

INTRODUCTION
TO
PHYSICAL
OPTICS

物理光学导论

雷肇棣 编著

电子科技大学出版社

物理光学导论

雷肇棣 编著

电子科技大学出版社

• 1993 •

95年12月13日

¥ 12.00
4-650-617.

[川]新登字 016 号

物理光学导论

雷肇棟 编著

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

电子科技大学出版社印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.0625 字数 350 千字

版次 1993 年 12 月第一版 印次 1993 年 12 月第一次印刷

印数 1-1500 册

中国标准书号 ISBN 7-81016-935-1/O·27

定价:12 元

内 容 简 介

本书从麦克斯韦电磁理论出发,系统地阐述了光波作为一种电磁波的基本性质,并在此基础上较详细地讨论了光的干涉现象和衍射现象以及光波在晶体中的传播规律。对于光的吸收、色散、散射等光波与物质相互作用现象,给出了一些重要结论。

该书物理概念清楚、准确,数学推导严密,逻辑性、系统性强,语言流畅精炼,重点突出,与实际应用联系较紧密。适合于从事光学和激光技术工作的科研人员、大专院校教师、研究生和高年级学生参考。

INTRODUCTION TO PHYSICAL OPTICS

序

物理光学是从光的波动性出发来研究光在传播过程中所发生的各种现象,因此也称为波动光学。物理光学或波动光学虽然比几何光学要复杂麻烦,但能解决更多的光学问题,而且更精确。

物理光学的基础早为玻恩和沃尔夫在《光学原理》这一经典巨著中所奠定。不过,这部著作的篇幅相当大,有些章节对一般读者来说也较难读。因而,在我国,看来还需要一本用中文写的不太难读的物理光学基础书籍。

《物理光学导论》一书现由电子科技大学出版社出版,恰恰满足了上述的需要。该书在不很大的篇幅内系统地、较为全面地描述了光波的基本性质,干涉理论,衍射理论,晶体光学和光的吸收、色散和散射。

该书著者雷肇棟教授曾在电子科技大学(原成都电讯工程学院)讲授物理光学多年。这是一所电子学和激光技术都很强的高等学府。

雷肇棟教授积累了丰富的教学经验和课程教材,用流畅的文字和理论紧密联系实际的观点写出了《物理光学导论》这本书,适合我国广大的从事光学和激光技术的科研人员、大专院校教师、研究生和高年级学生,作为教材或参考书。可以预期,《物理光学导论》一书的出版将对我国广大的科技与教学人员有所裨益。

中国科学院学部委员
上海科技大学名誉校长
黄宏嘉

前 言

《物理光学导论》是根据作者多年在电子科技大学(原成都电讯工程学院)光电子技术系讲授物理光学课程的讲稿整理而成的。全书共分五章:第一章,光波的基本性质;第二章,干涉理论,第三章,衍射理论;第四章,晶体光学;第五章,吸收、色散和散射。

第一章首先从麦克斯韦电磁理论出发,阐明了光波作为一种电磁波的基本性质,讨论了光波在分界面上的反射、折射、振幅和相位变化,偏振等问题以及多普勒效应等。作为光的波动性的两大特点:光的干涉现象和光的衍射现象,在第二、三章中进行较详细的讨论。在第二章干涉理论中,着重讨论了在激光技术中应用相当广泛的法卜里-珀罗干涉仪,并对光波的时间相干性、空间相干性以及薄膜光学等作了一般介绍。在第三章衍射理论中,对夫琅和费衍射和费涅耳衍射这两大类衍射现象进行了讨论,其中圆孔衍射,衍射光栅及波带板等和实际应用紧密相关。光波在晶体中的传播问题相当复杂,它又和激光技术关系密切,第四章从光的电磁理论出发较系统详细地讨论了这一问题。在第四章晶体光学中介绍了波法线椭球等一系列重要概念,对晶体双折射,光波通过晶片产生的干涉,晶体的旋光性,磁光效应,电光效应等作了基础性的讨论,并给出一些较形象的图形。读者在获得这些基础知识后将有能力阅读有关的书籍和文献。第五章讨论光波与物质的相互作用,给出了有关光的吸收、色散、散射等的一些重要结论。光与物质的相互作用问题,应当用量子力学去解决更为理想,但这已超出本书的范围,有兴趣的读者可阅读其它书籍。

作者有幸在电子科技大学工作一段时间,这是令人难忘的。特别是在讲授物理光学时,深受历届同学们的欢迎。每当讲授完后,不少同学真诚希望将讲稿整理成书。这使作者一方面很受鼓舞,一方面又

感到内疚。因为,同学们基本上是依靠笔记在进行学习。我深感缺少一本适合我国学生实际水平的、深浅适度的、系统性较强的物理光学教材,因此决心将其整理出版。

现在,《物理光学导论》终于出版了。在这里,首先要感谢电子科技大学前光电子技术系主任裘明信教授和刘树杞教授,没有他们的关怀,作者是不可能写本书的。刘树杞教授还亲自审阅了部分书稿,提出了宝贵意见。同时,要感谢李子琴副教授,廖云讲师在教学过程中给予的合作和支持。感谢历届听课的同学们,他们提出的疑问加深了作者的思考。作者还非常感谢西南技术物理研究所所长杨庆俊研究员、副所长古鸿仁研究员、副所长陈亦庆研究员以及封鸿渊研究员和其他同事们所给予的热情鼓励 and 大力支持。另外,作者又利用近年在西南技术物理研究所从事激光及其应用研究工作的经验,使书稿内容得以进一步充实完善。电子科技大学叶玉堂副教授最后审阅了全书,并提出不少宝贵意见,在此作者一并表示衷心的感谢。最后,作者要特别感谢中国科学院学部委员、上海科技大学名誉校长、我国著名学者黄宏嘉教授在百忙中亲自拨冗为本书作序,言简意赅,对物理光学作了高度概括。

由于作者学识有限,疏漏、不妥乃至错误之处在所难免,恳请读者指正,不胜感激!

雷肇棟

1993.11.6 成都

目 录

第一章 光波的基本性质

§ 1-1 电磁场基本方程	1
一、麦克斯韦方程组	1
二、物质方程	2
三、电磁场的能量定律和玻印廷矢量	3
四、波动方程和光速	5
§ 1-2 标量波	8
一、平面波	8
二、球面波	9
三、简谐平面波	10
四、相速度和群速度	15
§ 1-3 矢量波	19
一、一般平面电磁波	20
二、简谐平面电磁波	24
§ 1-4 平面波的反射和折射	34
一、电磁场的边界条件	34
二、反射定律和折射定律	36
三、费涅耳公式	41
四、反射率和透射率,反射和折射时的偏振	50
五、全反射	61
§ 1-5 多普勒效应	67
一、多普勒效应	67
二、光学多普勒效应	72
三、关于洛伦兹变换的推导	78
四、关于相对论角度变换公式	81

第二章 光的干涉

§ 2-1 两单色波的干涉	84
---------------------	----

§ 2-2 双光束干涉:分波面干涉	89
一、双缝干涉	89
二、几种其它的分波阵面干涉装置	91
§ 2-3 双光束干涉:分振幅干涉	94
一、等倾干涉	94
二、等厚干涉	100
三、迈克尔逊干涉仪	106
§ 2-4 驻波	108
§ 2-5 相干性:时间相干性和空间相干性	114
一、时间相干性	115
二、空间相干性	122
§ 2-6 多光束干涉	126
§ 2-7 法布里-珀罗干涉仪	136
§ 2-8 光学薄膜	157
一、单层光学薄膜	158
二、 $\lambda/4$ 多层高反射膜	164
三、干涉滤光片	167

第三章 衍射理论

§ 3-1 惠更斯-费涅耳原理	171
§ 3-2 夫琅和费单缝衍射	177
§ 3-3 夫琅和费圆孔衍射	185
一、夫琅和费圆孔衍射的光强分布	186
二、理想光学系统的分辨本领	193
§ 3-4 夫琅和费多缝衍射	196
§ 3-5 衍射光栅	206
一、平面光栅	206
二、闪耀光栅	212
三、凹面光栅	215
四、正弦光栅	215
五、超声光栅	225

六、三维空间光栅	234
§ 3-6 费涅耳衍射	235
一、费涅耳圆孔衍射	235
二、费涅耳圆屏衍射	243
三、费涅耳波带板	244
四、费涅耳直边衍射	248

第四章 晶体光学

§ 4-1 各向异性介质的介电张量	259
一、介电张量的概念	259
二、能量守恒定律和介电张量的对称性	262
三、主介电轴、主介电常数和主折射率	265
§ 4-2 单色平面波在各向异性介质中的结构	267
一、相速度和光线速度	267
二、在晶体中作为光传播的费涅耳公式	273
§ 4-3 决定传播速度和振动方向的几何结构	279
一、波法线椭球(或折射率椭球)	279
二、法线面和光线面	287
§ 4-4 单轴晶体和双轴晶体的光学性质	291
一、晶体的光学分类	291
二、单轴晶体中光的传播	292
三、双轴晶体中光的传播	296
§ 4-5 平面波在晶体表面上的折射和反射	304
一、双折射	304
二、折射定律	307
三、决定折射光线方向的惠更斯作图法	309
四、双反射	314
五、全反射	316
§ 4-6 产生和分析偏振光的仪器	319
一、起偏器和检偏器	320
二、补偿器	325
§ 4-7 带晶片的干涉	331

一、起偏器和检偏器之间晶片产生的干涉现象	332
二、等迴转线和等色线	337
三、斜入射时的相位差 δ	339
四、单轴晶片干涉花样	342
五、双轴晶片干涉花样	348
§ 4-8 旋光性	353
一、旋光现象的特点	353
二、关于旋光现象的解释	355
§ 4-9 磁光效应	359
§ 4-10 电光效应	
一、克尔效应和普克尔效应	361
二、电光张量	362
三、KDP 晶体的电光张量	365
四、纵向普克尔效应和横向普克尔效应	366
五、电光延迟	369
六、电光幅度调制	371

第五章 光的吸收、色散和散射

§ 5-1 光的吸收	374
§ 5-2 色散	377
一、色散的概念	377
二、色散的观察	378
三、正常色散	379
四、反常色散	380
§ 5-3 色散现象的解释	382
§ 5-4 散射	394
一、光的散射	394
二、瑞利散射	396
三、米氏散射	403
四、喇曼散射	404
五、布里渊散射	407

参考文献

第一章 光波的基本性质

§ 1-1 电磁场基本方程

一、麦克斯韦方程组

光的电磁理论认为,光波是一种电磁波。和所有的电磁波一样,光波也遵从描述电磁场的麦克斯韦方程组,即

$$\nabla \times H = j + \dot{D} \quad (1-1-1)$$

$$\nabla \times E = -\dot{B} \quad (1-1-2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1-1-3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1-1-4)$$

其中

$$\dot{D} = \frac{\partial D}{\partial t} \quad \dot{B} = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-1-5)$$

∇ 为哈密顿算符,它在直角坐标系下的表达式为

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (1-1-6)$$

而 E 是电场强度, D 是电位移矢量, B 是磁感应强度, H 是磁场强度, j 是电流密度, ρ 是电荷密度。

方程(1-1-1)实际上是全电流定律或安培环路定律的微分形式,说明传导电流或随时间变化的电场要产生磁场;式(1-1-2)是电磁感应定律的微分形式,说明随时间变化的磁场要产生电场,而静止的单个电荷所产生的静电场是无旋场;式(1-1-3)说明空间无磁荷存在,磁力线无头无尾,总是闭合的;式(1-1-4)是高斯定律的微分形式,它

也可以作为电荷密度 ρ 的定义方程。

需要说明的是,虽然哈密顿算符 ∇ 的表达形式和坐标系的选取有关,但麦克斯韦方程组是和坐标系的选取无关的;另外,麦克斯韦方程组的形式是和所采用的单位制有关的,本书采用国际单位制,即 SI 制;再有,麦克斯韦方程组的微分形式只在介质的物理性质连续的区域成立,在不连续的分界面上,应采用麦克斯韦方程组的积分形式。利用它的积分形式可以得到不连续界面上的边界条件。因此,在不连续分界面上,应由不连续界面上的边界条件来代替。

二、物质方程

麦克斯韦方程组中五个基本量 E 、 H 、 B 、 D 和 j 在介质中还有如下关系:

$$j = \sigma E \quad (1-1-7)$$

$$D = \epsilon E \quad (1-1-8)$$

$$B = \mu H \quad (1-1-9)$$

其中

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1-1-10)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1-1-11)$$

方程式(1-1-7)~式(1-1-9)反映了介质中各基本量之间的关系,叫做物质方程组。 σ 叫电导率, ϵ 叫介电常数, ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_r 是相对介电常数, μ 叫磁导率, μ_0 是真空磁导率, μ_r 是相对磁导率。

$$\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2 \quad (1-1-12)$$

而

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$$

为真空中的光速。

σ 、 ϵ 和 μ ,或更严格地说, σ 、 ϵ_r 和 μ_r 反映了介质的性质,是和介质本身性质有关的常数。对于导体, $\sigma \neq 0$,而对于绝缘体 $\sigma = 0$;对于非铁磁物质, $\mu_r \approx 1$,因此 $\mu \approx \mu_0$;对于各向同性介质, ϵ_r 是一标量,而在各向异性介质中,比如晶体中, ϵ_r 是一张量,此时式(1-1-8)中的 D 和 E 之间有更复杂的关系,我们将在晶体光学中进行讨论。本书的前一

部分讨论各向同性介质中的光学现象,并假定介质是透明的,均匀的。透明、均匀、各向同性是三个完全不同的概念,不能彼此混淆。

三、电磁场的能量定律和坡印廷矢量

光的电磁理论认为,光的强度就是电磁场的能量通量,因此,我们现在由麦克斯韦方程组和物质方程组出发来讨论电磁场的能量定律。假设介质是绝缘体,即 $\sigma=0$,由式(1-1-7), $j=0$ 。因此,麦克斯韦方程组中式(1-1-1)变为

$$\nabla \times H = \dot{D} \quad (1-1-13)$$

由 E 点乘式(1-1-13)减去 H 点乘式(1-1-2)得

$$E \cdot (\nabla \times H) - H \cdot (\nabla \times E) = E \cdot \dot{D} + H \cdot \dot{B} \quad (1-1-14)$$

利用矢量恒等式

$$\nabla \cdot (a \times b) = b \cdot (\nabla \times a) - a \cdot (\nabla \times b)$$

则式(1-1-14)可写为

$$E \cdot \dot{D} + H \cdot \dot{B} + \nabla \cdot (E \times H) = 0 \quad (1-1-15)$$

利用物质方程式(1-1-8),则

$$\begin{aligned} E \cdot \dot{D} &= E \cdot \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon E) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon E^2) \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} E \cdot D \right) = \frac{\partial}{\partial t} w_e \end{aligned} \quad (1-1-16)$$

其中

$$w_e = \frac{1}{2} E \cdot D \quad (1-1-17)$$

为所讨论点的电能密度。类似地

$$H \cdot \dot{B} = \frac{\partial}{\partial t} w_m \quad (1-1-18)$$

而

$$w_m = \frac{1}{2} H \cdot B \quad (1-1-19)$$

为磁能密度。

我们定义矢量 S 为

$$S = E \times H \quad (1-1-20)$$

S 称为玻印廷矢量,它代表单位时间内通过垂直于 E 和 H 方向上单位面积的能量,即能流密度或能量通量。

由式(1-1-16)、式(1-1-18)和式(1-1-20),可将式(1-1-15)写为

$$\frac{\partial}{\partial t}(w_e + w_m) + \nabla \cdot S = 0$$

或者

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot S = 0 \quad (1-1-21)$$

其中

$$\begin{aligned} w &= w_e + w_m \\ &= \frac{1}{2}E \cdot D + \frac{1}{2}H \cdot B \end{aligned} \quad (1-1-22)$$

为总的电磁能密度。式(1-1-21)是电磁场能量定律的微分形式,它和流体力学中的连续性方程有完全相同的形式。为了更清楚地说明能量定律的物理意义,将式(1-1-2)对任一体积 V 求积分

$$\int_V \frac{\partial w}{\partial t} dv + \int_V \nabla \cdot S dv = 0 \quad (1-1-23)$$

利用高斯定律

$$\int_V \nabla \cdot A dv = \int_{\Sigma} A \cdot n d\sigma$$

其中 A 是任一矢量, Σ 是包围体积 V 的整个表面, $d\sigma$ 是 Σ 上的面积元, n 是 $d\sigma$ 的单位法线矢量,其方向由体积 V 内指向外为正。因此式(1-1-23)变成

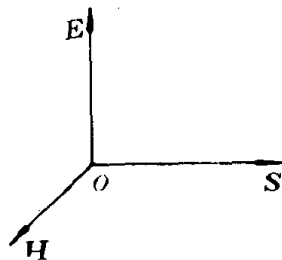
$$-\frac{\partial W}{\partial t} = \int_{\Sigma} S \cdot n d\sigma \quad (1-1-24)$$

其中

$$W = \int_V w dv \quad (1-1-25)$$

为体积 V 内电磁场的总能量。式(1-1-24)就是电磁场能量定律的数

学积分表达式,它说明体积 V 中单位时间内总电磁能量的减少等于从 V 的整个表面 Σ 流出去的电磁能量,因此,它实际上是能量守恒定律在电磁场中的具体表达式。



需要强调的是,玻印廷矢量 S 在光学中是一个十分重要的物理量,它的大小表示光的强度,它的方向代表光的能量传播方向,即光线方向。 S 和矢量 E 、 H 的关系如图 1-1 所示,三者两两正交,且 E 、 H 、 S 构成右手螺旋系。

四、波动方程和光速

麦克斯韦方程组是用联立方程组的形式给出各场矢量之间的关系,即 E 、 D 、 B 、 H 之间的关系。现在研究每一个场矢量所必须满足的微分方程,即每一个场矢量本身(比如电场强度 E)随时间和空间变化的规律。

为简单起见,我们假设介质是均均的,因此 ϵ 、 μ 和坐标 x 、 y 、 z 无关;另外,假设介质中无电荷及电流,因此 $\rho=0$, $j=0$ 。在这样的假设条件下,麦克斯韦方程组(1-1-1)至(1-1-4)简化为

$$\nabla \times H = \dot{D}$$

$$\nabla \times E = -\dot{B}$$

$$\nabla \cdot D = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

进一步利用物质方程(1-1-8)、(1-1-9),则

$$\nabla \times H = \epsilon \dot{E} \quad (1-1-26a)$$

$$\nabla \times E = -\mu \dot{H} \quad (1-1-26b)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (1-1-26c)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (1-1-26d)$$

根据矢量恒等式

$$\nabla \times \nabla \times a = \nabla(\nabla \cdot a) - \nabla^2 a \quad (1-1-27)$$

并注意到 $\nabla \cdot E = 0$, 因此

$$\nabla \times \nabla \times E = -\nabla^2 E \quad (1-1-28)$$

其中, ∇^2 为拉普拉斯算符, 它在直角坐标系下的表达式为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1-1-29)$$

对式(1-1-26b)两边取旋度

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu \nabla \times \dot{H} \quad (1-1-30)$$

和式(1-1-28)比较, 得

$$\nabla^2 E - \mu \nabla \times \dot{H} = 0 \quad (1-1-31)$$

组由式(1-1-26a)

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times H) \\ &= \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \dot{E}) = \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \end{aligned}$$

因此

$$\nabla^2 E - \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1-32)$$

同理, 对于场矢量 H 也有

$$\nabla^2 H - \mu \epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1-33)$$

式(1-1-32)、式(1-1-33)是标准的微分波动方程形式, 它说明电场 E , 磁场 H 都是以波的形式向前传播, 其速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (1-1-34)$$

由于光波就是电磁波, 因此 v 实际上就是光波在介质中的传播速度。