



高等院校“光电名师堂”系列教材

# 光电子学导论

GuangDianZiXueDaoLun

阎吉祥 编著

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 光电子学导论

阎吉祥 编著

华中科技大学出版社  
中国·武汉

**图书在版编目 (CIP) 数据**

光电子学导论/阎吉祥 编著. —武汉: 华中科技大学出版社, 2009 年 6 月

ISBN 978-7-5609-5406-6

I. 光… II. 阎… III. 光电子学-高等学校-教材 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 084041 号

**光电子学导论**

**阎吉祥 编著**

责任编辑: 王新华

封面设计: 潘 群

责任校对: 刘 竣

责任监印: 周治超

出版发行: 华中科技大学出版社 (中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027) 87557437

录排: 华中科技大学惠友文印中心

印刷: 武汉市新华印刷有限责任公司

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 12.75

字数: 298 000

版次: 2009 年 6 月第 1 版

印次: 2009 年 6 月第 1 次印刷

定价: 25.00 元

ISBN 978-7-5609-5406-6/TN·141

(本书若有印装质量问题, 请向出版社发行部调换)

# 高等院校“光电名师堂”系列教材

## 编委会

### 顾问

郁道银 天津大学教授  
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会主任委员

### 主任

金伟其 北京理工大学教授  
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会副主任委员  
杨坤涛 华中科技大学教授  
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会副主任委员

### 编委 (以姓氏拼音为序)

白廷柱 北京理工大学教授  
邸旭 长春理工大学教授  
光电信息科学与工程专业教学指导分委员会委员  
胡先志 武汉邮电科学研究院教授  
刘德明 华中科技大学教授  
刘继芳 西安电子科技大学教授  
刘劲松 华中科技大学教授  
石顺祥 西安电子科技大学教授  
王文生 长春理工大学教授  
阎吉祥 北京理工大学教授  
竺子民 华中科技大学教授

## 内 容 简 介

本书是为适应光电子学科新的发展形势和教学要求而编写的。全书共 6 章，依次介绍光本性理论的发展、光辐射与辐射源、光传输与传输介质、光电探测与探测器、光电成像与成像系统，以及光电统计理论等方面的知识。

本书可作为高等院校光电专业高年级本科生教材，也可供相关专业研究生和科技工作者参考。

## 前 言

光电子学是以光频波段的电子学效应基本理论和应用原理为研究对象，并由近代光学与电子学相互交叉与渗透而形成的一门新兴分支学科。本书主要讨论光学及光电子学领域的基本问题，包括光本性理论的发展、光辐射与辐射源、光传输与传输介质、光电探测与探测器、光电成像与成像系统，以及光电统计理论。

关于光的本性，虽然早在公元前 5 世纪就已出现了所谓“触觉论”和“发射论”，但对光的本性的认真探讨，应该说是从 17 世纪的微粒说和波动说开始的。而 20 世纪的“波粒二象性”则使人类对光的本性的认识达到一个空前的高度，的确是空前的，断然不是绝后的。事实上，一些新的光学物理现象已要求人们对光的本性作更深一步的探索。因此可以说，光的本性问题是一个非常古老的，但迄今尚无定论的且永远不会终结的问题。

由于一些显而易见的原因，本书中光辐射与辐射源部分将以激光作为讨论的重点，光传输与传输介质一章以较多篇幅介绍光在导波介质中的传输，而对光电探测与成像系统的讨论则主要针对 HgCdTe 进行。鉴于光电现象固有的统计行为，最后一章介绍光电统计理论。

本书在编写过程中承蒙中国电子科技集团周寿桓院士的鼓励，从立项到出版始终得到华中科技大学出版社的大力支持，全书的文字录入由作者的博士研究生温焱、王碧茹、王钢，以及硕士研究生王培军、田新荣完成，在此一并表示诚挚的感谢。书中欠妥之处，恳请读者不吝赐教。

编 者

2009 年 3 月

# 目 录

<b>第 1 章 光本性理论的发展</b> .....	(1)
1.1 早期学说 .....	(1)
1.1.1 经典粒子与波动 .....	(1)
1.1.2 光的微粒说 .....	(1)
1.1.3 光的波动说 .....	(2)
1.2 光的电磁理论 .....	(2)
1.2.1 电磁感应定律 .....	(2)
1.2.2 麦克斯韦电磁理论 .....	(3)
1.2.3 光的电磁理论 .....	(4)
1.3 光波的叠加与干涉 .....	(5)
1.3.1 光波的独立传播性 .....	(5)
1.3.2 光波叠加原理 .....	(5)
1.3.3 光波的相干条件 .....	(6)
1.4 相干性的进一步讨论 .....	(7)
1.4.1 复色场的复表示 .....	(7)
1.4.2 空间和时间相干度 .....	(8)
1.4.3 空间和时间相干度的测量 .....	(9)
1.5 早期光量子论及波粒二象性.....	(11)
1.5.1 辐射与量子概念 .....	(11)
1.5.2 光电效应与量子概念 .....	(13)
1.5.3 康普顿散射和量子性的进一步证实 .....	(15)
1.5.4 光的波粒二象性 .....	(16)
1.6 现代光量子理论简介.....	(17)
1.6.1 矢量空间和线性算符 .....	(17)
1.6.2 一维谐振子 .....	(20)
1.6.3 电磁场的量子化 .....	(23)
1.6.4 相干光子态 .....	(26)
1.6.5 密度算符和量子分布 .....	(29)
1.6.6 量子光学简介 .....	(32)
<b>第 2 章 光辐射与辐射源</b> .....	(35)
2.1 原子发光机理.....	(35)
2.1.1 $\alpha$ 粒子散射和原子的核式结构 .....	(35)
2.1.2 氢原子光谱和玻尔原子模型 .....	(35)
2.1.3 量子力学和原子发光 .....	(38)
2.1.4 光谱线的展宽 .....	(45)
2.2 自发辐射和普通光源.....	(48)

2.3 激光的产生机理·····	(48)
2.3.1 激光器的腔模概念·····	(49)
2.3.2 激光产生的必要条件·····	(49)
2.3.3 激光产生的充分条件·····	(52)
2.4 激光的物理特性·····	(55)
2.4.1 单色性与时间相干性·····	(55)
2.4.2 方向性与空间相干性·····	(55)
2.4.3 高阶相关·····	(56)
2.4.4 高亮度·····	(56)
2.5 激光器的工作特性简介·····	(56)
2.5.1 超短脉冲特性·····	(56)
2.5.2 频率稳定特性·····	(57)
<b>第3章 光传输与传输介质</b> ·····	<b>(58)</b>
3.1 光线在均匀介质及介质界面的传输·····	(58)
3.1.1 光线在均匀介质中的传输·····	(58)
3.1.2 光线在介质界面的透射传输·····	(59)
3.1.3 光线通过薄透镜的传输·····	(59)
3.2 高斯光束的传输·····	(61)
3.2.1 高斯光束及其特征参数·····	(61)
3.2.2 高斯光束在自由空间的传输·····	(62)
3.2.3 高斯光束通过薄透镜的传输·····	(62)
3.3 平面介质波导的射线光学理论·····	(63)
3.3.1 光线在介质界面的反射和折射·····	(63)
3.3.2 光线在平板波导中的传播·····	(65)
3.3.3 平板介质波导中的导波·····	(66)
3.3.4 Goos-Hänchen 位移和波导层的有效厚度·····	(66)
3.4 平板波导的电磁理论基础·····	(68)
3.4.1 麦克斯韦方程组的一般形式·····	(68)
3.4.2 平板波导中的麦克斯韦方程组·····	(69)
3.4.3 TE 波场方程的解·····	(70)
3.4.4 TE 波的模和截止条件·····	(73)
3.4.5 导波模的性质·····	(75)
3.5 通道波导简介·····	(76)
3.5.1 通道波导的种类·····	(76)
3.5.2 矢量波方程·····	(77)
3.5.3 标量方程近似及分离变量法·····	(78)
3.5.4 标量方程的其他解法简介·····	(78)
3.6 导波模耦合理论简介·····	(80)
3.6.1 方向耦合基本概念·····	(80)
3.6.2 耦合波方程·····	(81)



3.6.3 耦合波标量方程 .....	(82)
3.6.4 标量方程的解 .....	(84)
3.6.5 周期波导 .....	(85)
3.6.6 波导模的传输 .....	(87)
3.7 半导体波导理论 .....	(88)
3.7.1 改变半导体折射率的方法 .....	(88)
3.7.2 半导体平板波导 .....	(90)
3.7.3 通道波导 .....	(91)
3.7.4 耦合效应 .....	(93)
3.7.5 半导体波导中的损耗 .....	(95)
3.8 波导理论的新进展 .....	(97)
3.8.1 非线性波导中二次谐波的产生 .....	(97)
3.8.2 光波导的非正交耦合模理论 .....	(98)
3.9 绝缘晶体波导器件 .....	(100)
3.9.1 方向耦合器 .....	(100)
3.9.2 平衡桥干涉仪和交叉波导开关 .....	(101)
3.9.3 干涉滤波器 .....	(102)
3.9.4 耦合模滤波器 .....	(103)
3.9.5 偏振选择装置 .....	(104)
3.9.6 透射光栅 .....	(105)
3.9.7 反射光栅 .....	(106)
3.9.8 电光光栅和声光光栅 .....	(106)
3.9.9 光栅耦合器 .....	(107)
3.10 半导体波导装置 .....	(108)
3.10.1 半导体被动波导装置 .....	(108)
3.10.2 半导体电光波导调制器 .....	(112)
3.10.3 半导体光电集成回路 .....	(113)
3.11 光波导应用举例 .....	(113)
3.11.1 平面集成光学 RF 谱分析仪 .....	(113)
3.11.2 波导芯片连接器 .....	(114)
3.11.3 通道波导 A/D 转换器 .....	(115)
3.11.4 导波光通信 .....	(116)
3.12 MOEMS 简介 .....	(117)
3.12.1 衍射微透镜 .....	(117)
3.12.2 折射微透镜 .....	(118)
3.12.3 MEM 系统 .....	(118)
3.12.4 光学扫描仪 .....	(118)
<b>第 4 章 光电探测与探测器 .....</b>	<b>(120)</b>
4.1 光电探测器性能概述 .....	(120)
4.1.1 响应率 .....	(120)

4.1.2	等效噪声功率	(121)
4.1.3	探测率	(121)
4.1.4	量子效率	(122)
4.1.5	响应时间	(122)
4.1.6	线性区	(122)
4.1.7	噪声	(122)
4.2	光探测器工作基础	(123)
4.2.1	外光电效应	(124)
4.2.2	光电导效应	(124)
4.2.3	光生伏特效应	(125)
4.2.4	光-热-电效应	(126)
4.3	光电子发射型光电探测器	(126)
4.3.1	光电倍增管的结构及工作原理	(127)
4.3.2	光电倍增管的主要性能	(129)
4.4	光电导型探测器	(130)
4.4.1	光电导型探测器概述	(130)
4.4.2	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光电导探测器的性能	(131)
4.5	光伏型探测器	(133)
4.5.1	光伏型探测器概述	(133)
4.5.2	PN 结光电二极管电流特性简介	(133)
4.5.3	响应率与探测率	(136)
4.5.4	噪声	(136)
4.6	直接探测技术	(137)
4.6.1	环境辐射	(137)
4.6.2	直接探测中的噪声	(139)
4.6.3	归一化探测率	(139)
4.7	光相干探测技术	(140)
4.7.1	光相干探测原理	(140)
4.7.2	光相干探测的特性	(140)
<b>第 5 章</b>	<b>光电成像与成像系统</b>	(142)
5.1	光电成像系统概述	(142)
5.2	图像探测器简介	(142)
5.2.1	真空成像器件	(142)
5.2.2	固体成像器件	(143)
5.3	点扩展函数及基于点扩展函数的性能指标	(144)
5.3.1	点扩展函数	(144)
5.3.2	斯特列尔比	(145)
5.3.3	圆围能量与空间频率的关系	(146)
5.4	光学传递函数	(147)
5.5	调制与调制传递函数	(148)

5.5.1	调制	(148)
5.5.2	调制传递函数	(148)
5.6	光学系统的调制传递函数	(149)
5.6.1	衍射极限的调制传递函数	(149)
5.6.2	像差的影响	(149)
5.6.3	离焦的影响	(150)
5.7	光电成像系统简介	(150)
5.7.1	非扫描光电成像系统简介	(150)
5.7.2	扫描光电成像系统简介	(151)
5.7.3	光学成像系统性能指标	(151)
5.8	非扫描光电成像系统性能的进一步描述	(152)
5.8.1	视场	(152)
5.8.2	噪声与信噪比	(152)
5.8.3	分段凝视或栅格扫描	(152)
5.9	扫描光电成像系统性能的进一步描述	(153)
5.9.1	扫描光电成像系统的工作原理	(153)
5.9.2	扫描光电成像系统中的噪声	(153)
<b>第 6 章</b>	<b>光电统计理论概述</b>	<b>(154)</b>
6.1	随机变量	(154)
6.1.1	随机变量及其分布函数	(154)
6.1.2	随机变量的数学期望	(155)
6.1.3	随机变量的矩	(156)
6.1.4	高斯随机变量	(159)
6.2	随机过程	(159)
6.2.1	随机过程概述	(159)
6.2.2	随机过程的谱	(161)
6.2.3	实随机过程的复表示	(164)
6.3	高斯随机过程	(167)
6.3.1	实高斯随机过程和复高斯随机过程	(167)
6.3.2	窄带高斯随机过程	(167)
6.4	泊松随机点过程	(168)
6.4.1	单重随机泊松点过程	(168)
6.4.2	双重随机泊松点过程	(171)
6.5	光源的统计描述	(173)
6.5.1	非偏振光与部分偏振光	(173)
6.5.2	激光	(175)
6.6	光波传输的统计描述	(177)
6.7	光探测的统计描述	(178)
6.7.1	概述	(178)
6.7.2	光电子发射概率与辐射光强的关系	(179)

---

6.8 光电探测器噪声的统计描述 .....	(182)
6.8.1 热噪声 .....	(182)
6.8.2 散粒噪声 .....	(185)
6.8.3 产生-复合噪声 .....	(186)
6.8.4 温度噪声 .....	(190)
6.8.5 电流噪声 .....	(190)
<b>参考文献</b> .....	(192)

# 第 1 章 光本性理论的发展

光是人类感知外部世界最主要的信息源。据统计,人类感官所得到的信息中,有 90% 以上是通过眼睛接收物体辐射、反射或散射的光所获取的。但直到 17 世纪中后期,光的本性问题才被认真研究,并逐渐形成了两个并立的学说,即以牛顿为代表的一些学者提出的微粒说,和惠更斯(Christiaan Huygens)等人提出的波动说。两个世纪以后由麦克斯韦(James Clerk Maxwell)创立的电磁理论及 19 世纪早期的光量子理论,得出“光的波粒二象性”的解释。这使人类对光的本性的认识有了质的飞跃。但几乎可以肯定的是,光的波粒二象性绝不是对光本性认识的终结。光的本性问题今后仍将作为一个重要的科学问题被研究,并不断发展与深入。正是由于这个原因,本章的题目没有简单定为“光的本性”,而称为“光本性理论的发展”,喻其将继续发展,当前的理论充其量只是光本性理论的现阶段表述。

本章将基本按照历史发展顺序,首先介绍光本性的微粒说和波动说,接着介绍光的电磁理论,然后是光的早期量子理论和光的波粒二象性,最后以现代光量子理论简介结束整章的讨论。

## 1.1 早期学说

如上所述,光本性的早期学说主要是牛顿的微粒说和惠更斯的波动说,本节拟对其作一简要介绍。首先给出经典粒子与波动的概念。

### 1.1.1 经典粒子与波动

经典意义下的粒子应具备以下基本属性:

- (1) 具有惯性质量;
- (2) 在外力作用下会产生加速度;
- (3) 具有动量。

波动的属性是从一个地方向另一个地方输送能量,其中机械波的传输需要一定的介质。

### 1.1.2 光的微粒说

牛顿的微粒说于 1670 年形成,其基本观点如下:

- (1) 光是由大量微粒组成的,这些微粒具有惯性质量,并以极高的速度沿直线行进;
- (2) 当这种直线行进的粒子流碰到大型物体时,将被阻断;
- (3) 粒子流从表面弹回时,服从反射定律;
- (4) 粒子流由光疏介质进入光密介质时向界面的法线方向偏折,且传播速度增加。

由此可见,牛顿的微粒说成功解释了光的直线行进及大物体在光源的另一侧形成影子的现象,并可对光的反射定律给出合理的解释。而为了解释折射定律,则需假设在介质界面存在某种力,使微粒通过界面时法向速度发生变化。由此引起的问题首先在于存在力的假设缺乏依据,而更严重的是,它将导出光在介质中的传播速度与介质的折射率成正比,因而光在光密介质中具有较大速度的结论。然而,在地面上进行光速测定的工作直到 19 世纪上半叶才开

始。1862年, Foucault 的实验最终否定了上述结论。

### 1.1.3 光的波动说

比牛顿的微粒说晚 10 年, 惠更斯于 1680 年提出光的波动说, 其基本观点如下:

- (1) 光由一些小的波包组成, 其上每一点都是次波波源;
- (2) 平面波产生的还是平面波, 球面波产生的还是球面波;
- (3) 光波是纵波, 正如声波一样;
- (4) 光波从表面弹回时, 服从反射定律;
- (5) 光波由光疏介质进入光密介质时, 传播速度减小, 传播路径向界面法线偏折;
- (6) 光能产生干涉和衍射图样。

这样, 惠更斯的波动说就像牛顿的微粒说一样, 也能解释光的直线传播和反射定律。而比后者前进一步的是, 不需要任何额外的假设, 即可成功解释光的折射现象, 并预见光能产生干涉和衍射现象, 只是在当时的科学技术条件下尚没有相应的实验证明。直到 1807 年杨氏 (Young T.) 双缝实验和 1820 年 Poisson 的小孔实验, 证明了光波的干涉和衍射特性, 从而有力地支持了光的波动学说。

惠更斯认为光波是纵波, 而且是必须在一种特殊的弹性介质中才能传播的机械波。Fresnel 根据光的偏振实验, 于 1820 年论证了光波是横波。而麦克斯韦于 1860 年创立的电磁理论则将光的波动理论发展到一个新的高度, 它不仅能完美解释当时的各种实验现象, 还彻底否定了光是机械波的假设。下面就对这一理论作简单介绍。

## 1.2 光的电磁理论

### 1.2.1 电磁感应定律

19 世纪早期, 电磁学得到迅速发展。1819 年奥斯特 (H. C. Oersted) 发现, 放在载流导线下方的磁针会转向与导线垂直的方向。这表明, 运动电荷能产生磁场。

假定一电荷  $q$  以速度  $v$  ( $v \ll c$ , 因而不必考虑相对论效应) 运动, 它在位矢为  $r$  点所产生的电场为

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (1.1)$$

而在同一点所产生磁感应强度或磁通密度为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 q (\mathbf{v} \times \mathbf{r})}{4\pi r^3} \quad (1.2)$$

式中,  $\epsilon_0$  为真空电容率或真空介电常数, 而  $\mu_0$  为真空磁导率。

将式(1.1)和式(1.2)联立, 于是得

$$\mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 (\mathbf{v} \times \mathbf{E}) \quad (1.3)$$

随后, 毕奥 (Biot)、萨伐尔 (Savart) 对电流元导出与式(1.2)类似的表达式。假设一段载流导线, 其中电流强度为  $I$ ,  $Idl$  为其上的任一电流元, 电流方向由线元矢量  $dl$  给出, 则  $Idl$  在点  $P$  处产生的感应强度为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1.4)$$

1820年, 安培(Ampere)通过实验发现, 正如点电荷之间存在相互作用一样, 电流元之间也存在相互作用。借助磁感应强度概念, 安培定律可表述为: 在磁场中磁感应强度为  $\mathbf{B}$  的点, 电流元  $I d\mathbf{l}$  所受到的作用力为

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1.5)$$

在奥斯特发现电流的磁效应后, 很多科学家开始考虑, 既然电流可以产生磁场, 那么磁场是否也能产生电流? 法拉第(Faraday)基于大量实验事实, 在1831年11月24日发表的一篇重要论文中, 总结出可以产生感应电流的5种情况: 变化着的电流; 运动着的电荷或恒定电流; 变化着的磁场; 运动着的磁体; 在磁场中运动着的导体。他把这称为电磁感应, 并特别强调, 感应电流不取决于稳态电流或磁场, 而取决于它们的变化。借助矢量分析, 电磁感应定律的普遍(微分)形式可写为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

这是麦克斯韦方程组的基本方程之一。方程表明, 即使没有导体存在, 变化的磁场也会在空间激发涡旋状的感生电场。

### 1.2.2 麦克斯韦电磁理论

麦克斯韦系统总结了奥斯特、毕奥、萨伐尔、安培及法拉第等人的研究成果, 并提出有旋电场和位移电流的假设, 最终归纳出描述电磁场运动的方程组, 并称为麦克斯韦方程组, 其微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\text{e}} \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.9)$$

式中,  $\rho_{\text{e}}$  是自由电荷密度,  $\mathbf{j}_0$  是传导电流密度,  $\mathbf{D}$  是电位移或电通密度,  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  是位移电流密度,  $\mathbf{H}$  是磁场强度。

无论是否存在介质, 麦克斯韦方程组均成立。只是存在介质时, 上述方程组需与物质方程式联立求解。对各向同性介质, 它们是

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (1.11)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.12)$$

式中,  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别是介质的相对电容率和相对磁导率,  $\sigma$  是电导率。在真空中,  $\epsilon_r = \mu_r = 1$ 。

研究电磁场时, 通常感兴趣的是电场强度  $\mathbf{E}$ 。对于在自由空间传播, 频率为  $\omega$  的单色波, 由方程(1.6)~(1.12)可以导出亥姆霍兹(Helmholtz)方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.13)$$

和

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.14)$$

$$\mathbf{B} = -\frac{i}{\omega} \nabla \times \mathbf{E} \quad (1.15)$$

式中

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

称为波数。

对于平面电磁波

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (1.16)$$

式中,  $\mathbf{k}$  是沿电磁波传播方向的矢量。将式(1.16)代入式(1.14), 给出

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.17)$$

类似地, 有

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.18)$$

而由方程(1.15) 则可得到

$$\mathbf{B} = \frac{1}{\omega} (\mathbf{k} \times \mathbf{E}) \quad (1.19)$$

式(1.17)~(1.19)表明,  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{k}$  是 3 个相互正交的矢量。

于是, 由麦克斯韦电磁理论证明, 电磁波是横波,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{B}$  均与传播方向  $\mathbf{k}$  垂直, 且  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{B}$  互相垂直,  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  沿波矢  $\mathbf{k}$  方向, 而电磁波在介质中传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1.20)$$

式中,  $v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  是电磁波在真空中的传播速度。

### 1.2.3 光的电磁理论

麦克斯韦于 1860 年 12 月 8 日在英国皇家学会宣读的总结性论文《电磁场的动力学理论》中, 算出了电磁波的传播速度, 与 1862 年 Foucault 测得的光速极为吻合。由此得出结论, “光是按照电磁定律经过场传播的电磁扰动”, 简单地说, 光是波长处于一定范围的电磁波。从而确立了光的电磁波理论, 使人类对光本性的认识获得一次巨大飞跃。

根据国际相关部门 1986 年的推荐值,  $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\mu_0 = 1.256\ 637\ 061\ 4 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-1}$ 。于是得到真空中光速

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

而在相对电容率为  $\epsilon_r$ 、相对磁导率为  $\mu_r$  的介质中, 光速

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1.21)$$

由于  $\epsilon_r, \mu_r > 1$ , 故  $u < c$ 。二者之比

$$\frac{c}{u} = n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1.22)$$

称为介质的折射率。

在可见光波段, 几乎所有的磁化机制都不起作用,  $\mu_r \approx 1$ , 于是

$$n = \frac{c}{u} \approx \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.23)$$



由此可见,光波在介质中传播的速度随介质的不同而改变。注意到

$$u = 2\pi\omega\lambda \quad (1.24)$$

其中光波的角频率  $\omega$  不因介质而变,而波长  $\lambda$  会因介质而变。

光既然是一种电磁波,就应具备 1.2.2 节所描述的电磁波的所有特性。即它是一种横波,电场强度矢量  $\mathbf{E}$  和磁场强度矢量  $\mathbf{H}$  均与传播方向  $\mathbf{k}$  垂直,且  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  互相垂直。光波既可以在介质中传播,也可以在真空中传播。

光波既然是一种电磁波,在其传播过程中就应像其他电磁波一样伴随着电磁能量的传递,这就是光强  $I$ 。光强表示单位时间内通过与传播方向垂直的单位面积的光能量在一个周期内的平均值。对人眼或照相底片等感光器件起作用的主要是电场强度  $\mathbf{E}$ ,光强  $I$  与  $|\mathbf{E}|^2 = E_0^2$  成正比。在波动光学中,主要讨论的是相对光强,因而往往定义光强

$$I = E_0^2 \quad (1.25)$$

### 1.3 光波的叠加与干涉

光的电磁理论成功地解释了当时所观察到的光的干涉、衍射等现象。相关内容在物理光学或波动光学中已有详细描述。这里只对作为这些现象基础的光波独立传播与叠加原理加以简单介绍,并给出两列光波相干的条件。

#### 1.3.1 光波的独立传播性

当多列光波在空间交叠时,它们的传播互不干扰,即每列波如何传播,与其他波的存在无关。这就是光波的独立传播性。

光波的独立传播性在自由空间是毫无疑问的。而在介质中,光波是否独立传播取决于介质特性与入射光特性。导致独立传播性不适用的主要有两种情况:

(1) 在具有适当强度和频率的光场作用下,介质对光的吸收和透过特性发生改变,从而影响其他光波的穿透;

(2) 在强光的作用下,介质发生极化,产生极化强度矢量,后者辐射新的电磁波。在一定条件下,两列光波入射,会有第 3 个频率的光出射。这种现象常称为非线性光学效应。由于产生非线性光学效应需要很强的人射光,因而,在激光出现之前很少观察到这种现象。而在激光出现以后,各种非线性光学效应逐渐被认识,且在众多领域得到应用。非线性光学或强光光学已成为现代光学的一个重要研究领域,本书后面有关章节将适当介绍。而在本章中,除非特别说明,一般假定介质是线性的,光波满足独立传播条件。

#### 1.3.2 光波叠加原理

如果光的独立传播条件成立,则当两列或多列光波同时存在时,在它们的交叠区域内每点的光振动是各列光波单独在该点产生的光振动的合成。设两列波分别为

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}_1, t) = \mathbf{E}_{10}(\mathbf{r}_1) \exp\{-i[\omega_1 t - \varphi_1(\mathbf{r}_1)]\} \quad (1.26a)$$

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{r}_2, t) = \mathbf{E}_{20}(\mathbf{r}_2) \exp\{-i[\omega_2 t - \varphi_2(\mathbf{r}_2)]\} \quad (1.26b)$$

则合成后光波为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_1(\mathbf{r}_1, t) + \mathbf{E}_2(\mathbf{r}_2, t) \\ &= \mathbf{E}_{10}(\mathbf{r}_1) \exp\{-i[\omega_1 t - \varphi_1(\mathbf{r}_1)]\} + \mathbf{E}_{20}(\mathbf{r}_2) \exp\{-i[\omega_2 t - \varphi_2(\mathbf{r}_2)]\} \end{aligned} \quad (1.27)$$