

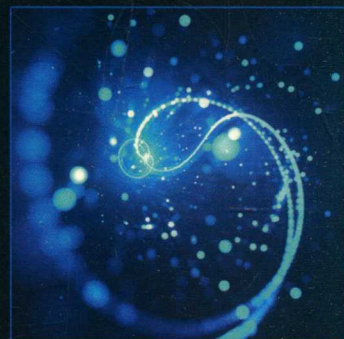
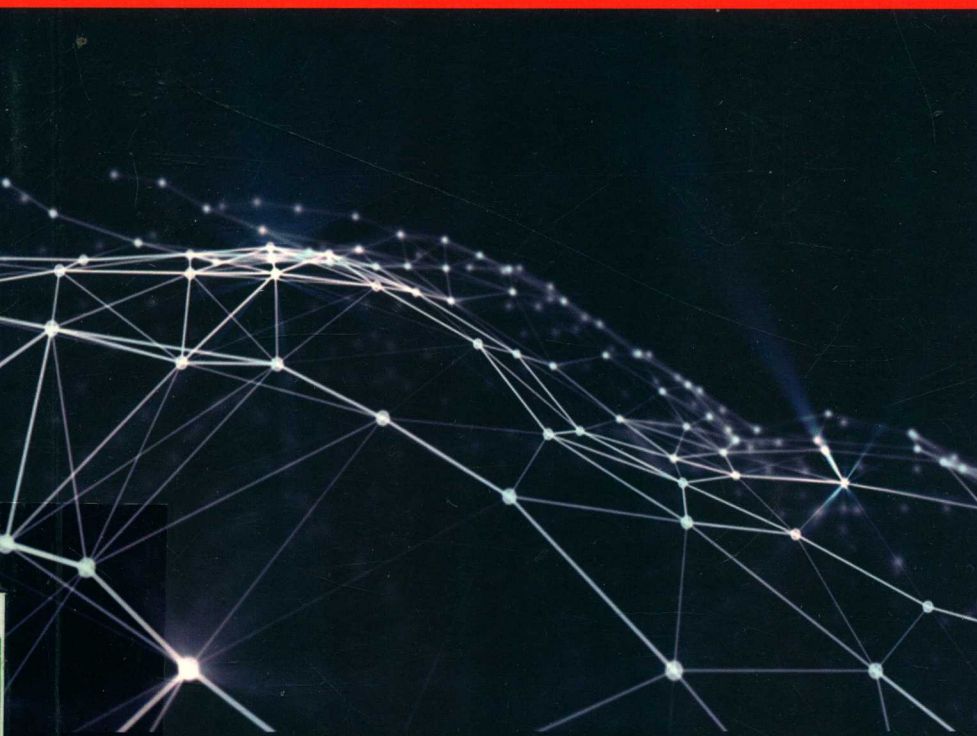


“十三五”江苏省高等学校重点教材
(编号: 2017-1-037)

Optoelectronic Physics and Applications (Second Edition)

光电子物理及应用 (第2版)

张 彤 王保平 ◎ 主编



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS



“十三五”江苏省高等学校重点教材(编号:2017-1-037)

光电子物理及应用

(第2版)

张 彤 王保平 主编
张晓兵 朱卓娅 张晓阳 参编



 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内容提要

光电子物理是高等学校工科电类专业的一门基础课程,它所涉及的内容是电类专业学生应具备的知识结构中的必要组成部分,同时又是一些交叉领域的学科生长点和新兴边缘学科发展的基础。本教材不仅兼顾了传统的光电探测技术,更突出了光电子技术的最新发展成果,如在集成光波导、近场光学技术、表面等离子体激元等领域的成果介绍,有益于拓宽学生的视野和培养学生的创新意识。

本书共分7章。第1章是光的基础知识,这是学习与研究光电子物理必要的准备,旨在使不同基础的读者均能从波动和几何光学两方面认识光的本质;第2章阐述了激光原理及技术,重点在于研究激光的产生及相关性质,为后续激光应用奠定理论基础;第3章研究激光的传输,讨论了激光在大气、介质和光纤中的传输特性;第4章是光电探测技术,探讨了光电探测原理、性能参数等;第5章光波导,研究集成、无源及有源光波导器件的工作原理及相关应用;第6章结合了纳米光学的进展,介绍了纳米光学基础知识及器件基础;第7章举例介绍了光电子技术在成像、显示、存储、通信及能源等领域的应用。

本书可作高等学校工科电类专业本科生教学和研究生参考用书,或可作为光电子领域工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电子物理及应用 / 张彤,王保平主编. —2版.

南京:东南大学出版社,2019.6

ISBN 978-7-5641-8221-2

I. ①光… II. ①张… ②王… III. ①光电子学—高等学校—教材 IV. ①TN201

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第295944号

光电子物理及应用(第2版)

Guangdianzi Wuli Ji Yingyong(Di 2 Ban)

主 编:张 彤 王保平

出版发行:东南大学出版社

出 版 人:江建中

责任编辑:张 煦

社 址:江苏省南京市四牌楼2号(210096)

经 销:全国新华书店经销

印 刷:江苏凤凰数码印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:15.5

字 数:387千字

版 次:2019年6月第2版

印 次:2019年6月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-8221-2

定 价:49.80元

序

光电子学是光学和电子学相结合的产物,是多学科相互渗透、相互交叉而形成的高新技术学科。光电子技术主要研究光的产生、传输、控制和探测等,已被广泛应用于激光、光通信、光信息处理以及微纳光子学等诸多领域。随着纳米科学与技术光学领域的渗透与交叉,光信号在产生与接收的机制、传输与调控方式等方面发生了显著变化,同时新近发展的新型光电子材料和器件又表现出众多新效应、新功能和 new 应用,这些都从广度和深度上促进了现代光电子科学技术的发展。

本书作者在光电子学领域已有十多年的研究与教学经历,他们在教学过程中发现,光电子学科发展日新月异,新效应、新技术、新应用不断涌现;而目前国内的大部分相关教材知识体系更新缓慢,难以反映当前该学科发展的最新动态和趋势,出版一本全面介绍并包含该学科最新进展的教材极为紧迫。而且,本科生的培养目标重在通过先进的教学奠定其专业基础,这就要求教材内容广泛而又精炼,帮助学生快速全面地掌握基础知识和知识要点,在提高学生的学习兴趣的同时又能为其今后从事该领域工作奠定基础。鉴于以上原因,作者编写了这本适用于现代光电子物理学习的《光电子物理及应用》一书。

与通常《光电子技术基础》教材相比,本教材具有以下特色:

1. 本书在介绍光电子技术及其应用的同时也关注其中的“物理”,因而第一章侧重介绍光的基础知识,包括几何光学和波动光学的原理,特别重点介绍了麦克斯韦电磁场理论。经过这一章的学习,学生不仅能够了解光学的基本概念和定律,还能够通过对电磁场理论的学习,为后续章节中的光电子技术理论,尤其是光波导和纳米光学基础理论的理解奠定基础,使学生能够循序渐进地掌握相关理论知识。教材的每一章节都配有适当的习题,可以帮助学生巩固和加深学到的理论并掌握其应用方法。

2. 本书对传统光电子物理相关教材中的激光原理及技术、激光传播以及光电探测技术进行了全面的总结,并用简洁的语言阐述了相关基础知识,便于学生掌握。此外,本书作者在第5章集成光波导理论和集成光电子器件的编写过程中,除了基本原理的介绍外,还加入了作者所在课题组十多年来在光波导器件的制备工艺中的经验总结,将理论与实际应用相结合,使学生能够产生直观

的印象,更加容易掌握和理解相关知识。这一章对于从事相关领域的研究生和科研人员也有一定的指导作用。

3. 表面等离子激元学等国际前沿的光电子学研究方向的介绍。在第6章纳米光学中,结合作者所在课题组的研究成果,介绍了一些新颖的纳米光学器件。此外,第6章中介绍的近场成像技术也是目前国际上纳米光学领域的一个研究热点。相信学生通过学习这些新颖的知识,可以进一步开阔视野,激发起学习兴趣,增强创新精神和独立思考能力。相关领域的研究人员查阅本书时也能了解到光电子领域发展的新动向。

本教材可作为普通院校、重点院校的电子科学与技术、物理电子学、信息与通信工程、光电子技术等相关专业本科学生的专业基础课程教材,也可作为光通信、纳米光学、仪器科学等相关领域技术人员的参考书。



2015年8月

目 录

第 1 章 光的基础知识	1
1.1 几何光学	1
1.1.1 光线与波面	1
1.1.2 几何光学的基本实验定律	1
1.1.3 费马原理	2
1.2 波动光学	3
1.2.1 波速和折射率	3
1.2.2 电磁波谱	3
1.2.3 光的衍射	4
1.2.4 光的干涉	6
1.2.5 光的偏振	9
1.2.6 电磁场基本方程与波动方程	13
习题 1	17
第 2 章 激光原理与技术	19
2.1 光辐射量子理论基础	19
2.1.1 热辐射	19
2.1.2 黑体的经典辐射定律	20
2.1.3 普朗克辐射公式	23
2.1.4 光电效应	24
2.1.5 爱因斯坦的量子解释	25
2.1.6 康普顿效应	27
2.2 光辐射产生的基本原理	29
2.2.1 三种跃迁	29
2.2.2 辐射与吸收之间的关系	31
2.2.3 光谱线加宽及类型	33
2.2.4 光与物质体系相互作用的量子解释	36
2.3 激光产生的条件	38
2.3.1 激光产生的必要条件	38
2.3.2 激光产生的充分条件	40
2.4 激光器的基本结构及激光模式	43
2.4.1 激光器的基本结构	43
2.4.2 谐振腔的限模作用	51
2.4.3 激光模式	51
2.5 高斯光束	54

2.5.1	光线传输矩阵	55
2.5.2	高斯光束的基本性质和 q 参数	57
2.5.3	高斯光束的传输变换	58
2.5.4	高斯光束的聚焦	59
2.5.5	高斯光束的匹配	62
2.5.6	高斯光束的准直	63
2.5.7	高斯光束的自再现与稳定球面腔	64
2.6	激光器的输出	65
2.6.1	输出功率	65
2.6.2	激光的输出特性	66
2.7	激光单元技术	67
2.7.1	激光调制技术	67
2.7.2	激光调 Q 技术	70
2.7.3	激光锁模技术	74
2.7.4	激光选模技术	74
2.7.5	激光稳频技术	76
习题2		77
第3章	激光传输	78
3.1	激光在大气中的传输	78
3.1.1	大气分子的吸收	78
3.1.2	大气分子的散射	79
3.2	激光在介质中的传输	80
3.2.1	光在介质分界面上的反射和折射	80
3.2.2	光在单层介质膜上的反射	82
3.2.3	光在非均匀介质中的传输	83
3.2.4	光在晶体中的传输	84
3.2.5	电光调制	86
3.3	激光在光纤中的传输	87
3.3.1	光纤的结构与种类	87
3.3.2	光纤的传输特性	89
3.3.3	光纤的损耗与色散	93
习题3		96
第4章	光电探测技术	97
4.1	光电探测的物理效应	97
4.1.1	外光电效应	97
4.1.2	内光电效应	99
4.1.3	光热效应	104
4.2	光探测器的性能参数和噪声	105
4.2.1	光探测器的性能参数	105

4.2.2 光探测器的噪声	109
4.3 光电探测器的探测方式	111
4.3.1 直接探测与外差探测的基本原理	111
4.3.2 两种探测方式的性能分析	112
4.4 光电探测器	114
4.4.1 光电探测器的分类	114
4.4.2 典型光电探测器	115
习题4	119
第5章 集成光波导理论和集成光子器件	121
5.1 集成光波导理论	121
5.1.1 平板波导的几何光学理论	121
5.1.2 平板波导中的导行波	122
5.1.3 波动理论分析方法	124
5.1.4 耦合模理论	129
5.1.5 光束传播法	133
5.2 无源光波导器件	136
5.2.1 光波导耦合器	136
5.2.2 谐振环	140
5.2.3 AWG 波分复用器	144
5.2.4 其他无源光波导器件	146
5.3 有源光波导器件	147
5.3.1 调制器	147
5.3.2 光开关	152
5.3.3 光波导放大器和激光器	153
5.4 光波导主要工艺和材料简介	155
5.4.1 光波导主要工艺	155
5.4.2 光波导主要材料	161
5.5 集成光波导的应用	162
5.5.1 微波光子	162
5.5.2 光子计算机	164
5.5.3 光波导传感器	165
习题5	167
第6章 纳米光学	168
6.1 纳米光学概述	168
6.1.1 纳米光学本质	168
6.1.2 纳米光学研究范畴	168
6.2 纳米光学基础	169
6.2.1 低维光波导理论	169
6.2.2 倏逝波概念及性质	170

6.2.3 金属的色散模型	170
6.3 纳米光学器件	172
6.3.1 光子晶体	172
6.3.2 纳米介质光波导	175
6.3.3 表面等离子激元概念及性质	177
6.3.4 表面等离子激元器件及应用领域	181
6.4 纳米成像技术	184
6.4.1 超分辨荧光成像	184
6.4.2 近场光学显微技术	186
6.4.3 金属增强拉曼技术	187
6.5 纳米制造技术	189
6.5.1 基于“Top-down”工艺的纳米制造技术	189
6.5.2 基于“Bottom-up”工艺的纳米制造技术	189
6.5.3 亚波长光刻技术	190
习题6	192
第7章 光电子技术应用实例	193
7.1 光电成像器件	193
7.1.1 CCD图像传感器	193
7.1.2 CMOS图像传感器	194
7.1.3 红外焦平面阵列	196
7.1.4 图像增强器	197
7.2 平板显示器件	199
7.2.1 液晶显示	200
7.2.2 等离子体显示板	204
7.3 光存储器件	207
7.3.1 光存储器概述	207
7.3.2 光盘存储器的工作原理	210
7.3.3 光盘存储技术的发展	214
7.4 光纤通信技术	217
7.4.1 光纤通信的发展过程	217
7.4.2 光纤通信技术的特点	218
7.4.3 光纤通信技术的种类	218
7.4.4 光纤通信与光电子器件	220
7.5 光生伏特器件	227
7.5.1 硅光电二极管	228
7.5.2 硅太阳能电池	231
习题7	234
参考文献	235

第 1 章 光的基础知识

本章主要介绍几何光学与波动光学的基本概念。几何光学以光线为基础,研究光的传播和成像规律。光线传播遵循三条基本定律:直线传播定律、独立传播和光路可逆原理、反射和折射定律。波动光学则认为光具有波动性,具有干涉、衍射和偏振等基本属性,本章介绍了光的波动属性,并重点介绍了光所满足的宏观电磁规律——麦克斯韦定律。应该指出,几何光学是波动光学在一定条件下的近似,适用于研究对象的几何尺寸远大于所用光波波长的情况。

1.1 几何光学

1.1.1 光线与波面

在几何上,点是一个没有大小和体积的抽象概念。当光源的尺寸远小于其作用距离时,可以将光源看作是一个发光点或者称之为点光源。点光源向四周发出光的同时伴随着能量的辐射。在几何光学中,这些光常被视为直线即光线,它代表光的传播方向。

在均匀各向同性介质中,一个点光源发出的光向四周传播,其波阵面将构成与点电荷等势面类似的一个球面。电力线是指与等势面垂直的线族中的每一条线,同样光线也是与波阵面垂直的线族中的每一条线。虽然电力线事实上是不存在的,但可以用实验的方法显示出它的形像来,进而用它阐明和计算一些电学问题。同样,事实上并不存在的光线的行迹也能用实验方法近似地描绘出来,并用来分析和计算光线光学问题。

光波在介质中沿着一定方向传播时,相位在不断地改变,但在同一波面上各点的相位是相同的。在各向同性介质中,光的传播方向和波面的法线方向一致。在许多实际情况下,人们可以不去考虑相位而只需要关心光的传播方向,这时波面就只是垂直于光线的几何平面和曲面。此时,可以将光线和波面视为抽象的数学概念。

1.1.2 几何光学的基本实验定律

光传播时所遵循的三条基本定律为:

(1) 光在均匀介质中的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光是沿直线传播的。物体的影子、针孔成象、日蚀、月蚀、日食、月食等现象都证明了光的直线传播。

(2) 光的独立传播定律和光路可逆原理

不同光源发出的光线在传播途中相遇时互不干扰,仍按各自的途径继续传播。

当光线逆着原来的反射光线(或折射光线)的方向射到媒质界面时,必会逆着原来的入射方向反射(或折射)出去,这种性质叫光路可逆性或光路可逆原理。

(3) 光通过两种介质分界面时的反射定律和折射定律

入射光线从折射率为 n_1 的介质入射到折射率为 n_2 的介质中,在两种介质的分界面将产生反射和折射,其示意图见图 1-1。图中的 x 轴和 z 轴分别平行于法线和分界面,把入

射光线与通过入射点的界面法线所构成的平面称为入射面(图中即为 xOz 平面),入射光线、反射光线和折射光线与入射面法线的夹角分别称为入射角 θ_i 、反射角 θ_r 和折射角 θ_t 。

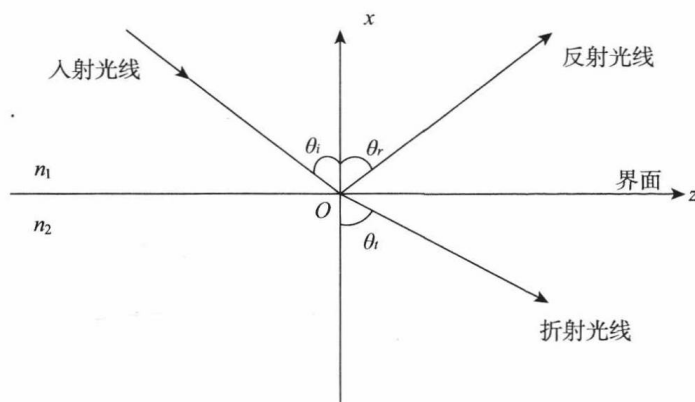


图 1-1 光线的反射和折射

在分界面上,光线所满足的反射定律可描述为:

- ① 反射光线与入射光线同在入射面内。
- ② 反射角等于入射角,即 $\theta_i = \theta_r$ 。

折射定律可描述为:

- ① 折射光线在入射面内。
- ② 入射角和折射角的正弦之比为一常数,即有

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-1)$$

式中, n_i 为介质折射率。需要指出,上述反射定律只适用于各向同性介质的界面,且只解决光线的传播方向而并不涉及反射时的能量分配。

通常,将折射率高的介质称为光密介质,将折射率低的介质称为光疏介质。当光从光密介质射向光疏介质时,在一定条件下,光线可以从分界面全部反射回来,而不发生折射,这种现象被称为全反射(或称完全内反射)。此时对应的入射角被称为临界角 θ_c ,其大小为

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1) \quad (1-2)$$

当 $\theta_i > \theta_c$ 时,会产生全反射现象;当 $\theta_i < \theta_c$ 时,界面处仍存在光的反射。

1.1.3 费马原理

光在介质中传播时,光传播的几何路程与介质折射率之乘积称为光程。光在指定的两点间传播,实际的光程总是一个极值。也就是说,光总是沿光程值为极小、极大或恒定的路程传播。这是几何光学中的一个最普遍的基本原理,称为费马原理,光在折射率为 n 的介质中从 A 点到 B 点所历光程为:

$$\int_A^B n ds = \text{极值(极小值、极大值或恒定值)} \quad (1-3)$$

费马原理是几何光学中的一个重要原理,由此原理可证明光在均匀介质中传播时遵从的

直线传播定律、反射和折射定律,以及傍轴条件下透镜的等光程性等。费马原理规定了不论是正向还是逆向,光线必沿同一路径传播,因此费马原理可以用来说明光路可逆原理的正确性。

1.2 波动光学

1.2.1 波速和折射率

在19世纪70年代,麦克斯韦发展了电磁理论,预言了电磁波的存在,并且最终被赫兹所实验证实。电磁波在不同介质的分界面上会发生反射和折射,在传播中出现干涉、衍射和偏振等现象,而光波也具有完全相似的干涉、衍射和偏振特性。那光和电磁波有什么联系呢?按照麦克斯韦理论,在真空中电磁波的传播速度只和真空介电系数 ϵ_0 和磁导率 μ_0 有关,即有 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$,约为 2.9979×10^8 m/s,这与已实验测得的光速相等。麦克斯韦于是认为:光也是一种电磁波,光在真空中的传播速度为 c 。

在介质中,电磁波的速度 v 和 c 满足如下关系:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1-4)$$

式中, ϵ_r 为介质的相对介电系数, μ_r 为相对磁导率。 c 与 v 的比值是该介质的折射率,即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-5)$$

既然光是电磁波,将式(1-4)和(1-5)相比较便可得知:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-6)$$

由式(1-6)可知,光学和电磁学的相关物理量具有关联性。在自然界中,除了铁磁物质外,大多数物质的磁性都很弱小, $\mu_r \approx 1$,因此式(1-6)可写为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1-7)$$

这个关系称为麦克斯韦关系。一般地, ϵ_r 或 n 都是频率的函数,具体关系式和物质的结构相关。

1.2.2 电磁波谱

19世纪当光被证实了是一种电磁波后,X射线(伦琴射线)、 γ 射线等也相继被实验证明都是电磁波。因此,电磁波的频率(或波长)范围分布很宽。

将电磁波按频率(或波长)的次序排列成谱,就得到了如图1-2所示的电磁波谱。通常,光学区域(或光学频谱)包括紫外、可见和红外区域。由于光的频率极高,为 $(10^{12} \sim 10^{16})$ Hz,为使用方便,通常采用波长表征光谱区域,其波长范围为1nm~1mm。可见光是人眼可以看到的各种颜色的光波,波长范围为 $(0.4 \sim 0.76) \mu\text{m}$ 。相应的各色光的波长范围为:红色, $(0.63 \sim 0.76) \mu\text{m}$;橙色, $(0.60 \sim 0.63) \mu\text{m}$;黄色, $(0.57 \sim 0.60) \mu\text{m}$;绿色, $(0.50 \sim 0.57) \mu\text{m}$;青色, $(0.45 \sim 0.50) \mu\text{m}$;蓝色, $(0.43 \sim 0.45) \mu\text{m}$;紫色, $(0.40 \sim 0.43) \mu\text{m}$ 。紫外线和红外线不能引起视觉。红外线波段的波长范围为 $0.76 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ (相应的频率范围是 $(3 \times$

$10^{11} \sim 4 \times 10^{14}$ Hz)。在红外技术领域,由于不同波长的红外线在地球大气层中的传播特性不同,通常将它分为以下几个波段: $(0.76 \sim 3) \mu\text{m}$ 为近红外波段; $(3 \sim 6) \mu\text{m}$ 为中红外波段; $(6 \sim 15) \mu\text{m}$ 为远红外波段; $(15 \sim 1\,000) \mu\text{m}$ 为极远红外波段。有时根据红外辐射产生的机理不同,也可将红外波段划分为:近红外波段, $(0.76 \sim 2.4) \mu\text{m}$ (相应于原子能级间跃迁);中红外波段, $(2.5 \sim 25) \mu\text{m}$ (相应于分子振动—转动能级间的跃迁);远红外波段, $25 \mu\text{m}$ 以上(相应于分子转动能级间的跃迁)。需要特别指出的是,电磁波谱中的太赫兹波分布在微波和光波之间,其波长在 $(0.03 \sim 3) \text{mm}$ (对应频率在 $(0.1 \sim 10) \text{THz}$),由于这是宏观电子学向微观光子学过渡的一个频段,常被认为是最后一个有待全面研究的频率窗口。

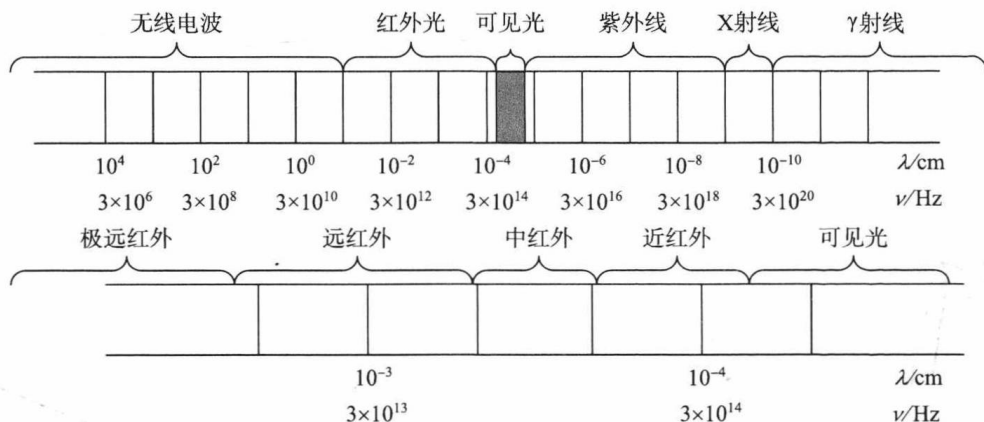


图 1-2 电磁波谱

在上述电磁波谱中的所有电磁波,虽然波长范围不同,产生方法及其与物质间的相互作用也各不相同,但都遵守同样的反射、折射、干涉、衍射和偏振规律,在真空中的传播速度都为 c 。

1.2.3 光的衍射

1. 衍射实验

如图 1-3(a)所示的装置, S 是一个位于很远处的线光源,由 S 发出的光束照射到不透光的 G 板上开有细缝的地方,缝宽约 0.5mm 。在 G 的后方,可在不同的距离处用一个观察屏 S_c 观察经过细缝的光束所产生的现象。

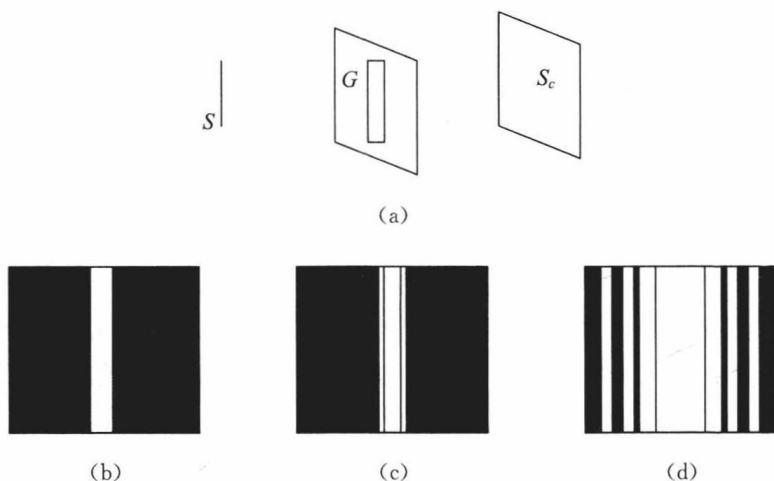


图 1-3 实验装置及现象

当 S_c 和 G 紧密接触时,如图 1-3(b)所示,屏上出现了细缝的像;当 S_c 逐渐向后移动时,缝的两长边的边界开始模糊;当 S_c 移动到几厘米远处时,可看到在原长边的边界附近,出现暗淡的条纹,此时,虽然 S_c 上显示的图像已经与细缝的几何像不完全一样了,但仍然还能看出缝的像的大致轮廓,可参见图 1-3(c);如果继续移动 S_c 到几米远的地方,如图 1-3(d)所示, S_c 的中央会出现一条亮而粗的明线,它的两侧则对称地排列着光强度递减的、等间距的、较细的明线。需要指出的是,上述三个区域是逐渐过渡的,并没有明显的分界线。

图 1-3(b)中是细缝的几何像,可以用光的直线传播(简称为直进)特性来解释。图 1-3(c)和图 1-3(d)所示的现象,则是由于光束在前进的路上遇到细缝时,因受到限制而产生衍射现象所造成的。

作为同一个实验装置所观察到的结果,虽然图 1-3(b)、(c)和(d)在形式上差别很大,但它们必然有内在的联系。图 1-3(b)属于光线光学或称几何光学的范畴。图 1-3(c)和(d)显示出偏离几何光学的现象,称之为衍射,是属于波动光学的范畴。通常把图 1-3(c)所示的衍射现象,称为菲涅耳(Fresnel)衍射或近场衍射;图 1-3(d)称为费郎霍夫(Fraunhofer)衍射或远场衍射。

Fraunhofer 衍射是 Fresnel 衍射的特殊情况,而几何光学又是波动光学的极限情况,这就是上述三种现象的相互联系。

2. 惠更斯—菲涅耳原理

(1) 惠更斯原理

1678 年,为了解释光在晶体内发生的双折射现象,惠更斯(Huygens)冲破传统的微粒说而首次创立了光的波动理论,即惠更斯原理,即把波阵面上每一点都可以看作是次级子波的源,所有子波的包络面形成一个新的波阵面。

惠更斯原理可由图 1-4 加以说明。图中在 t_1 时刻,光的波阵面是 S_1 ,光的传播速度为 v ,如果把 S_1 上的每一点都看作次级子波的源,各点均发出子波,经过 Δt 时间后,各子波的波面都是半径为 $r = v \Delta t$ 的球面,所有这些子波面的包络面 S_2 为 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻的新波阵面。

利用惠更斯原理可以对光的直进、光的反射和折射等一系列现象做出直观的解释。

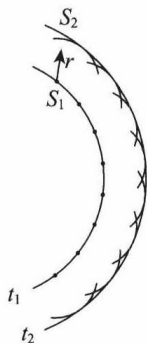


图 1-4 惠更斯原理示意图

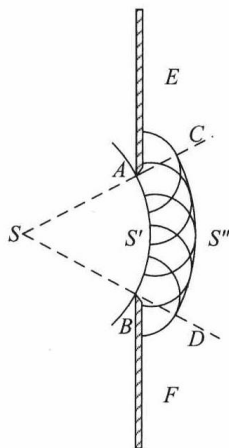


图 1-5 惠更斯原理解释光的直进示意图

图 1-5 所示,设有点光源 S 发出的光到达遮光屏 EF 上的宽缝 AB 上(图 1-5),由惠更斯原理可知,波阵面 $AS'B$ 上每一点都将发出子波,经过一段时间后,所有这些子波的包

络面 $CS''D$ 就是新的波阵面。显然, 包络面的端点 C 、缝的端点 A 和光源 S 在同一直线上, D 、 B 和 S 也在同一直线上, 包络面 $CS''D$ 之内有光通过, 而包络面外无光通过, 这说明了光的直线传播现象。

实质上, 惠更斯原理是从波动观点出发阐述几何光学现象的原理。因此, 惠更斯原理的不足之处在于, 不能单独用它来解释(当然更不能定量说明)光的衍射现象, 也不能用它来解释为什么子波不能向后传播(即倒退波不存在)。另外, 在利用惠更斯原理作图时, 如果媒质是均匀的, 可取有限长度作为子波的半径; 如果媒质不均匀, 就得取微分线元作为子波的半径。

(2) 菲涅耳的修正

菲涅耳在惠更斯原理的基础上, 考虑到所有子波射抵一点时的相位关系, 认为空间任意一点 P 处的光强是到达该点的全部子波叠加的结果, 并引进一个倾斜因数 $K(\theta)$ 的修正因子假设。他认为波阵面 S 上某一点 Q 处的子波对 P 点振幅的贡献与倾斜因数 $K(\theta)$ 成正比, θ 为 Q 、 P 的连线与过 Q 点波阵面的法线 N 之间的夹角, 如图 1-6 所示。当 $\theta = 0$ 时, $K(\theta) = 1$; 当 θ 逐渐增加时, $K(\theta)$ 逐渐减小; $\theta \geq \pi/2$ 时, $K(\theta) = 0$, 从而解决了倒退波不存在的问题。

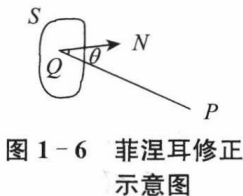


图 1-6 菲涅耳修正示意图

菲涅耳为了应用惠更斯的次级子波概念计算衍射实验的结果, 对子波作出以下三个修正因子假设:

- ① 子波源的振幅与发射方向有关, 取决于倾斜因数 $K(\theta)$, 并且规定 $\theta \geq \pi/2$ 时, $K(\theta) = 0$, 用以说明倒退波不存在;
- ② 子波源的振幅为原波源的振幅的 $1/\lambda$ 倍;
- ③ 子波源的相位应比原波源相位超前 $\pi/2$ 。

1.2.4 光的干涉

1. 双缝干涉实验

图 1-7 为双缝衍射实验示意图, 图中从双缝中心 O 到观察屏 S_C 的距离 OP_0 为 D , S_C 上任意一点 P 到 P_0 点的距离用 x 来表示, 以 P 为中心, PS_1 为半径作圆弧与 PS_2 交于 N 点。

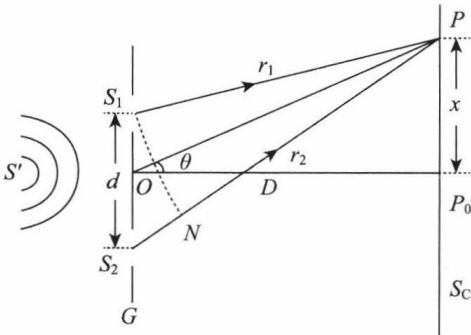


图 1-7 双缝干涉实验示意图

双缝衍射实验中, 若每个缝的宽度渐变窄, 则单缝衍射中央最大值的范围逐渐变大。当宽度窄到等于或小于波长 λ 时, 单缝衍射中央最大值将扩展到整个视场, 于是视场中仅仅出

现两列干涉波叠加所产生的干涉现象。此时光强公式 $I(\theta) = I_0 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \cos^2 \beta$ 化为

$$I = I_0 \cos^2 \beta \quad (1-8)$$

式中, I_0 为中央条纹光强; β 为干涉条纹的相位差, $\beta = \pi d \sin \theta / \lambda$ 。

如果去掉双缝衍射装置中的会聚透镜 L , 并将 G 换上一个双缝, 就是杨氏双缝干涉实验装置。对于杨氏实验, 式(1-8)仍然是适用的。

以杨氏实验为代表的双光干涉光强的一般表示式可用复振幅合成法求得。设 U_1 和 U_2 分别是二缝在重叠区 P 点产生的复振幅, 则 P 点的合成光强为

$$\begin{aligned} I &= |U|^2 \\ &= |U_1|^2 + |U_2|^2 + 2\sqrt{|U_1|^2} \sqrt{|U_2|^2} \cos 2\beta \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1} \sqrt{I_2} \cos 2\beta \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中, 2β 是 P 点二复振幅的相位差, 最后一项是由两光波的干涉所引起的, 通常称之为干涉项。在分析干涉现象时, 这是非常重要的一项。若 $I_1 = I_2$, 则式(1-9)简化为式(1-8)。

因为余弦值是 $-1 \sim +1$ 间的任意数, 又因为光波的频率很高, 在随机的迅速变化的情况下, 对于任一比光波周期长得多的观察时间来说, $\cos 2\beta$ 的平均值应是零。因此, 这种两光束的叠加称为非相干叠加。只有 2β 能维持恒定值(如杨氏实验), 才能使式(1-9)中的干涉项随着 2β 不同而有不同的恒定值。这样的两束光的叠加称为相干叠加。

式(1-8)表明干涉条纹的光强具有周期性的变化规律, 因此可以用相位差 2β 来描述。根据光程差和相位差之间的关系可写出

$$2\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (1-10)$$

由 $\Delta = d \sin \theta$, 故 $2\beta = (2\pi/\lambda) d \sin \theta$, 可见, 干涉条纹的光强决定于以 S_1 和 S_2 发出的两个衍射波到达屏上一点时相位差的半值 $\beta = (\pi d/\lambda) \sin \theta$ (θ 为 OP 和 OP_0 之间的夹角)。

$$\text{当} \quad \beta = \frac{\pi \Delta}{\lambda} = \pm p\pi$$

$$\text{或} \quad \Delta = \pm p\lambda = \pm \text{偶数} \times \frac{\lambda}{2}, p = 0, 1, 2, \dots \quad (1-11)$$

时, $I = I_0$, 是最大值, 可得明线。式中 p 是各级明线的级数, 叫作干涉级数。当 $p = 0$ 时, 即得零级明线, 或称中央明线。

$$\text{当} \quad \beta = \frac{\pi \Delta}{\lambda} = \pm \left(p + \frac{1}{2}\right) \pi$$

$$\text{或} \quad \Delta = \pm \left(p + \frac{1}{2}\right) \lambda = \pm \text{奇数} \times \frac{\lambda}{2}, p = 0, 1, 2, \dots \quad (1-12)$$

时, $I = 0$, 是最小值, 得暗线。

将式(1-10)代入式(1-11)和(1-12)得出 S_C 上明线和暗线的位置分别为

$$x_M = \pm \frac{D}{d} p \lambda, p = 0, 1, 2, \dots \quad (1-13)$$

$$x_m = \pm \frac{D}{d} \left(p + \frac{1}{2} \right) \lambda, p = 0, 1, 2, \dots \quad (1-14)$$

由式(1-13)可得第 p 级和第 $p+1$ 级明线与零级明线的的间隔为

$$\Delta x = \frac{D}{d} \lambda \quad (1-15)$$

同理,由式(1-14)得出相邻两暗线的间隔也等于 $D\lambda/d$,而且条纹的间隔不因级数的改变而改变,这意味着在观察屏 S_C 上呈现的是等间隔的、明暗相间的干涉条纹,其间隔与两缝到观察屏的距离成正比,与入射光的波长成正比,而与双缝之间的距离成反比。

条纹间隔一般都是很小的,例如当 $\lambda = 5 \times 10^{-5} \text{cm}$, $D = 1 \text{m}$, $d = 0.5 \text{cm}$ 时,则有 $\Delta x = 0.01 \text{cm}$ 。因此,为了便于观察,可增大 D 值,但 D 越大条纹就变得越暗淡,可见只有减小 d 值才是增大 Δx 的最可取的方法。为了使 S_1 和 S_2 之间的距离足够小,可以有各种不同的实验装置,如菲涅耳双镜、菲涅耳双棱镜等等。

需要明确的是,在产生干涉效果的情况下,虽然有的地方光强增加,有的地方光强减弱,但它们的平均光强却不改变,仍然满足能量守恒定律。

2. 相干光源

由前面分析可知,只有满足振动方向一致、频率相同、具有稳定相位差(此称为相干条件)的两束或多束光,才能在其叠加区域出现可以观察到的干涉条纹。因此,用光源直接照射双缝时能否出现可以观察得到的干涉条纹,主要决定于光源的发光机理。理想的光源模型中,可以将一无限小点发出的无限长波列的光束,用光学的方法分成两束,然后再实现同一波列的相遇叠加,从而得到稳定的干涉条纹,这样的光源也叫相干光源。

在考察一个实用光源是否满足相干光源的要求时,既要考虑光源发光的持续时间,也要考虑光源的尺寸,而且还要考虑被分开的两束光相遇前光程差的大小。总之,空间变量和时间变量是决定相位差能否稳定的共同因素。为方便讨论,可设计空间变量不变(实际上只能接近不变)的装置,认为相位差仅仅是由时间变量引起的,这是所谓时间相干性的问题;也可以设计时间变量不变的装置,认为相位差仅仅是由空间变量引起的,这是所谓空间相干性的问题。

(1) 时间相干性

原理上,可以在光路上的不同两点通过两个分束镜取出部分光,考察其时间相关特性:如果这两处的光波场相关,则可以由一点的光波场(振幅、相位)确定另一点的光波场(振幅、相位),或者说,空间一点某时刻的光波场可以确定另一时刻的光波场。如图 1-8(a)所示,可以取出光路中的两倾斜分束镜的部分光进行干涉,根据干涉现象确定其时间相干性。当两镜间距离改变时,干涉条纹将会发生变化。随着两镜间距离的增大,干涉现象将逐渐变差。当两镜间距离增大到 L_c 时,干涉现象消失,此时两束光不相关。通常用相干长度 L_c 来表征该光沿传播方向上的最大相关范围。对应于这个长度 L_c 有一个传播时间 $\tau_c = L_c/c$,式中的 c 为光速,所以可称 τ_c 为相干时间,光波在该相干时间内是时间相干的。显然, L_c 越大,光的时间相干性越好。