

光信息通信技术

实用手册

光情報通信技術
ハンドブック

光情報通信技術ハンドブック
編集委員会 編

コロナ社

〔日〕光信息通信技术手册

编辑委员会

金軫裕

叶常君

编
译
校



科学出版社

www.sciencep.com

光信息通信技术 实用手册

〔日〕光信息通信技术手册

编辑委员会 编

金轸裕 译

叶常君 校

科学出版社

北 京

图字: 01-2003-8871 号

内 容 简 介

本手册简洁阐述了有关光信息通信技术的基础理论、基本器件、基本系统,对最新成果作了完整的归纳和总结。本手册共分四篇。第1篇阐述光电子的基础理论,主要有光物理、激光基础、光波工程、量子光学等;第2篇介绍光电子器件,主要有发光元件、接收元件、光纤、波导性光调制器、空间光调制器、光电子集成电路等;第3篇讲述光通信系统,主要有主干光传输系统、用户系统、局域网、光波通信技术、超高速光处理技术、光通信和多媒体社会等;第4篇则叙述光信息系统,主要有光信息记录、显示技术、光计算、光互连、光计量的先进技术等。

本书是从事光技术、半导体技术、网络技术、信息技术人员及相关专业大专院校师生难得的实用手册。

图书在版编目(CIP)数据

光信息通信技术实用手册/(日)光信息通信技术手册编辑委员会编;金珍裕译;叶常君校. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-013632-2

I. 光… II. ①光… ②金… ③叶 IV. TN929.11-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 065726 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲/责任制作:魏 道

责任印制:刘士平/封面设计:李 祥

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

北京东方科图图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2005年1月第一次印刷 印张:25 7/8

印数:1 4 000 字数:790 000

定价:62.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

原著编辑委员会成员

委员长: 神谷武志 (东京大学名誉教授, 大学评估、学位授予机构)

委员: 荒川泰彦 (东京大学)

石尾秀树 (大阪工业大学)

大津元一 (东京工业大学)

向井孝彰 (NTT Electronics)

山田 实 (金泽大学)

山本喜久 (斯坦福大学)

执笔者一览表

天野 浩 (名城大学) 第2篇 1.3 节

荒井滋久 (东京工业大学) 第2篇 1.1 节

石尾秀树 (大阪工业大学) 第3篇 导论, 第7章

石川 朗 (NEC Engineering) 第2篇 第8章

石田邦夫 (东芝) 第1篇 第2章

井筒雅之 (通信综合研究所) 第1篇 第3章

伊藤 武 (千叶工业大学) 第3篇 1.2 节

井上宏明 (日本 Opnext) 第2篇 6.2 节

井元信之 (综合研究大学院大学) 第1篇 第5章, 第4篇 3.3 节

岩下 克 (NTT) 第3篇 4.1 节, 4.2 节

氏原纪公雄 (电气通信大学) 第1篇 第1章

江口直哉 (索尼) 第4篇 1.3 节

大津元一 (东京工业大学) 第4篇 5.2 节

笠原健一 (立命馆大学) 第4篇 4.2 节

金田哲也 (NTT-ME) 第3篇 2.1 节, 2.2 节

神谷武志 (东京大学名誉教授, 大学评估、学位授予机构)

第1篇 第7章, 第2篇 6.1 节, 第4篇 导论

川瀬正明 (千岁科学技术大学) 第3篇 1.3 节, 2.4 节

久间和生 (三菱电机) 第4篇 3.2 节

久保高启 (浜松地域 Technopolis 推进机构) 第4篇 1.1 节

久保田重夫 (索尼) 第4篇 1.3 节

黑川隆志 (东京农工大学) 第4篇 3.1 节

- 小柴正则 (北海道大学) 第2篇4.1节
- 后藤显也 (东海大学) 第4篇1.2节
- 小林骏介 (山口东京理科大) 第4篇第2章
- 小柳正光 (东北大学) 第4篇4.3节
- 佐藤健一 (NTT) 第3篇4.3节
- 猿渡正俊 (防卫大学校) 第3篇第5章
- 须藤昭一 (NTT) 第2篇第5章
- 泉对信太郎 (东京特殊电线) 第2篇3.3节
- 滝泽国治 (成蹊大学) 第2篇第7章
- 立川义彦 (安藤电气) 第3篇4.4节
- 田中 茂 (住友电气工业) 第2篇3.1节
- 谷内哲夫 (东北大学) 第1篇4.1节
- 土屋 裕 (浜松 Photonics) 第4篇5.3节
- 中泽正隆 (东北大学) 第1篇第6章
- 萩本和男 (NTT) 第3篇1.1节
- 挟间寿文 (产业技术综合研究所) 第2篇1.2节
- 春明正光 (大阪大学) 第2篇4.2节
- 保立和夫 (东京大学) 第4篇5.1节
- 前田成道 (日本 Opnext) 第3篇第3章
- 松岛裕一 (KDDI 研究所) 第2篇第2章
- 松本隆男 (东京电机大学) 第3篇6.1节
- 向井孝彰 (NTT Electronics) 第1篇导论
- 山内良三 (Fujicolor) 第2篇3.2节
- 山田 实 (金泽大学) 第2篇导论
- 行松健一 (秋田大学) 第3篇6.2节
- 米田悦吾 (古河电气工业) 第3篇2.3节
- 米津宏雄 (丰桥技术科学大学) 第2篇第9章
- 和田 修 (神户大学) 第4篇4.1节
- 渡边敏行 (东京农工大学) 第1篇4.2节

(括号内为编辑时所在的单位)

前 言

世界已跨入了信息化时代,正经历着前所未有的变革。推动这一进程的、最为重要的无疑是信息通信技术的惊人进步。

值得一提的是以激光技术为基础的光技术的巨大贡献。在 20 世纪后半期声名鹊起的高速传输技术是通过激光及光纤获得的。它与计算机、数字技术的发展相结合,促成了现已覆盖全世界的、全球信息网络系统的实现。

而光技术的革命性贡献并不局限于信息传输领域。存储大量的数字信息,并将其更新应用,形成了现在的数字时代。而其基础技术就是大容量光存储和半导体存储技术。从记录和再生数字语音开始的小型激光唱片(CD)技术除作为计算机的外部存储设备得到普及之外,已到达 DVD 时代,可以长时间记录并再生高品质运动图像,正蕴酿着正式的数字多媒体时代的到来。

另外,利用这些数字信息的是人,因而,人机界面技术最终将成为决定能否方便使用的关键。由布劳恩管起步的显示技术由于液晶的出现,而将平板显示器作为突破口,现在围绕着下一代显示器的主角之争,进行着激烈的技术开发。要做到无论何时何地,随心所欲地利用数字信息,必须确保方便性、灵活性、安全性。为此,必须进一步发展硬件技术和软件技术。人们对光信息技术始终寄予厚望。

本手册整理汇编了光通信系统、光信息系统、光电子器件等技术和支持这些技术的光量子科学技术,使读者了解现代光信息通信技术,为明确今后深层次的发展方向提供线索。

本手册的读者群将是从事光技术、半导体技术、网络技术、信息技术的工作人员、技术人员,以及想要在这些专业领域得到发展的大学生、研究生。但为了满足更广泛的一般读者的需求,使他们了解前沿光技术的基本概念和发展动向,本手册还特意列出了索引及综述论文目录。

本手册所涉及领域的发展是迅速的,因此,面面俱到是相当困难的。但是考虑到技术进步和发展的大趋势是经数年以上的积累才能形成,因

此我们认为,从技术原理的层面,针对突破现状的材料、加工、电路、信号处理,以及实用技术的本质部分加以叙述是完全可能的。本手册由活跃在日本相关领域的专家执笔,为了捕捉最新技术动向,引用了直至 2002 年秋季刊载于主要学术刊物的相关论文。

如果本手册对于读者了解以光技术为中心的现代通信技术能助一臂之力,我们将不胜荣幸。

最后向百忙中为承担执笔本手册而不辞辛劳的各位执笔者深表谢意。并感谢为本书的编辑、出版而大力协作的 CORONA 社编辑部的各位编辑。

光信息通信技术手册编辑委员会
委员长 神谷武志

目 录

第 1 篇 基 础

导论 光物理	3
0.1 处理光学现象的理论体系	3
0.2 激光的发明和光量子电子学的发展	4
0.3 激光基础和固体电子论	4
0.4 光波工程与非线性光学	5
0.5 以非经典方式探索光子的量子光学	5
0.6 超高速光学	6
0.7 用低维物质探索更优异的光物理特性	6
第 1 章 激光基础	9
1.1 光与物质的相互作用	9
1.2 自发发射与受激发射	12
1.3 放大器	16
1.4 光谐振腔	18
1.5 激光器	19
1.6 新概念激光器(微激光器,单原子激光器)	25
第 2 章 固体的量子论	27
2.1 概 述	27
2.2 固体的电子状态和能带结构	27
2.3 激发态与光学响应	35
第 3 章 光波工程	41
3.1 光波为电磁波	41
3.2 光波与介质	45
3.3 衍射现象	51
3.4 波导现象	56

3.5 扰动,不连续,变形	66
第4章 非线性光学	74
4.1 二阶、三阶非线性光学效应,四波混频	74
4.2 有机光材料技术	88
第5章 量子光学	110
5.1 光的量子化	111
5.2 光的各种量子态	117
5.3 光学器件对光量子态的影响	122
第6章 超高速光学	128
6.1 光纤中非线性波动的传播及其在光脉冲压缩中的 应用	128
6.2 超短光脉冲的产生	133
6.3 各种光脉冲压缩法	139
6.4 超短脉冲的测量技术	145
6.5 光纤中的非线性光学效应	149
第7章 低维物质的光物理特性	167
7.1 概述	167
7.2 半导体量子阱结构	167
7.3 介电响应函数与光学响应	170
7.4 量子阱结构半导体有趣的光物理特性	171
7.5 量子线及量子点结构	175

第2篇 光电子器件

导论 光电子器件的发展	183
0.1 激光问世以前的光电子技术	183
0.2 激光器的发明和光纤的改进	185
0.3 20世纪90年代以后的进展	186
0.4 光电子器件的制造技术	187
第1章 发光元件	190
1.1 半导体激光器	190

1.2 固体激光器	233
1.3 短波段半导体光源	244
第2章 接收元件	276
2.1 光检测的原理	276
2.2 pin 光电二极管	279
2.3 雪崩光电二极管	283
2.4 光电二极管的接收灵敏度	286
第3章 光 纤	290
3.1 光 纤	290
3.2 光缆技术	300
3.3 光纤部件及连接技术	310
第4章 光子 IC	332
4.1 光波导设计理论	332
4.2 无源,有源光集成器件/光路	347
第5章 光放大器	362
5.1 概 述	362
5.2 光纤放大器	362
5.3 半导体激光放大器	368
5.4 光纤拉曼放大器	372
第6章 波导性光调制器	376
6.1 利用电光晶体的光调制器	376
6.2 半导体光调制器	382
第7章 空间光调制器	398
7.1 光写入型 SLM	398
7.2 电写入型 SLM	406
第8章 显微光学	413
8.1 显微光学	413
8.2 微透镜	414
8.3 发光元件与光纤耦合光路	415
8.4 光耦合器	417
8.5 光波分复用/解复用器	420

8.6 光衰减器	422
8.7 光开关	422
8.8 单向光路	424
第9章 光电子集成电路(OEIC)	428
9.1 化合物半导体的 OEIC	428
9.2 Si 化合物半导体的 OEIC	431
9.3 融电路与光路于一体的高功能 OEIC	435
 第3篇 光通信系统 	
导论 光通信系统的发展	441
0.1 网络的宽带化和光纤通信	441
0.2 在新领域中的光通信技术	443
第1章 主干光传输系统	445
1.1 陆地主干传输	445
1.2 海底传输	459
1.3 光 缆	505
第2章 用户系统	519
2.1 光用户系统及其今后的发展	519
2.2 数字光接入系统	521
2.3 频分复用光接入系统	530
2.4 光接入线路网	539
第3章 局域网	552
3.1 光 LAN 的现状	552
3.2 光 LAN 今后的发展	566
第4章 光波通信技术	570
4.1 光波传输技术	570
4.2 光波节点技术	578
4.3 光波网络技术	579
4.4 光波测量技术	586
第5章 超高速光处理技术	597

5.1 各种单元技术	597
5.2 超大容量光传输技术	611
第 6 章 光空间处理技术	619
6.1 光空间转换连接技术	619
6.2 光交换系统	630
第 7 章 光通信和多媒体社会	636

第 4 篇 光信息系统

导论 光与信息	641
0.1 在信息技术中光的重要性	641
0.2 光信息记录的基本技术	642
0.3 显示的基本技术	642
0.4 光计算与光互连	643
0.5 光计量的最先进技术	643
第 1 章 光信息记录	647
1.1 记录方式、材料	647
1.2 写入、读出装置	656
1.3 对光盘的应用	667
第 2 章 显示技术	682
2.1 概 述	682
2.2 电子显示的分类与性能评价	682
2.3 CRT	685
2.4 LCD	689
2.5 三维(立体)图像显示	696
第 3 章 光计算	701
3.1 并行光计算	701
3.2 光神经网络	715
3.3 量子计算	728
第 4 章 光互连	738
4.1 光数据总线	738

4.2 垂直耦合互连	749
4.3 光布线	756
第 5 章 光计量的先进技术	768
5.1 光纤传感技术	768
5.2 超微细光计量	777
5.3 超高速光计量	783
索 引	797

光
信
息
通
信
技
术
实
用
手
册

第 1 篇 基 础

导 论 光物理

第1章 激光基础

第2章 固体的量子论

第3章 光波工程

第4章 非线性光学

第5章 量子光学

第6章 超高速光学

第7章 低维物质的光物理特性

本篇编辑委员
本篇执笔者

荒川泰彦
石田邦夫
氏原纪公雄
中泽正隆

向井孝彰
井筒雅之
神谷武志
向井孝彰

山本喜久
井元信之
谷内哲夫
渡边敏行

导论 光物理

0.1 处理光学现象的理论体系

第1篇要讲解光量子电子学的物理基础。正是这个理论基础在支撑着本手册的主题“光信息通信技术”。

光是电磁波的一种,其特征用处理所有电磁场辐射同样的理论体系——麦克斯韦方程来描述。一般电磁场辐射是以电场与磁场相结合的矢量波动传播。然而,在很多光学现象中,往往可以把光用单一的标量波动函数来加以表述。将这种处理光的近似方法称为“标量波动光学”或“波动光学(光波工程)(wave optics)”。

当光波在比波长大得多的物体中或其附近传播时,光波的性质将被隐匿,其行为可以用遵循几何光学定律的光线来描述。将这种光学模型称为“射线光学(ray optics)”或“几何光学(geometrical optics)”,相当于波长无限小时波动光学的极限。“电磁光学(electromagnetic optics)”是把电磁波作为矢量波动来处理,可以几乎完美地解释经典理论范畴的光学现象。但从本质上说,光具有量子力学的性质,因而存在着经典理论无法解释的自发发射、光电效应等若干光学现象。这些可以用“量子电磁力学(quantum electro-dynamics)”或“量子力学(quantum optics)”理论进行解释。

有关光学现象的理论体系在历史上是按几何光学→波动光学→电磁光学→量子光学的顺序发展的。按照这个顺序,理论结构变得更为复杂,难度逐渐增大,适用范围变得更为广泛^[2](参见图0.1)。参考文献[1,2]详细叙述了从几何光学到电磁光学,对经典理

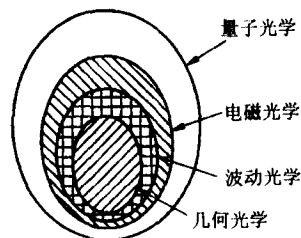


图 0.1 处理光学现象的理论体系^[2]

(得到 B. A. Saleh and M. C. Teich: Fundamentals of Photonics, John Wiley & Sons(1991)许可转载)。

论范畴的光学现象进行理论处理的结果,也讲述了光物理发展的历史。量子理论是从20世纪初才开始出现的。这个理论形成于克服和解释黑体辐射频谱和光电效应等有关光学现象与旧的经典解释相矛盾部分的过程中。光的量子理论对量子力学的创立做出了重要贡献。

0.2 激光的发明和光量子电子学的发展

自从1960年梅曼(Maiman)成功地进行红宝石激光器的振荡^[3]以来,已能够在气体、固体、染料、半导体等各种介质中实现激光振荡。激光与以往非相干白炽灯的光不同,具有如下特点:①具有时间相干性(频谱的单色性);②是空间相干性(方向性)很高的相干光;③光强很高;④具有光频区域的宽带频谱;⑤因一个光子的能量大,所以量子噪声大于热噪声。因此,有效地利用特点①和②发展了光计量、光通信、全息照相、光运算等工程方面的应用;利用特点③的非线性光学(第4章)、利用特点④的超高速光学(第6章)有了进展;利用特点⑤能够进行光的压缩等量子光学(第5章)实验,从而实现了光量子电子学在物理学、工程两方面的飞速发展。

0.3 激光基础和固体电子论

本篇第1章将阐述激光基础。激光振荡器是在光谐振腔内,使光和物质相互作用,以自发发射光子作为种源,在受激发射过程中产生相干光。对于这种相互作用的表述,有两种理论。一是“半经典激光理论”。这个理论把物质的电子系统经常按量子论的二能级系统来处理,而将光作为经典的电磁波来处理。二是“量子论的激光理论”。这个理论利用二次量子化,对光也用量子理论进行表述。利用第一个理论即半经典理论,求得激光振荡阈值、输出功率、振荡频率等是可以的。但要表述激光振荡谱线宽度、量子噪声、自发发射则必须用第二个理论,即量子理论。谐振腔尺寸为波长级的微小谐振腔激光器是一种新概念激光器。它把作用于原子的真空场用于微小谐振腔的控制,选择性地增强自发发射光对激光模式的耦合。

在气体激光器中,物质原子的电子层是理想的量子理论的二能级。而在最近广泛使用的固体激光器和半导体激光器中,与光相互作用的固