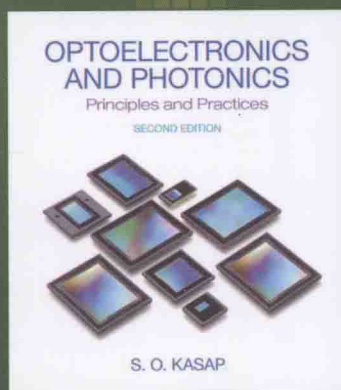


国外电子与通信教材系列

PEARSON

光电子学与光子学 ——原理与实践（第二版）

Optoelectronics and Photonics
Principles and Practices, Second Edition



[英] S. O. Kasap 著

罗风光 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

光电子学与光子学 ——原理与实践

(第二版)

Optoelectronics and Photonics
Principles and Practices

Second Edition

[英] S. O. Kasap 著

罗风光 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是光电子和光子学领域的经典教材,主要内容包括光的波动性、介质波导与光纤、半导体学与发光二极管、受激辐射器件——光放大器和激光器、光电探测器和图像传感器、光的偏振和调制等。每章除了基本内容外,还给出了一些附加专题来适当介绍先进技术和产品化光电子器件的实例,扩大和深化读者对基本内容的理解。本书力求采用尽可能少的数学推导而强调通过物理概念来说明原理,提供了许多例题和习题,使得基本概念与实际器件相联系。

本书可作为光电子科学与技术、电子科学与技术、物理电子学专业本科生的教材或研究生的教学参考书,同时也适合从事相关行业的科技工作者和教师阅读。

Authorized translation from the English language edition, entitled Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices, Second Edition, 9780132151498 by S. O. Kasap, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013 Pearson Higher Education Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2016.

本书中文简体字版专有版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2013-2678

图书在版编目(CIP)数据

光电子学与光子学:原理与实践:第2版/(英)卡萨普(Kasap,S.O.)著;罗风光译. —北京:电子工业出版社,2016.1

书名原文:Optoelectronics and photonics: principles and practices, second edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-24993-8

I. ①光… II. ①卡… ②罗… III. ①光电子学-高等学校-教材 ②光子-高等学校-教材 IV. ①TN201②O572.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第279041号

策划编辑:张小乐

责任编辑:李蕊

印刷:涿州市京南印刷厂

装订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:30 字数:816千字

版次:2016年1月第1版(原著第2版)

印次:2016年1月第1次印刷

定 价:79.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

当今世界信息技术飞速发展,已成为推动社会发展的重要因素。光电子学与光子学作为信息技术的基础,是从事光电子相关领域学习和研究的广大师生和科技工作者必须掌握的一门专业知识;对于光电子学与光子学相关技术的理论研究和器件设计、制造,以及对促进信息技术的发展和应用具有重要的现实意义和理论价值。

本书译自 S. O. Kasap 教授撰写的英文原版经典教材 *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Second Edition。第二版对第一版的内容进行了全新的修订,引入了许多近年来新的实践范例。本书的最大特点是内容丰富,图文并茂,理论与实践紧密结合,深入浅出,避免了烦琐的数学推导,注重物理概念及原理的阐述,读者学习前无须具备麦克斯韦方程组推导的数学知识。同时,本书还给出了大量最新研究应用案例,时代感强。本书的主要内容为:第1章介绍了光的波动性,对光的折射率和色散、群速度和群折射率、斯涅耳折射定律和全反射、时间相干性和空间相干性、波的叠加和干涉及衍射原理等基本概念进行了阐述。第2章简单叙述了介质波导与光纤的色散等基本特性及光纤的制造工艺。第3章为半导体学与发光二极管,对半导体物理学的能带图、半导体的统计分布、直接带隙和间接带隙半导体、 pn 结、异质结、发光二极管(LED)的基本原理和应用等进行了详细介绍。第4章为受激辐射器件——光放大器和激光器,简要介绍了各种光放大器和激光器的工作原理和结构。第5章介绍了各种光电探测器和图像传感器的结构、基本特性和工作原理。第6章为光的偏振与调制,对光的偏振、旋光效应、双折射、液晶显示、电光效应、光调制、非线性光学和二次谐波产生等光学现象和效应进行了阐述。同时在各章后补充部分以选学专题的形式给出了可进一步深入学习的议题。

S. O. Kasap 教授是加拿大萨斯喀彻温大学电气工程系资深教授和加拿大电子材料与器件首席科学家,具有丰富的教学和实践经验。本书受到广大师生和相关科研工作者的好评,同时发行了第二版的国际版,在国际上享有很高的声望。

本书译者罗风光教授在华中科技大学光学与电子信息学院长期从事光电子、光通信领域的科研与教学工作,主持或参与了多项国家973、863、国家自然科学基金等科研项目,承担了本科生、研究生的《光电子学导论》、《半导体物理》、《信息技术导论》、《光通信与光交换技术》、《光网络技术与器件》等课程的教学工作,积累了丰富的教学与实践经验,为本书的翻译奠定了良好的基础。

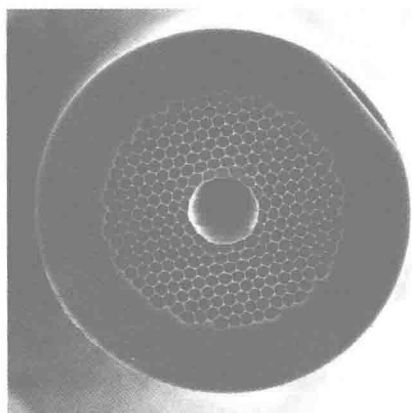
在本书的翻译过程中,得到了博士生杨柳,硕士生贺成、杨东堂、敬泽安、丁露、徐赐坚、李可的大力帮助,特别是硕士生贺成参与了本书的初译、多次修改及审定工作,在此表示衷心的感谢。同时也要感谢我的家人在本书的翻译工作期间给予的无私帮助和理解支持。

由于译者的水平有限,加之时间较为仓促,本书的翻译难免存在错误和不足之处,敬请广大读者指正。

译者
2015年11月

在撰写科技期刊文章时，我们有一个习惯，即工作的完成度越高越好，并能够涵盖所有的方面，不要担心研究进入了死胡同或者描述自己开始的想法有多么糟糕等。因此，我们不能以一种有尊严的心态去发表自己实际上正在从事的工作。

——理查德·费曼(诺贝尔演说 1966)



20 世纪 90 年代，菲利普·罗素在巴斯大学带领着一个科研团队，该团队制作出了光子晶体光纤。细薄的中空毛细管堆积在一起，然后熔凝成一个预成品，如上面左图所示。这种预成品可在高温下拉制成光子晶体光纤。光子晶体光纤在单模下能无限导光，并在各种控制光波的光子应用中有着极好的非线性性能，如可用于产生超连续光谱。(菲利普·罗素教授提供)



20 世纪 70 年代，在康宁公司工作的彼得·舒尔茨、唐纳德·凯克和鲍勃·毛雷尔(上图中自左至右)，首先采用外气相沉积法制作预制棒并生产出低损耗光纤，该方法后来应用于拉制低损耗光纤。(康宁公司提供)

献给带给我欢笑与快乐，并让我每天的生活充满阳光的尼科莱特

前 言

本书的第一版出版于 12 年以前。当时本书作为简明教材供三年制工程学或应用物理学本科学生使用。本书强调定性的解释并主要依赖于直观推导过程。最终结果是, 本书第一版被用于四年制选修课程, 甚至用于研究生光电子课程。因此, 许多在该层次教课的教师迫切需要更好的推导过程, 更加严格、更好的解释, 当然也需要更多的专题与问题。我们不止一次察觉到, 第一版中一些直觉上简单的推理是有问题的, 因此第二版本质上几乎是从头到尾对本书内容进行了全面的修订, 它将更加严谨、更好地阐释问题, 但在数学细节上不会有过多赘述。新版引入了许多新的激动人心的实践范例及大量新的问题。考虑到 12 年间该领域发生的很多变化, 本书也必须完全现代化, 把这些年的研究进展囊括到本科课程中。

第二版中的特点、变化及修订

第二版是完全不同于第一版的修订版, 对于书中内容进行了大量的特性扩充和加强。

- 所有章节都完全重新修订和扩充。
- 所有章节都加入大量光子学领域的现代专题。
- 本书增加了适用于高级课程或者可供两学期使用的选修专题。
- 各章节中加入了更多新的范例和题解, 章节的结尾加入了许多实用的习题, 这些习题涵盖了基本概念到构建更高级的应用。
- 为了更好地阐释概念, 第一版中的图示及插图几乎全部修订和重绘了。
- 为了更明确地传达概念, 第二版增加了大量新的图示说明。
- 为了增加本书的可读性并展示典型的现代光子/光电子器件, 第二版适当插入了很多照片。
- 第一版第 7 章关于太阳能光伏的内容作为一个选修专题合并到新版的第 5 章, 这样可以涉及更多与光子学有关的专题。
- 书中避免了高级、复杂的数学推理, 取而代之的是重点强调概念及工程应用。
- 给出了光子学中有用的和基本的方程并进行了解释, 且应用于范例和习题中, 从而让学生对器件的这些典型值具有更好的理解。
- 应读者要求, 为避免过多重复, 在第二版中尽量避免了很多交叉引用, 从而使各个章节能被跳过。
- 新版更多强调实践及工程范例, 谨慎考虑到大多数大学在本科层次已经开设了各种光子学/光电子学课程。
- 采用本书作为教材的教师广泛使用 PPT 展示教学促进了第二版的发展。PPT 幻灯片使用了多彩的图文演示, 包括附加的彩色图片。附加的幻灯片能突出显示基本的概念和公式, 并提供了大量的范例和题解。老师可以通过与出版商联系来获取本书的 PPT。
- 第二版同样在广泛使用的《教师专用版解决方案手册》中获得帮助, 该手册可通过与出版商联系来获取。

第二版继续作为光电子材料与器件专业系列课程的第一门课程, 可开设成为半学期或者

一学期的课程,适用于电气工程、工程物理、材料科学与工程系大三或者大四本科生。结合选修部分专题,第二版还可以作为研究生阶段的入门教材。通常适用于不了解麦克斯韦方程组的学生。尽管第二版中提及麦克斯韦方程组以让学生有所了解,但麦克斯韦方程组很少涉及原理的推导过程。第二版适用于已有一年或者两年基础物理和现代物理学习基础的学生,学生大致了解几何光学、干涉和衍射等基本概念,而不知道菲涅耳方程及群速度和群折射率的概念。通常光电子学课程开设在半导体器件课程之后,或者两者同时开设。也许在与基本半导体科学相结合的课程中,学生将会接触基本的量子力学概念。

在第二版中,大多数专题首先给出定性解释,从而使读者在数学推导之前理解基本概念。在数学知识方面,我们引入了矢量、复数和偏微分的方法,但没有涉及傅里叶变换。一方面,第二版需要涉及尽可能多的内容。但在另一方面,专业工程认证要求学生能够解决数值问题并能够进行“设计计算”。在编纂本书过程中,我尽量照顾到工程学位认证的要求。但是要解决数值问题,提供设计计算并导出每个方程,又不让课本篇幅扩展到让人无法忍受的地步显然是不可能的。因此,在舍弃了很多专题的同时也涉及了更多其他的专题,毫无疑问,我个人的取舍很大程度上影响了这本书。

我还要感谢两位特别的同事的意见和帮助,他们分别是多伦多大学的 Harry Ruda 和蒙特利尔工程学院的 Raman Kashyap。我们认识很久了,这两位绅士阅读了很多手稿,并在最终的版本中提出了宝贵建议。

没有一书是完美的,我只能在读者的参与下不断改进、完善,请广大读者给予批评指正。尽管无法逐一回复评论和建议,我确实会阅读所有的邮件信息并采纳好的建议和意见。实际上第一版就有很多教师写信帮我指出一些改进方案,以及很多我个人无法完全消除的错误,希望第二版能更好地满足他们的要求。有个经典的古老格言这样说(有点意译):“一个好的图抵得上一千字,但糟糕的图需要一千字来解释。”我用了一个称为“帆布”(Canvas)的软件包尽可能清晰地绘制第二版中几乎所有的艺术线条图,如果有错误都是我的过失,如果发现图表有误请给我发邮件。所有第三方图片和照片都经过授权,非常感谢培生教育集团能从版权持有人那里帮我认真获取这些授权。如果对第二版还满意,甚至期待第3版,请直接将评价和推荐发给培生高等教育集团的电气工程主管编辑,地址是:One Lake Street, Upper Saddle River, NJ 07458, USA。要让我们听到您的心声,这是最好的方式了。

Safa Kasap

safa.kasap@yahoo.com

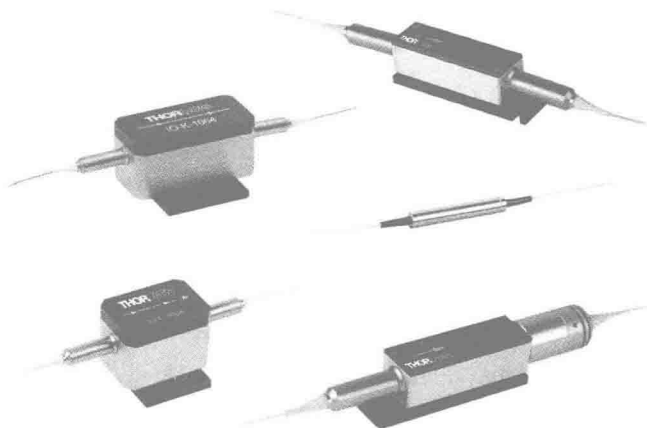
萨斯卡通(Saskatoon)(2012年3月)



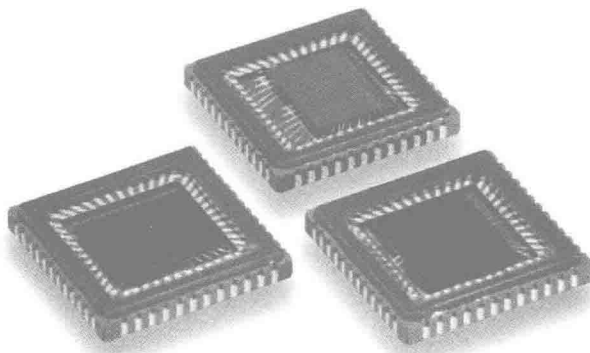
戈登·古尔德(Gordon Gould)(1920—2005)于1941年在斯克内克塔迪联合学院获得理学学士(物理学)学位,并在耶鲁大学获得理学硕士学位。1957年左右,他在哥伦比亚大学进行博士研究工作,在此期间,他提出了一个光泵浦激光器的设想——现在他被公认为光泵浦的发明者,这是一种激发微波和激光的方法。他也被认为是气体激光中的碰撞泵浦发明者,以及多个激光应用方面的专利持有人。在打了近30年的官司后,1987年,他最终赢得激光发明人的称号。戈登·古尔德的实验室日志的标题甚至写道:“Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”(对激光可行性的粗略思考:受激辐射式光放大)。这是激光的首字母缩写第一次出现。联合学院分别于1978年和1995年授予他荣誉科学博士及Eliphalet Nott奖章。(联合学院校友办公室提供)



光纤耦合相位和振幅调制器。铌酸锂的普克尔效应被用于调制折射率，从而调节其光信号相位。在振幅调制器中，普克尔效应被应用于调制马克-曾德尔干涉仪两个臂的折射率，继而调节光的输出。(@ JENOPTIK Optical System GmbH)



光纤耦合光隔离器：光纤光隔离器。信号只能沿着器件上箭头所指的方向传播，其原理是基于法拉第效应旋光性。(Thorlabs提供)



宽动态范围的 CMOS 图像传感器。[法国 New Imaging Technologies (NIT) 公司提供]

目 录

第1章 光的波动性	2
1.1 均匀介质中光的波动性	2
1.2 折射率和色散	8
1.3 群速度和群折射率	11
1.4 磁场、辐照度和坡印廷矢量	14
1.5 斯涅耳折射定律和全反射(TIR)	18
1.6 菲涅耳方程	21
1.7 增透膜和介质镜	32
1.8 光的吸收和复折射率	36
1.9 时间相干性和空间相干性	40
1.10 波的叠加和干涉	43
1.11 多波干涉和光学谐振腔	45
1.12 衍射原理	50
选学专题	59
1.13 干涉仪	59
1.14 薄膜光学——薄膜中光波的多次反射	61
1.15 平板内光波多次反射和非相干波	63
1.16 光的散射	64
1.17 光子晶体	67
习题	72
第2章 介质波导与光纤	84
2.1 对称平面介质平板波导	84
2.2 平面波导中的模间色散和波导色散	92
2.3 阶跃折射率分布光纤	95
2.4 数值孔径(Numerical Aperture)	104
2.5 单模光纤中的色散	106
2.6 色散位移光纤和色散补偿(Dispersion Modified Fibers and Compensation)	113
2.7 比特率、色散及电学和光学带宽	117
2.8 渐变折射率(GRIN)光纤	121
2.9 光纤的衰减损耗	128
2.10 光纤的制造	135
选学专题	139
2.11 波分复用: WDM	139
2.12 光纤和DWDM中的非线性效应	140
2.13 布拉格光纤(Bragg Fibers)	143
2.14 光子晶体光纤——多孔光纤	144

2.15 光纤布拉格光栅和传感器	146
习题	150
第3章 半导体学与发光二极管	162
3.1 半导体概念和能带概述	162
3.2 半导体的统计分布	167
3.3 非本征半导体	169
3.4 直接带隙和间接带隙半导体: $E-k$ 能带图	176
3.5 pn 结原理	179
3.6 pn 结的反向电流	189
3.7 pn 结动态电阻和电容	191
3.8 复合寿命	194
3.9 pn 结的能带图	197
3.10 异质结	201
3.11 发光二极管(LED): 基本原理	202
3.12 量子阱高亮度 LED	211
3.13 LED 材料和结构	214
3.14 LED 的效率和光通量	218
3.15 LED 的基本特性	222
3.16 光纤通信应用的 LED	223
3.17 荧光粉和白光 LED	225
选学专题	227
3.18 LED 电子技术	227
习题	229
第4章 受激辐射器件——光放大器和激光器	242
4.1 受激辐射、光子放大、激光器	242
4.2 受激辐射率和辐射截面	246
4.3 掺铒光纤放大器	251
4.4 气体激光器: He-Ne 激光器	261
4.5 气体激光器的输出光谱	264
4.6 激光振荡: 阈值增益因子和增益带宽	268
4.7 光增益曲线加宽及其线宽	275
4.8 脉冲激光器: 调 Q (Q 开关) 和锁模技术	278
4.9 半导体激光器原理	282
4.10 异质结半导体激光器	285
4.11 量子阱器件	290
4.12 激光二极管的基本特性	293
4.13 稳态半导体速率方程: 激光二极管方程	299
4.14 单频半导体激光器	304
4.15 垂直腔面发射激光器	309
4.16 半导体光放大器	312
选学专题	314
4.17 超辐射 LED 和谐振腔 LED; SLD 和 RCLED	314

4.18	激光器直接调制	315
4.19	全息技术	317
	习题	319
第5章	光电探测器和图像传感器	328
5.1	pn 结光电二极管原理	328
5.2	肖克莱-拉莫定理和外光生电流	332
5.3	吸收系数和光电探测器材料	334
5.4	量子效率和响应度	336
5.5	pin 光电二极管	340
5.6	雪崩光电二极管	345
5.7	异质结光电二极管	351
5.8	肖特基结光电探测器	355
5.9	光电晶体管	359
5.10	光电导探测器和光电导增益	359
5.11	基本光电二极管电路	362
5.12	光电探测器的噪声	365
5.13	图像传感器	371
	选学专题	376
5.14	光伏器件: 太阳能电池	376
	习题	384
第6章	光的偏振与调制	394
6.1	光的偏振	394
6.2	各向异性介质中的光传播现象: 双折射现象	398
6.3	双折射光学器件	403
6.4	旋光效应和圆双折射	407
6.5	液晶显示器	409
6.6	电光效应	412
6.7	集成光调制器	419
6.8	声光调制器	425
6.9	法拉第旋光效应和光隔离器	430
6.10	非线性光学和二次谐波产生	432
	选学专题	435
6.11	琼斯矢量	435
	习题	437
附录A	高斯分布	443
附录B	立体角	445
附录C	基本辐射度和光度学	447
附录D	重要的数学公式	450
附录E	部分定义与基本公式	452
附录F	符号和缩写	456

第1章 光的波动性

1.1 均匀介质中光的波动性

A. 平面电磁波

光的波动性与其光子的粒子性行为十分不同。光的波动性已通过诸如光的干涉和衍射现象得到很好的证明。光波是一种电磁波(EM),具有随时间变化的电场 E_x 和磁场 B_y 。在空间传播过程中,光波的电场 E_x 和磁场 B_y 始终相互垂直,并且垂直于光波的传播方向 z 轴,如图 1.1 所示。最简单的行波是正弦波,沿 z 轴传播,其一般数学形式为

$$E_x = E_o \cos(\omega t - kz + \phi_o) \quad (\text{沿着 } z \text{ 轴传播的行波}) \quad (1.1.1)$$

式中, E_x 表示 t 时刻在 z 点处的电场; $k = 2\pi/\lambda$ 是传播常数(propagation constant)^①, λ 为光波波长; ω 为光波角频率; E_o 为光波的振幅; ϕ_o 为 $t=0$ 时刻 $z=0$ 处的光波初始相位常数。 E_x 的值是否为 0 取决于原点的选择。 $(\omega t - kz + \phi_o)$ 表示光波的相位(phase),可用 ϕ 表示。式(1.1.1)描述的是一个在 xy 平面无限延伸的单色平面光波(monochromatic plane),沿着正 z 轴方向传播,如图 1.2 所示。在任意垂直于光波传输方向(z 轴)的 xy 平面上,根据式(1.1.1)可知,光波的相位 ϕ 是常量,即这一垂直面上光波的电场也是常数。在某一给定时刻,这种光波相位恒相等的表面称为光波的波阵面(wavefront)。从图 1.2 可以看出,平面波的波阵面显然垂直于光波传播方向的无限延伸的 xy 平面。

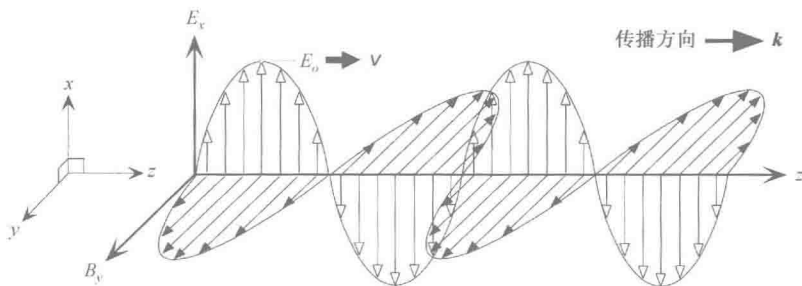


图 1.1 在均匀且各向同性介质中,传播的电磁波有着时变的电场和磁场,电场和磁场相互垂直,且同时垂直于传播方向 z 轴。图中为一特定谐波或正弦电磁波在某一给定时间上的波形图。在经过 δt 时间之后,这列波上的一点,如最大值点,将在 z 方向上移动 $v\delta t$ 的距离

根据电磁场理论,由法拉第定律可知,时变磁场产生时变的电场,时变电场产生时变的磁场。并且,时变电场产生具有相同频率的时变磁场。由电磁原理可知^②,式(1.1.1)表示的传

① 一些作者也把 k 称为波数。然而,在光谱学中,波数暗指 $1/\lambda$,即波长的倒数。为了避免混淆, k 一般称为传播常数。

② 麦克斯韦方程组明确地表述了电磁现象,并给出了电场和磁场及它们的空间导数和时间导数之间的关系。我们仅需要用到麦克斯韦方程组中的几个结论,而无须深入研究它们的推导过程。磁场 B 也被称为磁感应强度或者磁通量密度。在非磁性材料中,磁场强度 H 和磁场 B 的关系为 $B = \mu_o H$,其中, μ_o 为介质的绝对磁导率。

物理学家在星期一、星期三和星期五应用波动理论，而在星期二、星期四和星期六却应用粒子理论。

——威廉·亨利·布拉格爵士^①



奥古斯丁·简·菲涅耳(1788—1827)是一名法国物理学家和法国政府土木工程师，是波动光学理论的主要创建者之一。他对光学的发展做出了突出的贡献，包括19世纪应用于灯塔上的著名的菲涅耳透镜。1815年因与拿破仑政见不同，菲涅耳被软禁，直到拿破仑的统治结束。在此期间，菲涅耳提出了把波动光学理论转化为数学理论的想法。(© INTERFOTO/Alamy)

如果你没有掌握基本的实验技能，你就不可能成为一位优秀的实验大师。

(If you cannot saw with a file or file with a saw, then you will be no good as an experimentalist.)

——奥古斯丁·简·菲涅耳

^① 语录选自 Alan Mackay, Dictionary of Scientific Quotes, 2nd Edition (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1991), p. 37。

播电场 E_x 总会伴随产生一个传播磁场 B_y 。 B_y 的频率和传播常数 (ω 和 k) 分别与 E_x 的频率和传播常数相同。但是电场 E_x 和磁场 B_y 的振动方向相互垂直, 如图 1.1 所示。由此可知, 磁场 B_y 的传播方程与电场 E_x 的传播方程类似。在绝缘体材料 (电导率 $\sigma = 0$) 中, 一般只需考虑用电场 E_x 而不是磁场 B_y 来描述光波的相互作用。正是由于电场替代晶体分子或离子中的电子, 使物体发生极化, 所以, 绝缘体材料中的光波传播一般只需考虑电场 E_x 的作用。在实际应用中, 光场 (optical field) 一般指的就是电场 E_x 。然而, 因为电场和磁场相互关联, 具有密切的关系, 如图 1.1 所示, 所以光场一般用电场 E_x 表示。

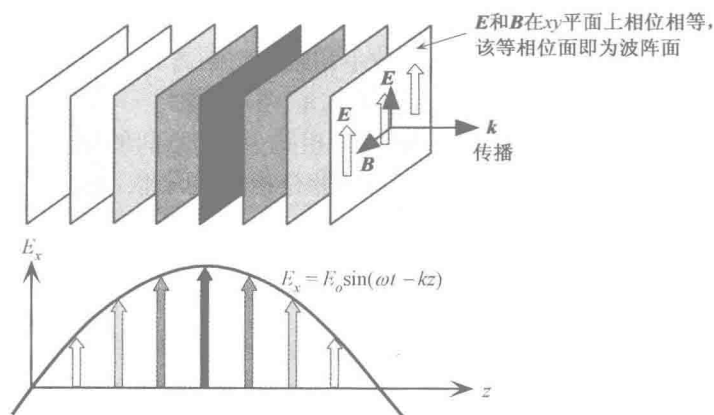


图 1.2 在一个给定的 xy 平面内, 一列沿 z 轴方向传播的平面电磁波在该平面任意点上都有相同的 E_x (或 B_y)。由此, 在给定的 xy 平面内所有的电场分量都是等相的。这里的 xy 平面在 x 轴和 y 轴方向上无限延展

因为 $\cos\phi = \text{Re}[\exp(j\phi)]$ (Re 表示实数部分), 传输光波也可用指数形式表示, 而我们需要计算的是复数结果中的实数部分, 所以式 (1.1.1) 可表示为

$$E_x(z, t) = \text{Re}[E_0 \exp(j\phi_0) \exp j(\omega t - kz)]$$

或者

$$E_x(z, t) = \text{Re}[E_c \exp j(\omega t - kz)] \quad (\text{沿着 } z \text{ 轴传播的行波}) \quad (1.1.2)$$

式中, $E_c = E_0 \exp(j\phi_0)$ 为复数, 表示光波的振幅, 包含光波的初始相位常数信息 ϕ_0 。注意, 在式 (1.1.2) 中, $\exp j(\omega t - kz)$ 表示 $e^{j(\omega t - kz)}$ 。

引入矢量 $\mathbf{k}$ 表示光波的传播方向。 $\mathbf{k}$ 叫作波矢量 (wave vector) (或者传播矢量, propagation vector), 其值为传播常数 (propagation constant), 有 $k = 2\pi/\lambda$ 。从图 1.2 可以看出, 波矢量 $\mathbf{k}$ 垂直于光波的等相面。考虑到电磁波沿任意的 $\mathbf{k}$ 方向传播, 如图 1.3 所示, 则其在空间内的任意点 $\mathbf{r}$ 处的电场 $E(\mathbf{r}, t)$ 为

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0) \quad (\text{三维空间内传播的行波, 波矢量为 } \mathbf{k}) \quad (1.1.3)$$

由于点积 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ 是沿着如图 1.3 所示的类似于 kz 的光波传播方向, 点积 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ 可通过画出垂直于波矢量 $\mathbf{k}$ 并经过矢量 $\mathbf{r}$ 端点的平面来表示。点积 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ 是波矢量 $\mathbf{k}$ 的大小与矢量 $\mathbf{r}$ 在 $\mathbf{k}$ 上的投影 $\mathbf{r}'$ 的乘积, 即 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = k\mathbf{r}'$ 。如果光的传播方向为 z 轴, $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ 即为 kz 。在一般情况下, $\mathbf{k}$ 在 x 、 y 、 z 轴方向上有分量 k_x 、 k_y 、 k_z , 那么根据点积的定义有 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = k_x x + k_y y + k_z z$ 。

对给定的光波的相位 ϕ , 如在最大电场时, 由式 (1.1.1) 可知, 平面光波时间和空间满足关系

$$\phi = \omega t - kz + \phi_0 = \text{constant}$$

在时间间隔 δt 内, 这一给定相位(即最大电场处)在 z 方向上移动了 δz 的距离。光波的相速度是 $\delta z / \delta t$, 所以相速度(phase velocity) v 满足

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = v\lambda \quad (\text{相速度}) \quad (1.1.4)$$

式中, ν 为电磁波的频率, 有 $\omega = 2\pi\nu$ 。在自由空间中, 电磁波的相速度 v 等于真空中的光速, 即 c 。

如图 1.1 所示, 考虑在给定时刻同一光波中相距一定距离 Δz 的两点的相位差 $\Delta\phi$ 。如果光波为满足式(1.1.1)沿着 z 轴传播并且波矢量为 $\mathbf{k}$ 的平面光波, 由于两点的 ωt 相同, 则两点间的相位差就等于 $k\Delta z$ 。当两点间的相位差为 0 或者 2π 的整数倍时, 这两点的相位相同。因此, 光波中两点间的相位差 $\Delta\phi$ 可表述为 $k\Delta z$ 或者 $2\pi\Delta z/\lambda$ 。

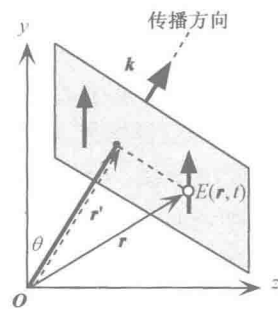


图 1.3 沿着 $\mathbf{k}$ 方向上传播的平面电磁波

B. 麦克斯韦波动方程和发散光波

考虑图 1.2 中的平面电磁波, 其所有的等相面为 xy 平面, 都垂直于 z 轴。平行于 z 轴做该平面电磁波的任一截面, 截面图如图 1.4(a) 所示, 垂直于 z 轴的平行虚线是光波的波阵面。通常用相位差 2π 或间隔波长 λ 来表示相邻两波阵面, 如图 1.4 所示。点 P 处垂直于波阵面的矢量表示在点 P 处的光波传播方向 $\mathbf{k}$ 。显然所有平面波的传播矢量相互平行, 平面波在传播过程中不发散。平面波的振幅 E_0 不随位置的变化而变化, 其在垂直于波矢量 $\mathbf{k}$ 的平面上所有的点都是定值, 即与 x 、 y 轴坐标无关。由于平面波的波阵面趋于无穷大, 平面波的能量也为无穷大。图 1.4(a) 中是理想平面波, 可用以分析许多光波现象。然而事实上, 由于光束横截面积和能量有限, 垂直于波矢量 $\mathbf{k}$ 的平面波内的电场不会无限传播。理想的平面波需要面积无穷大且能量无穷大的电磁波源。

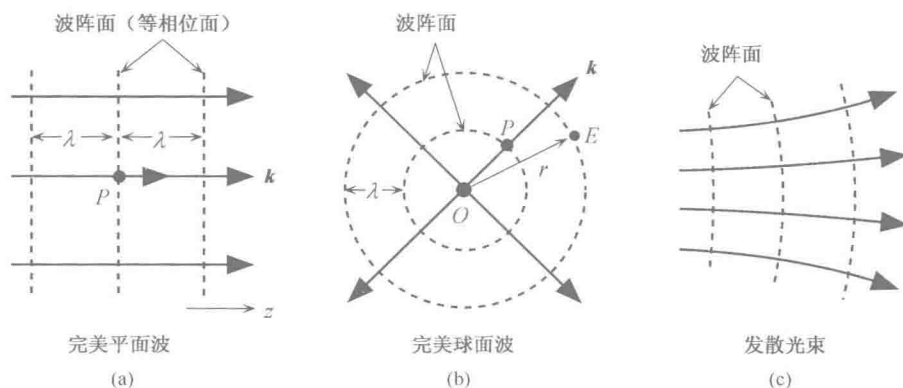


图 1.4 电磁波的几种可能的例子。(a) 一系列完美的平面波。(b) 一系列完美的球面波。(c) 一束发散光束

现实生活中存在着各种电磁波。这些光波遵循特定的波动方程, 用以描述其电场的时空依赖性。各向同性的线性电介质的相对介电常数(ϵ_r)在各个方向上相同, 与电场无关。该介质中的电场 E 满足麦克斯韦电磁波动方程(Maxwell's EM wave equation):