统单通道检测方法中的不足,进而大大提升了对透过率的测量范围和精度。

1.2 激光自混合测量技术的进展

1.2.1 激光自混合技术概述及特点

激光测量是光学干涉测量技术中的一个小的分支。其原理是指激光器出射的光束,在传播的过程中碰到障碍物时,一部分光会经过反射回归到激光内腔另一部分会发散开来,回归内腔的光与腔内激光进行混合进而调制激光的频率与光强度。在这部分回归到激光内腔的光束携带着外界物体的一些基本信息,现如今该技术也已经成为测量位移^[3]、角度^[4]、振动^[5]和速度^[6,7]等参数的常用方法。

激光自混合干涉效应主要有以下一些特点^[8]:激光器、透镜和目标物就可以组成一个系统,结构简单、紧凑、易准直且无需外加光学元件;系统的灵敏度高,可以根据

信号的波形来判别物体的运动方向；测量方式为非接触式的测量，降低了损坏测量物体表面的风险；自适应能力强，基本不受光源即激光器的影响。

1.2.2 激光自混合技术的研究现状

（1）国外研究现状

激光自混合地干扰检测技术历经了几十年的发展和研究，因其独有的检测优点而被应用于检测应用领域的各行各业。激光自混合干涉技术的研究最早可以追溯到上世纪六十年代，一开始是 King 等人在实验中偶然发现的现象，即外部反射镜的微小移动能够引起了激光器输出光波波形的变化^[9]。这一现象一经出现就引起了广大学者们的关注，通过一系列的研究也取得一定的成果。把这些成果归纳总结成了一套激光自混合干涉理论体系，并且应用在测距测位移、振动及描绘物体外部轮廓等领域^[10]。

1968 年，Rudd 等人将 He-Ne 激光器应用到测量多普勒速度上去，并证实了激光输出强度的变化与多普勒频率位移之间的相关性^[11]。1980 年，在有光反馈的前提下，Lang 和 Kobayashi 使用复合腔模型的概念，将激光器的基本速率方程推导出来，并将自混合特性和稳态特性分离出来分析^[12]。

1987 年，Shimizu 等人反馈强度的大小与自混合信号有关。在反馈强度达到强反馈时，自混合信号将变化为锯齿波形，可利用锯齿波形的偏移方向，来确定外界物质的运动方向^[10]。

1988 年，Groot 提出了法布里—珀罗腔（F-P 腔）系统模型，简化对自混合系统的分析，并建立了自混合干涉的理论，并推导出自混合干涉的数学表达式^[13]。三镜腔的模型建立为理论的层面上的自混合干涉提供了最根本支持。同年，Degroot P. J. 等人设计了简易版的激光雷达，可以进行距离和速度的测量，同时使用三镜腔对其进行解释说明，为自混合技术的发展向前推进了一大步。

1995 年，J.A.Smith 在对自混合现象的理论分析上将注入锁定理论融入了进去^[14]。这一观点的提出以及理论的验证为研究的思路和方法得到了极大的拓展。

2000 年，G.Giuliani 系统的分析了激光干涉仪的带宽和参数对激光自混合模型的影响^[15]。

2005 年，T.Bosch 等人在分析目标位移与半导体激光器输出之间的关系时，提出了一种新的模型自混合传感器的物理模型，该模型可以准确的分析出它们之间的对应关

系^[16]。该方法的提出为模型分析提供了理论保障。

2007年, K.Otsuka 的研究小组将自混合技术的应用范围进一步扩展了, 可以通过自混合检查出颗粒物大小、浓度以及粒径^[17]。它可以测量液体中的颗粒的浓度、液体的流速以及水和甘油混合物的黏度。

2013年, Zabit U.等人提出利用一种新的算法(包络跟踪算法)来处理自混合的干涉信号, 该算法成功解析出由于散斑干涉和目标横向移动引起的自混合干涉信号变形的问题, 并且重构出物体的位移^[18]。

2015年, Nikolic M.开发了一种新的对自混合干涉血液流速信号的处理办法即差分信号分类法, 使得传感器的测量范围大大增加了^[19]。

2019年, Cholhyon K 等人重新分析了自混合信号中线宽增长因子与条纹之间的关联, 从而提高了对激光二极管反馈因子的评价^[20]。

(2) 国内研究现状

国内科研人员对激光自混合技术的研究明显晚于国外, 但是经过几十年的发展研究, 目前已经形成了一定的研究体系。大体的研究方向如: 实验装置以及理论模型^[21]的优化、反馈因子 C ^[22]的研究、测量距离^[23]、角度^[24]、振动^[25]、折射率^[26]等一系列参数。

郑州大学的禹延光教授^[27,28], 从上世纪末就开始进行了对激光自混合技术的研发工作。通过在三镜腔的理论基础上, 分析激光自混合现象的稳态模型。同时, 经过对理论模型的剖析和有关理论公式的推导求解, 也明确了自混合现象的临界条件和处于系统稳定状态下的光反馈强度^[29]。

清华大学的张书练课题组对激光自混合技术进行全方位的研究, 包括位移、速度、生物成像以及变形镜测量等^[30,31]。

南京师范大学王鸣教授等人, 把相位调制原理融入对自混合技术研究中, 使得测量精度达到微纳米级, 与此同时也对自混合散斑干涉和流体速度的测量进行研究^[32]。

从激光自混合的国内外研究现状来看, 对激光自混合理论的研究日趋成熟, 激光自混合也正被应用在测量的各个领域, 技术也更加趋于完善, 影响干涉效应的多种因素也取得了长足的进展, 使得自混合技术, 本文主要利用激光自混合技术的特性对镜片透过率进行高精度的测量。

1.3 常用镜片透过率检测方法

1.3.1 概述

在日常生活中，镜片随处可见，透过率则是衡量镜片质量的核心参数，透过率高，成像的质量好；透过率低，成像质量差。虽然，对于镜片透过率的测量经过多年的发展，已经取得了一定的成果，市面上也出现各种各样的镜片透过率测量仪，但是精度上以及对测量的要求上仍需要予以改进。

1.3.2 常用的透过率检测方法

(1) 光电流检测法^[33]

光电流检测法首先需要进行两次测量，分别将放入和未放入被测系统的两种状态下的光电流计数值读出，这个比值就是被测系统的透过率。

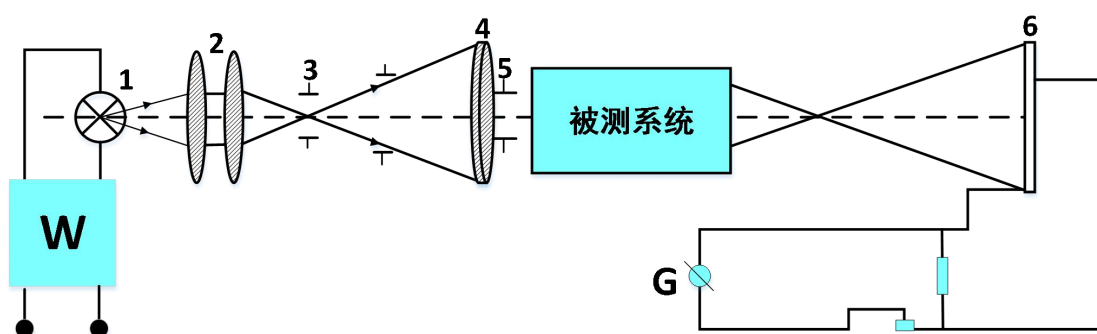


图 1. 光电流检测法光路示意图

Fig 1. Schematic diagram of optical path of photocurrent detection method.

图中各部件的作用：1 为系统光源，产生光线；2 是聚光镜主要作用将光线聚焦；3 和 5 都是可调节的孔径光阑，前者是为了消除杂散光的影响，后者是为了减少光通量；4 代表着准直物镜其作用将光线准直；6 是硒光电池用来将光信号转化为电信号。

在光电流系统搭建的过程中要注意这几点：

1. 在准直物镜前还有一个可调光阑，它的作用是控制光束的大小防止光束外泄；

2. 光阑 5 在减少光通量的同时，一定要使其出射孔径小于被测系统的孔径这样才能保证被测系统被放入前后的光通量一致；

所以透过率可以表示为：

$$\tau = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

其中 m_0 表示被测系统未放入时检流计的读数， m_1 表示放入被测系统后的检流计读数。

(2)积分球法^[34]

积分球检测法的测试系统由两部分组成的：

- 1.准直子系统，它主要作用是将光源产生的光束近似地转化为平行光束。
- 2.探测器子系统，是整个系统的主要测量部分，由积分球、硒光电池和检流计组成。

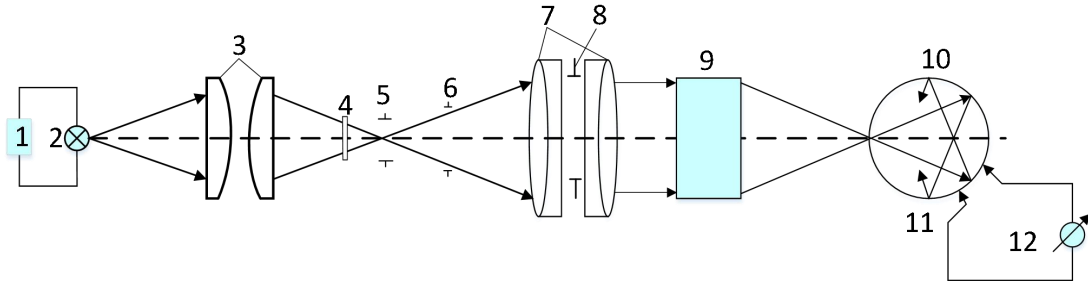


图 2. 积分球检测法光路结构

Fig 2. Optical path structure of integrating sphere detection method.

图中各部件的作用：1 为光源的稳定电源和 2 光源一起产生稳定的光束；3 是一个透镜组将光束进行汇聚；4 为滤光片作用是去除杂散光；5、6 和 8 均为可调节的光阑用以控制光束的大小；7 为物镜组将光束准直；9 为被测物体；10 为积分球；11 硒光电池；12 检流计；

用 m_0 标定系统时检流计的数值是可控的， m_1 表示加入被测物体后检流计的示数，被测物体的透过率则可以表示为：

$$\tau = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

在实际操作中一般将 m_0 设置成 100 这，这样 m_1 为 τ 值不需要在进行计算。

但是本方法受到内部暗电流和背景光的影响，精度不高。要想精准地测量出被测物体的透过率，那么就需要采用其他办法抵消掉干扰因素的影响。若 x 是影响测量的干扰因子，那么被测物体的透过率有：

$$\tau = \frac{m_1 - x}{m_0 - x} \times 100\% \quad (1-3)$$

(3)回反射检测法^[35]

回反射检测方法的一大特点是专门用来检测红外波段透过率的，可以有效地避免误差的干扰。回反射检测方法和上述两种方法的主要区别：它的出射光束为两束，其

中一个作为参考光最终由测量出的值为参考值，另一束为测量光最终测量的值为测量值，而被测物体的透过率为测量值和参考值的比值。

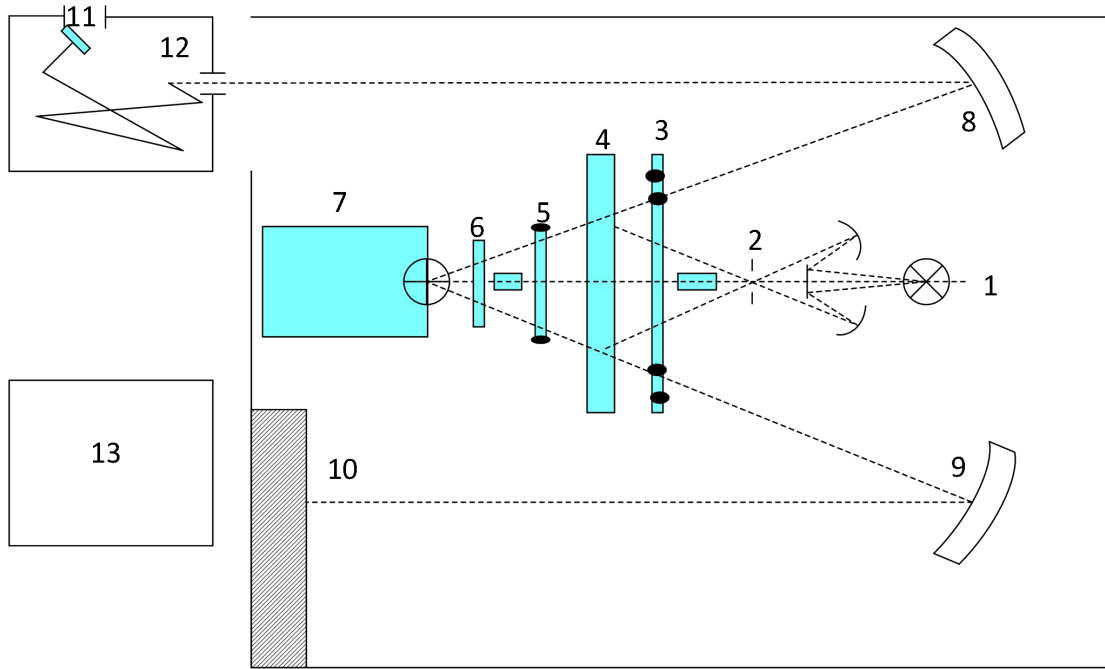


图 3. 回反射检测法原理图

Fig 3. Schematic diagram of back reflection detection method.

图中各部件的作用：1 光源出射光束；2 和 3 均为可控光阑前者起到消除杂散光的作用，后者会对光束大小进行调节；4 分光镜；5 调制盘；6 分划板；7 探测接收器，用来接收光束并把光信号转化为电信号；8 和 9 为球面反射镜用来反射光束；10 和 11 为回反射镜用来反射光束；12 被检测的系统；13 锁相放大器。

最终的信号由探测器接收到并传输至锁相放大器中，然后在对信号加以处理。锁相放大器也同样会将调制盘所产生的信号收集起来。该方法就是通过光回射和反射出的光通量地比得到被测试品的透过率

因此可得：

$$U_0 = (M_B k_1) \rho k_2 R \quad (1-4)$$

式中： U_0 表示参考信号的伏值、 ρ 是回反射系数、 M_B 是总的辐射通量、 k_1 和 k_2 分别表示总辐射的通过系数以及出射时的透过系数、 R 是系统的响应程度。

同理，测试光路信号 U_1 为：

$$U_1 = (M_B k_1) \tau^2 \rho k_2 R \quad (1-5)$$

将（1-3）代入到（1-4）化简得：

$$\tau^2 = \frac{U_1}{U_0} \quad (1-6)$$

所以红外系统的透过率值可得：

$$\tau = \sqrt{\frac{U_1}{U_0}} \quad (1-7)$$

(4) 光纤检测法

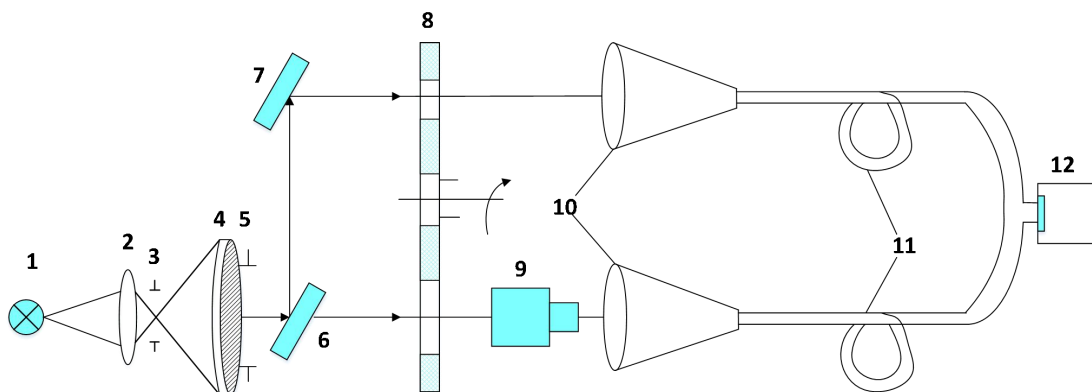


图 4. 光纤检测法测试工作原理图

Fig 4. Working principle diagram of optical fiber detection method.

图中各部件的作用：1 光源出射光束，2 和 10 均为聚光透镜起到汇聚光束的作用；3 和 5 均为可变光阑前者过滤掉部分杂散光，后者控制光束大小；4 为准直物镜准直光束；6 是 5-5 分光镜将光束均分为两部分；7 反射镜反射光束；8 是斩波盘对光束进行调制；9 被测物体；11 光纤；12 探测器接收信号。

光纤检测法的具体流程：光源产生的光在经过准直系统准直后平行进入光阑，经光阑的遮挡滤除杂散光，光束经过光阑改变光束孔径大小，然后直接照射在分光镜上进行分光，所得的两束光再由斩波盘进行调制处理，其中经过分光镜反射出来的光为参考光路所用，从分光镜透射的光为测量光路所用^[36]。

1.4 常用测试方法对比

上一节详尽的阐述了透过率测定的一些常用方法的检测原理及其测定步骤，可以通比找出不同测定方法优缺点。

表 1. 透过率传统测量方法优缺点比较

Table 1. Comparison of advantages and disadvantages of traditional measurement methods of transmittance

测试方法	优点	缺点
光电流检测法	操作简单，制作成本低。	测量精度易受负面影响，准确性不高，测量的数据相当复杂。
积分球检测法	积分球的加入，可使入射光通量和光源的照度成正比，且灵敏度较高。	光源的稳定性差，对测量环境需求高，测量准确度较低等。
回反射检测法	测量的精度高，抗击干扰能力强。	测量的误差大，系统结构的可靠性差。
光纤检测法	把光纤与系统光束相配合使用。	光纤分路、耦合很麻烦，对操作能力要求高。

在设计检测镜片透过率的系统的过程中，要防止由于环境条件、系统结构的因素导致测试精确度低下的设计问题。因此，本文在设计中结合了激光自混合理念，针对上述透过率测量方法的缺点作出了改善，提出一种利用某一特定波长基于激光自混合干涉镜片透过率的测量方法。

1.5 本文主要工作

单通道方法是传统的镜片透过率测试常用方法，该方法易受背景光的影响，对实验的条件要求也较高。因此在分析了传统测量方法的弊端，再结合激光自混合特性，提出了一种基于激光自混合干涉的镜片透过率测量的方法。实验结果表明，在不增加光路复杂程度和经济成本的基础上，可以准确的测量出镜片的透过率，并能提升测量精度。

具体的研究内容如下：

1、通过查阅国内外相关文献资料，阐述总结了国内外激光自混合发展现状、镜片透过率测量的研究现状和镜片透过率常见的测量方法并分析其优缺点，为后续实验系

统的搭建起指导作用；

2、系统分析了激光自混合基本理论，通过对等效三镜腔的分析并结合多次反馈现象，推导出中性密度滤光片在激光自混合系统中的总的功率公式；

3、根据理论以及传统方法的局限性设计出本文的实验系统，同时在测试实验之前检测出目标物的性能是否符合实验要求；

4、根据实验系统，搭建实验平台、收集实验数据、分析实验数据，使其与仿真实验结果进行对比，来验证该方法的准确性；

5、对实验的误差和不确定度进行分析，找出影响实验测量精度的因素，总结结论；

第 2 章 二次反馈激光自混合的基本理论

激光自混合干涉技术现已成为测量领域中一种常见的测量手段，被成功地应用到许多重要的领域。结构简单，易准直，操作简便是其的最大特点，同时是非接触式测量不会破坏物体表面，测量精度高。二次反馈激光自混合不仅具备以上优点，其测量精度更高。本章将从对激光自混合干涉技术的介绍入手，并对自混合的三镜腔等效模型进行详细的分析，推出基于二次反馈激光自混合干涉镜片透过率测量的原理公式。

2.1 二次反馈激光自混合技术的理论推导及形成过程

2.1.1 激光自混合干涉理论模型

出现光反馈现象是激光自混合现象产生的必要条件，它是指激光器稳定出射的激光，当传递至外界物体上之后，外部物体会将一部分激光反射或散射回激光器内腔，和原激光器内腔的光混合并产生相互作用，进而形成的干涉现象^[37]。当光反馈现象发生时，激光器的输出功率和波长等参数都会发生改变，而这些参数又与待测目标的物理特征有很大的关联，所以可利用对上述参数的测量来推算出与外部物体所相对应的参数^[38]。

激光自混合干涉的理论模型主要有下面三种^[39]：旋转矢量叠加模型^[40]、Lang-Kobayashi 理论模型^[12]以及三镜腔等效模型。旋转矢量叠加模型，把由干涉现象所产生的功率变换部分用正弦信息加以了替换，并叠加在尚未产生反馈的信号上；Lang-Kobayashi 理论是通过对激光泵浦、增益及其饱和、输出功率特性等动力学过程分析求解的速率方程，虽然可以很好的解释激光自混合现象，但只是推导流程过于繁琐；而三镜腔等效模型则简洁易懂，可以较好的说明激光自混合现象^[37]。因此大多数科研学者对激光自混合效应进行研究时，所选用的检测模式均为三镜腔等效模式。本文通过三镜腔等效模推导出激光自混合系统的理论模型，同时推出二次反馈激光自混合的理论模型。

2.1.2 三镜腔理论模型

在对三镜腔理论模式的解析中，将激光器前后两镜面都定义为激光器的内腔，同时也将从激光器内部到外部所有目标物体都定义为激光器的外腔。激光光束通过将目

标物质反馈回激光器的谐振内腔并与腔内激光进行耦合，同时改变了激光器内部的增益和电流，进而达到了能够调节激光器输出的光频率以及其光强的目的^[41]。这就是激光自混合干涉效应。

激光自混合干涉三镜腔等效模型如图 5 所示：

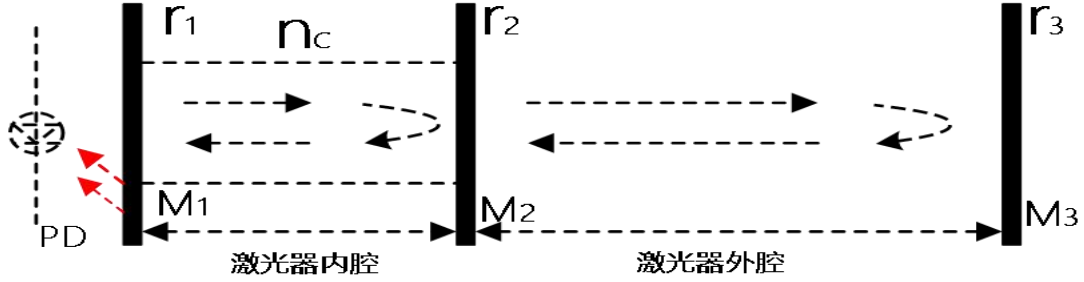


图 5. 激光自混合等效三镜腔图

Fig 5. Laser self mixing equivalent three mirror cavity.

在图 5 三镜腔等效模型中， M_1 和 M_2 构成激光器的内腔分别激光器前后二镜面。 M_3 表示目标物体， M_2 和 M_3 组成激光器的外腔。

在只考虑一次光反馈的情况下，如图 5 所示，光从 M_1 处向右传播在 M_2 光波分为两部分，一部分反射回 M_1 即光在内腔往返一周，另一部分透过 M_2 进入外腔，在有光反馈的情况下，光在 M_2 处被反射回 M_1 即光在内腔往返一周后的光强振幅为：

$$E_1 = r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi \nu \frac{nl}{c} + gl \right\} E_0 \quad (2-1)$$

其中 r_1 和 r_2 分别表示 M_1 和 M_2 两个腔面的振幅反射系数， n 为内腔有效折射率， l 和 L 分别为激光器内外腔的长度， c 为真空中光的速度， g 表示激光谐振器中每单位长度的光学增益；

光透过 M_2 在由 M_3 反射回激光内腔最后在回到 M_1 处的光强振幅为：

$$E_2 = r_1 t_2^2 r_3 f^2 \exp \left\{ -j \left(4\pi \nu \frac{nl+L}{c} \right) + gl \right\} E_0 \quad (2-2)$$

其中 r_3 为外部物体的反射率， t_2 为 M_2 端面的透射率， f 光在外腔内的衰减程度。

$$E = E_1 + E_2 = r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi \nu \frac{nl}{c} + gl \right\} E_0 + r_1 t_2^2 r_3 f^2 \exp \left\{ -j \left(4\pi \nu \frac{nl+L}{c} \right) + gl \right\} E_0 \quad (2-3)$$

$4\pi \nu \frac{nl}{c}$ 和 $4\pi \nu \frac{nl+L}{c}$ 代表了激光在等效内腔场和外腔场中一个周期的相位延迟。当系统稳定时，叠加的光波强度与初始光波强度应该相等即 $E = E_0$ ，式（2-3）整理得：

$$1 = r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi \nu \frac{nl}{c} + gl \right\} \left(1 + \xi \exp \left(-j 4\pi \nu \frac{L}{c} \right) \right) \quad (2-4)$$

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{\xi}{L} \cos(\varphi_L) \quad (2-5)$$

$$\varphi_a(v) = \xi \sin(\varphi_L) \quad (2-6)$$

其中 $\xi = \frac{t_2^2 r_3 f^2}{r_2}$ 表示传播后进入激光器内腔的光波的耦合系数， f 表示光在外腔内的衰减程度， $\varphi = 4\pi v \frac{L}{c}$ 为外界反馈引起的相位变化。因为光在内腔循环一个周期所产生的相位差必须达到 2π 的整数倍，即：

$$\varphi(v) = 2x\pi \quad (x \text{ 为正整数}) \quad (2-7)$$

可得到：

$$\Delta\varphi(v) = 2\pi(v - v_0)\tau_1 + \xi\sqrt{1 + \alpha^2} \sin(2\pi v\tau_L + \arctan\alpha) = 0 \quad (2-8)$$

式中 $\Delta\varphi(v)$ 是光在内腔运行一周产生的相位与 2π 的整数倍的差值， α 为线宽展宽因子， v_0 为外界无光反馈的激光频率， $\tau_1 = \frac{2nL}{c}$ 和 $\tau_L = \frac{2L}{c}$ 分别表示内外腔延时。

光反馈系数 C 为：

$$C = \frac{\tau_L}{\tau_1} \xi \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (2-9)$$

根据法布里—珀罗腔激光器输出光功率的一般表达式，即可得出激光自混合系统的输出光强为：

$$I = I_0(1 - k\Delta G) = I_0[1 + m\cos(\omega\tau)] \quad (2-10)$$

其中， $\Delta G = -\xi \frac{\cos(\omega\tau)}{2}$ 表示激光系统的阈值增益变化， I_0 是无反馈光情况下的激光的输出光强， K 使一个常量它只与激光器自身参数有关， m 为调制系数。所以，在光反馈条件下，激光器的输出光频和输出功率满足下式：

$$\omega_0\tau = \omega\tau + C \sin(\omega\tau - \arctan(\alpha)) \quad (2-11)$$

$$I = I_0[1 + m\cos(\omega\tau)] = I_0 \left[1 + m\cos\left(4\pi v \frac{L}{c}\right) \right] \quad (2-12)$$

当考虑二次光反馈的情况下，如图所示：

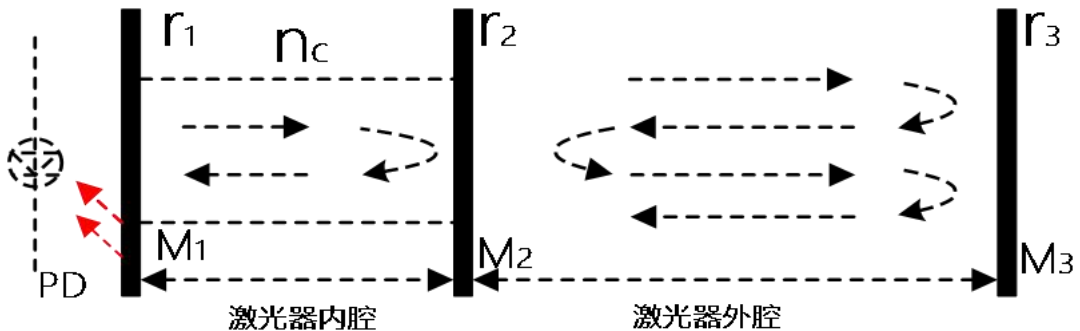


图 6. 二次反馈激光自混合等效三镜腔图

Fig 6. Self mixing equivalent three mirror cavity of secondary feedback laser.

光在从外腔反射回来在 M_2 处有一部分透射回到激光内腔，剩余部分又将经历一次反射后回到激光内腔即这部分光回到 M_1 处时的光强振幅为：

$$E_3 = r_1 r_2 t_2^2 r_3^2 f^4 \exp \left\{ -j \left(4\pi v \frac{nl+2L}{c} \right) + gl \right\} E_0 \quad (2-13)$$

此时，叠加在激光腔内的每列光波的总和代表腔内光强的总振幅 E ：

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi v \frac{nl}{c} + gl \right\} E_0 + r_1 t_2^2 r_3^2 f^2 \exp \left\{ -j \left(4\pi v \frac{nl+L}{c} \right) + gl \right\} E_0 + r_1 r_2 t_2^2 r_3^2 f^4 \exp \left\{ -j \left(4\pi v \frac{nl+2L}{c} \right) + gl \right\} E_0 \quad (2-14)$$

当系统稳定时，叠加的光波强度应与初始光波强度相同即 $E = E_0$ ，则式（2-14）可化简为：

$$r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi v \frac{nl}{c} + gl \right\} + r_1 t_2^2 r_3^2 f^2 \exp \left\{ -j \left(4\pi v \frac{nl+L}{c} \right) + gl \right\} + r_1 r_2 t_2^2 r_3^2 f^4 \exp \left\{ -j \left(4\pi v \frac{nl+2L}{c} \right) + gl \right\} = r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi v \frac{nl}{c} + gl \right\} \left\{ 1 + \xi \exp \left(-j 4\pi v \frac{L}{c} \right) + \eta \exp \left(-j 8\pi v \frac{L}{c} \right) \right\} = 1 \quad (2-15)$$

设在外腔往返一周的相移为 $\varphi = \frac{4\pi L}{c}$ ，则一次反馈和二次反馈的振幅衰减系数为 $\beta(f) = r_1 t_2^2 r_3^2 f^2$ 和 $\gamma(f) = r_1 r_2 t_2^2 r_3^2 f^4$ 。因此激光激发的条件为：

$$r_1 r_2 \exp \left\{ -j 4\pi v \frac{nl}{c} + gl \right\} \left\{ 1 + \frac{\alpha}{r_1 r_2} \exp[-j\varphi] + \frac{\beta}{r_1 r_2} \exp[-2j\varphi] \right\} = 1 \quad (2-16)$$

上式左侧为复数形式，右侧为实数，所以要保证等号的成立左侧的虚部必须为零。

$$Z = \text{Re}(Z) + j \cdot \text{Im}(Z) = 1 + \frac{\beta}{r_1 r_2} \exp[-j\varphi] + \frac{\gamma}{r_1 r_2} \exp[-2j\varphi] \quad (2-17)$$

得到二次反馈激光光强表达式为：

$$I = I_0 \left[1 + \frac{1}{2l} \left(\frac{\beta}{r_1 r_2} \cos \varphi + \frac{\gamma}{r_1 r_2} \cos 2\varphi \right) \right] \quad (2-18)$$

2.2 二次反馈激光自混合干涉形成过程

如果在非准直腔中发生激光自混合干涉，或输出光与外部物体不完全垂直，则光束会在激光器与外部物体之间会反射数次。在这个情况下，干涉条纹的数目将会增加到原来的 2 倍，3 倍甚至更多，从而形成多重反馈激光自混合效应。与激光自混合干涉仪相比，二次反馈激光自混合干涉仪的分辨率有所提高。Addy.R.C 等人在实验过程中

发现二次反馈激光自混合干涉现象，发现它是由非对称性激光腔所形成的并对其进行相关的说明^[42]。张书练等人使用 VCSEL 激光器，观察到了三次反馈的激光自混合干涉现象，使干涉条纹的分辨率达到了 $\lambda/6$ ^[43]。Marta 等人深入研究了激光自混合干涉中的多重反馈现象，对多重光反馈形成的原因进行了光谱分析，并利用实验结果作出了证明^[44]。

图 7 显示了二次反馈激光自混合现象的形成过程^[42]。 r_1 、 r_2 代表半导体激光器内腔前后两个腔面反射率的大小， r_3 代表外部物体的反射率。如果外部物体表面并不垂直与激光器的光轴，并且存在一个微小的倾斜角 θ ，则由激光器、透镜、外部物体，构成了一个不对称的激光器外腔。当光束从激光器内腔发射并通过透镜照射到外部物体表面上时，因光轴和外部物体表面的反射点不在同一条直线上，那么由外部物体反射光在经过透镜后并不能直接进入激光器内腔。而是打在了激光器的边缘，并且可以通过激光边缘的反射形成二次反射。第二个反射光再次通过透镜照射到外部物体的表面。最后，它被外部物体反射，通过透镜进入激光器的内腔，与腔内的激光器发生干涉，即为激光的二次自混合效应。因此这种光束经常在激光和外部物体之间反射，形成多重反馈激光自混合效应。

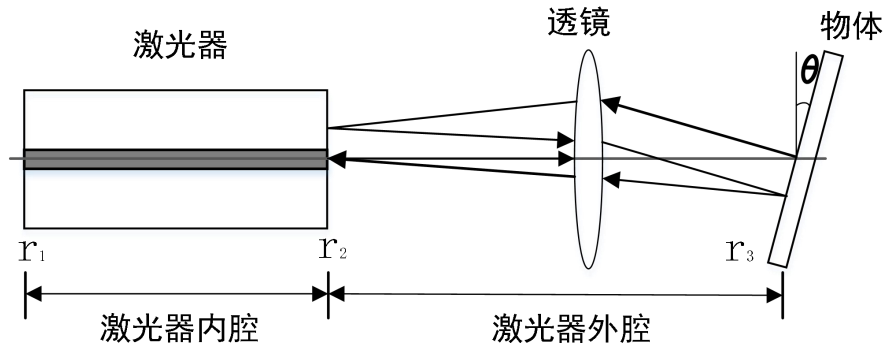


图 7. 二次反馈激光自混合干涉原理

Fig 7. Multiple Self-Mixing Interference principle.

多重光反馈激光自混合干涉有以下特点^[35]:

(1) 由于不完全垂直对称的激光腔能形成多重反馈的激光自混合干涉信号，其干涉条纹数目是激光自混合的 k 倍，相应的条纹分辨率也是激光自混合的 k 倍。

(2) 在外界为弱反馈的情况下，多重反馈的激光自混合干涉效应也可以捕捉到反馈波形即锯齿波。虽然该波形复杂程度跟高，但其中隐含了振动偏移的信号，能够通过波形的偏移方向来判断外部物质的振动方位。

(3) 多重反馈的激光自混合信号经过进一步的信号处理，可以得到较低的振动测量误差。

研究发现，多重反馈激光自混合干涉，能够在不增加复杂计算和设备的情况下，提高干涉条纹的分辨率，并通过使用适当的信号处理技术进一步减小测量误差。2.1 节的理论表明，反射越多，条纹越多，分辨率越高，测量的效果越好。然而，事实上，反馈的次数越多，在传播过程中的光损耗越大，实验复杂性也显著提高，所以不能通过增加反射次数的方法来增加分辨率。本实验每经过一次目标物光衰减一次，所以本文是以二次反馈为研究对象。

2.3 本章小结

本章详细介绍了二次反馈激光自混合干涉系统的三镜腔模型、原理、以及二次反馈激光自混合干涉效应的形成过程以及形成条件，同时分析二次反馈激光自混合相比与激光自混合的优势，当然光在传播的过程会随着反馈次数的增加损耗也会增加，因此激光自混合反馈次数不是无上限的。

第 3 章 二次反馈激光自混合测量实验的整体设计

本章通过对实验系统各关键单元的分析，选取搭建实验系统的仪器。实验仪器以及测量物体的选取对实验的精确度影响非常大，符合实验预期要求的实验仪器往往可以缩减实验产生的误差。当然在实验中的各个参数对实验的影响也非常大，合适的参数可以更快地完成实验，更好的达到实验效果。

3.1 二次反馈激光自混合测量平台的实验仪器的选取

激光自混合测量系统分为三个模块：光学系统、供电控制系统和信号数据处理系统。光学系统由激光器、透镜和待测物体组成；电源驱动、信号发生器、光电探测器和示波器组成的供电控制系统；PC 端的信号数据处理系统。

下图为本文实验装置图：

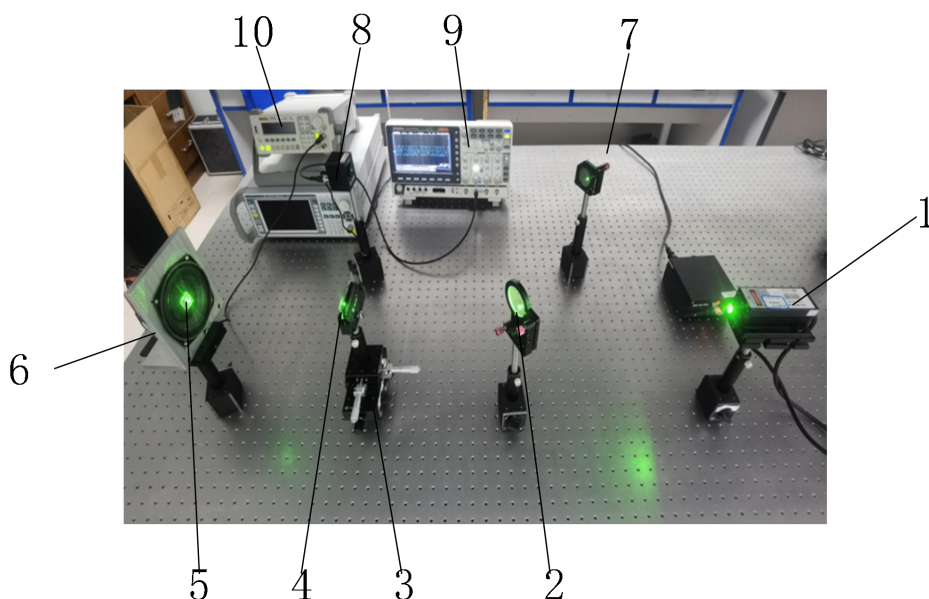


图 8. 实验系统实物图

Figure 8. Physical diagram of experimental system.

各实验仪器的主要作用：

- 1、激光器：选用可见光波段的 532nm 绿光激光器，优点易调整实验光路；
- 2、分光镜：选用 5-5 分光镜将光平均分为透过光和反射光两部分（拥有极低的吸收特性，透射和反射比例的总和近似看作 100%）；
- 3、平移台：一维平移台用来 x 轴方向移动目标物，进而转换不同的透过率；

- 4、目标物（中性线性密度片）：为实验加载不同的透过率，类比待测镜片；
- 5、高反光镜：贴在扬声器表面用以反射激光器传播过来的光线；
- 6、扬声器：加载一个正弦信号，扬声器做正弦运动，用以改变外腔长度；
- 7、高铝反光镜：用于改变光线传播路径；
- 8、光电接收器：接收光信号并将光信号放大后转换为电信号，再传输给示波器、频谱仪、PC 等；
- 9、示波器：用以检测激光自混合时域信号；
- 10、信号发生器：能够提供正弦讯号，用来驱动扬声器的简谐振动；

3.2 目标物的选取

3.2.1 目标物选取的依据

本文为基于激光自混合干涉的镜片透过率测量方法，我们要选取的目标物要可以呈现出不同的透过率，在查阅文献和实际检测后最终选取中性密度滤光片作为目标物。

3.2.2 滤光片的选取

金属和玻璃是制造滤光片的两种材质。金属滤光片的制造方法是将各式各样的打在金属片上，金属片上通孔的面积大小影响着滤光片的透光量。由于成本设备因素，小且密集的通孔很难被制造出来，所以高衰减程度的金属滤光片难以被制作出来。在光学玻璃表面镀上不同的金属膜是制造玻璃材质衰减片的主要方法，其原理是通过吸收和反射光来达到衰减的目的，不同的金属膜层和膜层的厚度控制着玻璃材质的衰减片的衰减量。

玻璃材质的衰减片按衰减形式可分为连续渐变、阶梯、固定和径向渐变四种密度滤光片。圆形和条状是衰减片两种主要形状。

3.2.3 中性密度滤光片的性能检测

（1）中性密度滤光片

下图为本实验选取的中性密度滤光片：

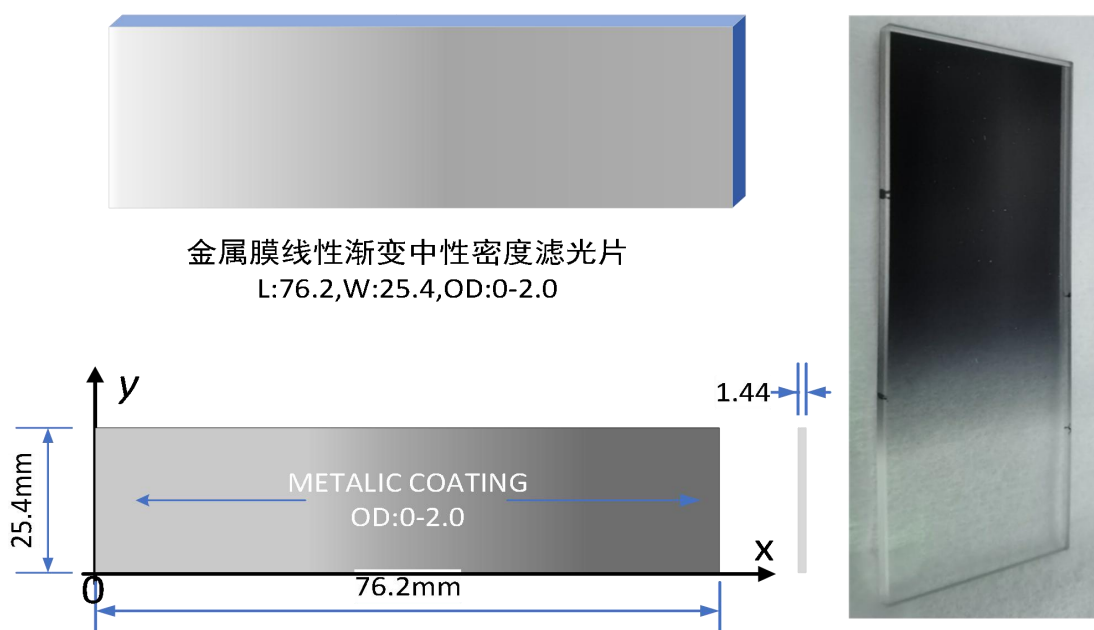


图 9. 中性密度滤光片

Fig 9. Neutral density filter.

下表为中性密度滤光片的具体参数：

表 2. 中性密度滤光片参数

Table 2. Parameters of neutral density filter

材料	K9
外形尺寸公差	0.0/-0.2
通光孔径	90%长边方向 80%短边方向
密度变化误差	-5%- 5%@632.8nm
膜层	S1: Ni-Cr-Fe S2 : 宽 带 增 透 膜 , Rave<0.5%@420-675nm, 0°-15°入射

(2) 标准滤光片

图为三个标准滤光片，其作用用以标定整个实验系统以及误差的检测排除。三个标准滤光片从左到右透过率分别为：70%、80%、90%。

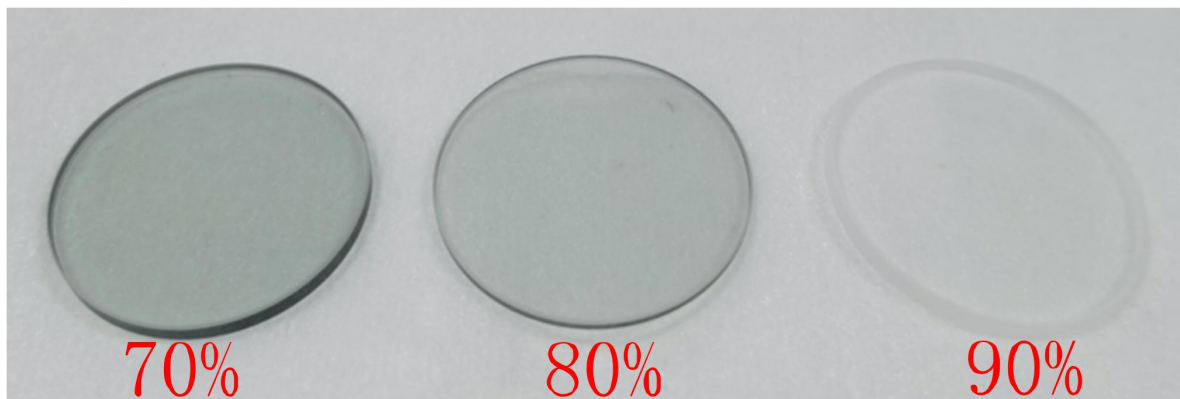


图 10. 标准滤光片

Fig 10. Standard filter.

(2) 变密度中性滤光片的遮光特性

可变密度滤光片通过吸收和反射来控制光线强弱。光学特点是光密度值几乎不随波长变化，光密度值随位置线性改变。即：

$$OD = k \cdot x \quad (3-1)$$

其中 OD 表示密度值，X 表示密度片位置，K 表示斜率。

光密度 OD 的定义为：

$$OD = -\log(T) \quad (3-2)$$

根据上式可以得出透过率与位置的关系：

$$T = 10^{-k \cdot x} \quad (3-3)$$

(3) 实验检测中性密度片

对于目标物即中性密度片的测量我们从两个方面入手

- 1) 激光器的输出功率直接由功率计检测出功率大小 **a**。（检测出激光器的输出功率为 88.8 W）
- 2) 激光器的输出功率经过目标物的衰减后，再由功率计检测出此时的功率 **b**。

实验重复测量 10 组随机选取 3 组数据进行分析：

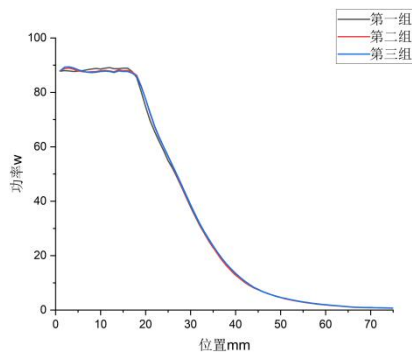


图 11.衰减后的功率和位置的关系图

Fig 11. Relationship between power and position after attenuation

现将全部十组数据取平均值得到其平均功率与位置的关系如下图：

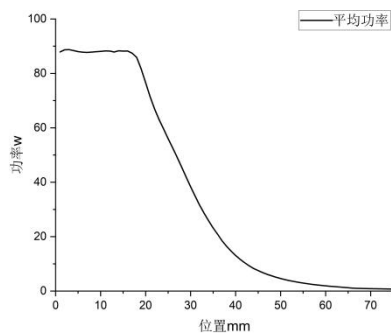


图 12.平均功率和位置的关系图

Fig 12. Relationship between average power and position

透过率定义为： $D=b/a$

其中， a 为激光器的输出功率直接由功率计检测出功率大小， b 是透过样品后的功率大小。

表 3. 透过率和 OD 值与位置的关系表

Table 3. Relationship between transmittance, OD value and location

位置	透过率	OD 值	位置	透过率	OD 值	位置	透过率	OD 值
1	0.9899	0.0044	26	0.5935	0.2266	51	0.047	1.3276
2	0.9985	0.0007	27	0.5537	0.2567	52	0.0431	1.3656
3	0.9992	0.0003	28	0.5135	0.2894	53	0.0395	1.4039
4	0.9955	0.002	29	0.4718	0.3262	54	0.036	1.4437
5	0.991	0.0039	30	0.4317	0.3648	55	0.033	1.482
6	0.9887	0.0049	31	0.393	0.4056	56	0.0303	1.5192
7	0.988	0.0052	32	0.3555	0.4492	57	0.0277	1.5569
8	0.9891	0.0048	33	0.3217	0.4926	58	0.0255	1.5937
9	0.9906	0.0041	34	0.2909	0.5362	59	0.0234	1.6303
10	0.9921	0.0034	35	0.2609	0.5835	60	0.0216	1.6659
11	0.994	0.0026	36	0.235	0.629	61	0.0198	1.7029
12	0.9936	0.0028	37	0.2076	0.6828	62	0.0184	1.7362
13	0.9895	0.0046	38	0.1851	0.7327	63	0.0169	1.7723
14	0.9944	0.0025	39	0.1652	0.7821	64	0.0154	1.8138
15	0.9932	0.0029	40	0.1471	0.8322	65	0.0137	1.8621
16	0.9936	0.0028	41	0.1314	0.8815	66	0.0122	1.9137
17	0.9846	0.0067	42	0.1171	0.9314	67	0.0112	1.9513
18	0.9673	0.0144	43	0.1044	0.9815	68	0.0107	1.971
19	0.92	0.0362	44	0.0935	1.0293	69	0.0102	1.9924
20	0.8622	0.0644	45	0.0847	1.0722	70	0.0099	2.0023
21	0.8044	0.0945	46	0.0764	1.1168	71	0.0096	2.019
22	0.753	0.1232	47	0.0693	1.1595	72	0.0093	2.0328
23	0.7095	0.1491	48	0.0631	1.2	73	0.0089	2.049
24	0.6704	0.1737	49	0.0571	1.2434	74	0.0085	2.0695
25	0.6306	0.2002	50	0.052	1.2841	75	0.0081	2.0891

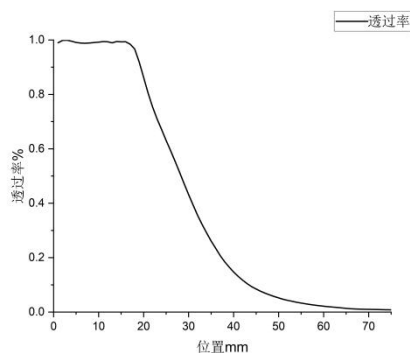


图 13. 透过率与位置的关系图

Fig 13. Relationship between transmittance and position.

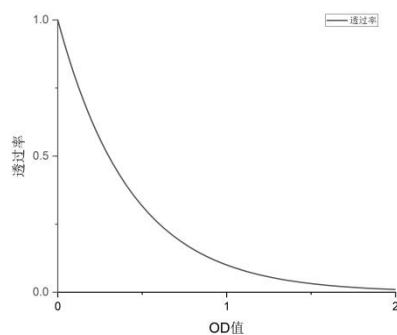


图 14. 透过率和 OD 值的关系图

Fig 14. Relationship between transmittance and OD value.

目标物检测结果与理论一致，可以应用到镜片透过率检测的实验中去。

3.3 实验参数对信号的影响

在第二章理论推导的基础上，结合波形的频率和振幅特性，从不同的振幅和频率二个方面对激光自混合干涉实验信号进行了比较和解释，同时分析了不同外腔长度和不同反射角下的干涉信号。

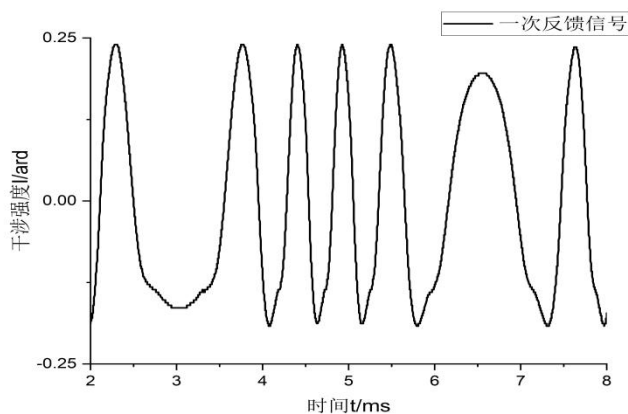


图 15. 激光自混合的信号图

Fig 15. Signal diagram of laser self mixing.

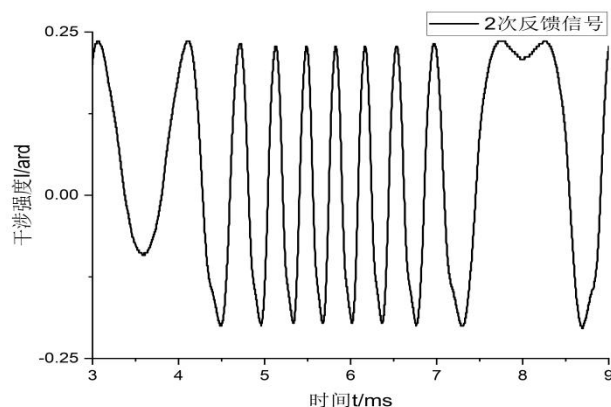


图 16. 二次反馈激光自混合信号图

Fig 16. Secondary feedback laser self mixing signal diagram.

通过上述两幅干涉图可以观察出，二次反馈激光自混合信号的条纹数量是激光自混合信号的两倍，这与第二章的理论相对应即干涉条纹分辨率是自混合干涉条纹分辨率的 2 倍。

1、不同频率对激光自混合干涉的实验信号的影响：

使用除频率外相同的其他参数，研究了物体在 100Hz 至 400Hz 范围内的正弦波振动时，激光自混合信号的变化。得到激光自混合信号的波形如下图所示。在途中，物体的振荡频率依次增加。

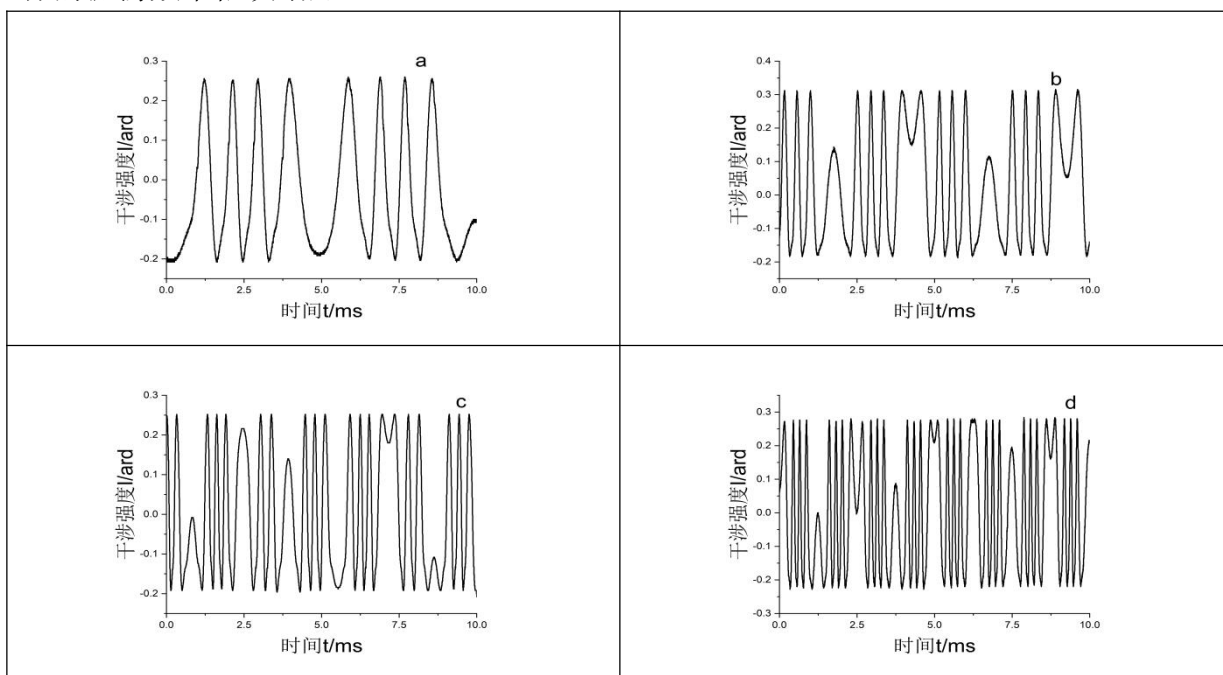


图 17. 不同频率下的激光自混合信号图 (a):100Hz;(b):200Hz;(c):300Hz;(d):400Hz

Fig 17. Self mixing signal diagram at different frequencies. (a):100Hz;(b):200Hz;(c):300Hz;(d):400Hz

随着物体的振动频率发生改变，相同时间内周期数目随之发生改变，同一个周期

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/458035004075006034>