



高新科技译丛

通信技术系列

无线光通信

Wireless Optical Communications

[法] Olivier Bouchet

著

韩仲祥 马丽华 康巧燕 李雪松

译

李云霞 倪延辉 石磊



国防工业出版社
National Defense Industry Press

WILEY



装备科技译著出版基金

无线光通信

Wireless Optical Communications

[法] Olivier Bouchet

著

韩仲祥 马丽华 康巧燕 李雪松

译

李云霞 倪延辉 石磊

国防工业出版社

著作权合同登记 图字：军—2015—015 号

图书在版编目（CIP）数据

无线光通信/（法）奥利弗·布薛特（Olivier Bouchet）著；韩仲祥等译. —北京：国防工业出版社，2018.3

书名原文：Wireless Optical Communications

ISBN 978-7-118-11394-5

I. ①无… II. ①奥… ②韩… III. ①光通信 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 265282 号

Wireless Optical Communications by Olivier Bouchet

ISBN 9781848213166

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under John Wiley & Sons license. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13¼ 字数 259 千字

2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 128.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

译者序

在信息时代，人们的工作、学习和生活需要无处不在的宽带网络，借助光纤等传输技术实现骨干网的宽带传输已经不是问题，在接入侧利用有线或无线技术实现用户接入网络亦逐渐成熟，但无线光通信技术在实现短距离宽带传输时有一定的优势，而且允许太比特每秒的末端通信，因此，无线光通信逐渐受到人们的关注，并成为通信技术领域的研究热点。

发展我国通信事业，人才培养是关键，而人才培养的基础是教育。高等院校是培养通信人才的主要管道，在院校除了学习通信基本理论，还要学习各种通信技术及网络技术，而无线光通信的理论和技術就是其中的重要学习内容。除了院校之外，向广大通信终端用户普及无线光通信技术，已经成为一个十分有意义的事情。

通信人才的培养以及无线光通信的推广使用，都需要实施相应的教育，因此都需要教材，为此，我们组织翻译了本书。

本书作者奥利弗·布薛特（Olivier Bouchet）是法国著名电信工程师，现为欧洲 Orange Lab 工作，有多年的实际工作经验，主要从事光通信信道特征研究和无线光通信系统设计。

本书的第 1 章、第 9 章、第 10 章由康巧燕翻译，第 2 章、第 8 章由李雪松翻译，第 3 章、第 4 章、第 7 章由马丽华翻译，第 5 章由李云霞翻译，第 6 章由倪延辉翻译，第 11 章、第 12 章、附录由韩仲祥翻译，全书由韩仲祥统稿，石磊审校。

由于译者的专业知识和外语水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者指正，译者在此深表感谢。

译者于西安

2017 年 10 月

前 言

现代通信，至少在通信的末端（如电视接收器、计算机、录音机、网络游戏控制终端、电子书等）将被“无线化”和高速化：物理链路将不是铜线、光纤、硅或其他介质，而是位于一个发射接收器与另一个发射接收器之间的自由空间电磁波。

常用的无线链路是无线电频谱范围内的电磁波。这是一种很好的技术，但是它在速度（比特每秒）、频率、功率、兼容性及电磁污染等方面具有一定的局限性。关于信息的传送，我们知道，电磁波频率越高，速率越高。因此，现在实验室正在研究能够传输吉赫兹、太赫兹甚至更高频率的通信系统，太赫兹以上就接近光波了，位于红外线或可见光附近（ $100\sim 1000\text{ THz}$ ），可以实现太比特每秒的通信速率。

随着激光器（发明于 1960 年）与石英光纤（石英光纤已经在 1961 年被证明具有应用于通信的潜力）的产生，并伴随着激光器、光电子产品与石英光纤制作加工技术的巨大进步，已经确定性地开启了光纤通信这一发展方向。基于光通信，人们已经可以实现洲际通信和宽带互联网。光通信作为最基础研究领域具有重要社会价值。

无线光通信利用大气作为传输介质，在组成成分、物质均匀性和信号的重现性方面，大气环境要比硅系光导纤维复杂得多，无线光通信技术相比光纤通信技术能够实现短距离宽带传输，而且允许太比特每秒的通信，而现在（指 2011 年），限制环境中，使用的是吉比特的末端传输（GTTT）。

大气光链路总会随周围环境因素（如灰尘、雾、雨等）的变化而变化，这些因素能引起通信系统性能的下降。在这样的环境下，光束的传输特性必须能提供良好的服务质量，正如 Al. Naboulsi 等人基于大气能见度建立的模型中描述的一样。大气能见度就是表征大气透明性的术语。现在，利用 LED、激光、光电探测器等设施获得非离子化光子是成熟的技术，基于短距离的自由空间通信，尤其是室内通信，具有非常大的潜力。本书是《自由空间光传播与通信》的继续，《自由空间光传播与通信》一书主要讨论自由空间和有限空间远距离通信的物理基础。本书更进一步地讨论关于实际通信系统的一体化信道、传播模型、链路选择以及数据处理与译码、调制、标准和安全性等。

对于想学习无线光通信的工程师或是从事实际系统应用的人员，本书可视为出色的工具书，在校学生可以从中获得大量关于传输、光学、光学测量、安全等信息

及有用的概念。

本书作为对电信领域关键技术的概述，其中所述内容为我们呈现了光通信设备领域的应用情况。早在 1979 年 Gfellerin 开展了有限空间的无线光学相关研究工作，Kintziget 等人在 2002 年也发表了相关工作，他们都提出了一些无线光通信设备的解决方法，我们可以了解到从 n 个研究对象到 m 个研究对象以及极限传输速率 (THz) 等安全无线光通信相关内容。

采用可信可复制的单光子发射器，无线光通信可以实现绝对安全通信，这些自由空间量子将会有绝对安全需求的信息交换领域找到很有价值的应用。

Pierre-Noël FRVENNEC

URSI-France

March 2012

目 录

绪论	1
第1章 光	5
第2章 光通信历史	10
2.1 基本定义	10
2.1.1 通信	10
2.1.2 电信	10
2.1.3 光通信	10
2.1.4 无线频率或赫兹波	11
2.2 史前通信	11
2.3 光电报	13
2.4 编码	16
2.5 光电话	18
2.5.1 日光通信	18
2.5.2 全天候光通信	20
2.6 亚历山大·格雷厄姆·贝尔的光电话	20
第3章 现代与日常无线光通信	24
3.1 基本原理	24
3.1.1 工作原理	24
3.1.2 光的传播	25
3.1.3 电磁学原理	29
3.1.4 数据交换模型	39
3.2 无线光通信	42
3.2.1 户外无线光通信	42
3.2.2 室内无线光通信	44
3.2.3 学术与技术生态系统	47
第4章 传播模型	49

4.1	引言	49
4.2	基带等效模型	49
4.2.1	无线电传输模型	49
4.2.2	自由空间光传输模型	50
4.2.3	信噪比	54
4.3	封闭环境中的漫射传播链路预算	55
4.3.1	符号间干扰	55
4.3.2	反射模型	57
4.3.3	建模	60
第 5 章	光在大气中的传输	63
5.1	概述	63
5.2	大气信道	63
5.2.1	大气的气体组成	64
5.2.2	气溶胶	64
5.3	光在大气中的传播	65
5.3.1	分子吸收	65
5.3.2	分子散射	65
5.3.3	气溶胶吸收	66
5.3.4	气溶胶散射	67
5.4	光大气传输模型	68
5.4.1	Kruse 和 Kim 模型	68
5.4.2	Bataille 模型	69
5.4.3	Al Naboulsi 模型	69
5.4.4	降雨衰减	70
5.4.5	降雪衰减	70
5.4.6	闪烁	71
5.5	实验装置	74
5.6	实验结果	75
5.6.1	实验结果与 Kruse 和 Kim 模型的对比 (850nm)	75
5.6.2	与 Al Naboulsi 模型的对比	76
5.7	雾、霾和水汽	77
5.8	跑道可视范围 (RVR)	78
5.8.1	能见度	78
5.8.2	测量仪器	79
5.9	自由空间光链路参数计算	83
5.10	小结	84

第 6 章	室内光链路预算	86
6.1	发射与接收的参数	86
6.1.1	传输设备参数	87
6.1.2	接收设备	89
6.2	视距光通信链路计算	91
6.2.1	几何损耗	91
6.2.2	系统裕量	92
6.2.3	覆盖范围	92
6.2.4	信道的互易性及非互易性	93
6.3	带逆反射器的通信链路预算	94
6.3.1	工作原理	94
6.3.2	光预算	94
6.4	光预算实例及信噪比	96
6.4.1	光预算示例	97
6.4.2	SNR 与 BER 示例	98
第 7 章	辐射损伤、安全、能量和相关法规	100
7.1	辐射损伤	100
7.1.1	国际标准	100
7.1.2	激光类别	101
7.1.3	计算方法	103
7.2	通信保密性	105
7.2.1	物理保密	105
7.2.2	数字方案	106
7.3	能量	108
7.4	法规	108
7.4.1	监管组织	108
7.4.2	无线光学设备规定	109
第 8 章	光器件与光电器件	110
8.1	引言	110
8.2	光电设备：发射器和接收器	111
8.2.1	材料和结构	111
8.2.2	光源	112
8.2.3	光接收器	117
8.3	光学器件	120
8.3.1	光发射器件	120

8.3.2	光接收器件	121
8.3.3	光学滤波	122
8.3.4	小结	124
第 9 章	数据处理	125
9.1	引言	125
9.2	调制	125
9.2.1	开关键控调制 (OOK)	126
9.2.2	脉冲位置调制	127
9.2.3	正交频分复用 (OFDM)	128
9.2.4	分集: MIMO	129
9.2.5	小结	130
9.3	编码	130
9.3.1	原理和定义	130
9.3.2	编码举例	132
9.3.3	小结	137
第 10 章	数据传输	138
10.1	引言	138
10.1.1	定义	138
10.1.2	接入方法	139
10.1.3	服务质量参数	140
10.2	点到点链路	141
10.2.1	遥控器	141
10.2.2	红外资料协会	142
10.2.3	可见光通信协会	145
10.3	点到多点数据链路	145
10.3.1	IEEE 802.11 IR	145
10.3.2	ICSA—STB50 (兼容 IEEE 802.3—以太网速度)	146
10.3.3	IEEE 802.15.3	147
10.3.4	IEEE 802.15.7	148
10.3.5	光无线媒体接入控制	148
10.4	小结	149
第 11 章	设备和系统工程	151
11.1	自由空间光系统工程和设备	151
11.1.1	操作原理	151

11.1.2	特点	152
11.1.3	实现建议	154
11.1.4	光链路预算	154
11.1.5	FSO 链路有效性（可利用率）	156
11.1.6	小结	159
11.2	受限空间的无线光系统与设备	160
11.2.1	家庭居室结构	160
11.2.2	统计分析和覆盖区域	160
11.2.3	光链路预算	163
11.2.4	室内无线光系统优化	166
第 12 章	结论	168
附录 A	几何光学、光度测定和能量基础	170
A1.1	几何光学基础	170
A1.1.1	折射率	170
A1.1.2	费马原理	170
A1.1.3	斯涅耳-笛卡儿定律	171
A1.1.4	几个定义：光源、成像和焦距等	171
A1.2	光度测定基础	172
A1.2.1	球面度（立体角单位）	172
A1.2.2	立体角	172
A1.2.3	光强度	173
A1.2.4	光通量	173
A1.2.5	光照度	173
A1.2.6	光亮度	173
A1.2.7	光度测量和辐射度量的转换	174
A1.2.8	布格关系	175
A1.2.9	光能或辐射功率	175
A1.2.10	光强	176
A1.2.11	光亮度	176
A1.2.12	接收面的光照度	176
A1.2.13	几何扩展	177
A1.3	辐射度量和光度量的对应关系（表 A1.4）	177
附录 B	分贝单位	179
附录 C	缩略词	182
参考文献		189

绪 论

目前,电信运营商正在面临信息传输需求(话音、数据、图像等)日益增长的问题。解决办法之一就是提高载波频率,以提供更大的带宽和更高的传输速率。用光波波段作为无线通信链路载波,其波长范围包括可见光、紫外线、红外线,可以实现通信速率从几千比特每秒到几百吉比特每秒的无线信息传输。光波不仅可以实现短距离通信,如限定在一定空间(办公室、客厅、汽车、飞机舱等),也可以实现中距离(几十米到几千米)的大气光链路或自由空间光通信,还可以实现空间(如高空平台、飞机、无人机、卫星等)长距离通信。

无线光通信并不是新技术。早在几千年前,在 Abbot Claude Chappe 之前,就有了空间光通信,虽然非常原始,但实现了光的传输过程。原始光通信的信息容量很低。直到 18 世纪光学电报出现,长距离的光通信才开始起步,但其服务质量较差,因为发射方、接收方、人及原材料这些因素都缺乏再现性和可靠性,其传输媒质——空气同样具有不确定性。

之后不久,电(电荷)和铜取代了光(光子)和空气。通过铜线传输的信息可以实现相对较高的信息速率。到 21 世纪,这种以铜线作为传输媒介的通信方式仍在广泛应用,因为几十年来,以铜作为传输媒介的通信方式,已经形成了覆盖全球的巨大信息传输网络。

1960 年,激光的发明铺平了光纤通信替代铜线通信的道路,光纤通信方式能提供几近无限的传输容量。1970—1971 年,低损耗光纤和室温下可连续工作的半导体激光器几乎同步发展,从而引发了有线光通信的一场革命。将玻璃用作传输光子的介质,而玻璃纤维可拉伸至几千千米的长度。因此,光纤无可争议地成为水下、远距离以及城域间信息传输的载体,它是信息高速公路基础。

随着电信业务的不断扩大,自由空间激光通信技术成为提高数字信息传输容量显而易见的首选方案。这一技术的兴起是由于以下几个因素所致:在监管方面,搭建链路时,不需要频率授权或获得特殊许可,但搭建大规模无线电链路时必须获得授权或许可;在经济方面,搭建无线链路比敷设光缆要更容易,更快捷,更便宜;在通信速率方面,光载波要比无线载波(甚至毫米波)通信速率高很多,可达千兆比特每秒。另外,系统主要器件(激光器、接收器、调制器等)已广泛地应用于光纤通信技术,其技术的成熟意味着降低了设备成本。目前,数字无线数据通信在全

球的市场主要还是使用无线电传输技术。但是，无线电通信有局限性，并且不可能靠自身解决，这是由于它有限的谱宽决定的，而社会的发展对通信速率需求是不断增加的。

无线光通信主要应用包括无线话音通信、信息网络和高清电视。

本书的目的是介绍目前用于信息交互的自由空间光通信(FSO)。由于它的众多优点(高速率、低成本、机动性、安全性等)，在未来10年可能会引发电信技术的爆炸性变革，它将成为计算机通信网络应用不可或缺的重要技术，无论是短距、中距还是长距离无线通信。

从方便教学出发，本书分为12章以及两个附录。

第1章讨论光的基本概念：历史的发展、不同的理论(波粒二象性)、传播及各种定律(反射、透射、折射、漫射、衍射等)、干涉、速率、光谱组成、发射等，直到1960年激光的发明。激光的出现，使CD、DVD、激光打印机、计算机磁盘、光纤、激光焊接、激光手术等技术的应用成为现实。

第2章首先介绍无线电通信的基本概念，之后回顾无线光通信在各个时期的不同发展历史(烟雾信号、光信号、火把动作信号等)。最后，学习18世纪，经历无数次考验的发明，包括Chappe的光电报，即日光电报或太阳摄影机，以及贝尔的光话机。这里将详细介绍其原理(机制、编码等)和应用。

第3章介绍无线光通信与现代日常生活关系：基本原理、电磁传播理论、电磁波频谱、传播模式(窄发散角、宽发散角、散射等)、OSI分层模型和各种标准(VLC、IEEE 802.15.7、ECMA、IrDA)。最后，介绍现代无线光通信一般应用，包括室内(有限空间)、室外(地面自由空间)和空间(链接到飞机、无人机、高空平台、卫星平台等)应用。

第4章介绍传播信道的建模。首先介绍光信道基带和不同的调制方式，包括开关键控(OOK)、强度调制(IM)、脉冲位置调制(PPM)等。与无线电模型进行对比介绍。介绍了噪声特性(热噪声、周期性噪声(人造光)、散粒噪声等)。对光和电两种不同技术的数字通信通过信噪比进行了系统性能比较。光传输信道路径很多(直射、反射、漫反射等)，不同路径的光一起传输，有可能会发生码间串扰。给出了不同类型的反射(镜面反射和漫反射(Lambert, Phong))，当光波遇到远大于自身波长的表面(地板、墙壁、天花板、家具等)时会发生反射。反射特征依赖于材料表面特性、波长和入射角。最后将重点放在不同的漫射模型上。

第5章研究大气中的传播问题。大气影响光传输，例如吸收和散射(分子和气溶胶颗粒)，不同温度影响空气成分指标，从而导致光传输特性的变化。水汽(雨、雪)对光衰减有不同模型(Kruse, IUm, Bataille, Al Nabulsi, Carboneau等)，相应的实验结果将一一给出。实验给出各种天气条件(雨、冰雹、雪、烟雾、薄雾等)下的光学传播特性。雾对可见光和红外光波传播影响最大，可从多方面说明(定义、

形成、特点和发展)。给出了能见度的定义为描述大气不透明性的参数,介绍了能见度特性测量仪器(大气透射表、散射仪)。无线光通信性能仿真软件可以模拟大气光链路的可用或中断。这个软件的设计,为决策发展中短距离的点对点高速大气光通信提供了有力支撑。

第6章讨论了光链路在有限空间的设计预算,这是建立链接的一个重要步骤。已知接收器的灵敏度,计算光信道的总损耗,最后估算出发送器功率。损耗可以分为几何损耗、光学损耗、节点损耗、分子吸收损耗等。考虑不同系统,包括视线可见的直线系统与反射系统,然后利用已知的信噪比确定误差率。不同系统信道信号的衰减或中断是不同的。

第7章介绍抗扰、标准以及辐射安全问题。为了使用安全,必须注意传输能量阈值。国际电工委员会制定了标准,列出7种不同危险级别的光源。通信安全可以通过硬件或软件编码来保证。系统的能量消耗是选择一项技术的重要参考指标。本章最后介绍了相关标准制定机构。

第8章为光学和光电子学,介绍组成系统的各种光学设备,包括光发送、光接收和光学滤波等光学设备,并进一步介绍其工作机理,如系统工作原理、光发送机理(白光发光二极管、红外发光二极管、激光器等)、光接收工作机理(光伏电池、PIN光电二极管、雪崩光电二极管、MSM光敏二极管等)。

第9章数据处理,介绍发射之前的数字/模拟转换和接收后的模拟/数字转换。数据处理包括诸多操作,如滤波、压缩、分析、预测、调制和编码,其中只有调制和编码在无线光通信中有特殊含义,其他操作无特别不同。对不同的调制方式,如OOK、RZ、ASK、QAM、PPM、OFDM和MIMO技术,进行了讨论。编码部分详细讨论了原理、定义、性能,并给出了实例,如奇偶校验码、循环冗余校验码、分组码、BCH码、RZ码、卷积码等。

第10章介绍了数据链路层,OSI系统中的第二层。这一层的协议从网络层获取需求并处理该服务请求到物理层(下行方向),反之亦然(向上方向)。介绍了多种访址方式(时分多址、频分多址、码分多址、载波侦听多址、波分多址和空分多址),并提及服务质量参数。无线光通信中提出的各种协议用来实现不同类型的数据链接:点对点(远程控制、IrDA、VLC)和点对多点(IEEE 802.11 IR、IEEE 802.3以太网(ISCSTB50)、IEEE 802.15.3、IEEE 802.15.7、OWMAC)。

第11章研究了无线光通信在自由空间和受限空间中的工程设备安装问题。在自由空间中(FSO),首先给出了在设备安装之前需要掌握的基本原理、特点和实现建议,然后讨论了法国多个城市光链路预算及其有效性案例。在受限空间中,首先描述了居室结构:不同房间面积分布及通信覆盖面积人口比例,在无线光学系统的体系结构中,每个房间至少有一个光学无线传输/接收系统基站(BS)。

通过无线光通信基站,实现与每个房间终端设备的通信。最后,这些终端连接

或集成到多媒体通信设备（计算机、监视器、PAD 等）。不同的模拟光学系统通过被称为 QOFI 的免费软件工具实现并通过链路预算准备：基站位于天花板中央（情况 A）、门上（情况 B）或在一个接口上（电话、以太网、输电线（情况 C））；终端安装在房间的一个较低的角落（情况 1），在与门等高的位置（扬声器、运动检测器）（情况 2），或在房间中间的地面（情况 3）。

而后进行系统各方面的讨论（生产适合无线光学的光电模块，考虑安全方面因素在发射端放置扩散器，通过设置一个称为“鱼眼”的光学器件获得均衡光增益，或者进行均衡处理、正交频分复用等）。

第 12 章讨论了无线光通信在自由空间或有限空间的未来发展，如在家里或办公室，传输媒介稳定，优势明显。无论是家中还是办公室，光通信发展潜力很大，将有很好的经济和商业价值。

附录提供相关几何光学的各种概念（折射率、折射定律、清晰度、图像、焦距等），光度量（球面弧度、立体角等）和能量（光强度、光通量、照度、亮度、能流、照明、几何范围等），以及各种常用相关对数符号（dB、dBW、dBm 等）。

本书的编写，旨在推动发展 ITU-R 新的建议。ITU-R 是国际电信联盟的无线电通信部门，对地面自由空间光通信传输数据和方式进行统一规范，这些建议标准在精确设计光通信链路和相关系统时是必须具备的。

起初，神创造天地，地是空虚混沌的，渊面黑暗；神的灵运行在水面上。神说“要有光”，就有了光。神看光是好的，就把光暗分开了。神称光为昼，称暗为夜。有晚上，有早晨，这是头一日。

“菲亚特勒克斯——愿知识之光普照大地”

基督教的《旧约全书》第 1 部分
《摩西五经》之第 1 卷——《创世纪》

第 1 章

长久以来，光一直吸引着人类，画家用画布描摹它，作家用文字赞美它，科学家和学者们对它展开了丰富的研究。例如，图 1.1 是塔皮莱（Taperet）夫人（第 22 王朝，公元前 10 或 9 世纪）向太阳神哈拉克提祈祷的石碑。光的意义是为从过去到现在各种文明的各种庆典提供了几乎不受限制的场地。



图 1.1 塔皮莱（Taperet）夫人的石碑（卢浮宫博物馆）

几个世纪以来，唯一被人所知的放射线是光。第一个所写的关于光的分析可追溯到希腊和拉丁文明。对于希腊人欧几里得（前 325–前 265）和托勒密（Ptolemy，前 168–前 90）来说，光是从我们的眼睛发出的，是物体图像的矢量。另一方面，伊壁鸠鲁（Epicurus，前 341–前 270），还有拉丁诗人卢克莱修（Lucretius，前 98–前 55），他们认为明亮的物体传送少量的图像到空间中，这称作“影”。这些影全部进入我们的眼睛，所以我们可以“看到”这些物体。这之后的理论称为“光的微粒理论”，在 17–18 世纪期间，该理论以一种更加抽象的方式被继续研究。

因此，从 17 世纪开始，光的特性一直是争论的来源，并且持续了超过 300 年。争论的基本问题就是：“光：是一种波还是一连串的粒子？”

为了解释光线的反射和折射规律，勒耐·笛卡儿（1596–1650）引出粒子从镜子上弹出，就像在一个叫“室内网球”的法国游戏中，当球进入一个透明介质（水或玻璃）时，其速度会发生改变。这就是基本的斯涅耳-笛卡儿（Snell–Descartes）定律的来源。惠更斯（Huygens，1629–1695）参考了当时斯涅耳在该主题上未发表的研究成果，因而折射定律的原创归功于维勒布罗德·斯涅耳（Willebrord Snell）。目前，又认为折射定律应该归功于伊本·萨赫尔（Ibn Sahl，940–1000）在 985 年的发现。伊本·阿尔·海什姆（Ibn Al-Haytham，965–1039）写了一本有光学的书（《光学词典》），书中提到了折射现象，但他并没有利用数学定律来研究。由于光线的轨迹是以集合规则来建立的（事实上也是这样的），该学科原来称为折射光学，后来称为几何光学。

只在几十年之后，艾萨克·牛顿（1643–1727）在 1704 年研究了光的粒子模型。光是由在真空和不同的透明介质中快速移动的发光物体发出的小的粒子组成的。他毫不犹豫地复杂化该模型，使得它可以与所观察到的现象（如牛顿环）相兼容。这种干涉现象（图 1.2）是通过在一个具有光源（L'）的平坦的表面（P）上放置一个透镜（L）而获得的。在这个实验中，可能观察到一系列交替光暗的同心圆（A）[NEW 18]。这个现象现在由波的方法来解释。

同一时期，惠更斯提出了一个光波模型，模拟波在水的表面传播。这个模型也解释了反射和折射现象。但是，以他万有引力定律获得的特殊威望，牛顿平息了该争论，将他的光的粒子理论引入了当时的科学界中。

直到大约一个世纪之后，存在的许多已知的现象都通过几何光学（光的分解、干涉等）来解释，这些都仰赖托马斯·杨（1773–1829）和奥古斯丁·菲涅耳（1788–1827）对波的研究所取得的成就。光波理论把光定义为振动，类似于声音，在一个叫“以太”的不可见的环境中振动。

由于当时的仪器无法测量，初步估算具有很重要的振动频率振动的传播速度为 $200000 \sim 300000 \text{ km/s}$ ，该模型在解释干涉和衍射现象时具有突出的效果。