



同济大学本科教材出版基金资助

光学实验

马宁生 李佛生 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

043-33



同济大学本科教材出版基金资助

光学实验

马宁生 李佛生 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书结合同济大学物理实验教学实践,通过作者多年来对实验仪器的开发和实验内容的增设,最终编写而成。全书共有 34 个实验,覆盖面较广,具有较鲜明的同济大学物理实验特色。基础实验使学习者掌握基本的实验理论和测量方法;近代实验反映了新的知识和新的测量方法;拓展实验具有较强的实用价值和应用前景。扫一扫每个实验中及封底的二维码可进入本书的微课程平台。

本书适合高等院校光学类专业的学生在基础实验中使用,也可作为相关专业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光学实验/马宁生,李佛生编著. —上海:同济大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5608-6391-7

I. ①光… II. ①马… ②李… III. ①光学—实验—教材 IV. ①O43-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 128576 号

光学实验

马宁生 李佛生 编著

责任编辑 张 莉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏句容排印厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 13
字 数 260 000
版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6391-7

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

本书的历史可追溯至 1986 年,由胡德敬、马宁生编著的《普通物理实验(光学实验)讲义》。随着实验内容的增加和教学方法的改进,在 2005 年,由马宁生、李佛生、章昌奕、孙文光完成了《光学实验(讲义)》的修订,该讲义对原有实验内容作了调整和补充。2010 年,马宁生、李佛生对《光学实验(讲义)》再次进行修订,扩充了自主创新的实验内容,增加了软件使用说明,进一步完善形成本书。

全书结合同济大学物理实验教学实践,覆盖面较广,具有较鲜明的同济大学物理实验特色。全书共有 34 个实验,基础实验使学习者掌握基本的实验理论和测量方法;近代实验反映了新的知识和新的测量方法;拓展实验具有较强的实用价值和应用前景。本书适合高等院校光学类专业的学生在基础实验中使用,也可作为相关专业人员的参考用书。

本书由马宁生、李佛生编写,软件由马宁生负责编写,马宁生负责统稿。本书编写中汇集了许多教师多年的教学经验和长期的科研成果,编者对教材中作出贡献的前辈胡德敬教授表示由衷的感谢,对构建光学实验微课程学习系统的吕军老师和微课程内容制作的金佳老师表示感谢。最后,我们将铭记章昌奕、孙文光老师为本书的前期编写所作的贡献。

教材中可能会有错误和不妥之处,望使用者指出,以便我们不断改进。

编 者

2016 年 5 月于同济大学

实 验 安 排

周次	时间	实验内容	上课地点	备注
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				

目 录

前言

绪论	1
光源简介	4

基础实验部分

实 验 一 显微镜实验	9
实 验 二 衍射光栅	16
实 验 三 正常色散中的科希方程验证	22
实 验 四 等厚干涉	29
实 验 五 薄透镜焦距的测量及共轴球面系统的研究	33
实 验 六 光谱仪和光谱的观察	40
实 验 七 数码照相	46
实 验 八 LED 发光光谱测量	51
实 验 九 双棱镜干涉	54
实 验 十 偏振光	59

近代实验部分

实 验 十 一 光电效应和普朗克常数的测定	65
实 验 十 二 迈克耳孙干涉仪	72
实 验 十 三 全息照相	78
实 验 十 四 X 光实验	84
实 验 十 五 晶体电光效应实验	93
实 验 十 六 拍频法测量光速	100
实 验 十 七 激光喇曼光谱	106

实 验 十 八	光镊-光的力学效应及光阱力的测量	114
---------	------------------------	-----

拓展实验部分

实 验 十 九	用线阵 CCD 测定折射率实验研究	119
实 验 二 十	太阳能应用实验	125
实验二十一	转速测量实验	130
实验二十二	用拍频法测量钠光波长	134
实验二十三	高斯光束束腰半径的测量	138
实验二十四	路灯声光双控延时电路	141
实验二十五	双光束微弱振动测量	146
实验二十六	简易半导体-激光准直仪的设计与实践	149
实验二十七	用超声光栅仪测定声速	157
实验二十八	磁致旋光效应	162
实验二十九	激光二极管的特性测定	167
实 验 三 十	阿贝成像原理和空间滤波	169
实验三十一	全息干涉测振	176
实验三十二	全息存储	184
实验三十三	激光散斑法测量物体微小位移	186
实验三十四	颜色的合成与分解	191
软件使用说明		197
参考文献		199

绪 论

1. 光学发展概况

物理学是一门基础科学,对整个自然科学和社会发展起着巨大的推动作用。光学是物理学中的一个重要分支。历史上,在诺贝尔物理学奖获奖科学家中,从事光学研究的比例很高,这从一个侧面反映光学在物理学中不同寻常的地位。自 20 世纪 60 年代激光问世以来,不但使古老的光学焕发青春,更使光学在各个领域中大放光彩。随着光电技术的不断完善,光子学和光子技术迅速发展,人类已经进入信息时代、光子时代,这为光学的广泛应用和发展开辟了灿烂的前景。

2. 光学实验的任务和作用

从光学发展的历史,可得到一个显然的结论:光学是一门实验性很强的科学。因为光学中没有哪一个重要理论,不是起源于科学实验,并被科学实验所证实。本课程也同样具有鲜明的理论和实验相结合的特点,通过学习,加深和牢固掌握光学理论知识,同时掌握一些基本光学仪器的原理和使用,掌握常用的光学技术和测试方法,了解光学的新技术、新成就。除此之外,最重要最基本的就是要通过动手、动脑的学习和训练,在“知识、素质、能力、创新”各个方面都得到培养和提高。

3. 课程内容改革和安排

教学改革最重要的是教材改革。在教材改革方面,本课程从下列五个方面进行:

(1) 合理安排光学实验内容。教育要面向现代化,面向世界,面向未来。因此,我们的教学内容要面向 21 世纪,合理安排基础实验、近代实验和拓展实验内容。由于基础实验很成熟,无论在理论的陈述上,还是在能力的培养方面都较完美。通过基础实验的训练使学习者掌握基本的实验理论和测量方法;近代实验一般是反映新的知识和新的测量方法,具有较强的理论价值;拓展实验侧重于激光应用、光电子器件应用和信息光学,具有较强的实用价值和应用前景。

(2) 把科研成果反映到教材中,促进科研和教学的结合。近十几年来,我们结合科研项目,在折射率测量、太阳能应用、高斯光束、转速测定、路灯双控、磁光调制和非接触透明物体厚度、折射率测量技术等方面进行了研究,上述成果引入教材,增加了教学内容的先进性和应用性,同时,也有利于启发学生学以致用和创新精神

的培养。

(3) 精选拓展实验内容。为了使学习者加深对高新技术的了解,大部分内容为设计性实验,主要介绍有关的应用背景,明确做该实验的目的、意义。一些实验对原理只做简要提示,真正领会和掌握要靠学生自己查资料,从而培养资料检索能力。对实验仪器的选取和使用,实验方法的设计,如何测量分析、归纳总结,这主要靠学习者的主观能动性和钻研创新精神,这正是选做实验的训练培养目的。

(4) 开发了与课程相配套的光学实验微课程学习系统。《教育信息化十年发展规划(2011—2020年)》明确提出了教育的发展目标之一是“充分发挥现代信息技术独特优势,信息化环境下学生自主学习能力明显增强,教学方式与教育模式创新不断深入,信息化对教育变革的促进作用充分显现”。因此在近年来的信息化建设中,在线学习已经成为学生学习的一种方式。我们所构建的物理实验微课程学习系统是运用智能手机的第三方应用程序(Web App)来实现教育信息化的教学理念。学习者可以通过扫描某实验的二维码即可在手机上展示该实验的视频影像。它将改变现有的物理实验教学模式和学习方法,为物理实验的教学改革提供了一种有效途径。

(5) 开发了与课程相配套的光学实验软件。该软件不仅具有较强的数据计算功能,同时具有实验原理、仪器调节方法和实验内容,教会学习者如何作图、如何书写实验结果,有些实验嵌入了虚拟实验和实物影像演示。该软件具有图像输出和不可修改的实验报告输出等独特的功能。

4. 光学实验特点

(1) 在基本技能的训练上,着重于光学仪器的调节技术和光路的调整技术。

(2) 通常要对实验中的光学现象进行认真地观察、比较、思考和判断,然后才能进行定性分析和定量测量。

(3) 实验中使用的光学仪器一般较为精密和贵重,光学元件大都为玻璃制品,较易损坏,所以在做实验前要掌握实验仪器的操作方法。

(4) 光学实验常在较暗环境或暗室中进行,因此,做光学实验一定要细心、耐心,要认真观察光学现象,勤于动手,善于用脑。

5. 光学实验教学特点

该课程的教学目标是让学习者在理解和掌握基本理论的同时具备观察问题和解决问题的能力;使学习者在有限的学习时间内了解和吸收实验课程与其他学科之间的相关知识;在解决实际问题中具备动手能力和设计能力,以达到培养知识面广、能力强、了解最新光学技术发展的跨世纪高等人才的目的。根据教学目标,从实验教材的编写和实验项目的选择上充分体现实验内容的基础性、研究性和探索性。

课堂实验教学是传授知识、培养学生综合能力的重要场所,为此我们重视上好每一堂课,提倡启发式、引导式、互动式教学,摒弃灌输式、结果式的教学。课程设计以学生为主体、教师为主导的教学理念,充分发挥学习者的主动性,教学效果以改革传统的教学方法为切入点,运用多种教学手段和教学方法。基于上述教学理念,我们进行五段式教学方法,即加强预习、重点讲解、独立进行实验、提问与质疑、实验过程检查和实验结果检查。

通过多年的探索和实践,教学效果达到了比较满意的程度。我们的“光学实验”课程在 2004 年被评为校级优质课程,在 2005 年被评为校级精品课程。“正常色散中的科希方程验证”、“迈克尔逊干涉仪”、“用线阵 CCD 测定折射率实验研究”、“太阳能应用实验”、“全息照相”实验在 2008 年以后评为校级精品实验。

6. 注意事项

- (1) 实验前必须做好预习,了解仪器的正确使用方法,不可违章操作。
- (2) 实验中,手指或其他物体不得触及光学元件的光学表面或镀膜表面。拿取时,手指应拿住磨砂面或边缘。
- (3) 对光学表面、镀膜表面要注意防止水汽、灰尘的沾污,也不能对着这些表面讲话。如要进行表面处理,应在教师指导下,用吹气球或擦镜纸、清洁剂进行处理。
- (4) 调节或转动仪器各部件时,要缓慢均匀,并注意有关锁紧螺钉的配合使用。
- (5) 实验数据经检查后,方能拆除光路,整理仪器。
- (6) 在暗室做实验时,首先要熟悉有关仪器、用具的安放位置,做好各种准备,操作时要小心谨慎,注意人身安全。

光源简介

光学实验离不开光源,光源的正确选择对实验的成败和结果的准确性至关重要。现简要介绍一些实验中常用的光源。

1. 白炽灯

白炽灯是一种热辐射光源。常用的白炽灯灯丝通电加热后,呈白炽状态而发光。灯丝常用钨丝,它熔点高、蒸发率低、在可见光范围内能量辐射多、机械强度大。在功率大的灯泡中,往往充以氩、氮或二者的混合气体,以抑制钨丝在高温工作时的蒸发,使白炽灯有较高的发光效率,又有较长的使用寿命。

普通白炽灯可作白光光源和照明用,交流或直流供电均可。使用寿命约为 1 000 h。

如需要较大的亮度时(如投影仪或幻灯机中的光源),一般采用卤钨灯。卤钨灯通常做成长管形、圆柱形或球形,其中灯丝通常为线状、排丝状或点状。排丝状灯泡可当作较均匀的面光源使用,点状灯丝可作点光源用。卤钨灯灯壳内除充入惰性气体外,还放入卤族元素。在适当的温度条件下,从灯丝蒸发出钨原子在灯壁区域与卤素原子化合而成卤化钨,挥发性的卤化钨气体扩散到温度较高的灯丝周围发生分解,钨原子沉积在灯丝上,卤素原子又扩散到温度较低的管壁附近与蒸发出来的钨原子重新化合,这种循环往复过程,使灯丝温度大为提高,达到光效高而寿命不缩短的目的。卤钨灯的工作电流大,管壁温度高,要注意散热。投影仪和幻灯机中的卤钨灯光源,一般均用风扇冷却,使用中需注意。

2. 气体放电灯

利用灯内气体在两电极间放电发光的原理制成的灯称为气体放电灯。其基本原理是,被两电极间电场加速的电子与管内气体原子发生非弹性碰撞,使气体原子激发,受激态原子返回基态时,把多余的能量以光辐射的形式释放出来。

气体放电灯有两类:一类是照明用,如高压汞灯和高压钠灯;另一类是实验室中作单色光源的低压放电光谱灯,在可见光谱区,它们各自发出较强的特征光谱线。

(1) 低压钠灯

钠光灯是钠蒸气放电灯,是发光效率最高的电光源。它耗电省、穿透云雾能力

强,常用作仪器单色光源和照明光源。灯内在高真空条件下放入金属钠,并充入适量的惰性气体,泡壳由耐钠腐蚀的特种玻璃制成。灯丝通电后,使惰性气体电离放电,灯管温度逐渐升高,金属钠逐渐气化,然后产生钠蒸气弧光放电,发出较强的钠黄光。钠黄光光谱含有 589.0 nm 和 589.6 nm 两条特征光谱线,钠黄光波长取平均值 589.3 nm。

弧光放电有负阻现象。为防止钠光灯发光后电流急剧增加而烧坏灯管,在钠光灯供电电路中需串入相应的限流器。GP20Na 低压钠光灯,其额定功率为 20 W,额定工作电压为 15 V,工作电流为 1.2 A。由于钠是一种难熔金属,一般通电后要过十余分钟钠蒸气才能达到正常的工作气压而稳定发光。

(2) 低压汞灯

低压汞灯灯管内充有汞及惰性气体氖或氩,工作原理和钠光灯相似。它发出绿白色光,在可见光范围内的主要特征谱线是:579.1 nm, 577.0 nm, 546.1 nm, 435.8 nm 和 404.7 nm。546.1 nm 和 435.8 nm 两条谱线较强。

3. 氦氖激光器(He-Ne 激光器)

氦氖激光器是一种单色性好、方向性强、亮度高、相干性好的常用光源。发光波长为 632.8 nm。激光管内充有按一定配比的氦气和氖气,在管端两极上加以直流高压才能激发出光。就腔长 250 mm 的激光管而言,其工作电压大于 1 600 V,激发电压就更高,使用中应注意人身安全。最佳工作电流约 5 mA,此时输出功率最大,使用寿命也长。使用时要注意激光管的正、负电极,不能把高压电源的正极接激光管的负极,否则会造成阴极溅射,污染激光管两端反射镜,影响激光器正常工作。激光器关闭后,也不能马上触及两电极,否则电源内的电容器高压会电击伤人。另外,激光束光强度大,不能让光束直接射入眼内,以免损害视力。

4. 常用钠灯、汞灯的型号规格

常用钠灯、汞灯的型号规格如表 0-1 所示。

表 0-1 常用钠灯、汞灯的型号规格

灯泡名称	型 号	电源电压 /V	工作电流 /A	额定功率 /W	镇流器要求工作电流		
					工作电流 /A	频率 /Hz	阻抗 /Q
钠 灯	GP20Na	220	1.3	20	1.3	50	
低压汞灯	pHgD1	220	1.3	20	1.3	50	
高压汞灯	GGQ50	220	0.62	50	0.62	50	285
高压汞灯	GGQ80	220	0.85	80	0.85	50	202

5. 常用钠灯、汞灯的谱线和规格

常用钠灯、汞灯的谱线和规格如表 0-2 所示。

表 0-2 常用钠灯、汞灯的谱线

主要光谱线的波长/nm			
颜 色	钠 灯	低压汞灯	高压汞灯
红			690.72
			671.65
橙			623.44
			612.35
			607.26
黄	589.593		588.96
	588.996		587.20
		579.07	585.94
		576.96	579.07
绿			576.96
			567.59
		546.07	546.07
			536.51
青			535.41
			496.03
		491.60	491.60
蓝		435.84	435.84
			434.75
			433.92
紫			410.84
		407.78	407.78
		404.66	404.66
紫外			398.40
			390.64
			389.39

6. 氢灯、氦灯、氖灯的特性

氢灯、氦灯、氖灯的特性如表 0-3 所示。

表 0-3

氢灯、氦灯、氖灯的特性

名 称	氢 灯	氦 灯	氖 灯
型 号	CP15H	GP10He	NH2A
点燃电压/V	8 000	5 000	
主 要 光 谱 线 的 波 长 /nm			724.5
		1 083.0	717.3
		706.5	692.9
	656.2	667.8	659.6
	486.1	587.5	650.6
	434.0	501.5	640.2
	410.1	492.1	633.4
	387.0	477.1	632.8
	388.9	402.6	626.6
	(巴尔末线系)	388.8	614.3
			596.5
			588.1
			585.2
			540.0
			535.8
			534.1
			533.0
			419.0
			478.8
			470.4
			457.5
			453.7

注意事项:

(1) 各种气体放电光源都应在一定电压下点燃使用,点燃时电路上必须串联适合灯管要求的限流器,切勿直接接入电源,以免灯泡损坏。

(2) 汞灯,除发出可见光外,还有较强的紫外线,特别是高压汞灯和超高压汞灯,紫外线对眼睛有刺激作用,所以实验时要注意眼睛的防护(尽量避免眼睛直接对着汞灯看,或带防护眼镜)。

管子的保存要注意安全,废管也要妥善管理,特别是破裂的钠灯泡与水接触会引起爆炸和起火。

6.315	1.230	
6.230	1.187	
6.150	1.145	
6.075	1.103	
6.000	1.061	
5.925	1.019	
5.850	977	
5.775	935	
5.700	893	
5.625	851	
5.550	809	
5.475	767	
5.400	725	
5.325	683	
5.250	641	
5.175	599	
5.100	557	
5.025	515	
4.950	473	
4.875	431	
4.800	389	
4.725	347	
4.650	305	
4.575	263	
4.500	221	
4.425	179	
4.350	137	
4.275	95	
4.200	53	
4.125	11	

基础实验部分

实验一 显微镜实验

显微镜是一种常用的助视光学仪器,在计量测试、科学研究、教学实验、医疗卫生等方面常用来进行微小长度测量和显微放大观察。显微镜一般有生物显微镜、读数显微镜、测量显微镜、金相显微镜、双筒立体显微镜等多种。但基本原理和主要构造是相同的。



【实验目的】

1. 了解显微镜的基本结构,加深对显微镜放大原理的理解。
2. 正确掌握显微镜的使用方法。
3. 把测微目镜和生物显微镜结合起来,进行微小长度的测量。

【实验仪器】

生物显微镜、测量显微镜、光源、全息光栅片、测微目镜、石英尺。

【实验原理】

1. 显微镜放大的基本原理

最简单的显微镜是由二块凸透镜组成,它们分别称为物镜和目镜,其放大成像的光路如图 1-1 所示。

物镜 L_o 是显微镜的主要元件,它的焦距 f_o 很短,其作用是对被观察的微小物体 PQ 进行第一次放大,以便在目镜 L_e 的焦点 F_e 附近(目镜一侧)形成放大实像(为此,物体应放在何处)。目镜的作用同放大镜。通过它观察放大实像时,实像又再一次被放大,使视角增加,结果在目镜前的明视距离(25 cm)处,形成放大的虚像。因此,只有当物体、物镜、目镜满足上述成像条件时,才能清晰地看到放大的物体像。我们把满足上述条件而进行的调节过程叫调焦。

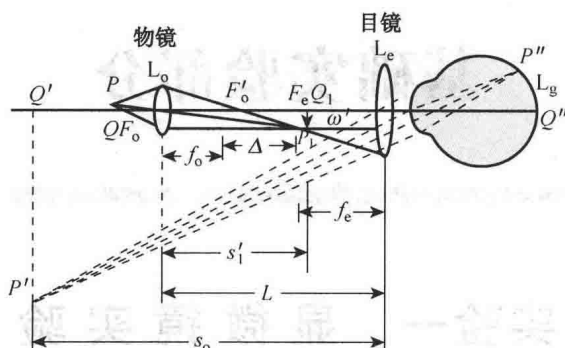


图 1-1 显微镜放大的基本原理

如 L 代表显微镜物镜和目镜间的距离, Δ 代表物镜焦点 F'_o 和目镜焦点 F_e 之间的距离(称光学间隔), s'_1 为第一次放大的实像 P_1Q_1 到物镜的像距(图 1-1)。

满足调焦要求时,由图 1-1 显然有

$$L = f_o + \Delta + f_e \cong s'_1 + f_e$$

通常显微镜的标准筒长为 160~180 mm,筒长是固定的,因此实际上调焦就是调节物体到物镜镜头的距离(叫工作距离),以满足上述两次成像的要求,所以观察物体时,显微镜物镜和物体间距离不可任意,必须细心调节。

2. 显微镜的横向放大率

横向放大率定义为:像 $P'Q'$ 的长度与物 PQ 长度之比,即

$$\beta = -\frac{P'Q'}{PQ}$$

由于物镜焦距为 f'_o ,目镜焦距为 f_e , $P'Q'$ 到眼睛的距离(眼睛到目镜的距离可忽略)为明视距离($s_0 = 25$ cm),由图 1-1 可知:

$$-\frac{P_1Q_1}{PQ} \cong -\frac{s'_1}{f_o} \cong -\frac{\Delta + f_o}{f_o}; \quad \frac{P'Q'}{P_1Q_1} \cong \frac{s_0}{f_e}$$

所以

$$\beta = \frac{-P'Q'}{PQ} = -\frac{s_0(\Delta + f_o)}{f_o \cdot f_e} \cong -\frac{\Delta}{f_o} \cdot \frac{s_0}{f_e}$$

即显微镜的横向放大率为物镜放大倍数和目镜放大倍数之乘积,式中负号表示像是倒立的。

3. 显微镜的视角放大率

视角放大率定义为