

❖ 高等院校通信与信息专业规划教材 ❖

# 光子学与光电子学

OPTOELECTRONICS AND PHOTONICS



原荣 邱琪 编著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

本书赠送电子教案  
及习题解答

高等院校通信与信息专业规划教材

# 光子学与光电子学

原荣 邱琪 编著



机械工业出版社

本书以光的反射、干涉、偏振、双折射和非线性等电磁理论,从光电效应、电光/磁光/声光/热电效应、光热/光电导/光电荷效应、电致/光致发光等效应出发,介绍了各种激光器、光放大器、光探测器、光电器件、发光及显示器件等的基本原理、最新技术及进展,以及光子学与光电子学在光纤通信、军用光电系统、激光武器中的应用。

本书概念清晰、由浅入深、系统性强、内容前后呼应、叙述通俗易懂。

本书可作为相关专业学生的教材,也可作为从事光电器件、系统研究教学、规划设计、管理维护的有关人员的参考书。

为配合教学的需要,本书免费提供各章的详尽教学课件和习题题解。读者可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费注册、审核后下载,或联系编辑索取(QQ: 241151483, 电话 010-88379753)。

## 图书在版编目(CIP)数据

光子学与光电子学 / 原荣, 邱琪编著. —北京: 机械工业出版社, 2014.4  
高等院校通信与信息专业规划教材

ISBN 978-7-111-46219-4

I. ①光… II. ①原… ②邱… III. ①光子—高等学校—教材 ②光电子学—高等学校—教材 IV. ①O472.3 ②TN201

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第057458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:李馨馨

责任编辑:李馨馨 崔利平

责任印制:李洋

高教社(天津)印务有限公司印刷

2014年6月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张·484千字

0001-2500册

标准书号: ISBN 978-7-111-46219-4

定价: 42.00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

# 序

20 世纪 60 年代激光器的发明，实现了经典光学向现代光学的跨越，使人们对光与物质的相互作用过程有了新的认识。此后激光和光学领域的研究空前活跃，导致了光子学、光电子学、导波光学、非线性光学等方面一系列新型学科的涌现。光物理和技术的快速发展和广泛应用使其不断向其他学科渗透，产生了一系列交叉学科和崭新的应用领域，推动了信息、交通运输、医疗卫生和国防领域等大量应用学科的发展，形成了众多市场份额可观、发展潜力巨大的光电子产业。

光子学具有丰富的内涵和广泛的应用前景，因此光子学一经提出立刻引起人们的高度重视。人们认为，光子技术将是 21 世纪的骨干技术，在今后世界各国经济实力与国防力量的较量中，光子学必定占据极其重要的位置，甚至认为，未来的世界是光子的时代。

经过几代人的努力，光子学、光电子学和光电子技术得到了广泛深入的发展，发明和产生了大量先进的光电子器件。到了 20 世纪 70 年代，光纤、半导体激光器和光接收器件的生产技术有了惊人的进步，加速了光电子学的发展，也使人们的工作和生活发生了极大的改变。今天，小到我们每个人使用的手机、计算机、电视机、复印机和照相机，大到导弹跟踪制导、航空/航天侦察导航、激光雷达、激光武器，都与光电子技术有关。在能源危机威胁到人类生存和发展的今天，利用光电效应制成的太阳能光电池提供了化解这一危机的新出路。

当前，国外对光子学和光电子学的发展极为重视，投入重金加大研究和开发。而国内对光电子学的认识、重视、科研，特别是基础性的研究还有待加强。

教材建设是高等院校建设的主要内容之一，编写、出版一本好的教材，意味着开设了一门好的课程。

本书内容参考了国外和国内光电子学和光子学的优秀教材，覆盖了光子学和光电子学的主要内容，根据国际专业年会有关光子学和光电子学的最新进展，增加了光电子技术近年来的最新进展，以通俗易懂的方式解释了光子学和光电子学的基本原理，内容充实。而且书中突出重点，实用性强，还精简了比较陈旧、落后并与国内学生已学过知识的重叠内容。无疑对于普及光电子技术教育，推动光电子技术研究发展，科教兴国、科技强军会起到一定的积极作用。

本书作者原荣和邱琪多年来从事光电子技术的研究和教学，已出版了多部教材和学术专著，有的还再版多次，被许多院校作为教材采用。

林尊琪

中国科学院院士

中科院上海光机所

高功率激光物理国家实验室总工程师

# 前 言

光不仅给了人们生存的能源，同时也是诸多信息的载体。经典光学以电磁辐射本身为研究对象。目前光学已渗透到人们生活的每一个细节，渗透到各个科学技术与应用领域。与光学相同，电学也是在电磁学的基础上发展起来的。电子学的发展使人类的生活质量和生产效率得到了极大的提高。

光子学由荷兰科学家波德沃尔特（Poldervaart）于 1970 年首次提出，他认为，光子学是研究以光子为信息或能量载体的科学。电子学是关于电子及其应用的科学，与电子学类比，光子学被广义定义为关于光子及其应用的科学。光电技术是光学和电学的结合，在理论上，主要研究光与物质的相互作用；在应用上，主要研究光的产生、传输、控制、探测及各种应用。光电子学有时狭义地专指光-电转换器件及其应用领域，但广义上也包括光子学中的一些内容。

由于 20 世纪 60 年代激光器的发明，人们对光与物质的相互作用过程的研究呈现出空前的活跃，导致了半导体光电子学、导波光学、非线性光学等一系列新学科的涌现。光电子技术的快速发展和广泛应用使其不断地向其他学科渗透，从而又产生了一系列交叉学科和应用领域，同时也推动着其他学科的发展，形成了许多市场可观、发展潜力巨大的光电子产业。

经过几代人的努力，光子学、光电子学和光电子技术得到了广泛深入的发展，发明和产生了大量先进的光电子器件，不管是民用产品，还是军用装备，都得到广泛的应用。

据近日报道，欧盟提出更要重视光电子学的发展，加大光电子学研究和投入。

所以，对于我们每个人，特别是从事光电子科学技术、光电工程和光信息科学与技术的人员，了解光子学和光电子学的基本知识是至关重要的。

全书共分 10 章，首先介绍了光子学和光电子学概念、进展和理论基础；第 2 章用光线光学和导波光学分析了光波在光纤波导中的传输原理和特性；第 3 章用光的干涉和谐振理论讲解了滤波器、复用/解复用器、激光器、半导体光放大器、阵列波导光栅（AWG）、光纤陀螺和全息技术等的工作原理；第 4 章介绍了偏振理论、光纤偏振模色散、光纤通信系统偏振复用/相干接收技术，利用偏振复用提高信道速率和光信噪比的最新进展；第 5 章阐述了光的双折射现象及其在偏振和液晶显示器件中的应用；第 6 章用光电效应解释了光探测器和光伏电池的工作原理；第 7 章在介绍电光效应、磁光效应、热光效应和声光效应的基础上，对相关的调制器、光开关、光隔离器和光环行器等器件的工作原理进行了讲解；第 8 章对光纤非线性光学效应的应用——光纤拉曼放大、光孤子通信和波长转换技术进行了介绍；第 9 章解释了光热效应、光电导效应、光电荷效应及其有关的热敏电阻、光敏电阻、CCD、CMOS 显示



器件，以及红外热成像技术及其应用；第 10 章介绍了发光机理、电致/光致发光效应及显示器件。

本书反映了当前光子学和光电子学技术的发展水平，增加了近年来的最新进展。主要有各种高能激光器，如化学激光器、碱金属激光器、光纤激光器、自由电子激光器等；各种阵列波导光栅 (AWG) 器件，如 AWG 复用/解复用器、滤波器、可重构光分插复用器 (ROADM)、波长可调激光器、光子集成 (PIC) 多频激光器和光发射机/接收机等。本书还增加了已在高速光纤通信系统中得到广泛使用的高速光探测器件，如单向载流子探测器 (UTC-PD)、波导探测器 (WD-PD)、行波探测器 (TW-PD) 和肖特基结光电探测器，以及由它们构成的 PIC 光接收机。此外，还对偏振复用/间插/相干接收技术、光正交频分复用 (O-OFDM) 系统等进行了介绍。

本书从光电理论出发，系统性地解释了光电子技术的工作原理和最新技术。不管是滤波器、复用/解复用器、阵列波导光栅 (AWG)，还是激光器、半导体光放大器，以及光纤陀螺和全息技术，只要源于同一个光干涉概念，就归类到同一章。

本书概念解释清楚，由浅入深，系统性强，内容前后呼应。比如在第 1 章，在介绍平面电磁波时，提到“光波在给定时间被一定的距离分开的两点间存在的相位差”这一概念很重要。果然，在以后介绍由马赫-曾德尔 (MZ) 干涉仪构成的滤波器、复用/解复用器和调制器，由 AWG 构成的诸多器件、由电光效应制成的外调制器，以及光纤陀螺、液晶显示器均用到这一相位差的概念，并经常使用同一个公式。

为了适合不同层次读者的使用，本书特意在介绍一个现象或器件的原理前，尽量把一些通俗易懂、日常生活中经常会遇到的现象，辅以插图，简单明了地加以说明。本书还插入许多例题，以便读者理解书中的内容。

本书作为教材使用时，根据专业和前修课程的不同，可以全部讲授，也可以选择部分内容讲授，有些内容可以自学，有些内容也可以展开讲授，增加数学分析和推导，尽管本书已将物理概念交代得很清楚了。

机械工业出版社策划编辑李馨馨对本书的出版给予了极大的支持，在此表示衷心的感谢！

作者原荣特地邀请在江苏洪泽湖部队农场劳动接受再教育时，同班战友，现为中国科学院院士、中科院上海光机所高功率激光物理国家实验室总工程师林尊琪写了序，在此也表示诚恳的谢意！

本书由原荣（中国电子科技集团公司第三十四研究所研究员）、邱琪（电子科技大学光电信息学院教授、博导）共同编著完成。

因作者水平所限，书中可能会有遗漏及错误之处，敬请读者指出。

# 目 录

## 前言

第 1 章 概述和理论基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 光子学	1
1.1.2 光电子学	3
1.1.3 光电子器件进展情况	5
1.1.4 光电系统发展概况	8
1.2 光的本质	13
1.2.1 光的波动性	13
1.2.2 光的粒子性	14
1.3 均匀介质中的光波	16
1.3.1 平面电磁波	16
1.3.2 麦克斯韦波动方程	18
1.3.3 相速度和折射率	19
1.3.4 群速度和群折射率	21
1.4 相干	23
1.5 光电子学基础知识	25
1.5.1 能带理论	25
1.5.2 半导体对光的吸收	27
1.5.3 载流子的产生、复合、扩散和漂移	29
1.6 复习思考题和习题	31
第 2 章 光波在光纤波导中的传输	32
2.1 光与介质的相互作用	32
2.1.1 斯奈尔定律和全反射	32
2.1.2 内/外反射	34
2.1.3 抗反射膜	39
2.1.4 古斯-汉森相移和分光镜	40
2.2 平板介质波导	41
2.2.1 光波在波导中传输的条件——全反射和相长干涉	41
2.2.2 单模和多模平板波导—— $V$ 参数	42
2.2.3 TE 模、TM 模和 HE 模	43
2.3 光线光学分析光纤传光原理	44
2.3.1 渐变 (GI) 多模光纤传光原理	45



2.3.2 数值孔径和受光范围	46
2.3.3 光线光学分析光纤模式	48
2.4 导波光学分析光纤传光原理	50
2.5 光纤的基本特性	54
2.5.1 基模传输条件	54
2.5.2 场结构和模式兼并	55
2.5.3 双折射效应和偏振特性	55
2.5.4 模场半径	56
2.5.5 纤芯和包层中的光功率分配	57
2.6 光纤的传输特性	58
2.6.1 光纤色散	58
2.6.2 光纤衰减	60
2.6.3 光纤比特率	61
2.6.4 光纤带宽	62
2.7 光纤衰减的补偿——掺铒光纤放大器	63
2.7.1 掺铒光纤放大器的构成	63
2.7.2 EDFA 工作原理及其特性	64
2.8 复习思考题和习题	67
<b>第 3 章 光的干涉及衍射</b>	<b>69</b>
3.1 光的干涉及应用	69
3.1.1 从机械谐振到光学谐振	69
3.1.2 法布里-珀罗光学谐振腔	71
3.1.3 固体激光器	74
3.1.4 气体激光器	76
3.1.5 染料激光器	77
3.1.6 化学激光器	78
3.1.7 碱金属蒸气激光器	78
3.1.8 法布里-珀罗滤波器	79
3.1.9 半导体激光器	82
3.1.10 半导体光放大器——没有反馈的 F-P 光学谐振腔	86
3.1.11 马赫-曾德尔滤波器	88
3.1.12 马赫-曾德尔干涉滤波复用/解复用器	89
3.1.13 从电介质镜到光子晶体	90
3.1.14 介质薄膜光滤波解复用器	91
3.1.15 自由电子激光器	92
3.2 光的衍射及应用	94
3.2.1 夫琅和费衍射	94



3.2.2	衍射光栅	96
3.2.3	反射光栅解复用器	98
3.2.4	阵列 SOA 集成光栅腔体波长可调激光器	99
3.2.5	布拉格光栅	100
3.2.6	光纤光栅滤波器	100
3.2.7	分布反馈激光器——布拉格光栅的应用	101
3.2.8	波长可调激光器/光放大器	104
3.2.9	垂直腔表面发射激光器	105
3.2.10	光纤激光器	106
3.3	阵列波导光栅器件	109
3.3.1	AWG 星形耦合器	109
3.3.2	阵列波导光栅 (AWG) 的工作原理	110
3.3.3	AWG 复用/解复用器	112
3.3.4	AWG 多频激光器	113
3.3.5	AWG 滤波器	114
3.3.6	AWG 光分插复用器	115
3.3.7	AWG PLC 多信道光接收机	116
3.3.8	AWG 用于 LED 频谱分割多波长光源	117
3.3.9	AWG 用于 ONU 无色 WDM-PON	117
3.4	光纤转速传感器——光纤陀螺	118
3.4.1	真空中的萨格奈克效应	118
3.4.2	光纤中的萨格奈克效应	119
3.4.3	光纤陀螺	121
3.5	全息技术	125
3.6	复习思考题和习题	126
第 4 章	光的偏振及应用	128
4.1	偏振的基本概念	128
4.2	光纤的偏振特性和偏振模色散	130
4.3	偏振复用/相干接收技术和系统	131
4.3.1	相干检测偏振分集接收	131
4.3.2	偏振复用/相干接收传输系统	132
4.3.3	偏振复用/相干接收无中继传输试验系统	133
4.4	偏振复用的应用	135
4.4.1	偏振复用正交频分复用 (OFDM) 光纤传输系统	135
4.4.2	偏振复用将低速信号提升到高速信号	135
4.4.3	偏振复用提高光信噪比	137
4.4.4	偏光式 3D 眼镜	137



4.5 复习思考题 .....	138
<b>第5章 光的双折射效应及应用 .....</b>	<b>139</b>
5.1 光的双折射效应 .....	139
5.1.1 各向同性材料和各向异性材料 .....	139
5.1.2 光的双折射效应原理 .....	139
5.1.3 双折射的几种特例 .....	140
5.1.4 晶体的双色性 .....	141
5.1.5 光纤双折射效应 .....	142
5.2 双折射器件——偏振器件 .....	142
5.2.1 相位延迟片和相位补偿器 .....	142
5.2.2 起偏器和检偏器 .....	144
5.2.3 尼科尔棱镜 —— 一种起偏器 .....	145
5.2.4 渥拉斯顿棱镜 —— 一种偏振分光器 .....	146
5.2.5 偏振控制器 .....	146
5.3 液晶显示器件——双折射和偏振的应用 .....	147
5.3.1 液晶的双折射效应和偏振特性 .....	147
5.3.2 扭曲向列型液晶显示器件 .....	150
5.3.3 超扭曲向列型液晶显示器件 .....	154
5.3.4 有源矩阵液晶显示器件 .....	156
5.3.5 快门式 3D 眼镜 .....	158
5.3.6 液晶显示器的应用及前景 .....	159
5.4 复习思考题和习题 .....	159
<b>第6章 光电效应及应用 .....</b>	<b>161</b>
6.1 光探测概述 .....	161
6.1.1 光探测原理 .....	161
6.1.2 响应度和量子效率 .....	162
6.1.3 响应带宽 .....	162
6.2 光探测器 .....	163
6.2.1 PIN 光敏二极管 .....	163
6.2.2 雪崩光敏二极管 .....	167
6.2.3 单行载流子光探测器 .....	168
6.2.4 波导光探测器 .....	169
6.2.5 行波探测器 .....	171
6.2.6 肖特基结光探测器 .....	173
6.2.7 紫外探测器 .....	176
6.2.8 光敏晶体管 .....	177
6.2.9 光敏二极管负载线及前置放大器 .....	178

6.3 光伏电池 .....	180
6.3.1 光伏电池概述 .....	180
6.3.2 光伏电池发展历史 .....	182
6.3.3 光伏电池工作原理 .....	182
6.3.4 光伏电池 $I-U$ 特性 .....	186
6.3.5 光伏电池的等效电路 .....	190
6.3.6 光伏电池的并联和串联 .....	191
6.3.7 温度对光伏电池的影响 .....	194
6.3.8 光伏电池材料、器件和提高效率的措施 .....	195
6.3.9 聚光光伏电池 .....	199
6.3.10 商用光伏电池技术指标和特性曲线 .....	201
6.4 复习思考题和习题 .....	202
<b>第7章 电光/磁光/声光效应及应用 .....</b>	<b>204</b>
7.1 电光效应及器件 .....	204
7.1.1 电光效应 .....	204
7.1.2 电光调制器工作原理 .....	206
7.1.3 电光强度调制器 .....	206
7.1.4 电光相位调制器 .....	208
7.1.5 马赫-曾德尔幅度调制器 .....	209
7.1.6 QPSK 光调制器 .....	210
7.1.7 电光开关 .....	211
7.2 热电效应及热光开关 .....	211
7.3 磁光效应及其器件 .....	212
7.3.1 磁光效应 .....	212
7.3.2 磁光开关 .....	213
7.3.3 光隔离器 .....	213
7.3.4 磁光波导光隔离器 .....	215
7.3.5 光环形器 .....	216
7.4 声光效应及其器件 .....	218
7.4.1 声光效应及声光滤波器 .....	218
7.4.2 声光调制器 .....	220
7.4.3 声光开关 .....	222
7.5 复习思考题和习题 .....	222
<b>第8章 非线性光学效应及应用 .....</b>	<b>224</b>
8.1 非线性光学效应 .....	224
8.1.1 非线性光学效应的概念 .....	224
8.1.2 几种光纤非线性光学效应 .....	225



8.2 光纤拉曼放大器 .....	228
8.2.1 光纤拉曼放大器的工作原理 .....	228
8.2.2 拉曼增益和带宽 .....	229
8.2.3 放大倍数和增益饱和 .....	230
8.2.4 噪声指数 .....	231
8.2.5 多波长泵浦增益带宽 .....	232
8.2.6 光纤拉曼放大技术应用 .....	233
8.3 光纤孤子通信 .....	234
8.3.1 基本概念 .....	234
8.3.2 光孤子通信实验系统 .....	234
8.4 波长转换器 .....	236
8.5 复习思考题 .....	237
<b>第9章 光热/光电导/光电荷效应及应用 .....</b>	<b>238</b>
9.1 光热效应及其器件 .....	238
9.1.1 热敏效应——热敏电阻 .....	238
9.1.2 温差电效应——热电偶原理 .....	238
9.1.3 热释电效应——热释电探测器 .....	239
9.2 光电导效应及应用 .....	241
9.2.1 光敏电阻的工作原理 .....	241
9.2.2 光敏电阻的特性 .....	242
9.2.3 光敏电阻的偏置电路 .....	244
9.2.4 光敏电阻的种类和应用 .....	245
9.3 光电荷效应及应用 .....	247
9.3.1 电荷耦合器件 (CCD) 的工作原理 .....	247
9.3.2 电荷耦合摄像器件的工作原理 .....	249
9.3.3 CCD 的应用 .....	251
9.3.4 CMOS 图像传感器 .....	251
9.3.5 图像传感器系统及色彩分离技术 .....	253
9.3.6 CMOS 和 CCD 摄像器件的比较 .....	255
9.3.7 光子效应器件汇总 .....	256
9.4 红外热成像技术 .....	258
9.4.1 热成像机理 .....	258
9.4.2 热探测器、光电转换和制冷 .....	258
9.4.3 热成像装置的组成及工作原理 .....	261
9.4.4 焦平面阵列红外探测器 .....	262
9.5 红外技术的应用 .....	263
9.5.1 红外侦察 .....	263

9.5.2 红外遥感	263
9.5.3 红外告警	264
9.5.4 红外跟踪	264
9.5.5 红外制导	264
9.5.6 红外测温	266
9.5.7 红外医疗	267
9.5.8 其他应用	267
9.6 复习思考题和习题	268
<b>第 10 章 发光及其显示器件</b>	<b>269</b>
10.1 电致发光和光致发光	269
10.1.1 发光二极管的发光机理	269
10.1.2 LED 材料和结构	270
10.1.3 光致发光——磷光体、白光 LED、CRT 和等离子体	272
10.1.4 LED 的主要特性和应用	274
10.2 电致发光显示器件	275
10.2.1 薄膜电致发光显示	275
10.2.2 厚膜/薄膜混合电致发光显示	277
10.2.3 粉末电致发光显示	278
10.3 有机电致发光显示器件	278
10.3.1 OLED 器件的结构	279
10.3.2 OLED 显示的工作原理	279
10.3.3 有源矩阵 OLED 显示器件	280
10.4 电致发光显示器件的应用和发展前景	281
10.5 复习思考题	281
<b>附录</b>	<b>282</b>
附录 A 名词术语索引	282
附录 B 内容索引	292
附录 C 符号注释	294
<b>参考文献</b>	<b>298</b>

# 第1章 概述和理论基础

## 1.1 概述

### 1.1.1 光子学

人们的日常生活离不开光和光学，地球上可以采集到的 99.98 % 的能源都来自太阳能，太阳以光的形式抚育着大地，施恩于人类。光不仅给了人们赖以生存的能源，同时也是诸多信息的载体。光是一种频率范围很宽的电磁波，但人类肉眼所能看到的光，其波长仅局限在可见光的狭窄范围内，光学学科正是为此而形成和发展起来的。经典光学以电磁辐射本身为研究对象。目前光学已渗透到人们生活的每一个细节，渗透到各个科学技术与应用领域。

#### 1. 光子学的发展简史

1960 年美国发明了第一台红宝石激光器，1961 年制成氦-氖 (He-Ne) 气体激光器，1962 年制成砷化镓半导体激光器。激光器的发明使科学家对光与物质相互作用过程的研究呈现出空前活跃的局面，极大地推动了光电子技术的发展。1966 年英籍华人高锟 (C. K. Kao) 发表了关于通信传输新介质——光导纤维的具有历史意义的论文，开创了光纤通信的新时代，获得了“光纤之父”的美称。1968 年 RCA 公司利用电刺激液晶使其透光方式发生改变的特性制作了液晶显示装置。1969 年 W. S. Boyle 和 G. E. Smith 发明了将光学图像转化为数字信号的电荷耦合器件 (Charge-Coupled Devices, CCD)。光子学和光电子学的发展简史见表 1.1.1。

1970 年，荷兰科学家波德沃尔特 (Poldervaart) 首次提出了光子学的概念。他认为，光子学是研究以光子为信息或能量载体的学科。电子学是关于电子及其应用的学科，与电子学类比，光子学被广义定义为关于光子及其应用的学科。在理论上，光子学研究光子的量子特性，研究光子与分子、原子、电子以及与光子本身在相互作用时出现的各种效应；在应用上，研究光子的产生、传输、控制及探测规律。由此产生了光子激发（激光）技术、光子传输技术、光子调制技术、光子开关技术、光子存储技术、光子探测技术及光子显示技术等。从而导致了半导体光电子学、导波光学和非线性光学等一系列新学科的涌现。

表 1.1.1 光子学和光电子学的发展简史

2000 多年前	用光传递信息：烽火台、夜间的信号灯及水面上的航标灯
公元前 4 世纪	我国先秦时代伟大学者墨翟在《墨经》里对光的几何性质在理论上作了比较完整的论述
公元前 3 世纪	我国周代用凹透镜向日取火，欧几里得著《光学》
公元 13 世纪	西方国家用金属磨成一个凹面镜，在太阳光下取火
1864 年	麦克斯韦 (Maxwell) 通过理论研究指出，和无线电波、x 射线一样，光是一种电磁波，光学现象实质上是一种电磁现象，光波就是一种频率很高的电磁波
1867 年	麦克斯韦证实，光的传播就是通过电场、磁场的状态随时间变化的规律表现出来的。他把这种变化列成了数学方程，后来人们就叫它为麦克斯韦波动方程，这种统一电磁波的理论获得了极大的成功

(续)

1876年	美国人贝尔发明了光电话(光源为阳光,接收器为硒管,传输介质为大气)
1888年	德国物理学家赫兹首先用人工的方法获得了电磁波
1891~1893年	科学家用实验方法测出了电磁波的传播速度,它和光的传播速度近似相等
1897年	法国物理学家法布里(Fabry)和珀罗(Perot)发明法布里-珀罗(Fabry-Perot)光学谐振器,奠定了激光器、滤波器和干涉仪等的理论基础
1905年	爱因斯坦用光量子的概念,从理论上成功地解释了光电效应现象,奠定了光探测器、光伏电池和电荷耦合器件等的理论基础,为此,他于1912年获得了诺贝尔物理学奖
1915年	澳大利亚出生的英国物理学家布拉格(W. L. Bragg, 1890~1971)与他的父亲共同发明了布拉格衍射方程,并于1915年他25岁时获得了诺贝尔物理学奖
1929年	L. R. 科勒制成了银氧铯光电阴极,出现了光电管
1947年	美国物理学家肖克利(W. B. Shockley)等人发明了晶体管,电子学开始了革新意义的飞跃,为此他们获得了1956年度诺贝尔物理学奖
1948年	荷兰出生的英国物理学家Dennis Gabor(1900~1979)发明全息技术,1971年获得了诺贝尔物理学奖
1960年	美国人梅曼(T. H. Maiman)发明了第一台红宝石激光器,并进行了透镜阵列传输光的实验
1960~1962年	Ali Javan等人在美国贝尔实验室第一次成功地演示了氦-氖(He-Ne)激光器连续波工作
1962年	Robert Hall等人在美国纽约首次报道了砷化镓结型半导体激光器的工作
1966年	英籍华人高锟发表了通信传输新介质——光导纤维的论文,开创了光纤通信的新时代,为此,获得了2009年度诺贝尔物理学奖
1968年	美国RCA公司利用电刺激液晶使其透光方式发生改变的特性制作了液晶(LCD)显示装置
1969年	W. S. Boyle和G. E. Smith发明了将光学图像转化为数字信号输出的电荷耦合器件(CCD),为紫外、可见光和红外焦平面阵列等固态成像器件的发展开辟了道路。为此,获得了2009年度诺贝尔物理学奖
1970年	美国康宁公司研制成功损耗为20 dB/km的石英光纤 美国贝尔实验室和日本NEC公司先后研制成功室温下连续振荡的GaAlAs双异质结半导体激光器 荷兰科学家波德沃尔特(Poldervaart)提出了光子学的概念

## 2. 光子具有的优异特性

1) 光子具有极高的信息容量和效率,作为信息的载体,光频与电频相比,要大出好几个数量级,所以,光子的信息容量要比电子的大得多,一个光子具有承载成千上万个比特信息的能力。

2) 光子具有极快的响应能力,电子脉冲宽度最窄限定在纳秒(ns,  $10^{-9}$  s)量级,因此电子通信中信息速率被限定在Gbit/s ( $10^9$  bit/s)量级。对于光子来说,由于光子是玻色子,没有电荷,而且能在自由空间传播,因此光子脉冲很容易做到脉宽为皮秒(ps,  $10^{-12}$  s)量级。实际上,现在实验室的光子脉冲宽度已达到小于10个飞秒(fs,  $10^{-15}$  s)量级。因此使用光子作为信息载体,信息速率能够达到几十、几百Gbit/s,甚至几个、几十个Tbit/s ( $10^{12}$  bit/s)都是可能的。

3) 光子具有极强的互连能力和并行能力。如上所述,电子有电荷,因此电子与电子之间存在库仑作用力,这就使得它们彼此间无法交连。例如,在电子技术中,两根导线如果交连,就会发生短路。所以,在电路中为了实现互连,就只能像搭立交桥那样,将其运行路线彼此隔离,显然这就使互连受限,成为限制电子信息速率与容量的一个主要因素。另外,在电子技术中,电子信号也只能串行提取、传输和处理,对于两维以上的信号,如图像信号,则只好依靠扫描手段将其转换为一维串行信号来处理。而光子无电荷,彼此间不存在排斥和吸引力,具有良好的空间相容性。例如,在拟开发的第六代计算机——神经网络光计算机中,可进行超大规模的群并行处理,实现足够大的网络规模。

4) 光子具有极强的存储能力。不同于电子存储,光子除能进行一维、二维存储外,还能

完成三维存储。如把频率维算上,可用于存储的参量更多,因此光子具有极大的存储容量。如果使用可见光,光子的存储能力则为  $10^{12}$  bit/cm<sup>3</sup>。三维存储的优势除容量大外,还可以并行存取,且信息写入和读出都是逐页进行的,并能与运算器并行连接,因此速度很快。另外,因光子无电荷,可防电磁干扰,保密性好。

### 3. 光子学分子学科

光子学在发展中已形成诸多重要的研究领域,产生了许多分子学科。

1) 基础光子学。基础光子学包括量子光子学、分子光子学、超快光子学和非线性光子学等。

量子光子学,光具有波动性和粒子性,光子是量子化光场的基本单元,量子光场遵循量子力学规律。量子光学侧重于理论,而光子学更侧重技术,但它的基础是量子光学。量子光学的效应、规律和理论等将不断地为光子学的发展开拓新的途径,产生新的突破。

分子光子学,如有机/无机聚合物发光器件、有机微腔发光器件、有机/聚合物激光器件等。在光场的作用下,如液晶分子发生光致异构、取向、重排等物理过程。

超快光子学,如飞秒光电子技术、高峰值功率密度脉冲的产生、光孤子的形成和传输。

非线性光子学,如受激拉曼放大、波长转换、光孤子传输和变频技术产生新的光子源等。

2) 光子学器件,包括新型激光器、光放大器、新型探测器、有源光子无源器件等。

3) 信息光子学 (Infophotonics),它是光子学与信息科学的交叉学科,是一门新兴学科。信息科学是光子学的重大应用领域,光子作为信息载体的优势与竞争力正在不断地被挖掘和开拓。因此,如果说今天是电子时代,那么明天将是光子时代。信息光子学包括导波(光纤)光子学、光纤通信技术、光存储技术、光显示技术等。

4) 集成与微结构光子学,包括半导体集成光子学、微结构光子学等。

5) 生物医学光子学 (Bio-medophotonics),它是用光子来研究生命的科学,涉及生物系统以光子形式释放的能量、来自生物系统光子的探测,以及这些光子携带的有关生物系统的结构与功能信息,包括生物光子学、医学光子学等。

如上所述,光子学具有丰富的内涵和广泛的应用前景,因此光子学一经提出即刻引起人们的高度重视。早在1973年,法国率先召开了国际光子学会议。1978年成立了欧洲光子学会,其后一些国际性学术刊物和会议也纷纷更换名称,冠以光子学的头衔。1991年,美国政府将光子学列为国家发展重点,认为光子学在国家安全与经济竞争方面有着深远的意义和潜力,并且肯定,通信和计算机研究与发展的未来属于光子学领域,之后,美国各地就建立了众多光子学高技术研究中心。人们认为,在今后世界各国经济实力与国防力量的较量中,光子学必定占据极其重要的位置,甚至认为,未来的世界是光子的世界。

## 1.1.2 光电子学

与光学相同的是,电子学也是在电磁学的基础上发展起来的。与光学不同的是,电波的波长比可见光的波长长得多,电学并不能直接来自人类感官(如视觉)的感觉,而是来自人类对生产和生活积累的知识。从1947年晶体管诞生起,电学开始了具有革新意义的飞跃。电子学的发展使人类的生活质量和生产效率得到了极大的提高。考虑到光学和电学各自所拥有的优点,于是一种吸收并巧妙结合各自优点,产生一些独特性能,实现更新、更广泛应用的光电子学和光电子技术就逐渐形成了。



光电子学是光子学和电子学结合而形成的技术学科。

电子和光子是当今和未来信息社会的两个最重要的微观信息载体，它们具有各自的个性，分别属于电子学和光子学的研究范畴。电子学研究用电波传输信息，而光子学研究用光波传输信息。但是，从广义上讲，它们都属于电磁波的范畴，只是频率高低不同，所以，光子学和电子学存在某种“血缘”关系。电子学/光子学分别是研究电子/光子运动规律的科学，包括研究电子/光子产生的方法、电子/光子运动的规律以及控制它们的方法。既然它们都属于电磁波的范畴，所以，传统电子学中的许多概念、原理和技术，如放大、谐振和相干，调制、倍频/分频和混频，双稳态、通信、雷达和计算机等，原则上都可以延伸到光子学中，见表 1.1.2。

表 1.1.2 电子学和光子学的异同

项 目	电 子 学	光 子 学
波动性	电子具有波动性（电子衍射）	光子具有波动性（赫兹实验）
粒子性	电子具有粒子性（汤姆孙实验）	光子具有粒子性（光电效应）
理论解释	低速电子用薛定谔方程（依赖于作用势） 高速电子用麦克斯韦波动方程组（依赖于传输介质，如自由空间、波导管或介电常数周期结构）	麦克斯韦波动方程组 在介电常数以光波长周期变化的结构中，光子的运动规律类似于晶体中电子的运动
信息载体	带负电荷、有静止质量和自旋的电子	不带电、无静止质量、有偏振的光子
相干性	电磁振荡回路（由电感 L 和电容 C 组成）产生正弦电磁波，具有很好的相干性	由法布里-珀罗谐振腔产生的光波也具有良好的相干性
调制	信息信号对高频载波进行幅度调制、频率调制、相位调制	信息信号通过电光效应、声光效应和磁光效应可对光波进行幅度调制、频率调制、相位调制
倍频和混频	利用电子回路实现	利用石英晶体的非线性特性或半导体光放大器（SOA）对光波进行倍频和混频
放大	电子放大器	光子放大器（掺铒光纤放大器、拉曼光纤放大器、SOA）
通信	电线/电缆通信、微波空间通信	光纤/光缆通信、光波空间通信
雷达	发射大功率窄脉冲电波探测飞机和导弹的运行轨迹	利用短波长发送脉冲持续时间十分短的激光脉冲探测飞机和导弹的运行轨迹
计算机	用电子电路构成电子双稳态制作计算机，串行处理数据，限制了计算机的数据处理速度。分布电容等效为一个 RC 电路，限制了计算机的运行速度和信息传输速度	利用介质折射率的非线性效应制成法布里-珀罗谐振腔光学双稳态，构成光计算机，并行处理信息，运算速度快，不存在 RC 问题，光脉冲很窄，可提高处理数据速率
其他	电子是自旋为 1/2 的费米子，电波是标量波，电子之间有很强的相互作用	光子是自旋为 1 的玻色子，光波是矢量波，光子是独立的，光子之间没有相互作用

在发展模式上，光子学和电子学也有惊人的相似之处，图 1.1.1 为电学和光学发展模式的比较。

电学 → 电子学 → 电子回路 → 电子集成 → 电子系统 → 电子工程 → 电子产业  
 光学 → 光子学 → 光子回路 → 光子集成 → 光子系统 → 光子工程 → 光子产业

图 1.1.1 电学和光学发展模式比较

正是由于这种相似，让人们得以借鉴，才不断地为创造思维与开拓性研究提供了契机，从而不断地促成了光子学的飞速发展。

狭义讲，光电子学有时专指光-电转换器件和电-光转换器件及其应用领域。但广义上也包括光子学中的一些内容。

光电子学是光子学和电子学的结合，在理论上，主要研究光与物质的相互作用特性；在应用上，主要研究光的产生、传输、控制、探测及各种应用。它涉及几何光学（折射和