



物理实验丛书

WULISHIYAN CONGSHU

物理光学实验

杨之昌 王潜智 邱榴贞 编

(上 册)



C436-33
4736:1

物理实验丛书

* * *

物理光学实验

(上册)

杨之昌 王潜智 邱榴贞 编

上海科学技术出版社

物理实验丛书

— * * * —

物理光学实验

(上册)

杨之昌 王潜智 邱榴贞 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 祝桥新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 9.5 字数 208,000

1986年5月第1版 1986年5月第1次印刷

印数: 1—4,300

统一书号: 13119·1312 定价: 1.55元

内 容 提 要

本书系根据我国高等院校普通物理实验中有关物理光学实验内容以及结合复旦大学基础光学实验教学的经验编写而成。全书分上、下两册。上册主要以基础物理光学实验为主,介绍了物理光学实验的基本特点、基本原理及有关的一些基本概念以及光的干涉、衍射和偏振实验。下册以物理光学仪器、光探测器和新实验技术为主;并且尽可能介绍一些适合于基础光学的实验内容。

本书可供大专院校、中等专科学校物理教师及有关从事物理实验的科技工作者参考。

出版说明

物理学是一门以实验为基础的科学。每个物理概念的确立以及原理和定律的发现无不具有坚实的实验基础,而且只有经过实验的检验,才能得到公认。所以,物理实验在物理学中起着非常重要的作用。

为了实现我国四个现代化的要求,需要迅速培养大批科学技术专门人材。在整个物理学的教学过程中,物理实验是培养物理工作者和其他科学技术专门人材不可缺少的组成部分。可是在物理实验的教学中,深感这方面书籍的不足,以及实验仪器和实验设备的缺乏。鉴于上述情况,为了提高物理实验的水平,适合我国的实际情况,推广实验中的新技术、新仪器和新方法,我们请国内有关高等院校从事物理实验教学时间较长、经验丰富的教师编写这套《物理实验丛书》。

本丛书内容包括当前我国高等院校正在开设和准备开设的普通物理实验。每一分册集中介绍一个专题。本丛书采用章节式的实验参考书编写方式,注意到专题的系统性与完整性,中间插入有关的实验,并有备查的附录,内容简明扼要,重点突出。此外,为了适应科研部门和工矿企业实验工作者的需要,还适当增加了一些实际应用的内容。本丛书不但可供大专院校物理专业师生参考,亦可供中等专科学校和中学物理教师以及科研单位与工矿企业从事物理实验工作的技术人员参考。

本丛书已拟定的普通物理实验方面的分册有:《力学实验》、《静电实验》、《几何光学实验》、《物理光学实验》、《电磁学实验》、《热学实验》、《真空实验》、《气垫导轨实验》等,将陆续出版。

前 言

《物理光学实验》是物理实验丛书——《几何光学实验》的续篇，主要根据作者在复旦大学物理系长期从事实验教学工作实践的经验编写而成。

由于科学技术的迅速发展推动了物理光学实验技术的发展，涌现了许多新技术和新工艺，并逐步形成了新的物理光学分支。例如以光波衍射为基础的傅里叶光学，包括空间滤波，光学传递函数，相干性理论等；随着激光的出现和应用发展了全息照相术，非线性光学，光学信息处理等。考虑到这些新的分支逐步趋向成熟，如何把新的实验技术运用到日常的基础教学之中，并介绍给读者，这是我们面临的任务。

《物理光学实验》分上、下两册。上册主要以基础物理光学实验为主，包括光的干涉、衍射和偏振实验。下册以物理光学仪器、光探测器和新实验技术为主，并且尽可能介绍一些适合于基础光学的实验内容。在实验数据处理方面，我们增加了直线和曲线拟合处理的内容，同时对实验系统误差进行分析。本书中实验内容的安排尽量做到由浅入深，逐步展开。为了便于进行教学及科研工作，编写方式以小实验形式为主，以利于根据要求及需要选做部分实验。

在本书编写过程中，王潜智同志负责第二章，邱榴贞同志负责第四章，凌佩玲同志负责第九章，马秀芳同志负责第六章，杨之昌同志负责其余的章节及附录。此外，陆丽华同志参加了本书的部分编写工作。

姚世亨同志对本书作了认真仔细的审阅，并且提出许多宝贵的意见。复旦大学物理系激光教研组有关同志提供了一些帮助，在此一并表示感谢。

由于编写时间较为仓促，作者水平有限，书中肯定存在一些不足之处，希望读者予以指正。

编者 1985年10月

目 录(上册)

前 言

第一章 基础知识	1
§1 物理光学实验的基本特点	2
§2 物理光学实验的基本原理	9
§3 物理光学实验技术的应用和发展	36
第二章 光波的干涉实验	44
§1 双光束干涉实验之一——波阵面分割法	46
§2 双光束干涉实验之二——振幅分割法	60
§3 多光束干涉实验	88
§4 光波干涉实验的小结	115
第三章 光波的衍射实验	124
§1 对光波衍射现象的观察	125
§2 基本的衍射实验	136
§3 衍射光栅	142
§4 新的衍射实验	158
§5 衍射现象的应用	176
第四章 光的偏振实验	198
§1 光波在介质表面的反射和折射——菲涅耳公式及应用	198
§2 偏振元件	210
§3 光的偏振实验	231
§4 偏振光的干涉	252
§5 旋光、电光和磁光现象	269
§6 液晶光学特性的测定	280
实验索引(上册)	292

第一章 基础知识

物理光学是光学的重要组成部分，它是以光具有波动特性来解释一些基本光学现象，也是研究光的本性、光在介质中传播时的基本特性以及光和物质的相互作用的一门学科。人类对光的本性的认识是有一个发展过程的。不是一开始就接受光具有波动性这一概念，而是在十七世纪末先接受伟大的科学家牛顿(I. Newton)对光本性的解释，认为光是以微小粒子的形式从发光物体中发射出来，这些微粒以高速作直线运动，用这一理论可以解释光在均匀介质中直线传播的规律。与牛顿同时代的科学家惠更斯(C. Huygens)提出了另一种观点，即光的波动学说。按照这个原理光扰动所落到的“以太”的每一点可以看作是一个新的扰动中心，分别向外发射一个球面波，这些次波按这样的方式进行组合，使得它们的包络面决定了以后任何时刻的波阵面(波前)。利用这一原理可以成功地解释一些光学基本现象，例如光的反射定律和折射定律以及当时已经观察到的光的双折射现象。尽管牛顿的微粒学说对后面两种现象作了错误的解说或者不能解释，但是由于那个时代的实验条件较差，不能用更多的实验来作进一步的探讨，再加上牛顿的权威使光的微粒学说整整统治了一个世纪。

直到十九世纪初，杨氏(T. Young)首先在实验室中，用实验方法再现了光的干涉现象。他的双孔干涉实验为光的波动学说提供了可靠的实验依据，接着他又作了“光的偏振现象”和“偏振光干涉”的实验。杨氏的这些工作为以后在实验室内

进行物理光学实验打下了基础。

随着实验水平的提高,使人们接受光的波动性的条件逐渐成熟,早期尽管杨氏已经提出了干涉原理,但他的解释大多是定性描述。直到十九世纪二十年代菲涅耳(A. J. Fresnel)将惠更斯原理和杨氏干涉原理结合在一起,提出了惠更斯-菲涅耳原理。利用这一原理不仅足以解释光的直线传播规律,而且正确地解释了光的干涉现象,以及光经过障碍物以后发出偏离直线运动的现象——光的衍射现象。菲涅耳的一系列工作以及后来麦克斯威(J. C. Maxwell)提出的光的电磁理论可以解释大部分实验所得到的光学现象,从而使光的波动学说取代光的微粒学说成为解释光学基本现象的主要理论。

光具有波动性,也就是惠更斯和菲涅耳提出的“以太”是传播光波的介质。但“以太”介质是否存在,仍然是一个谜。直到二十世纪初实验物理学家迈克尔逊(A. A. Michelson)通过实验否定了“以太”的存在。之后伟大的科学家爱因斯坦(A. Einstein)提出狭义相对论和光的量子理论,确立了光具有波粒二象性。即认为光既是频率极高的电磁波,又是静止质量接近零的光量子。光的波粒二象性可以解释绝大多数的光学现象。但光究竟是什么?光的相干性问题,光的发射问题还有待于进行大量的实验工作和理论探讨,才能使人们对光的本性有更深入的认识。

用光的波动学说来解释光学基本现象和研究光与物质相互作用的规律及其应用,都是属于物理光学的范畴。

§1 物理光学实验的基本特点

一、光是频率极高的电磁波

光波是一种电磁波，它的频率极高，可见光波的频率在 $3.8 \times 10^{14} \sim 7.7 \times 10^{14}$ 赫之间，人的视觉系统对这一波段的电磁波能产生各种颜色的感觉，这样就使光学实验主要是依靠人眼（包括助视光学仪器的配合）的观察来进行的，形成了与其它波段的电磁波不同的实验方法和技术。

因为光波的本质是一种电磁波，所以与其它波段的电磁波一样描写光波的基本参量有波长 λ ，频率 ν （或周期 T ， $T = \frac{1}{\nu}$ ），位相 φ ，振幅 A 等。

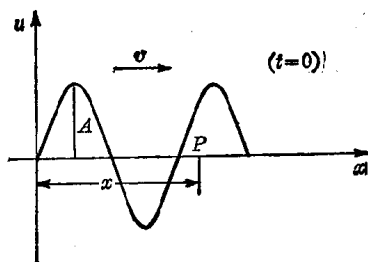


图 1-1

单色平面波在真空中传播到 P 点位置上的光扰动 (u) 的数学表示式在图 1-1 的坐标系中如下：

$$\begin{aligned} u &= A \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \\ &= A \sin 2\pi\nu \left(t - \frac{x}{c} \right), \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 A 是光波传播到 P 点处的光扰动的振幅， T 为光扰动的周期 (ν 是频率)， c 是光波在真空中的速度 ($c = 2.9979 \times 10^{10}$ 厘米/秒)，

$$\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

是光扰动在 P 点处 t 时刻的位相。单色光在真空中的波长 λ_0 与周期(频率)的关系是

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu} \quad (1-2)$$

代入(1-1)式得到光扰动的另一数学表式

$$\begin{aligned} u &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda_0} \right) \\ &= A \sin 2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda_0} \right). \end{aligned}$$

由于光波在各种光学介质中的传播速度不一样,对于某一频率为 ν 的单色光波在不同介质中的波长也是不一样的,光波在介质中的波长 λ 与真空中波长 λ_0 的关系由下式决定:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (1-3)$$

式中 n 为光学介质的折射率。

这样光波在折射率为 n 的光学介质中光扰动的表式应为

$$\begin{aligned} u &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \\ &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{n x}{\lambda_0} \right) \\ &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\Delta}{\lambda_0} \right), \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 $\Delta = nx$ 称为光波在介质中的光程(光学路程),而 x 是光波在介质中传播的几何路程。光程 Δ 是物理光学的重要参数,而测定光程大小或比较光束之间的光程差是物理光学实验的重要内容。

光波是一种电磁波,又是横波,具有偏振性。由于光波在介质中传播所引起的光扰动的振动方向是垂直于光波传播的方向,因而光扰动可以在垂直于光传播的平面内振动,并且可

以由该平面内的笛卡儿坐标来描写,如图 1-2 所示。

这样的单色平面波的光扰动也可以用直角坐标分量来描写。

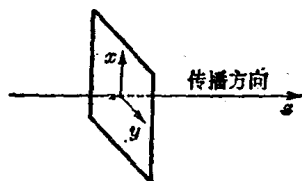


图 1-2

$$\begin{cases} u_x = A_x \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{D_x}{\lambda_0} \right), \\ u_y = A_y \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{D_y}{\lambda_0} \right), \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 A_x, A_y 分别是光扰动的振幅在 x, y 坐标上的分量。

(1-5) 式可以描写光波的偏振性。因为单色平面波的光扰动可以由 x, y 坐标上的分振动的叠加而形成, 光波在介质中传播时其偏振态主要决定于 A_x, A_y 的大小。在各向同性介质中, $A_x = A_y$, 则光波的偏振态不会改变; 若在各向异性的介质中, 则 A_x, A_y 将发生变化, 这样光波在各向异性介质中传播会改变光波的偏振态。通过实验来观察光波在介质中的偏振态及其变化规律, 有助于进一步了解光的本性以及光波和物质相互作用的规律。这些实验也是物理光学实验的重要内容。

二、光的波粒二象性

前面讲到光是一种电磁波, 可以解释大部分物理光学的基本现象, 但是对光谱学范围内的问题只能作部分解释, 至于对光电效应、光压等现象就更无能为力。到二十世纪初, 爱因

斯坦建立了光具有波粒二象性的假设以后，上述问题才能得到解决。

由光的量子理论可知，光是一个粒子，又称为光子。它的能量 E 由下式决定。

$$E = h\nu, \quad (1-6)$$

式中 ν 是光波的频率， h 称为普朗克常数。

1906 年爱因斯坦进一步提出光是光量子，并用它来解释光电效应现象。根据这一理论一个光子打在金属表面上，迫使一个电子逸出金属表面，电子的最大动能 $\frac{1}{2}mV_{\max}^2$ 由下式决定：

$$h\nu = \frac{1}{2} mV_{\max}^2 + P_0, \quad (1-7)$$

式中 P_0 是电子逸出金属表面时所需作的功，称为脱出功（亦称脱出功函数）。

以上这一假设由密立根（R. A. Millikan）作了大量的实验，结果证明爱因斯坦的假设的正确性。

光量子学说严谨地解释了光电效应现象，进一步认识到光不仅具有波动性而且还具有粒子性，从而形成了目前人们对光具有波粒二象性的概念。

三、物理光学实验的基本方法

在物理实验丛书——《几何光学》分册已经讲过，几何光学实验的主要实验方法是通过测定成像位置和大小，观察成像的清晰程度以及测定经过光学系统所成图象上各点的明暗（光强或照度的大小）来进行的。而物理光学实验则由于所研究的对象和范畴不同，因而实验方法也就不一样。它的基本方法归纳起来有以下几方面：

1. 测量干涉条纹或衍射条纹之间的间距(或条纹宽度)

光的干涉现象和衍射现象是光的波动本性的具体表现。二束(或多束)相干光叠加在一起可以产生干涉条纹,这就是光的干涉现象。测定干涉条纹之间的间距可以深入了解干涉的基本原理。光波在均匀介质中传播时碰到障碍物将偏离直线运动的方向,这种现象称为光的衍射现象。对于不同障碍物将在光的衍射区产生不同的衍射花样,通过测定衍射条纹之间的间距,可以了解光波的本性或掌握障碍物的几何特征。在几何光学实验中由于所研究的物象其尺寸远远地大于光波的波长,光的波动特性就被掩盖了,而在物理光学实验中所研究的物象的几何尺寸与光波的波长是同一数量级,因此光的波动本性就显示出来,被测的对象越小,光的干涉与衍射现象就越明显。利用这一特性,用光的干涉或衍射原理测量小于微米量级物体的大小或变动量具有很大的优点。

2. 测量条纹的数目或条纹的移动量

由于二束(或多束)相干光之间的干涉在叠加区域将产生干涉条纹,在物理光学实验中,可以通过测量干涉条纹的数目来测定一些基本物理量,例如:光波的波长,材料的折射率,光学表面的物理特性以及光学元件的基本参数等等。在干涉计量中,由于它的精确度高,可以使长度计量达到很高的准确度。通过测定干涉条纹的移动量可以达到精确定位。具体的方法可以由实验工作者人工计数,也可以通过光电计数器进行计数。在可见光波段干涉条纹数目不太多时,由于人眼观察(或人眼通过助视光学仪器观察)有很高的灵敏度,不论进行条纹计数或测定条纹的移动量都可以得到较高的测量精密度;当计数量增多时,用人的视觉系统进行计数将发生困难,用光电计数器进行计数就有其优点,只要提高实验装置的稳

定性，提高光电探测器的灵敏度以及使干涉条纹锐细和反衬度高，同样可以达到较高的测量精确度。

3. 测量干涉条纹和衍射图案的光强分布

物理光学实验中分析干涉条纹和衍射图案的光强分布情况是非常普遍的。用人的视觉系统只能测定光强分布图中的暗点(或亮点)位置和主极大或次极大的位置，但不能得到强度的大小。用客观光度学测量仪器，例如光电探测器、热电探测器、感光乳胶等可以定量测定光强分布图。由于光波的频率极高，用任何探测器测定的光强所得的结果均是光扰动在观察时间(T')内的平均值。

$$I = \frac{1}{2T'} \int_{-T'}^{T'} A^2 \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{nx}{\lambda_0} \right) dt. \quad (1-8)$$

干涉图和衍射图的描绘或者用光电自动记录系统直接记录下来并进行分析和研究可以深入理解光的波动本性，为探索光的理论提出实验依据。

4. 物理光学实验的又一特点是理论和实践紧密结合

前面已经讲到光波是频率极高的电磁波。目前还没有一种仪器能够直接测定光扰动的瞬时变化情况，实验只能测定在观察时间内的平均结果（即使我们采用时间响应极好的电子仪器），例如毫微秒级时间内光扰动有几十万次。因此进行物理光学实验，必须运用理论知识对观测结果进行分析，以得出正确的结论。例如光的偏振实验，不论用人眼去观察光强的变化或者用客观方法来测定光强的变化，只有与光波的偏振概念结合起来进行思考，才能分析光波的各种偏振态以及进行与光的偏振性有关的一些测量。

5. 进行物理光学实验必须选择好光源

光源的发光特性直接影响光波的单色性和偏振性。每一

个物理光学实验必须选择好光源，否则将使实验不会得到预期的结果。

目前人类对光源的发光特性仍未完全掌握，对光源的发光机理还在探索之中，由于不同实验往往采用不同的光源，这样就要求实验工作者必须了解各种光源的发光性能。在实验中可选择恰当的光源，但从目前的实际情况来看要求得到发光强度稳定的光源是极其困难的，所以在大量的实验中，只测量光强的相对值，而不去测定光强的绝对值。因为要测定光源的能谱和光电探测器的绝对光谱灵敏度，实验的方法和技能就复杂得多。在基础物理光学实验中，对光强进行相对测量就足够了。关于光强的绝对测量问题仅在本书最后作简单的介绍。

§2 物理光学实验的基本原理

一、光扰动的数学表式

光是一种电磁波，光波在均匀介质中的传播可以用波动方程来描写：

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2},$$

式中 ψ 是波函数，它是位置坐标 x, y, z 和时间 t 的函数， v 是光波在均匀介质中的传播速度。

在基础物理光学实验中一般应用一维波动方程：

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}, \quad (1-9)$$

这里的波函数 $\psi = \psi(x, t)$ ，用它可以代表某一波阵面^①的光

① 在任何给定时刻，连接所有等位相点的面积称为波阵面(或波面)。