

高等学校教材

光测原理和技术

王圣佑 曹才芝 韩召进 编

兵器工业出版社

兵器

71206

社

7M.2.6

V. 177

365277

51050字(约140页)

光 测 原 理 和 技 术

王圣佑 曹才芝 韩召进 编

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内容提要

本书在介绍基本光学知识的基础上,着重阐述了光学测试技术,如高速摄影技术、光测高温技术、利用干涉和衍射进行精密测量的有关技术、基于人为双折射现象的光测弹性效应、全息无损检测、激光多普勒测速等,并介绍了适用于任何反射表面的激光速度干涉仪(简称VISAR)、光纤干涉仪等干涉新技术,此外还介绍了红外辐射的传播特性及基本的探测原理、激光器的基本原理及提高性能的措施、光电探测器及热探测器等。本书在阐述中既重视理论性,也照顾到实用性,可供兵器测试和一般测试专业及有关专业的大学生用作教材,也可供有关的科技工作者参考。

光测原理和技术

王圣佑 曹才芝 韩召进 编

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京通县向阳印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.5 字数: 404千字

1992年11月第1版 1992年11月第1次印刷

印数: 1-1400 定价: 4.30元

ISBN 7-80038-432-2/TN·17(课)

前 言

本教材是依据“兵器测试技术”专业指导委员会教材编审组讨论确定的教学大纲编写的，并得到兵工教材编审室的大力支持和鼓励。

由于激光的问世，光学测试技术得以飞跃地发展，在兵器测试领域中的应用也日益广泛。作为测试专业，设置本门课程是完全必要的。

鉴于工科院校学生的光学知识基础比较薄弱，本教材的起点在几何光学方面以高中物理为基础，在物理光学等其它方面则以工科大学物理为基础，因此必须以一定篇幅讲述基本的测试原理，同时介绍一些实用技术和测试系统。教学大纲规定学时数为68学时，可安排在三年级以后讲授。

本书是在编者的原讲义基础上修改而成。全书共分十二章，由王圣佑主编。第二、三、六、八章由曹才芝编写，第七章由韩召进编写，其余七章由王圣佑编写。全书的连贯和必要的修润由王圣佑、曹才芝共同完成。潘德恒教授审阅了原讲义，并为修改提供了宝贵意见，编者表示衷心的感谢。

作为一本非光学专业的光测技术基础课教材，既要阐明原理，又要具有实用价值，还需在限定的篇幅内尽量充实内容，不当或疏漏之处，还望各方面专家及读者不吝赐教。

本书由徐金镛教授主审，潘德恒教授任责任编委，宋筱平同志任教材编审室主管编辑，在此一并致以衷心的感谢。

编者

1991年2月

目 录

绪言	(1)
第一章 几何光学	(2)
§ 1.1 折射和反射	(2)
1.1.1 折射	(2)
1.1.2 反射和全内反射	(3)
1.1.3 全反射的应用	(3)
1.1.4 菲涅耳公式	(4)
§ 1.2 光导纤维	(8)
1.2.1 光纤的数值孔径 NA	(8)
1.2.2 光纤中子午光线的几何程长和反射次数	(9)
1.2.3 光纤中光能的损耗及其透射率	(10)
1.2.4 渐变折射率光纤	(11)
1.2.5 光纤传感器	(11)
§ 1.3 单球面成像	(12)
1.3.1 单球面的折射	(12)
1.3.2 球面反射镜	(15)
1.3.3 玻璃微珠的定向反射特性	(16)
§ 1.4 薄透镜成像	(16)
1.4.1 成像公式	(16)
1.4.2 正透镜和负透镜	(17)
§ 1.5 厚透镜及透镜组成像	(18)
1.5.1 主平面	(18)
1.5.2 作图法	(19)
1.5.3 高斯公式	(19)
1.5.4 牛顿公式	(20)
1.5.5 像的放大率	(20)
§ 1.6 拉格朗日—亥姆霍兹不变量	(20)
§ 1.7 像差概述	(22)
习题	(23)
第二章 光学仪器	(24)
§ 2.1 眼睛	(24)
2.1.1 人眼的生理结构及简约眼	(24)
2.1.2 人眼的光焦度及其调节	(24)
2.1.3 眼睛的缺陷及其校正	(25)

2.1.4 虹膜与瞳孔·····	(26)
2.1.5 分辨本领及视觉灵敏度·····	(26)
§ 2.2 照相系统·····	(27)
2.2.1 照相物镜·····	(27)
2.2.2 感光胶片·····	(28)
2.2.3 快门速度和光圈数·····	(32)
§ 2.3 投影系统·····	(33)
§ 2.4 简单放大镜·····	(34)
§ 2.5 显微镜·····	(35)
§ 2.6 望远镜·····	(36)
§ 2.7 内调焦、准直和自准直望远镜·····	(37)
2.7.1 内调焦望远镜·····	(37)
2.7.2 准直仪(平行光管)·····	(38)
2.7.3 自准直目镜·····	(40)
习题·····	(42)
第三章 高速摄影 ·····	(43)
§ 3.1 高速摄影概述·····	(43)
3.1.1 高速摄影的定义·····	(43)
3.1.2 基本术语·····	(44)
3.1.3 高速摄影的分类·····	(45)
3.1.4 高速摄影的信息论·····	(45)
§ 3.2 单幅高速摄影·····	(47)
3.2.1 短暂闪光的光源·····	(47)
3.2.2 高速快门·····	(47)
§ 3.3 间歇式高速摄影机·····	(48)
§ 3.4 光学补偿式高速摄影机·····	(49)
3.4.1 棱镜补偿式高速摄影机·····	(49)
3.4.2 反射镜补偿式高速摄影机·····	(50)
§ 3.5 鼓轮式高速摄影机·····	(51)
3.5.1 有补偿器的鼓轮式高速摄影机·····	(51)
3.5.2 保护快门·····	(52)
3.5.3 鼓轮式狭缝扫描摄影机·····	(52)
§ 3.6 转镜式高速摄影机·····	(54)
3.6.1 扫描式和分幅式·····	(54)
3.6.2 同步型和等待型·····	(56)
§ 3.7 变像管高速摄影·····	(57)
§ 3.8 网格高速摄影·····	(57)
§ 3.9 闪光高速摄影·····	(58)
§ 3.10 特种高速摄影·····	(58)

3.10.1 射线高速摄影	(58)
3.10.2 高速阴影、纹影和干涉摄影	(59)
习题	(61)
第四章 光源和探测器	(62)
§ 4.1 辐射度学和光度学	(62)
4.1.1 辐射度学单位	(62)
4.1.2 光度学单位	(63)
4.1.3 点源	(65)
4.1.4 扩展源	(65)
4.1.5 漫反射面	(66)
4.1.6 像的照度	(66)
4.1.7 像的亮度	(67)
4.1.8 定向辐射体	(68)
§ 4.2 光源	(69)
4.2.1 黑体辐射源	(69)
4.2.2 谱线源	(70)
4.2.3 发光二极管(LED)	(71)
§ 4.3 探测器	(72)
4.3.1 光电探测器的工作原理与分类	(72)
4.3.2 光电探测器的性能参数	(73)
4.3.3 光电管	(75)
4.3.4 光电倍增管	(76)
4.3.5 光敏电阻	(80)
4.3.6 光电二极管	(81)
4.3.7 光电雪崩管	(81)
§ 4.4 电荷耦合器件(CCD)	(82)
4.4.1 CCD的电荷存贮和传输	(82)
4.4.2 信号电荷的产生	(85)
4.4.3 信号输出装置	(85)
4.4.4 CCD像感器	(85)
习题	(86)
第五章 光的干涉及其应用	(87)
§ 5.1 光波的数学描述和光波的叠加	(87)
5.1.1 光波的数学描述	(87)
5.1.2 光波的叠加	(88)
§ 5.2 波阵面分割的干涉	(88)
5.2.1 双缝干涉	(89)
5.2.2 多缝干涉	(89)
§ 5.3 振幅分割的干涉	(90)

5.3.1 斯托克斯的倒逆关系	(91)
5.3.2 双光束干涉	(91)
5.3.3 多次反射的干涉	(92)
§ 5.4 光的相干性	(94)
5.4.1 时间相干性	(94)
5.4.2 空间相干性	(95)
§ 5.5 激光位移干涉仪	(97)
5.5.1 位移干涉仪的基本公式	(97)
5.5.2 几种位移干涉仪的结构特点	(98)
§ 5.6 迈克尔逊干涉仪的两种变形	(101)
5.6.1 泰曼—格林干涉仪	(101)
5.6.2 马赫—秦特干涉仪	(101)
§ 5.7 法布里—珀罗干涉仪	(102)
5.7.1 法布里—珀罗干涉仪与标准具的结构	(102)
5.7.2 法布里—珀罗干涉仪的特性	(102)
5.7.3 利用F—P干涉仪测速	(105)
5.7.4 从干涉图样求波长差 $\Delta\lambda$	(106)
§ 5.8 激光速度干涉仪	(108)
5.8.1 VISAR的基本原理	(109)
5.8.2 ΔK 的检测与信号处理	(110)
5.8.3 在VISAR中关于相干性的考虑	(110)
5.8.4 VISAR中关于滞后臂光路的选择	(112)
5.8.5 VISAR的光路布置	(113)
§ 5.9 光纤干涉仪	(114)
5.9.1 光纤迈克尔逊干涉仪	(114)
5.9.2 光纤马赫—秦特干涉仪	(115)
5.9.3 光纤环形干涉仪	(116)
5.9.4 光纤法布里—珀罗干涉仪	(117)
§ 5.10 光学薄膜	(117)
5.10.1 单层光学膜	(117)
5.10.2 多层光学膜	(120)
5.10.3 干涉滤光片	(121)
习题	(122)
第六章 衍射现象及其应用	(123)
§ 6.1 衍射理论	(123)
6.1.1 惠更斯—菲涅耳原理	(123)
6.1.2 菲涅耳—基尔霍夫公式	(124)
6.1.3 基尔霍夫衍射公式的近似	(124)
6.1.4 巴俾涅原理	(127)

§ 6.2 夫琅和费单缝衍射及其应用	(127)
6.2.1 夫琅和费单缝衍射和矩孔衍射图样	(127)
6.2.2 单缝衍射的应用	(129)
§ 6.3 夫琅和费圆孔衍射及其应用	(131)
6.3.1 夫琅和费圆孔衍射	(131)
6.3.2 夫琅和费圆孔衍射的应用	(133)
§ 6.4 光栅衍射及光栅光谱仪	(134)
6.4.1 衍射光栅	(134)
6.4.2 光栅光谱仪及其性能参数	(140)
§ 6.5 菲涅耳衍射及菲涅耳透镜	(142)
6.5.1 圆孔和圆屏菲涅耳衍射实验	(142)
6.5.2 菲涅耳半波带法	(142)
6.5.3 菲涅耳透镜	(144)
习题	(145)
第七章 全息的原理和应用	(147)
§ 7.1 全息照相的基本原理	(147)
7.1.1 物体光波波面的记录和再现	(147)
7.1.2 同轴全息和离轴全息	(150)
§ 7.2 全息照相实验	(150)
7.2.1 光源及稳定性要求	(150)
7.2.2 记录介质及其处理	(151)
§ 7.3 全息干涉计量	(153)
7.3.1 实时全息干涉计量	(154)
7.3.2 双曝光全息干涉计量	(156)
7.3.3 连续曝光全息干涉计量	(158)
习题	(159)
第八章 光的偏振及其应用	(160)
§ 8.1 偏振现象、起偏与检偏	(160)
8.1.1 自然光、部分偏振光、完全偏振光	(160)
8.1.2 获得偏振光的方法	(160)
8.1.3 马吕斯定律	(162)
§ 8.2 晶体的双折射现象	(162)
8.2.1 双折射	(162)
8.2.2 用惠更斯原理解释双折射现象	(162)
8.2.3 折射率椭球	(164)
8.2.4 偏振棱镜	(164)
8.2.5 波片、 $\frac{1}{4}$ 波片和 $\frac{1}{2}$ 波片	(166)
§ 8.3 椭圆偏振光和圆偏振光	(167)

§ 8.4 偏振光的干涉·····	(168)
§ 8.5 电光效应·····	(170)
8.5.1 克尔效应·····	(170)
8.5.2 泡克耳斯效应·····	(172)
§ 8.6 光弹性测试原理·····	(174)
8.6.1 应力和应变·····	(174)
8.6.2 应力—光学定律·····	(176)
8.6.3 平面偏振布置中的光弹性效应·····	(176)
8.6.4 圆偏振光场中的光弹性效应·····	(178)
8.6.5 整数级等差线的观察与识别·····	(180)
§ 8.7 旋光现象·····	(181)
§ 8.8 磁光效应·····	(183)
8.8.1 法拉弟效应·····	(183)
8.8.2 塞曼效应·····	(184)
习题·····	(184)
第九章 光学多普勒效应及其应用 ·····	(186)
§ 9.1 多普勒效应·····	(186)
9.1.1 声学多普勒效应·····	(186)
9.1.2 光学多普勒效应·····	(188)
§ 9.2 光学多普勒频移量的检测·····	(193)
§ 9.3 多普勒测速装置的典型光路·····	(194)
§ 9.4 速度方向的鉴别·····	(197)
§ 9.5 双频激光位移干涉仪·····	(200)
习题·····	(202)
第十章 辐射测温技术 ·····	(203)
§ 10.1 物体的亮温和隐丝式光测高温计·····	(203)
10.1.1 物体的亮温·····	(203)
10.1.2 亮温的测量及隐丝式光测高温计·····	(203)
10.1.3 由物体的亮温求其真实温度·····	(204)
§ 10.2 物体的色温及相关的测温法·····	(207)
10.2.1 物体的色温·····	(207)
10.2.2 由物体的色温求其真实温度·····	(207)
§ 10.3 辐射温度计·····	(208)
§ 10.4 瞬态测温技术——光电比色测温法·····	(210)
习题·····	(213)
第十一章 激光器 ·····	(214)
§ 11.1 激光的基本原理·····	(214)
11.1.1 原子的能级结构·····	(214)
11.1.2 自发辐射和受激辐射·····	(215)

11.1.3	粒子数反转	(217)
11.1.4	工作物质的增益系数	(218)
11.1.5	光学谐振腔	(219)
11.1.6	激光器的频率特性	(220)
11.1.7	激光的横模	(221)
§ 11.2	在测试中应用的激光器	(222)
11.2.1	氦氖激光器	(222)
11.2.2	红宝石激光器	(226)
习题		(227)
第十二章	红外辐射的传播和探测	(228)
§ 12.1	红外线的发射	(228)
12.1.1	红外辐射的基本定律	(228)
12.1.2	红外辐射源	(230)
§ 12.2	红外线的传输	(234)
12.2.1	红外辐射在大气中的传输	(234)
12.2.2	红外光学系统的选择	(236)
§ 12.3	红外辐射的探测	(240)
12.3.1	红外辐射的探测器	(240)
12.3.2	红外辐射的调制	(242)
§ 12.4	红外技术应用概述	(247)
附录I、II		(248)
附录II		(249)
参考文献		(249)
习题答案		(251)

绪 言

以基本光学原理为依据的测试技术，早已被证明是行之有效的，特别在非接触测量和测试精度两方面的优越性更是其它方法所不及。然而传统光测法对被测对象及环境条件的苛刻要求，使测试工作者在条件恶劣的现场测试情况下，对光测技术持怀疑态度。这就使先进的光测技术不能充分发挥其威力，严重地影响了各项研究工作的顺利进行。

形成上述状况的原因，主要应从两方面考究。客观上在激光器问世之前，因为光源在单色性、方向性及输出功率等方面的局限和不足，确实给光测法走出实验室进入测试现场造成了颇大的困难。但是，随着激光器的研制成功，给光学仪器和光测技术提供了廉价的高质量光源，它使昔日的光测技术如虎添翼，更为激光测试技术在恶劣条件下的现场应用铺平了道路。例如，采用激光光源和定向反射或漫反射元件的激光干涉仪系统，已被成功地用于各种待测目标的位移和速度测量。其中包括由爆炸形成的强冲击测试和枪炮发射时的弹道测试。从主观方面考虑，由于已往对光测法的成见，影响了测试工作者对光测技术应有的重视，甚至在专门培养测试人才的有关专业中，最初也没有设置相应的光测技术课，这显然是不应有的知识上的偏废，令人颇为惋惜。

随着各种市售激光器质量的不断提高、光纤技术的飞跃发展、CCD等固体光电探测器件的开发利用，光测技术作为一种精密有效的测试手段将越来越显示其不容忽视的作用。

第一章 几何光学

在光的波动性被发现之前，把光束看成沿直线传播的近似处理一直被认为是天经地义的。即使在光的波动性被大量的实验事实证明之后，这种近似的直线传播特性对于光学仪器的发展来说，仍然导致了大量行之有效的辉煌成果。与之有关的研究内容称为几何光学或射线光学。

§1.1 折射和反射

1.1.1 折射

当光线以某一角度入射到两种透明介质的分界面上时，如图1—1所示，如果这一分界面足够平滑，则遵从众所周知的折射定律(斯涅耳定律)

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1-1)$$

式中 n 为第一介质的折射率， n' 为第二介质的折射率， I 为入射角， I' 为折射角。

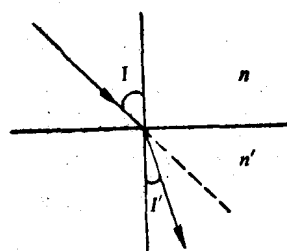


图1—1

关于折射率 n ，其物理意义为真空中的光速与介质中光速之比。对波长为400.0~760.0nm的可见光辐射来说，大多数的光学材料均呈透明状态。对于紫外线或红外线而言，情况则不同。比如在可见光区透明度很好的玻璃，对于紫外线或红外线就有不同程度的吸收，甚至紫外线基本不能透过。材料的折射率是随着波长的不同而改变的，一般是随着波长的增加而减小。这种现象在光学中称为色散。人们可以利用棱镜的色散来显示光谱。在光栅的刻制技术和制造工艺不很先进的时候，棱镜光谱仪在物质的光谱分析中，曾经起过举足轻重的作用。但是，对于由一系列透镜构成的光学系统而言，色散会导致成像性质随波长而改变，形成色像差，从而使像质变坏，于是光学设计者们又不得不千方百计地去避免或补偿这种色散效应的危害。从光学设计考虑，只需知道光学材料对某些特定波长的折射率即能决定其特性。这些特定波长的谱线如表1—1所示。光学材料对波长为589.3nm的钠黄光的折射率 n_D 称为基本折射率。一些材料的基本折射率列于表1—2。表内大多数数据仅仅给出三位有效数字，如果需要更为精确的数据时，可查阅有关光学材料手册。一般在光学玻璃特性中，通常给出下列

表1—1

颜 色	红		黄		绿	青		蓝	紫
谱线符号	A'	C	D	d	e	F	g	G'	h
波长 λ (nm)	766.5	656.3	589.3	587.6	546.1	486.1	435.8	434.1	404.7
产生谱线元素	K	H	Na	He	Hg	H	Hg	H	Hg

表1-2

材 料	n_D	材 料	n_D	材 料	n_D
空 气	1.0003	苯	1.50	重火石玻璃	1.66
水	1.33	冕 玻 璃	1.52	超重火石玻璃	1.73
甲 醇	1.33	加拿大树胶	1.53	蓝 宝 石	1.77
乙 醇	1.36	氯化钠	1.54	极重火石玻璃	1.89
氟化镁	1.38	轻火石玻璃	1.57	钛酸锶(SrTiO_3)	2.41
熔 石 英	1.46	二硫化碳	1.62	金刚石(C)	2.42
派热克斯	1.47	中火石玻璃	1.63	金红石(TiO_2)	2.62 2.90

光学参数：基本折射率 n_D ，平均色散 $n_F - n_C$ ，阿贝系数 $\gamma = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ ，相对色散 $\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$ ， $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$ 、……以及部分色散 $n_D - n_d$ 、 $n_D - n_g$ 、……。光学玻璃在透明波段内折射率随波长的增加而减小，有关系式 $n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}$ 。式中 a 、 b 、 c 对某种玻璃是常数。只要用三种波长的折射率代入上式解出 a 、 b 、 c 的数值，即可计算其它波长的折射率。

1.1.2 反射和全内反射

光线在两种介质的分界面上发生反射时所遵从的规律，是众所周知的反射定律。现在着重考虑光线从高折射率介质向低折射率介质入射时发生的全反射现象。以光线从玻璃到空气的折射为例，由于第二种介质的折射率 n' 小于第一种介质的折射率 n ，故折射角 I' 必大于入射角 I 。当折射角 $I' = 90^\circ$ 时，相应的入射角 I_0 称为临界角。根据折射定律应有关系式 $n \sin I_0 = n' \sin 90^\circ$ ，于是可得

$$\sin I_0 = \frac{n'}{n} \quad (1-2)$$

如果入射角 $I > I_0$ 时，就会发生全内反射现象。这时入射光能全部返回到第一种介质中，而且仍然遵从反射定律。对于玻璃和空气的分界面，临界角 $I_0 \approx 42^\circ$ 。

1.1.3 全反射的应用

一、全反射棱镜

如图1—2所示的等腰直角棱镜是光学系统中常用的全反射棱镜。用它代替平面反射镜，其优点为：当棱镜的透光面镀以增透膜时，反射率接近百分之百。它比一般镀金属膜的反射镜具有较高的反射率，而且比金属膜反射镜耐腐蚀、牢固耐用，能承受较强激光束的照射而不致损坏。尤其值得一提的是，根据全内反射定律制造的全反射棱镜，其反射率对于入射光的偏振态没有选择性。如果把光线的入射角控制在临界角附近，则当入射光为偏振光时，其反射光的垂直分量和水平分量之间不会形成明显的位相差，因而不会改变入射偏振光的偏振态及其强度。金属膜平面反射镜则不然，它不仅对入射光线有明显的吸收，而

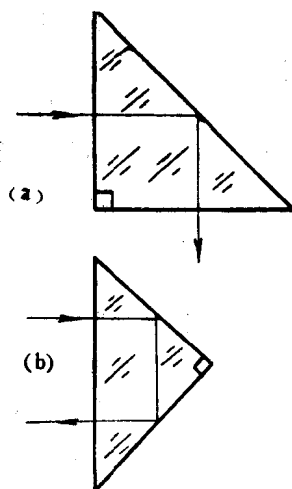


图1-2

且反射率对入射光的偏振态有选择性,也即对偏振面取向不同的入射光,其相应的反射率也不一样。在某种意义上说,平面反射镜相当于一个起偏器或检偏器。当入射光为偏振光时,反射后的偏振态和强度都很容易被改变。在光学测试系统中,如果必须用反射元件改变信号光束的方向时,上述问题应适当注意。此外,在成像系统中的全反射棱镜,最好是应用于平行光束中,否则会引入附加的像差。

图1—2(a)表示光线垂直于直角棱面入射,出射光将偏折 90° 。图1—2(b)是同一块等腰直角棱镜,但光线是从斜面入射,显然,只要入射光在垂直于直角棱的平面(称主截面)内,则出射光必与入射光平行而反向,即偏折 180° 。同时出射线相对入射线将产生一定的平移。这样使用的棱镜称为屋脊棱镜,图示为正入射的特例。其实,只要是直角棱镜,不需要严格等腰,均可以使光线偏折 180° 。一般等腰直角棱镜使用起来方便些。至于出射线与入射线的平行度,则取决于直角的加工精度。当直角为 $90^\circ \pm \alpha$ (α 是偏差)时,反射光线与入射光线间夹角为 2α 。

二、角隅棱镜和角反射器

角隅棱镜是汇集于一点的三个棱边互成直角的棱镜,就象正立方体的各个顶角,如图1—

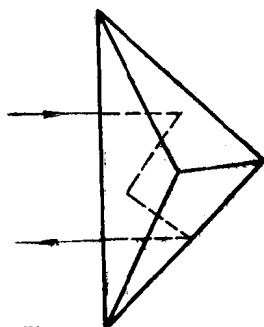


图1—3

3所示。这种棱镜是屋脊棱镜的推广,其最突出的特点是能使穿透斜面的任何光线平行于入射方向反射回去。由于这一特性,使它在激光测距和干涉测长中成为不可缺少的关键部件。例如,为了精确测定地球和月球的距离,阿波罗11号宇宙飞船在月球表面着陆后,专门把100个角隅棱镜拼成的合作目标安放在月球表面。这样就可以把发自地球的激光束按原方向反射回来,测得激光往返的渡越时间,乘以光速,即可算出地球和月球之间的距离。

同样,由三个平面反射镜两两相互正交而构成的角反射器,也具有与角隅棱镜相同的作用,而且制作更加容易。只需一块标准立方体作为靠模,即可用平面反射镜胶合成角反射器。下面简单证明使入射光线原方向返回的特性。因为三个平面反射镜两两相互正交,这样三个平面所围成的空间相当于一个立方盒子的一角。令直角坐标 x 、 y 、 z 三轴分别垂直于角反射器的三个平面反射镜,当光线从任何方向由角反射器上凹的一侧入射时,入射光束的方向矢量 S 为

$$S = xi + yj + zk$$

其中 x 、 y 、 z 为矢量 S 在三个直角坐标轴上之投影。相继经过三个面的反射后, x 、 y 、 z 都改变符号,即 x 变为 $(-x)$, y 变为 $(-y)$, z 变为 $(-z)$ 。这样反射光的方向矢量为 $(-S)$,也就是使入射光的方向矢量改变了 180° 。这里需要说明的是,不论是角隅棱镜还是角反射器,都会使反射光线与入射光线在空间上分离,也即产生一定量的平移。上述证明可以很容易地推广到角隅棱镜的情况。二者之间的区别在于,角隅棱镜利用了玻璃与空气界面上的全反射现象。这不仅使得光线的强度反射率有所不同,而且对于不同偏振态的入射光,其位相的改变也有所区别。进一步的探讨必须涉及光的电磁波理论,将在下一节中进行讨论。

1.1.4 菲涅耳公式

一、菲涅耳公式的推导

反射定律和折射定律只给出了反射光线、折射光线与入射光线的传播方向之间的关系。

为了弄清它们之间在振幅和位相方面的关系，必须从光的物理本质入手。光是电磁波，而且是横波，即电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场矢量 $\mathbf{H}$ 均与波的传播方向相垂直。由于引起视觉和底片感光作用的是电场矢量 $\mathbf{E}$ ，所以 $\mathbf{E}$ 也被称为光矢量。任一偏振态的光矢量 $\mathbf{E}$ 均可分解为互相垂直的两个偏振分量。其中与入射面平行的分量称为 p 分量；与入射面垂直的分量称为 s 分量。假设在两种介质的分界面上入射光矢量 $\mathbf{E}$ 的分量为 $\mathbf{E}_{p1}$ 、 $\mathbf{E}_{s1}$ ，入射角为 I ，两媒质的折射率分别为 n_1 、 n_2 。菲涅耳公式将给出反射光的偏振分量 $\mathbf{E}'_{p1}$ 、 $\mathbf{E}'_{s1}$ 和折射光的偏振分量 $\mathbf{E}_{p2}$ 、 $\mathbf{E}_{s2}$ 分别与 $\mathbf{E}_{p1}$ 、 $\mathbf{E}_{s1}$ 的比值与入射角 I 及 n_1 、 n_2 的关系。由于在反射和折射时，二相互垂直的偏振分量是相互独立的，平行(或垂直)分量在反、折射时只产生平行(或垂直)分量，因此可以分别讨论。

1、 p 分量的反射和折射

如图1—4(a)，入射光的 p 分量为 $\mathbf{E}_{p1}$ ，在入射点 O 附近，反射和折射光的 p 分量的振幅分别为 $\mathbf{E}'_{p1}$ 和 $\mathbf{E}_{p2}$ ，相应的振动方向如图中与光的传播方向相垂直的短箭头所示。箭头的方向是假设的，若计算结果为正，即为假设方向；若计算结果为负，则与假设方向相反。这种振动方向的突变反映了位相的突变，它本应发生在界面附近。图中符号画得离 O 点较远，是为了看起来清楚。相应光线的磁矢量的振幅分别为 $\mathbf{H}_{s1}$ 、 $\mathbf{H}'_{s1}$ 和 $\mathbf{H}_{s2}$ ，其方向可按右手螺旋法

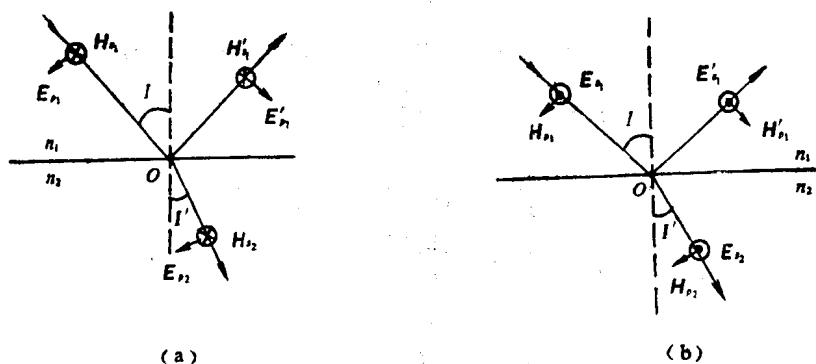


图1—4

则确定(因为 $\mathbf{S}=\mathbf{E} \times \mathbf{H}$)，在图示情况中均垂直纸面向里。

根据电磁场理论的边界条件， $\mathbf{E}_p$ 沿边界的分量连续，有关系式

$$\mathbf{E}_{p1} \cos I - \mathbf{E}'_{p1} \cos I = \mathbf{E}_{p2} \cos I' \quad (1-3)$$

式中 I' 为折射角。同样， $\mathbf{H}_s$ 沿界面的分量也连续，有关系式

$$\mathbf{H}_{s1} + \mathbf{H}'_{s1} = \mathbf{H}_{s2} \quad (1-4)$$

此外，根据电磁理论，空间某处在任一时刻的 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{E}$ 在量值上有下列关系

$$\sqrt{\epsilon} \mathbf{E} = \sqrt{\mu} \mathbf{H}$$

式中 ϵ 、 μ 分别为介电系数和磁导率。对于透明媒质，相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ ， $\mu = \mu_0 \mu_r \approx \mu_0$ ，所以有

$$\begin{aligned} \sqrt{\epsilon_1} \mathbf{E}_{p1} &= \sqrt{\mu_0} \mathbf{H}_{s1}; \quad \sqrt{\epsilon_1} \mathbf{E}'_{p1} = \sqrt{\mu_0} \mathbf{H}'_{s1}; \\ \sqrt{\epsilon_2} \mathbf{E}_{p2} &= \sqrt{\mu_0} \mathbf{H}_{s2}. \end{aligned} \quad (1-5)$$

因为媒质的折射率 n 为

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (1-6)$$

将式(1-5)、(1-6)代入式(1-4), 得

$$n_1 E_{p1} + n_1 E'_{p1} = n_2 E_{p2} \quad (1-7)$$

联立式(1-7)和(1-3), 得

$$r_p = \frac{E'_{p1}}{E_{p1}} = \frac{n_2 \cos I - n_1 \cos I'}{n_2 \cos I + n_1 \cos I'} \quad (1-8)$$

$$t_p = \frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{2n_1 \cos I}{n_2 \cos I + n_1 \cos I'} \quad (1-9)$$

r_p 和 t_p 分别表示 p 分量的振幅反射率和振幅透射率。它们分别给出了反射波、折射波与入射波的振幅之比。

2. s 分量的反射和折射

如图1-4(b), 进行与上述类似的推导, 可得出 s 分量的振幅反射率 r_s 和振幅透射率 t_s 为

$$r_s = \frac{E'_{s1}}{E_{s1}} = \frac{n_1 \cos I - n_2 \cos I'}{n_2 \cos I' + n_1 \cos I} \quad (1-10)$$

$$t_s = \frac{E_{s2}}{E_{s1}} = \frac{2n_1 \cos I}{n_2 \cos I' + n_1 \cos I} \quad (1-11)$$

式(1-8)~(1-11)称为菲涅耳公式。利用折射定律(1-1)还可将菲涅耳公式化成另一种形式

$$r_p = \frac{E'_{p1}}{E_{p1}} = \frac{\operatorname{tg}(I - I')}{\operatorname{tg}(I + I')} \quad (1-12)$$

$$t_p = \frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{2 \cos I \sin I'}{\sin(I + I') \cos(I - I')} \quad (1-13)$$

$$r_s = \frac{E'_{s1}}{E_{s1}} = \frac{-\sin(I - I')}{\sin(I + I')} \quad (1-14)$$

$$t_s = \frac{E_{s2}}{E_{s1}} = \frac{2 \sin I' \cos I}{\sin(I + I')} \quad (1-15)$$

r_p 、 t_p 、 r_s 、 t_s 又称为菲涅耳系数。当媒质的折射率一定时, 因为折射角 I' 可从入射角 I 算得, 所以菲涅耳系数是入射角 I 的函数。

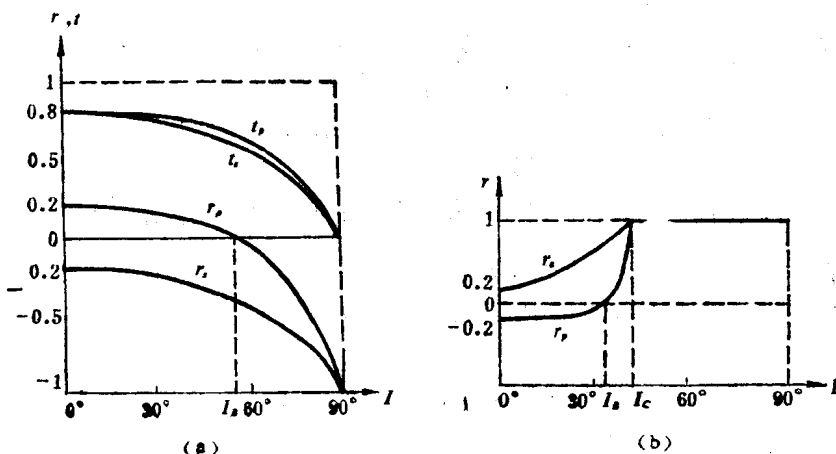


图1-5