光学理论与实践

·邓梅生

·武汉大学出版社

光学理论与实践

邓梅生

武汉大学出版社

一九八七年·武汉

内 容 简 介

本书依据理论密切联系科研实践的原则，系统地阐述了光学的基本原理。经典光学部分以麦克斯韦电磁场理论贯彻始终，近代光学部分包括了引人注目的激光与非线性光学，具有较高的学术水平和实用价值。

本书可作为大学高年级和研究生的光学教材，对于广大从事光学领域工作的工程师、科技人员和教师来说，也是一本较好的参考书。

光学理论与实践

邓梅生

*

武汉大学出版社出版

（武昌 珞珈山）

新华书店湖北发行所发行 武汉大学印刷厂印刷

*

787×1092毫米 1/32 17.125印张 383千字

1987年2月第一版 1987年2月第一次印刷

印数：1—2,000

统一书号：13279.36 定价：2.95元

ISBN 7-307-00004-0

O·2

序　言

本书是以作者给研究生讲授光学课程的讲稿为基础，结合我国教学和科学研究的实际而写成的。全书共分十章，前八章为经典光学部分，以麦克斯韦电磁场理论贯彻始终；最后两章为近代光学部分，包括了两个引人注目的新领域——激光和非线性光学。每章后都附有适量的习题，以便帮助读者加深对内容的理解。从内容上看，经典光学仍是本书的重点。在阐述近代光学的内容时，必然要涉及原子物理和量子力学，这里已假定读者具有这些方面的基本知识。

本书的出版工作得到了武汉市科学技术委员会、武汉大学和邮电部武汉邮电科学研究院领导同志的大力支持，并承蒙李光临博士审阅，靖秀华同志也为本书做了大量工作，在此表示衷心的感谢。

限于本人的学识水平，书中难免出现错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

邓　梅　生

于武汉邮电科学研究院

1985.4

目　录

序言……………………………………………………（1）

第一章　光的电磁场理论……………………………（1）

§1.1　电磁场……………………………………………（1）
1．麦克斯韦方程组　边界条件……………………（1）
2．物质方程……………………………………………（3）
3．电磁场的能量定理…………………………………（4）
4．电磁场理论的完备性………………………………（7）
§1.2　波动方程　光速　麦克斯韦公式………………（10）
§1.3　标量波动方程……………………………………（13）
1．平面波………………………………………………（13）
2．球面波………………………………………………（15）
3．平面谐波……………………………………………（16）
4．相速和群速…………………………………………（18）
§1.4　光的矢量性………………………………………（22）
1．一般平面电磁波……………………………………（22）
2．平面谐电磁波　偏振态……………………………（24）
§1.5　平面波的反射和折射……………………………（28）
1．反射和折射定律……………………………………（28）
2．菲涅耳公式…………………………………………（33）
3．反射下的相变　关于半波损失问题………………（40）
4．全反射时的瞬逝波　古斯—汉欣效应……………（43）
习题……………………………………………………（49）

第二章　电偶极子的场　极化和色散理论……………（51）
§2.1　引言……………………………………………………（51）
§2.2　电偶极子的场………………………………………（51）
1.　矢势和标势………………………………………（51）
2.　推迟势……………………………………………（55）
3.　赫兹矢量…………………………………………（60）
4.　电偶极子的场……………………………………（61）
§2.3　介质极化的基本理论………………………………（65）
1.　极化率……………………………………………（65）
2.　有效场……………………………………………（66）
3.　罗仑兹—罗仑茨公式……………………………（69）
§2.4　色散的基本理论……………………………………（73）
1.　罗仑兹色散模型…………………………………（73）
2.　亥姆霍兹方程　塞耳迈尔和科希公式…………（79）
习题……………………………………………………………（80）

第三章　几何光学的基本原理…………………………（82）
§3.1　几何光学近似………………………………………（82）
§3.2　光程函数方程………………………………………（82）
§3.3　光线和光线方程……………………………………（85）
§3.4　光线的微分方程及其应用…………………………（90）
§3.5　自聚焦光纤　自聚焦棒透镜………………………（96）
§3.6　光矢量表述的反射和折射定律……………………（100）
§3.7　几何光学的其他基本原理…………………………（102）
习题……………………………………………………………（104）

第四章　光学成像的几何理论…………………………（106）
§4.1　引言……………………………………………………（106）

§4.2　哈密顿特征函数和光程函数……………………………………(106)
1.　点特征函数………………………………………………………(107)
2.　混合特征函数……………………………………………………(110)
3.　角特征函数………………………………………………………(114)
4.　折射球面的角特征函数的近似形式……………………………(116)
5.　反射球面的角特征函数的近似形式……………………………(122)
§4.3　无像散成像　理想成像…………………………………………(124)
1.　绝对仪器的成像定理……………………………………………(125)
2.　绝对仪器的例子——“鱼眼”…………………………………(133)
3.　面的理想成像……………………………………………………(136)
§4.4　理想光学系统理论——高斯光学………………………………(138)
1.　基点　基面　放大率……………………………………………(138)
2.　光学系统的分类…………………………………………………(144)
3.　组合光组…………………………………………………………(146)
§4.5　球面和透镜………………………………………………………(150)
1.　折射球面…………………………………………………………(150)
2.　反射球面…………………………………………………………(154)
3.　厚透镜……………………………………………………………(154)
4.　薄透镜……………………………………………………………(158)
5.　拉格朗日-亥姆霍兹公式………………………………………(160)
§4.6　广角光束的无像散成像…………………………………………(162)
1.　正弦条件…………………………………………………………(164)
2.　赫歇尔条件………………………………………………………(166)
§4.7　色差………………………………………………………………(167)
§4.8　光阑和光瞳………………………………………………………(173)
§4.9　光线追迹…………………………………………………………(175)
1.　斜子午光线追迹…………………………………………………(176)
2.　近轴光线追迹……………………………………………………(179)
习题………………………………………………………………………(181)

第五章　像差的几何理论……………………………………(183)

§5.1　引言……………………………………………………(183)
§5.2　波像差和光线像差　像差函数……………………(184)
§5.3　赛德耳变量　微扰程函……………………………(189)
§5.4　五种初级像差………………………………………(195)
§5.5　初级像差的相加定理………………………………(205)
§5.6　一般共轴透镜系统的初级像差……………………(208)
1.　用两条近轴光线来表示的赛德耳公式………………(208)
2.　用一条近轴光线来表示的赛德耳公式………………(215)
§5.7　一个薄透镜的初级像差……………………………(217)
§5.8　共轴透镜系统的色差………………………………(221)
§5.9　双胶合透镜的设计…………………………………(225)
1.　单薄透镜的基本像差参量……………………………(226)
2.　双胶合薄透镜的基本像差参量………………………(233)
习题……………………………………………………………(244)

第六章　干涉理论基础……………………………………(245)

§6.1　引言……………………………………………………(245)
§6.2　两束单色波的干涉…………………………………(246)
§6.3　双光束干涉　分波法………………………………(250)
1.　杨氏实验………………………………………………(250)
2.　菲涅耳双面镜和其他类似装置………………………(252)
3.　准单色光与白光………………………………………(255)
§6.4　缝光源　干涉条纹的可见度………………………(256)
§6.5　迈克耳逊星球干涉仪………………………………(259)
§6.6　驻波……………………………………………………(266)
§6.7　双光束干涉　分幅法………………………………(272)
1.　平行平面板的干涉条纹　等倾干涉…………………(272)

2. 薄膜的等厚干涉 牛顿环 ……(274)
3. 条纹的定域 ……(277)
4. 迈克耳逊干涉仪 ……(284)
5. 光纤旋转传感器——光纤陀螺 ……(285)
6. 相干长度和相干时间 部分相干光 ……(288)
§6.8 多光束干涉 ……(294)
1. 平行平面板的多光束干涉条纹 ……(294)
2. 法布里-珀罗干涉仪分辨率 ……(302)
§6.9 多光束干涉的矩阵处理——多层介质膜理论
干涉滤光片 ……(310)
习题 ……(321)

第七章 衍射理论基础 ……(326)

§7.1 引言 ……(326)
§7.2 惠更斯-菲涅耳原理 ……(327)
§7.3 基尔霍夫衍射理论 ……(334)
§7.4 夫琅和费衍射 ……(346)
1. 矩孔和狭缝 ……(346)
2. 圆孔 ……(349)
3. 其他形式的孔 ……(353)
§7.5 衍射光栅 ……(356)
1. 衍射光栅原理 ……(356)
2. 闪烁光栅 阶梯光栅 ……(364)
§7.6 菲涅耳衍射 ……(367)
1. 菲涅耳圆孔衍射 波带片 ……(367)
2. 直边菲涅耳衍射 ……(369)
§7.7 傅立叶变换在衍射上的应用 空间滤波 相衬显微
镜 ……(375)
§7.8 光学成像系统的频谱分析 光学传递函数 ……(381)

§7.9 全息术 ……(394)
习题 ……(397)

第八章 晶体光学 ……(400)

§8.1 引言 ……(400)
§8.2 各向异性介质的张量描述 ……(400)
§8.3 相速度和光线速度 ……(404)
§8.4 光在晶体中传播的菲涅耳公式 对偶规则 ……(407)
§8.5 决定传播速度和振动方向的作图法 ……(411)
§8.6 晶体的光学分类 ……(416)
§8.7 光在单轴晶体中的传播 离散角公式 ……(418)
§8.8 光在双轴晶体中的传播 ……(423)
§8.9 晶体的双折射 锥形折射 ……(426)
§8.10 尼科耳棱镜和格兰棱镜 λ/4 波片 ……(431)
§8.11 用晶片产生的干涉图 ……(437)
§8.12 应力双折射 ……(441)
§8.13 电光效应 电光开关 ……(445)
§8.14 磁光效应 双稳态磁光开关 ……(448)
习题 ……(453)

第九章 光放大原理和激光器 ……(455)

§9.1 引言 ……(455)
§9.2 黑体辐射腔内的模 普朗克公式 ……(456)
§9.3 爱因斯坦的热辐射理论 受激辐射 ……(459)
§9.4 光谱线的宽度 ……(463)
§9.5 光在激活介质中的放大 增益曲线 ……(468)
§9.6 光学共振腔的模式理论 ……(470)
§9.7 激光振荡的阈值条件 选模 ……(477)
§9.8 Q 突变和锁模技术 ……(481)

§9.9 各种激光器 ……………………………………………………(484)
1. 气体激光器 ……………………………………………………(484)
2. 固体激光器 ……………………………………………………(486)
3. 染料激光器 ……………………………………………………(488)
4. 半导体激光器 …………………………………………………(488)
5. 新型激光器的进展 ……………………………………………(491)
习题 ………………………………………………………………(493)

第十章 非线性光学理论基础 ……………………………………(495)

§10.1 引言 ……………………………………………………(495)
§10.2 非线性介质的张量描述 ………………………………(498)
§10.3 有效极化率 ……………………………………………(503)
§10.4 耦合振幅方程 …………………………………………(505)
§10.5 位相匹配 ………………………………………………(512)
§10.6 倍频和参量振荡 ………………………………………(518)
§10.7 受激拉曼散射 …………………………………………(524)
§10.8 光位相共轭原理及其应用 ……………………………(526)
习题 ………………………………………………………………(532)
参考文献 …………………………………………………………(532)

第一章　光的电磁场理论

§1.1　电磁场

1.麦克斯韦方程组　边界条件

运动电荷在周围空间激发一个电磁场，这个场由电场强度 $\boldsymbol{E}$ 和磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 两个场矢量来表征。为了描述场对物质的作用，又引入第二组矢量，即电流密度 $\boldsymbol{J}$，电位移矢量 $\boldsymbol{D}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$。在连续介质中，电磁场的这五个矢量间的关系由麦克斯韦方程组的微分形式所表征：

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\frac{1}{c}\dot{\boldsymbol{D}}+\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{J} \tag{1.1}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{1}{c}\dot{\boldsymbol{B}} \tag{1.2}$$

“·”表示对时间的微商。(1.1)和(1.2)方程式是麦克斯韦方程组的基本方程，表征了电磁场的涡旋性。涡旋磁场由传导电流和位移电流所激发，而涡旋电场由磁感应强度的时间变化率来激发。它们反映了变化的电场和磁场之间的内在联系，构成统一的电磁场。

还有两个辅助的标量方程：

$$\nabla\cdot\boldsymbol{D}=4\pi\rho \tag{1.3}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0 \tag{1.4}$$

方程(1.3)可看作电荷密度 ρ 的定义，它表明电位移矢量的散度的源是自由电荷密度。方程(1.4)表明磁场的无散性，意味着无自由磁荷的存在。

根据电荷守恒定律的微分形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \boldsymbol{J} \tag{1.5}$$

对(1.1)和(1.2)两边取散度，因为$\nabla \cdot \nabla \times \boldsymbol{A} = 0$，则有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \boldsymbol{D}) + 4\pi \nabla \cdot \boldsymbol{J} = \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \boldsymbol{D} - 4\pi\rho) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \boldsymbol{B}) = 0$$

故(1.3)和(1.4)式可认为是电磁场基本方程(1.1)和(1.2)式的起始条件。

电磁场的边界条件是

$$\boldsymbol{n}_{12} \cdot (\boldsymbol{B}^{(2)} - \boldsymbol{B}^{(1)}) = 0 \tag{1.6}$$

$$\boldsymbol{n}_{12} \cdot (\boldsymbol{D}^{(2)} - \boldsymbol{D}^{(1)}) = 4\pi\hat{\rho} \tag{1.7}$$

$$\boldsymbol{n}_{12} \times (\boldsymbol{E}^{(2)} - \boldsymbol{E}^{(1)}) = 0 \tag{1.8}$$

$$\boldsymbol{n}_{12} \times (\boldsymbol{H}^{(2)} - \boldsymbol{H}^{(1)}) = \frac{4\pi}{c}\hat{\boldsymbol{J}} \tag{1.9}$$

它是麦克斯韦方程组(1.1)—(1.4)式运用于不连续界面的结果。式中 $\boldsymbol{n}_{12}$ 为由介质1到介质2界面的法线单位矢量，$\hat{\rho}$ 为面电荷密度，$\hat{\boldsymbol{J}}$ 为面电流密度，也可表述为分量形式：

$$B_{2n} = B_{1n} \tag{1.6$'$}$$

$$D_{2n} - D_{1n} = 4\pi\hat{\rho} \tag{1.7$'$}$$

$$E_{2t}=E_{1t} \tag{1.8$'$}$$

$$H_{2t}-H_{1t}=\frac{4\pi}{c}\hat{j} \tag{1.9$'$}$$

这就是说，电磁场通过界面时，$\boldsymbol{B}$ 的法线分量连续，$\boldsymbol{E}$ 的切线分量连续，而$\boldsymbol{D}$ 的法线分量不连续，$\boldsymbol{H}$ 的切线分量不连续。若 $\rho=\hat{\boldsymbol{J}}=0$，则 $\boldsymbol{D}$的法线分量连续，$\boldsymbol{H}$ 的切线分量连续。边界条件在研究实际问题时具有重要意义。

本书采用高斯单位制：电学量 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{D}$、ρ、$\boldsymbol{j}$ 单位用静电单位，而磁学量 $\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{B}$ 用电磁单位；式中出现的 C 为电动力学常数，它是真空中的光速。在理论上高斯单位制比别的单位制优越。

若当所有场量都与时间无关，并且当 $\boldsymbol{J}=0$ 时，场称为静态场。

若当所有场量都与时间无关，并且当 $\boldsymbol{J}\neq 0$ 时，场称为稳态场。

对光场来说，场量随时间变化非常迅速（约10^{-15}秒），通常取宏观时间间隔的平均值，而不考虑其微观瞬时值，于是光场的性质与所取的宏观时间间隔无关，如光场的干涉条纹等，这属于广义的稳定场。

2.物质方程

在已知电荷和电流分布下，要由麦克斯韦方程去决定所有场矢量，还必须补充三个场对物质作用的物质方程。这些方程与场中物质的性质有关，一般是比较复杂的。对相对静止（或低速）各向同性的物质来说，物质方程具有简单形式：

$$\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E} \tag{1.10}$$

$$\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E} \tag{1.11}$$

$$\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H} \tag{1.12}$$

式中 σ 是电导系数，ε 是介电系数，μ 是磁导率。

(1.10)式是欧姆定律的微分形式，$\sigma\neq 0$ 的物质是导体。在电场作用下发生电流并产生楞次——焦耳热，这就意味着光能的吸收。本书主要研究光在透明介质中传播，这就必须是非导体 $\sigma=0$。因此，在一般介质中，$\sigma=0$ 时，电磁场的性质主要由 ε、μ 来描述。对大多数介质来说是非磁性的，即 $\mu=1$。

对各向异性介质来说，如晶体，ε 不再为常数。这种情况我们将在第八章晶体光学中讨论。

上述物质方程取场量的一次形式，这种线性关系只是特殊情况。在强场作用下，方程不仅与场量的一次有关，还与二次及高次有关。我们将在第十章非线性光学中讨论。

3. 电磁场的能量定理

由麦克斯韦方程可以直接导出能量定理。使 $\boldsymbol{E}\cdot$(1.1) 和 $\boldsymbol{H}\cdot$(1.2)有

$$\boldsymbol{E}\cdot\nabla\times\boldsymbol{H}=\frac{1}{c}\boldsymbol{E}\cdot\dot{\boldsymbol{D}}+\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{J}$$

$$\boldsymbol{H}\cdot\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{1}{c}\boldsymbol{H}\cdot\dot{\boldsymbol{B}}$$

利用矢量恒等式：$\nabla\cdot(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})=\boldsymbol{H}\cdot\nabla\times\boldsymbol{E}-\boldsymbol{E}\cdot\nabla\times\boldsymbol{H}$，上两式相减得

$$\boldsymbol{E}\cdot\nabla\times\boldsymbol{H}-\boldsymbol{H}\cdot\nabla\times\boldsymbol{E}=-\nabla\cdot(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})=\frac{1}{c}(\boldsymbol{E}\cdot\dot{\boldsymbol{D}}$$

$$+\boldsymbol{H}\cdot\dot{\boldsymbol{B}})+\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{J}$$

以$\frac{c}{4\pi}$乘上式，并对任意体积积分，利用高斯定理

$$\int_V \nabla\cdot\boldsymbol{a}dV=\oint_S \boldsymbol{a}\cdot d\mathbf{s}\qquad (d\mathbf{s}=\boldsymbol{n}ds)$$

得出

$$-\frac{c}{4\pi}\oint_S(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})\cdot d\boldsymbol{s}=\frac{1}{4\pi}\int(\boldsymbol{E}\cdot\dot{\boldsymbol{D}}+\boldsymbol{H}\cdot\dot{\boldsymbol{B}})dV$$

$$+\int\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}dV\qquad(1.13)$$

(1.13)式是由麦克斯韦基本方程直接得出的普遍结果，不管物质方程(1.10)—(1.12)式是否成立。

现在我们讨论物质方程(1.10)—(1.12)满足时的情况。至于(1.10)—(1.12)式不满足的非各向同性情况，将在第八章晶体光学中再研究。

对各向同性媒质则有

$$\frac{1}{4\pi}(\boldsymbol{E}\cdot\dot{\boldsymbol{D}})=\frac{1}{4\pi}\boldsymbol{E}\cdot\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\boldsymbol{E})=\frac{1}{8\pi}\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\boldsymbol{E}^2)$$

$$=\frac{1}{8\pi}\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D})$$

同理 $$\frac{1}{4\pi}(\boldsymbol{H}\cdot\dot{\boldsymbol{B}})=\frac{1}{8\pi}\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B})$$

令 $$w_e=\frac{1}{8\pi}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{D},\quad w_m=\frac{1}{8\pi}\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{B}\qquad(1.14)$$

分别为电场能量密度和磁场能量密度，则电磁场能量为

$$W=\int(w_e+w_m)dV\qquad(1.15)$$

于是(1.13)式变成

$$-\frac{dW}{dt}=\int_V \boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}dV+\oint_S\frac{c}{4\pi}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})\cdot d\boldsymbol{s} \qquad (1.16)$$

引进能流密度矢量坡印廷矢量 $\boldsymbol{S}$

$$\boldsymbol{S}=\frac{c}{4\pi}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}) \qquad (1.17)$$

则(1.16)式中各项的意义为：$\int \boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}dV$ 表示体积 V 中电磁场移动电荷消耗的功率，即每秒电磁场消耗的能量，$\oint_S\frac{c}{4\pi}(\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})\cdot d\boldsymbol{s}$ 表示每秒流出该体积包围面积的电磁场能量，而 $-\frac{dW}{dt}$ 表示该体积的电磁场能量减少率。故(1.17)式说明：体积 V 内电磁场能量的减少率等于该体积内电磁场能量的消耗功率和流出该体积表面积的电磁场功率，这正是能量守恒定律在电动力学中的表现形式。

在非导电媒质（$\boldsymbol{J}=0$）中，能量守恒定律能写成不可压缩液体中流体动力学的连续方程形式。由高斯定理——

$$\oint \boldsymbol{S}\cdot d\boldsymbol{s}=\int_V\nabla\cdot\boldsymbol{S}dV$$

因此，(1.16)式可写成

$$\frac{d}{dt}\int WdV+\int\nabla\cdot\boldsymbol{S}dV=\int\left(\frac{\partial W}{\partial t}+\nabla\cdot\boldsymbol{S}\right)dV=0$$

故有形式

$$\frac{\partial W}{\partial t}+\nabla\cdot\boldsymbol{S}=0 \qquad (1.18)$$