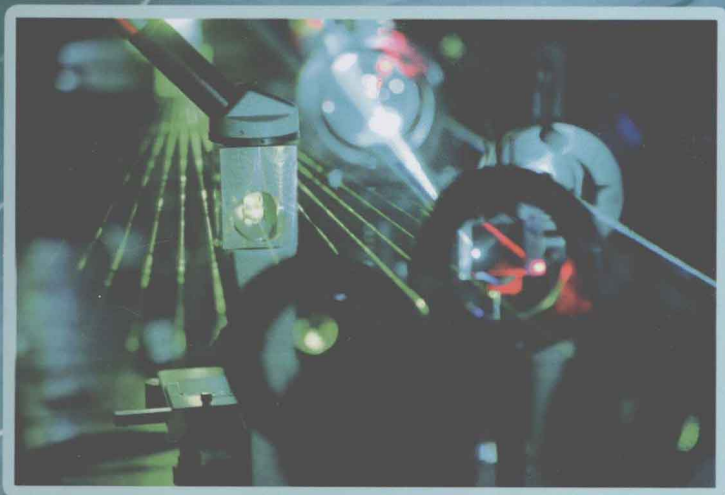


ESSENTIALS OF PHOTONICS
SECOND EDITION

光子学设计基础

(原书第2版)



(英) Alan Rogers 著
周海宪 程云芳 译
周华君 程 林 校

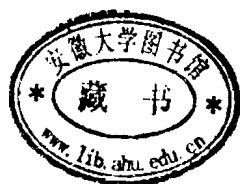
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



光子学设计基础

(原书第2版)

(英) Alan Rogers 著
周海宪 程云芳 译
周华君 程 林 校



机械工业出版社

本书内容丰富, 不仅有详尽的光子学理论基础, 同时论述了许多实际的光子学应用技术。本书首先以比较容易理解的形式提供了非常坚实的光子学理论基础; 并且涵盖了光子学独立发展的完整内容, 对光子学学科的学生及希望进一步发展的科研人员是非常有用的; 另外, 还列出了推荐阅读资料, 帮助读者更深入地进行研究; 并且, 增加了许多新的重要内容, 对光子晶体纤维、波分复用技术、偏振模色散的扩展处理和分布式光纤传感器及琼斯偏振算子进行了详尽的论述。

本书适合光子学方面的科研人员、工程师及高等院校相关学科师生使用。

Essentials of Photonics/by Alan Rogers. —2nd ed. /ISBN: 978-0849338366

Copyright© 2009 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号: 图字 01-2010-5157 号。

图书在版编目(CIP)数据

光子学设计基础: 原书第 2 版/(英) 罗杰斯(Rogers, A.) 著; 周海宪等译.
—北京: 机械工业出版社, 2012. 10

书名原文: Essentials of photonics, second edition

ISBN 978-7-111-39953-7

I. ①光… II. ①罗…②周… III. ①光子-研究 IV. ①O572.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 238551 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王欢 责任编辑: 王欢

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 赵颖喆 责任印制: 杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·25 印张·2 插页·485 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-39953-7

定价: 98.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

光子学是研究光子与物质相互作用及应用的新兴学科。作为一门学科，光子学于1970年提出，基本上可以定义为：研究以光子为信息或能量载体的行为及应用的科学。与电子学相比，光子学是关于光子及应用的科学：在理论方面，主要研究光子的量子特性及与物质（包括分子、原子、电子及光子自身）的相互作用中出现的各类效应和规律；在应用上，则是根据光子学理论方面的结果，研究光子的产生、传输、控制及探测规律，进一步发掘光子作为信息与能量载体的功能和相关应用。实际上，光子学是一个具有极强应用背景的学科，并由此形成了一系列的光子学技术。

光子学是由光学拓展而来的，因此，在光子学形成过程中，相应的分支学科随之形成，并且已有若干分支学科在诸多科技领域获得重要应用，产生强烈影响。与电子相比，光子具有优异的性质。首先，光子具有极高的信息容量和效率。作为信息载体，光的信息容量起码比电的高出3、4个数量级，即千倍以上。在一定条件下，一个光子甚至具有承载成千上万比特信息的能力。其次，光子具有极快的响应能力，在信息领域，信息载体的响应能力至关重要，是决定信息速率与容量的主要因素。与电子技术（脉宽是纳秒量级）相比，光子脉宽为皮秒数量级，甚至达到飞秒（fs）量级（10~15fs），因此信息速率能够达到每秒几百Gbit，甚至几十Tbit，从而使光纤可以高速地将信息传输到几千公里或更远的距离。

光子学涵盖领域宽广，在发展过程中已形成诸多活跃和重要的研究领域，主要包括：①信息光子学，包括导波（光纤）光子学、光通信技术、光存储技术、光显示技术等，光子学与信息科学的交叉已经形成一门新兴的学科——信息光子学，相对于20世纪的电子时代，21世纪将是光子时代；②生物医学光子学，包括生物光子学、医学光子学等，激光与光子技术的日渐成熟，使生物医学光学与光子学紧密结合，成为光子学又一个重要应用领域；③光子学器件应用技术，包括新型激光器、有源和无源光子器件及半导体集成光子学、微结构光子学等；④基础光子学，包括量子光学、分子光子学、超快光子学、非线性光子学等。光子学应用技术的发展，甚至每个技术细节的进步都与基础光子学息息相关。而基础光子学的每一个“突破”和每一次“飞跃”，也自然导致光子应用技术的一次次创新、开拓和革命。光子学的兴起标志着光学进入了一个新的发展时期。近年来，光子学发展迅速，人们对光子学的研究兴趣日益增长，其发展趋势非常类似

IV 光子学设计基础

于 20 世纪的电子学。可以预言, 21 世纪是光子学技术的时代。正如 A. J. Rogers 教授在本书中所预言的: “未来的应用前景是不可估量的。在 21 世纪初期, 光子学主导人们的物质生活将不可避免”。

光子学技术的快速发展, 使越来越多的科技人员从事光子学及其相关专业的研究和应用技术的开发工作, 光子学工程的研究领域也逐渐扩大, 包括许多新的、难以预料的应用。目前, 无论学术界还是产业界, 对研究和开发光子学的重要性和迫切性有了进一步的认识。应当看到, 与国际的发展势态相比, 无论是光子学基础理论的研究深度, 还是光子学应用技术的开发广度, 我们都存有较大差距。随着对新型光子学仪器应用性的认识, 人们更迫切需要熟悉光子学基础理论、光子学仪器的设计原理及应用技术方面的知识。由 CRC 出版社出版的 A. J. Rogers 教授 (英国) 编写的《The Essentials of Photonics (Second Edition)》, 正是献给特别需要光子学理论与设计技术信息、从事实际工作的工程师和科学家的著作。

A. J. Rogers 教授在剑桥大学获得自然科学学士和硕士学位, 射电天文学和空间物理学博士学位, 先后被英国伦敦大学 (King's College London)、萨里大学 (University of Surrey) 聘为教授、电子与电气工程系主任, 在英国中央电力局 (Central Electricity Generating Board, CEGB) 中央电业研究实验室 (Central Electricity Research Laboratories, CERL) 工作, 担任英国 Polarmetrix 公司 (专门研制和生产商业化分布式光纤传感系统) 的技术顾问, 一直从事着微波通信、移动无线电通信、光学通信、信号处理、光纤传感器、激光诊断和非线性光学方面的研究工作。从 1996 年开始, Rogers 教授重点研究光纤通信分布式光纤传感技术和偏振现象。Rogers 教授一直致力于光子学理论和应用技术领域的教学和研究工作, 有着深厚的光子学理论基础和丰富的应用技术经验。至今, Rogers 教授在学术期刊和会议上发表了 200 多篇论文, 获得 14 项专利, 是英国物理协会及工程技术协会会员, 以及电器和电子工程师协会的资深会员。

原书第 2 版内容丰富, 不仅有详尽的光子学理论基础, 同时论述了许多实际的光子学应用技术。该书有以下显著特点: 第一, 光子学既是一门纯科学, 也是一种应用技术。为帮助光子学领域 (尤其光子学应用技术领域) 的研究人员开展该方面领先课题的研究, 此书较少论述数学分析的细节, 而是以比较容易理解的形式提供更为坚实的光子学理论基础。换句话说, 该书的内容偏重于光子学应用技术, 但又不失完整、易懂的光子学基础理论, 因此具有很强的实用性, 因而翻译定名为《光子学设计基础 (原书第 2 版)》。第二, 涵盖了光子学独立发展的完整内容, 对早期光子学学科的学生及希望在物理学领域进一步发展的科研人员都是非常有用的。第三, 为使本书便于不同程度的研究人员阅读, 提供了参考文献, 并为读者列出了“推荐阅读资料”, 能够更深入地进行研究。随着光子学

理论和工程应用技术的发展,原书第2版也与时俱进,相对于原书第1版增加了许多新的内容,例如对光子晶体纤维(Photonic Crystal Fiber, PCF)、波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术、偏振模式散布(Polarization-Mode Dispersion, PMD)的扩展处理和分布式光纤传感器(Distributed Optical Fiber Sensor, DOFS)及对琼斯(Jone)偏振算子更为详细的论述。由于光子学是一个蓬勃发展、方兴未艾的学科,会不断出现新的理论、方法和应用技术。原书作者在本书第12章中对光子学的未来前景提出了个人见解,供读者参考。为便于读者加强和巩固对光子学知识的理解,书中给出了相应的练习题,并在全书最后(第13章)给出了参考答案。

在本书的出版过程中,译者与原书作者A. J. Rogers教授进行了充分的讨论和沟通,对书中的印刷错误进行了修订,并增加了“译者注”。为使读者更准确地理解和应用,并有利于光子学研究人员进一步开展工作,保留了参考文献和推荐阅读资料的英文形式。

本书主要由周海宪翻译了第1~10章,程云芳翻译了第11~13章,在美国工作的周华君和程林先生对全书进行了认真校对,高级工程师马俊岭、赖宏辉和程云芳对本书做了专业校对和最终审核。

本书出版得到了清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生,英国的A. J. Rogers教授和北京理工大学王涌天教授的极大支持,下面列出的同事和相关人员也参与了本书的翻译工作:孙维国研究员,刘永祥、郭世勇、鲁保启、金朝瀚、仇志刚、马俊岭、翟文军、黄存新、祖成奎、王希军、张良、曾威、邢妙娟和朱彬等高级工程师,韩鹏工程师。在此对他们的努力和帮助表示衷心感谢。

机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和王欢编辑对本书出版给予了非常大的鼓励和支持,在此特别致以谢意!

本书可供光电子学领域从事光子学研究和仪器设计的工程师阅读,也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书提供的理论和应用技术能够有益于我国光子学事业的快速发展,对我国军事、航空航天和民用光学仪器的设计提供有益指导。

译者

2012年8月

原 书 前 言

原书第2版是1997年出版的《Essentials of photoelectronics (光电子学基础)》一书的最新修订版本,书名变化反映了内容重点的变化(也就是说,重点是光子学而不是光学和电子学的混合)。

然而,光子学的确是一门光学与电子学相互渗透和交联的科学和技术。随着读者对本书的深入阅读,这种相互渗透的优越性会感觉更为清晰,主要原因在于光束的高速传播和携带信息的能力,以及与电子可控性的结合。

光的高传播速度是众所周知的(真空中约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$),正如爱因斯坦(Einstein)在其相对论(1905年)中所阐述的,对于任何一种物理能量,光的传播速度可能会更快。并且,在不太久之前(约1640年),许多科学家还坚持认为光速是无限大的。

光具有较大的携带信息能力源自高振动频率。其实质就是光学过程发生的时标(时间量程)是在一个光学周期(约 10^{-14} s)的数量级内,因此可以在同样的时标内吸收和传播信息,从而导致信息吸收和传递速率达到光学频率数量级。

与光子不同,电子携带电荷,对电场和磁场有响应,因而可以用电场和磁场控制和操纵电子。近代电子学能够以一种非常成熟的灵活性准确地调整电场(或磁场),所以可以用来控制和操作电子。

由于对电子转化为光子及光子转化为电子的过程非常了解,一旦某些条件得以满足,将这两种科学联系在一起就是非常自然和方便的事情。在1960年之前,这些条件涉及光源性质,即噪声和不精确性。这些光源发射的光还有不太清楚的性质,这意味着很难对这种光的有关信息有清晰认识,并且在一定程度上也难于控制,因此在电子控制技术方面不可能有合理匹配。

1960年,激光器的发明提供了能够满足清晰分辨率要求的光,就在那一年,光电子学的研究课题有效地开展起来。

早期的光子学既是一门科学,也是一门技术。前者是因为其对加深理解光子和电子及两者之间的关系有非常大的作用,后者则是由于以此科学为基础的许多应用已经开始影响人们的日常生活:光通信、高清晰度电视、小型唱机、激光打印机、手表和计算器上使用的液晶显示、激光外科手术、激光切割和焊接、超市的激光条码结账机等。

未来的应用前景是不可估量的。在21世纪初期,光子学主导人们物质生活的发展将不可避免。

本书希望能够帮助读者对光子学原理和应用进行轻松详尽的解读，认识光子学及相关行业的广泛知识。本书较少论述数学分析的细节，目的在于提供光子学坚实的理论基础，并为分析前沿研究课题提供理论指导。

原书第2版增加的重要内容有：光子晶体纤维（PCF），波分复用（WDM）技术，偏振模式散布（PMD）的扩展处理和分布式光纤传感器（DOFS），以及对琼斯（Jones）偏振算子更为详细的论述。

本书提供所有的重要结果（一些结果在附录中论述），读者无需额外查找参考文献就可以获得完整的逻辑过程。本书所指的外部参考文献（或推荐阅读书籍）是指背景材料和兴趣资料，不是阅读理解本书的必备内容。

本书的一个重要特点是涵盖了光子学独立发展的整个内容，对于早期的光子学学科的学生，以及希望在物理学领域进一步发展的科研人员都是非常有用的。

本书的目的在于激起读者兴趣，获取相关知识；欣赏该学科，应用该学科，并进一步推动该学科未来的发展。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 光子和电子	1
1.1 概述	1
1.2 发展简史	1
1.3 光的波动性	3
1.4 偏振	6
1.5 电磁波谱	8
1.6 发射和吸收过程	9
1.7 光子统计学	10
1.8 电子的特性	12
1.9 激光	20
1.10 总结	20
练习题	20
参考文献	21
推荐阅读资料	21
第 2 章 光的波动性	22
2.1 概述	22
2.2 电磁波谱	22
2.3 波的表现形式	22
2.4 电磁波	25
2.4.1 速度和折射率	25
2.4.2 能量、功率和强度	27
2.4.3 光学偏振	29
2.5 反射和折射	30
2.6 全内反射	37
2.7 光的干涉	40
2.8 光的波导	42
2.9 干涉仪	44
2.10 衍射	51
2.11 高斯光束和稳态光学谐振器	56
2.12 结论	58

练习题	58
参考文献	59
推荐阅读资料	59
第3章 偏振光学	60
3.1 概述	60
3.2 偏振椭球	60
3.3 晶体光学	63
3.4 减速波片	66
3.5 一种可变化的波片: 索雷-巴俾涅补偿器	69
3.6 偏振棱镜	70
3.7 线性双折射	71
3.8 圆双折射	71
3.9 椭圆双折射	72
3.10 偏振效应的实用性	73
3.10.1 电-光效应	75
3.10.2 磁-光效应	76
3.10.3 电旋效应	79
3.11 偏振分析	79
3.12 琼斯矩阵的形式	83
3.12.1 线性双折射矩阵	84
3.12.2 圆双折射矩阵	84
3.12.3 椭圆双折射矩阵	85
3.12.4 琼斯矩阵运算的本质	85
3.12.5 延时器/旋转器对	89
3.13 结论	90
练习题	91
参考文献	92
推荐阅读资料	92
第4章 光和物质: 发射、传播和吸收过程	93
4.1 概述	93
4.2 光在均匀电介质中传播的经典理论	93
4.3 光学色散	100
4.4 光的发射和吸收	103
4.4.1 基本过程	103
4.4.2 激光发射原理	104
4.4.3 发光	108
4.4.4 光探测	109
4.4.5 光发射	110

X 光子学设计基础

4.5 结论	111
练习题	111
参考文献	112
推荐阅读资料	112
第5章 光学相干和相关	113
5.1 概述	113
5.2 相干性测量	114
5.3 维纳-辛钦定理	119
5.4 双光束干涉	120
5.5 实际例子	123
5.5.1 迈克尔逊恒星干涉仪	123
5.5.2 马赫-曾德尔干涉仪	123
5.5.3 光纤陀螺仪	124
5.5.4 偏振光的双折射退极化	125
5.5.5 激光的相干性	125
5.6 结论	126
练习题	127
参考文献	127
推荐阅读资料	127
第6章 辐射和固体的物理学基本知识	128
6.1 概述	128
6.2 辐射	128
6.2.1 黑体辐射	128
6.2.2 量子效应	133
6.2.3 黑体光源	134
6.2.4 激光器工作原理	134
6.2.4.1 速率方程和增益机理	134
6.2.4.2 激光器结构	139
6.2.4.3 模式锁定(锁模)	141
6.2.4.4 Q开关	143
6.3 固体物质中的电子	145
6.3.1 固体能带理论要点	146
6.3.2 金属、绝缘体和半导体	151
6.3.3 布里渊区	152
6.3.4 半导体中的电子能量分布	156
6.3.5 非本征半导体	160
6.3.6 二元和三重半导体	161
6.4 结论	164

练习题	164
参考文献	165
推荐阅读资料	165
第 7 章 光源、调制器和探测器	166
7.1 概述	166
7.2 光源	166
7.2.1 激光光源	167
7.2.1.1 概述	167
7.2.1.2 氩离子激光器: 一种四能级系统	167
7.2.1.3 染料激光器	168
7.2.1.4 Nd-YAG 激光器: 一种固态激光器系统	169
7.2.1.5 其他类型激光器	171
7.2.2 半导体光源	171
7.2.2.1 p-n 结	171
7.2.2.2 发光二极管	174
7.2.2.3 半导体激光二极管	176
7.2.2.4 特殊类型的半导体激光二极管	179
7.3 光学调制器	181
7.3.1 电光调制器	182
7.3.2 磁光调制器	187
7.3.3 声光调制器	188
7.3.3.1 拉曼-奈斯结构	188
7.3.3.2 布拉格结构	192
7.4 光探测器	196
7.4.1 光导型探测器	196
7.4.2 光敏二极管	199
7.4.2.1 结型光敏二极管	199
7.4.2.2 光敏二极管的性能参数	202
7.4.2.3 PIN 光敏二极管	205
7.4.2.4 光电倍增管	206
7.4.2.5 雪崩光敏二极管	207
7.4.3 光子计数	208
7.5 结论	209
练习题	209
参考文献	211
推荐阅读资料	211
第 8 章 光学波导	212
8.1 概述	212

XII 光子学设计基础

8.2 平板波导	213
8.3 集成光学	219
8.4 柱面波导	220
8.5 光学纤维	223
8.6 通信光纤	225
8.6.1 光纤的衰减	226
8.6.2 光纤的色散	227
8.6.2.1 模式色散	229
8.6.2.2 材料色散	231
8.6.2.3 波导色散	233
8.6.2.4 偏振模色散	234
8.6.2.5 色散补偿	237
8.7 偏振波导	238
8.8 光子晶体光纤	242
8.8.1 实芯光子晶体光纤	243
8.8.2 空芯光子晶体光纤	243
8.9 结论	244
练习题	244
参考文献	245
推荐阅读资料	246
第9章 非线性光学	247
9.1 概述	247
9.2 非线性光学和光学纤维	248
9.3 非线性光学的表达形式	249
9.4 二次谐波的发生(倍频效应)和相位匹配	250
9.5 光学混频	256
9.6 与光强度相关的折射率	256
9.6.1 光学克尔效应	257
9.6.2 自相位调制	258
9.7 四光子混合	260
9.8 参量和非弹性过程	262
9.8.1 拉曼散射	263
9.8.2 受激拉曼散射	266
9.8.3 光纤中的拉曼效应	266
9.8.4 拉曼效应的实际应用	268
9.8.5 布里渊散射	270
9.9 孤子	275
9.10 光敏性	278

9.10.1 概述	278
9.10.2 光纤布拉格光栅	279
9.11 光子晶体光纤的非线性效应	284
9.11.1 气体拉曼和布里渊光谱术	284
9.11.2 谐波的生成	284
9.11.3 X射线的生成	285
9.12 结论	285
练习题	285
参考文献	286
推荐阅读资料	287
第10章 光子学应用实例	288
10.1 概述	288
10.2 增透膜(或减反膜)	288
10.3 利用光纤测量电流	291
10.4 集成光学光谱分析仪	298
10.5 音频光盘	300
10.6 光纤陀螺仪	305
10.7 全息术	311
10.8 光时域反射计技术及其在分布式光纤拉曼温度传感器中的应用	316
10.8.1 光时域反射计技术	317
10.8.2 分布式光纤拉曼温度传感技术	319
10.8.3 分布式光纤测量技术综述	322
10.9 超短光脉冲的测量:自相关器	323
10.10 光纤通信	328
10.10.1 光纤放大器	330
10.10.2 波分复用技术	333
10.10.3 光纤激光器	336
10.10.4 光波导耦合和开关	337
10.10.5 相干系统	341
10.10.6 对偏振模色散的进一步理解	347
10.10.6.1 对光路长度的依赖性	348
10.10.6.2 “长”和“短”界限的区分——相关长度	350
10.11 结论	352
练习题	352
参考文献	354
推荐阅读资料	354
第11章 未来的光子学	355
第12章 附录	357

XIV 光子学设计基础

附录 I	麦克斯韦方程	357
附录 II	傅里叶逆变换定理	358
附录 III	介电常数张量的对称性	360
附录 IV	偏振椭球	361
附录 V	振荡电偶极子的辐射	363
附录 VI	δ 函数	367
附录 VII	费米-狄拉克函数	368
附录 VIII	二次谐波生成 (倍频)	371
附录 IX	抽样定理	374
附录 X	半导体方程	375
附录 XI	对偏振模式色散的正式分析	378
参考文献	381
第 13 章	练习题的答案	382

第 1 章 光子和电子

1.1 概述

本章将一般性地介绍光子和电子的性质，便于读者在研究该领域课题时对其总的性质有较熟悉的认识。很明显，在深入探讨某些非常必要的细节（为保持清晰可见，不允许这些细节的不同方位之间相互干扰）之前，大致获得这种“感觉”是非常有用的。重要的是，通过阅读本章可以轻松地熟悉光子和电子的性质，非常有利于理解本书其他章节的内容。

能够以近代观点认识光的本性，源自众多科学家几个世纪的艰苦努力。基于这些严谨的研究结果，可以对更微妙的研究发展提供可能性。本章就从简要概述光子学发展史开始。

1.2 发展简史

大约在公元前 500 年，古希腊人就开始探索光的性质。当时，真正感兴趣的重点不可避免地是将太阳光应用于军事方面。并且，这种具有深奥哲学性质的研究不太实用，以致没有太大影响。

到伽利略（Galileo, 1564—1642）时代，才开始采用近代的科学方法将实验提高到一个真正有意义的使用位置。在此之前，认为试验是一种比较低级的、相当凌乱的行为，而不是一个绅士所为（即使今天，仍受到该时期的影响!）。在伽利略去世的那一年，牛顿（Newton）出生了，这两个人为我们以后 300 年使用的科学方法奠定了基础。

牛顿相信光以粒子形式存在于自然界，因此有理由推断：光是某种物质的一束射弹，据此可以满意地解释光是直线传播的事实。然而，牛顿认识到，这种观点难以与某些实验数据相吻合；并且，企图通过将一些不太可能的性质归属于其粒子说来解决这些矛盾。然而，他仍然保留了这种基本的微粒性。

牛顿的研究思想是如此之巨大，直至其去世之前（1727 年），在其他物理学科和数学分支应用微粒说凸现了许多重要发现，诸如欧拉（Euler）、Yong 和菲涅尔（Fresnel）等人的研究成果。这些人相信，光是以太中的一种波动。在他们中间已经研发出一种非常重要的理论，能够非常好地解释众所周知的光学现象——干涉和衍射。18 世纪末和 19 世纪初期，波动说快速得到传播。

2 光子学设计基础

通常认为，对最终形成的波动理论做出贡献的是傅科（Foucault，1819—1868），其在1850年完成了一项试验，证明光波在水中比在空气中传播的要慢。该结果与波动理论一致，但与微粒学说相矛盾。

在以后的50年内，波动理论一直摇摆不定，直到1900年，普朗克（Planck，1858—1947）发现，可以很方便地从数学上证明光是以离散波束或“量子”的形式从辐射体中发出，而不是一束波连续射出。虽然普朗克（Planck）是第一个从数学角度解释发射强度和波长之间的实验关系，但却是爱因斯坦（Einstein，1879—1955）立刻抓住了该发现的基本重要性，并利用它解释光电效应，认为光的作用就是从物质中发射电子。这样的解释完美简单，并令人心悦诚服。看来，光确实具有某些微粒的性质。

与此同时，在波动理论方面还有一些令人烦恼的事情。在19世纪初期，研究人员就已经认识到，如果光振动是垂直于传播方向，那么“偏振”现象，例如冰洲石（方解石的一种）晶体中可以观察到的现象，就可以得到解释。麦克斯韦（Maxwell，1831—1879）借助于其著名的场致方程式已经（在1864年）证明了：摆动量是电场和磁场。

然而，会出现另一个问题，即存在这些摆动的“以太”的性质是什么？特别是天文体如何毫无阻力地通过以太？1887年，迈克尔逊（Michelson）和莫雷（Morley）完成了一个非常著名的实验，企图测量出地球相对于这种以太的速度，得到的结果始终都是：速度为零。由于已经知道地球是绕着太阳运转，所以，结果使人非常迷惑，使人似乎感觉传播光波的介质实际上是不存在的。

以太实验的零（速度）结果被爱因斯坦（Einstein）根据其两个相对论（狭义相对论（1905年）和广义相对论（1915年））具体解释为一种全新的时空概念。在空间域传播和在时间域振荡的光在这些理论中起着至关重要的作用。

物理学（约1920年）已经达到这样的水平：光似乎具有微粒性（量子）和波动性两种性质，这要取决于具体情况。为了综合这种两重性，已经发现（由德布罗意（de Broglie）在1924年提议，后由戴维森（Davisson）和杰默（Germer）于1927年发现）电子（以前相当清楚地认为是粒子）有时会呈现波的性质，以一种类波的形式产生干涉和衍射图。

实际上，现在已经认为，波-粒双重性之间的明显矛盾是人们企图将所有的物理现象都归于人类可及范围之内所发生的事情及必然要产生的结果。由于受到思维模式的限制，人们认为，光子和电子或者具有粒子的性质，或者具有波动性质，已经是在根据物体（例如棒、石头和水中的波，以及在特定事态环境下必须对物体进行的理解）的习惯进行有条件的思考。

事实是，利用这些相同的术语（或条款）不可能描述自然状态下基本的原子过程，当试图强制将它们纳入人们比较熟悉的理解框架结构中，例如电子和光