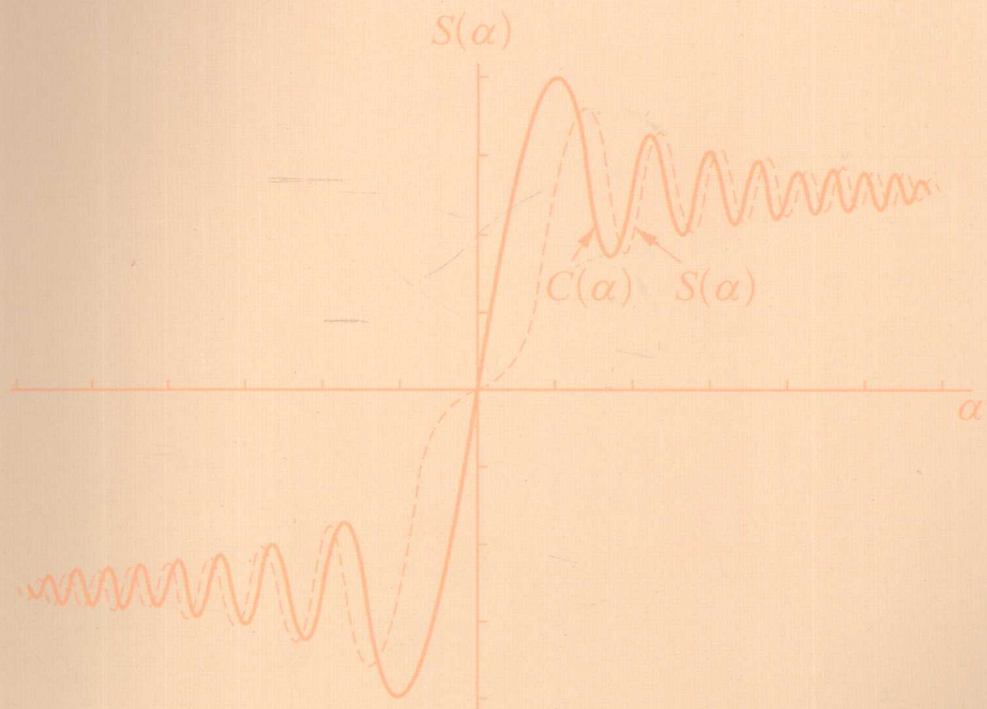


中国科学技术大学 **精品** 教材

高等物理光学

第2版

► 羊国光 宋菲君 编著



中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学精品教材

高等物理光学

GAODENG WULI GUANGXUE

第2版

羊国光 宋菲君 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书以现代光学的基本观念和处理方法来讨论传统的物理光学现象,并用傅里叶光学的基本概念贯穿全书.本书共分十三章,内容涉及光的干涉、衍射、偏振,部分相干性理论,光的偏振,晶体光学,导波光学和高斯光学.在衍射理论方面,对菲涅耳与夫琅和费衍射作了较详细的讨论,并对近年来新出现的无衍射光束作了介绍.本书对晶体光学的理论以及电光、磁光和声光效应作了较为深入的分析.还对应用广泛的导波光学和高斯光束光学的理论基础作了较详细的讨论.

“高等物理光学”是综合性和工业性大学近代光学、激光、光电子学、信息光学和工程光学等专业研究生和大学高年级学生的必修课程.本书的主要读者对象是需要掌握物理光学理论的研究生,经摘选后本书可用作大学高年级有关课程的教材,也可供科技工作者参考.

图书在版编目(CIP)数据

高等物理光学/羊国光,宋菲君编著. —2版. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2008.9

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02175-6

I. 高… II. ①羊… ②宋… III. 物理光学—高等学校—教材 IV. O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 091779 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026

网址: <http://press.ustc.edu.cn>

安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司

全国新华书店经销

开本: 710×960 1/16 印张: 24.25 插页: 2 字数: 459 千

1991 年 7 月第 1 版 2008 年 9 月第 2 版 2008 年 9 月第 2 次印刷

印数: 3001—6000 册

定价: 38.00 元

总 序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

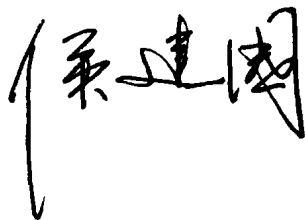
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学

内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校 50 周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。



2008 年 8 月

修订版前言

光学是研究光的现象、光的本性、光与物质相互作用的科学,是物理学的一个重要分支.光学是一门古老而又年轻的学科.之所以说古老,光学作为一门科学是在十七世纪从牛顿开始的.而现代光学的发展起源于爱因斯坦在 20 世纪初提出的光量子理论.之所以说年轻,是由于在 20 世纪后 50 年,在光学领域奇迹般层出不穷的研究成果,形成了本领域和交叉领域许多重要的新分支,如激光、全息照相、光纤、傅里叶光学、非线性光学、量子光学以及近几年出现的量子计算,等等.自 20 世纪 60 年代激光问世后,光学有了飞速的发展,形成了现代光学.可以说,光学是物理学中最活跃,而且有着广泛应用的学科.

光学通常分为以下三部分:

(一) 几何光学:以光的直线传播规律为基础,研究各种光学现象和光学仪器的理论.

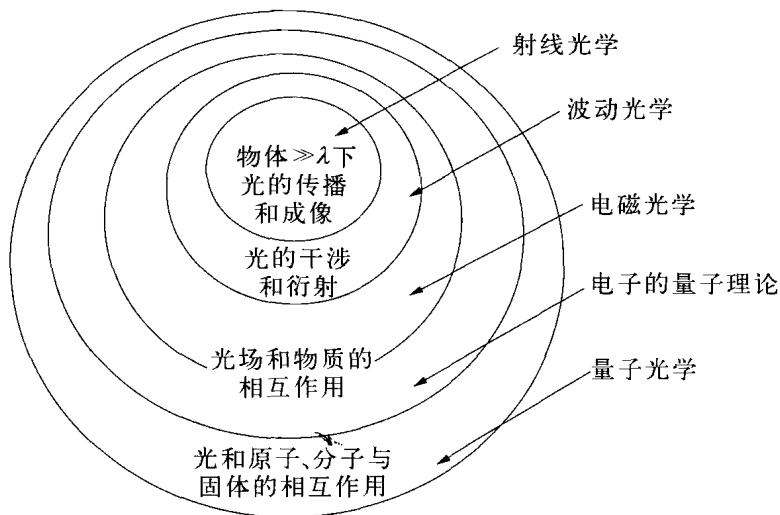
(二) 波动光学:研究光的电磁性质和传播规律,特别是干涉、衍射、偏振的理论和应用.

(三) 量子光学:以光的量子理论为基础,研究光与物质相互作用的规律.

它们之间的关系可以用以下的插图表示.本书侧重于讨论波动光学(即物理光学),将不涉及其他两部分的内容.

本书《高等物理光学》已经出版 16 年了.我们感到欣慰的是,尽管第一版的书早已脱销,但不少大学,包括一些重点大学仍在采用这本书作为光学专业的研究生教材以及博士生资格考试的指定参考书,受到读者的欢迎.为了满足广大读者的需要,我们认为有必要对本书的内容作更新,反映十几年来波动光学的发展,并对原书中的一些错误和不当之处进行订正.在中国科技大学出版社的大力支持下,我们决定对《高等物理光学》出修订版.

本书是光学专业研究生的基础课教材,我们认为本书应该侧重于基础物理概念的讨论.因此,在这个修订版中,我们删节了一些过于专门的应用领域的内容,加强了基本物理概念的讨论.



以下是新版所作的修订：

- (1) 在第 1 章中加了一节——关于光的光子本性。
- (2) 由于傅里叶分析的方法在光学中的重要性，我们把傅里叶变换放到第 2 章进行讨论，作为本书的基础。
- (3) 增加了对菲涅耳衍射的讨论，将“菲涅耳衍射”单列成一章。
- (4) 取消了原来涉及光学工程应用的第 7 章“光学成像系统的频谱分析”，把相关的内容变成第 7 章中的一节。
- (5) 更新了“衍射特论”一章的内容。例如增加了“无衍射光束——Bessel 光束”以及“光学成像系统的分辨率”等节。
- (6) 把有关偏振的内容扩展成为第 9 章“光的偏振效应和琼斯矩阵表示”。
- (7) 较大幅度地改写了原书“导波光学”，作为本书第 12 章。
- (8) 新增加了“高斯光束光学”一章(第 13 章)。

本书的主要参考书目是：

- [1] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999; 珀恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理[M]. 杨葭菽, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. 3rd ed. San Francisco: McGraw-Hill, 2006.

作者的话

高等物理光学是综合性大学和高等师范学院近代光学、激光、光电子等专业研究生和大学高年级学生的必修课程.同时,它又是从事光学和光电子领域科学研究和产品开发的科技人员必需的理论基础.本书的主要读者对象正是需要掌握物理光学理论的研究生,经摘选后本书可用作大学高年级有关课程的教材,也可供科技工作者参考.

在编著过程中,我们力求以现代光学的基本观念和处理方法来讨论传统的光学现象.例如,本书用平面波展开法来研究光的衍射现象,用平面波角谱观念来处理各种光学课题等,还用系统理论来分析光学成像过程,而不局限于用光波衍射理论.而且本书一开始就引入傅里叶分析方法,以使傅里叶光学即信息光学的基本概念贯穿全书有关章节.

在选材方面,除了与傅里叶光学有关的内容外,还对部分相干光理论、导波光学及统计光学基础作了较为详细的论述,将有助于读者了解近代光学中这些领域的基本理论和处理方法.晶体光学过去曾是高等光学的主要内容,近年来一般院校重点讲授傅里叶光学,晶体光学只在普通物理课程中作介绍.我们认为这部分内容仍然是许多光学课程的理论基础,因此本书对晶体光学的理论作了较为深入的分析.近年来,电光、磁光和声光效应已在科学技术的各个领域获得了广泛的应用,本书对这些效应的理论基础及典型应用也作了较详细的介绍.

物理光学课程中常常用到一些数学—物理的处理方法,学习、掌握这些方法,无疑对于加深物理概念的理解是有益的,对于科技人员解决科研和开发中的物理光学课程也会有所帮助.因此,本书在各有关章节中除傅里叶分析以外,还介绍了隐相法、最速下降法、在零级本征函数空间求近似本征函数法(即简并态微扰法)、希尔伯特变换、求解耦合模方程的常数变易法、折射率渐变波导内波动方程的W. K. B解法、求解散斑效应—一阶统计的近独立子系最可几分布法等.

目 次

总序	(i)
修订版前言	(iii)
作者的话	(v)
第 1 章 光波和光子以及光场的表示	(1)
1.1 光的波动性描述——麦克斯韦方程及标量波	(1)
1.2 平面波、球面波和圆柱面波	(5)
1.3 相速度和群速度	(12)
1.4 光的光子本性	(16)
第 2 章 光场的傅里叶分析	(21)
2.1 傅里叶变换	(21)
2.2 时间信号的傅里叶分析	(29)
2.3 二维傅里叶变换和空间频率	(32)
2.4 平面波的角谱	(35)
2.5 消逝波	(39)
第 3 章 干涉理论基础	(44)
3.1 两个单色波的干涉	(45)
3.2 多色光的干涉	(50)
3.3 扩展光源的干涉	(59)
3.4 干涉条纹的定域	(63)
3.5 相干条件	(67)
第 4 章 标量衍射理论	(69)
4.1 引言	(69)
4.2 平面波角谱的衍射理论	(70)
4.3 稳相法和最快速下降法	(74)
4.4 由基于平面波的衍射积分推导基于球面波的基尔霍夫衍射积分	(79)
4.5 巴比涅原理	(81)

4.6	菲涅耳近似与夫琅和费近似	(82)
第 5 章	夫琅和费衍射	(87)
5.1	透镜的位相变换与夫琅和费衍射的观察	(87)
5.2	矩孔和圆孔的夫琅和费衍射	(90)
5.3	其他形状孔的衍射	(96)
5.4	双缝和多缝的夫琅和费衍射	(99)
5.5	光栅的夫琅和费衍射	(103)
第 6 章	菲涅耳衍射	(114)
6.1	菲涅耳近似下角谱的传播和菲涅耳积分	(114)
6.2	矩孔的非涅耳衍射	(118)
6.3	光栅的非涅耳衍射	(124)
6.4	Talbot 效应——周期图形的非涅耳衍射	(126)
6.5	圆孔的非涅耳衍射	(129)
第 7 章	衍射特论	(132)
7.1	光学成像系统的频谱分析	(132)
7.2	光学成像系统的分辨率	(139)
7.3	焦点附近的光场分布	(145)
7.4	无衍射光束——Bessel 光束	(150)
7.5	全息照相术	(156)
第 8 章	部分相干光理论	(162)
8.1	相干性的基本概念	(162)
8.2	多色场的解析信号表示	(164)
8.3	互相干函数	(168)
8.4	互相干函数的极限形式	(174)
8.5	时间相干性	(180)
8.6	互相干函数的传播	(186)
8.7	空间相干性和范西特-泽尼克定理	(190)
8.8	部分相干光照明的孔径的衍射	(198)
8.9	部分相干光的成像	(202)
第 9 章	光的偏振效应和琼斯矩阵表示	(207)
9.1	光波偏振态的琼斯矩阵表示	(208)
9.2	基本偏振器件的变换矩阵	(213)
9.3	折射、反射的偏振效应和相位异常	(217)

9.4 散射的偏振效应	(223)
9.5 准单色光的偏振效应	(227)
第 10 章 晶体光学	(229)
10.1 介电张量	(229)
10.2 平面波在晶体中的传播	(232)
10.3 折射率椭球和晶体偏振化空间	(239)
10.4 光波在单轴晶体中的传播	(241)
10.5 双折射现象	(247)
10.6 光学活性(自然旋光性)	(251)
第 11 章 光波的调制	(262)
11.1 泡克耳斯效应(线性电光效应)和电光调制	(262)
11.2 克尔效应(二次电光效应)	(273)
11.3 法拉第效应(磁光效应)	(276)
11.4 声光效应	(280)
11.5 布拉格衍射的耦合模解	(285)
第 12 章 导波光学	(295)
12.1 引言	(295)
12.2 光线光学近似和全反射相移修正	(297)
12.3 平面光波导的电磁理论	(300)
12.4 矩形光波导	(310)
12.5 用耦合模方法求解波导间的相互作用	(315)
12.6 光波在光纤中的传播	(323)
12.7 弱导引近似和线偏振模(LP 模)	(329)
12.8 渐折射率分布平面波导	(337)
第 13 章 高斯光束光学	(347)
13.1 光束的概念	(347)
13.2 广义测不准关系和空间带宽积	(348)
13.3 波动方程的近轴解和高斯光束的特性	(352)
13.4 高斯光束通过透镜系统的变换	(359)
13.5 模式匹配和几何光学近似	(362)
13.6 厄米-高斯光束	(368)
附录 A13 高斯光束基模表达式的推导	(371)

第 1 章 光波和光子以及光场的表示

我们知道,光具有波动性和粒子性.在讨论光的传播现象时,光表现出波动性.就光的波动性而言,光场是在一定频率范围内的电磁场.因此,光学现象可以用麦克斯韦方程来描述.对于通常遇到的光学问题,例如光学仪器中的干涉和衍射等问题,用这种经典理论来处理是足够的.而在观察光与物质相互作用时,光表现出粒子性.这要用量子力学或量子电动力学来处理.光以光子的形式出现.

在物理光学中,主要讨论光的传播现象.因此,物理光学也称为波动光学,因为物理光学涉及光的波动性.我们在本章中以麦克斯韦波动方程作为讨论的出发点,先讨论光的波动性.在本章的最后给出光子的特性的讨论.

1.1 光的波动性描述 ——麦克斯韦方程及标量波

1.1.1 麦克斯韦方程及标量波

众所周知,麦克斯韦方程在 MKS 单位制下为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= 4\pi\rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

这里 \mathbf{E} 为电场矢量, \mathbf{H} 为磁场矢量, \mathbf{D} 为电位移矢量, \mathbf{B} 为磁感应矢量, \mathbf{J} 为电流密度矢量以及 ρ 为电荷密度. 以上的麦克斯韦方程把五个基本的物理量 \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{D} , \mathbf{B} 和 \mathbf{J} 联系起来. 为了在给定的电流和电荷分布的情况下, 唯一地决定电磁场矢量, 我们需要有描述在场作用下物质行为的关系. 这些关系就是以下的物质方程:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.2)$$

其中 ϵ 为介电常数, μ 为磁导率, σ 为电导率.

在涉及电磁波遇到宏观物体的传播行为时, 或光场通过的介质的光学参数在一个或多个面处有突变的情况下, 需要利用边界条件来求解.

当不存在自由电荷和电流的情况下, 麦克斯韦方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) &= 0, \\ \nabla \cdot (\mu \mathbf{H}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.3)$$

其中符号 \times 为矢量积, \cdot 为标量积. $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$, 这里 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为在 x, y, z 方向上的单位矢量.

对(1.1.1)式中第一式的左、右边进行 $\nabla \times$ 的矢量积运算, 并利用矢量积运算的恒等式:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E},$$

假定传播介质是线性的, 各向同性的和均匀的, 那么麦克斯韦方程通过推导可得到波动方程:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \mathbf{H} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.4)$$

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; n 是介质的折射率, 它的定义是

$$n = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1/2};$$

ϵ_0 是真空的介电常数; c 是电磁波在真空中的传播速度,其大小为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}};$$

μ_0 为真空的磁导率,而光在介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

可以将(1.1.4)式写成分量形式,即

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 E_i - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 H_i - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_i}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.5)$$

其中 $i = 1, 2, 3$. 在线性、各向同性和均匀介质中,电场和磁场的的所有分量具有完全相同的行为. 因此,它们的属性可以用以下一个标量波动方程

$$\nabla^2 U - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1.6)$$

来描述,这里把 U 理解为电场或磁场的的一个分量. 我们称(1.1.6)式为标量波动方程.

以上方程用于光频段时,需要指出几点:

(1) 联立方程(1.1.5)并不表明矢量场完全可按照一个标量来处理. 尽管(1.1.5)式是由三个标量波动方程组成,但是其中每一个方程的解并不能表示矢量场 \mathbf{E} , 只有将 E_x , E_y 和 E_z 都解出来,才能由它们构成 \mathbf{E} . 假设在所讨论的问题中, \mathbf{E} 只含有一个分量(如线偏振光的情况). 那么,矢量场的问题就可以完全化成标量波来处理了. 电磁场的标量理论只是一种近似. 在许多情况下,它可以给出正确的结果. 实际上,在仪器光学中标量理论往往可以给出足够精确的结果,也就是说,可以近似地只对电场 \mathbf{E} 的一个分量进行处理.

(2) 光从真空折射到某一介质中时的折射率为 $n = c/v$. 将它与(1.1.4)式比较可得

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}. \quad (1.1.7)$$

