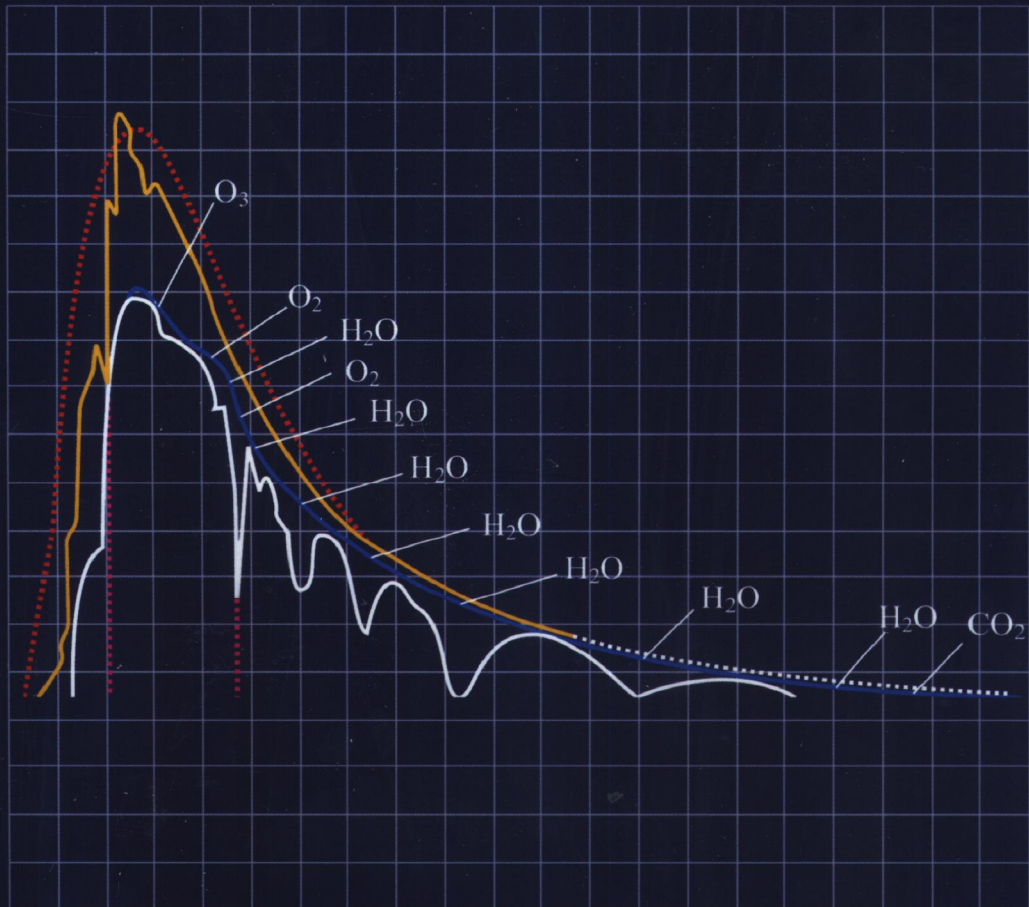


OHM 大学理工系列

光电子学

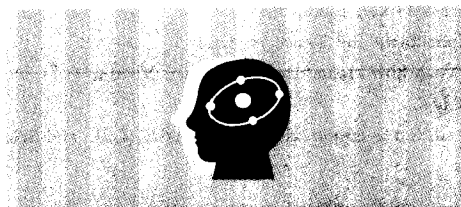
〔日〕滨川圭弘 西野种夫 编



187

TN201

B79



OHM 大学理工系列

光 电 子 学

〔日〕 滨川圭弘 西野种夫 编
于广涛 译
杜宝勋 校

科学出版社

OHM社

2002

图字:01-2002-0306号

Original Japanese edition

Shinsedai Kougaku Series; Hikari Electronics

Edited by Yoshihiro Hamakawa and Taneo Nishino

Copyright © 2001 by Yoshihiro Hamakawa and Taneo Nishino

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

新世代工学シリーズ 光エレクトロニクス

濱川圭弘 西野種夫 オーム社 2001

图书在版编目(CIP)数据

光电子学/(日)濱川圭弘,(日)西野種夫编;于广涛译. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-010031-X

I. 光… II. ①濱…②西…③于… III. 光电子学-高等教育-教材 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004041 号

北京东方科苑图文有限公司 制作

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

科学出版社 OHM 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

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2002 年 2 月第一次印刷 印张: 8 5/8

印数: 1—5 000 字数: 142 000

定 价: 18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着意为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪大学名誉教授

副主编

西川祯一 大阪工业大学校长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广瀨全孝	广岛大学教授	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	大阪大学教授
池田克夫	京都大学教授	滨川圭弘	立命馆大学教授 大阪大学名誉教授

前 言

从居室客厅的电视、办公室的自动化办公设备到机器人,以及在现代社会中起着重要作用的电子计算机和通信系统等,电子技术无处不在,它已经成为当今文明生活所必须的工具。根据我们实际生活中的体会,说电子技术是 20 世纪文明所产生出的具有代表性的科学技术之一实不为过。探索电子技术发展的历史,可以追溯到 1903 年 D. 福雷斯特的三极电子管的发明。他的发明使电信号的放大、振荡、检测等功能成为可能,拉开了电子管时代的序幕。其后,电子管经历了茄子管、GT 管、小型管的发展,逐步实现了小型化和高性能化。20 世纪中叶的 1949 年,晶体管(Tr)诞生了,电子技术由此也实现了“固体化”这个具有革新意义的第二次飞跃。随着技术的不断发展,它又从点接触型 Tr 逐渐向合金型 Tr、扩散型 Tr、平面型 Tr 过渡,又从 MOSTr(金属氧化物半导体)发展成为今天的 IC(集成电路)。

晶体管刚刚发明时,无论是性能还是可靠性都不如电子管,那么为什么它能够发展成为今天这样庞大的半导体工业呢?究其原因,是因为在电子电路的开发中,以“更快的速度”、“微小的耗能”处理“更多的信息”这一“信息处理经济学原理”,作为其驱动力发挥着推动作用。也就是说,1 比特(bit)信息处理的低成本化成为了其发展的潜在趋势。过去,从茄子管到小型管,进而从晶体管到集成电路,其开发动机无不是这个经济学原理起着作用。从现在的 VLSI(超大规模集成电路)到三维集成电路或者 OEIC(optoelectronic IC,电子集成光路),它们的发展也都将遵循这一规律。

那么,今后的有源器件会变成什么样的呢?按照上面的说法,用“更快的速度和更微小的耗能”处理信息的信号媒体又是什么呢?还有硬件问题等等,这些问题都将在 21 世纪得到解决和发展。“光”是高频电磁波,可以快速传输,最近由于可以制造出达到 10 兆分之 1 秒的非常短的脉冲波,所以利用超高速光电子计算机和平面图像并行处理所进行的超高速信息处理等,以及有关大容量存储器的新技术相继问世。另外,利用激光的相干性,将高密度

信息以光波为载体进行传输的光通信已经实现了大容量的信息传输。正如我们已经从 CD 和光盘的实用化中体验到的,高密度信息的记录已经轻而易举地实现了。不久的将来,我们可以期待,利用光的双向传输性,光的应用将扩展到能将图像、影像信息相互进行通信的可视化电视等多媒体应用领域。而且,还可以构筑使用光纤通信以及卫星通信的信息高速公路,通过局域网和互联网还可以编织成全球通信网。

今天,在 21 世纪尖端技术中取得重要进展的领域里,光能及其应用学科有着举足轻重的地位。在这些学科中,研究人员正在围绕着太阳能发电、激光加工、激光核聚变、光纤照明、光能在医疗领域中的应用等课题开展着研究工作。太阳能发电作为可以解决化石燃料的枯竭和地球环境问题的绿色能源而备受瞩目,从个人家庭住宅用电到通过大规模集中发电进行沙漠绿化,它在许多领域的应用前景非常广阔。

综上所述,可以认为 21 世纪的高新技术将会以光电子工程为中心展开。

最近,在日本国家政府机构改革和企业的经营活动中,甚至在个人的网页和电子邮件中,无处不感觉到维系社会中枢功能的 IT 的进步。进入 21 世纪,相信在 IT 技术的基础上,通过融合本书所介绍的光技术,可以预见 IT 会更加突飞猛进。鉴于这种形势,肩负着 21 世纪开发应用尖端技术重任的年青人,请一定要学习好本书所介绍的光电子技术,成为 21 世纪文明的开拓者。

本书是请光电子学领域的专家撰写而成的。如果本书能够实现“OHM 大学理工系列”的初衷,为各位读者提供新的知识,将深感荣幸。

滨川圭弘

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 人类文明与光	1
1.2 日益进步的光学应用技术	3
第 2 章 半导体的光学性质	7
2.1 半导体和光之间的相互作用	7
2.1.1 半导体的光学特性	7
2.1.2 半导体和电磁波之间的相互作用 ...	8
2.2 半导体的光吸收	9
2.2.1 光吸收系数和光谱	9
2.2.2 激子吸收	12
2.2.3 能带边的光吸收	12
2.3 用电子能带结构解释光学性质	14
2.3.1 直接跃迁型的光吸收	14
2.3.2 间接跃迁型的光吸收	15
2.3.3 Ge 的吸收光谱	16
2.3.4 GaAs, a-Si 的吸收光谱	18
2.4 半导体发光的原因	21
2.4.1 半导体发光机理	21
2.4.2 能带边的复合发光	22
2.4.3 与杂质能级有关的发光	24
2.4.4 与等电子陷阱有关的发光	26
2.5 其它光学效应	28
2.5.1 非线性光学效应	28
2.5.2 拉曼散射	28
2.5.3 超晶格的光学性质	31
练习题	35

第 3 章 光接收器件	37
3.1 光电导器件	37
3.1.1 光电导器件的工作原理	37
3.1.2 光电导器件的种类	39
3.1.3 光电导器件的性能	39
3.2 光电二极管的工作原理	40
3.2.1 光电二极管概述	40
3.2.2 光电二极管的工作原理	42
3.2.3 光晶体管的作用	43
3.3 高速光电二极管具有优越性能的原因	44
3.3.1 pin 光电二极管的结构和作用	45
3.3.2 APD 的工作原理和作用	46
3.4 摄像器件	48
3.4.1 摄像器件的种类	48
3.4.2 CCD 的结构及作用	49
3.4.3 CCD 的种类及应用	51
练习题	52
第 4 章 太阳能电池	55
4.1 太阳能	55
4.1.1 太阳能的实质	55
4.1.2 日照量	56
4.2 太阳能电池原理	57
4.2.1 太阳能电池的工作原理	57
4.2.2 太阳能电池的结构和作用	58
4.3 太阳能电池的性能	59
4.3.1 能量转换效率	59
4.3.2 性能参数	61
4.4 太阳能电池材料	62
4.4.1 高效率太阳能电池	62
4.4.2 理论极限效率	62
4.5 通过研究和开发提高光电转换效率	64
4.5.1 提高转换效率的研究和开发	64
4.5.2 多结多层结构的太阳能电池	64
练习题	66

第 5 章 光发射器件	69
5.1 发光二极管(LED)	69
5.1.1 复合发光过程	69
5.1.2 半导体中的受激发射	71
5.1.3 发光效率	72
5.1.4 结构和工作原理	74
5.1.5 输出功率特性	77
5.2 激光二极管	79
5.2.1 半导体激光器的种类和用途	79
5.2.2 结构和工作原理	80
练习题	87
第 6 章 电子图像显示器件	89
6.1 阴极射线管 CRT	89
6.1.1 CRT 的工作原理	89
6.1.2 彩色阴极射线管	90
6.1.3 投影式显示器	92
6.2 液晶显示器 LCD	93
6.2.1 液晶光调制和开关的工作原理	93
6.2.2 图像显示的原理	95
6.2.3 液晶投影式显示器	98
6.3 等离子体显示板 PDP	100
6.4 电致发光显示器 ELD	102
6.4.1 EL	102
6.4.2 无机 EL 的工作原理	102
6.4.3 有机 EL 的工作原理	104
6.5 场发射显示器 FED	106
练习题	107
第 7 章 光 IC 和光信息处理	109
7.1 光 IC 概述	109
7.1.1 将光波导型器件集成后的光 IC	109
7.1.2 光波导型器件的结构	109
7.1.3 以电介质为衬底的无源光 IC	110
7.1.4 使用电光晶体的有源光 IC	112

7.1.5	使用半导体衬底的光 IC	113
7.2	光信息处理的独特性质	115
7.2.1	光信息处理能力	115
7.2.2	利用傅里叶变换的光图像信息 处理	115
7.2.3	利用空间并行性的超高速信息 处理	118
7.2.4	未来展望	119
	练习题	120
	练习题简答	121
	参考文献	125

第 1 章 概 述

当出现了利用太阳光的农耕技术,并且人们掌握了用火进行照明和炊事的时候,人类文明的发祥也由此开始了。到了 21 世纪的今天,在高新技术的发展中,光学技术显示出举足轻重的作用。那么,到底是什么原因决定了它的地位呢?为什么光学技术如此重要呢?带着这个问题,我们在本章中首先介绍人类文明的进步与光密不可分的关系,然后,根据光的高速度、高能量密度等特性,具体地说明光电子学这一新兴技术是如何开拓其应用领域的。第 2 章以后将切入各项专题进行叙述。

1.1 人类文明与光

地球上可以采集的 99.98 % 的能源都是源自于太阳能。在人类历史上科学技术取得辉煌进步的 20 世纪,简单地也可称为煤炭和石油的文明时代。构筑这个能源文明的化石燃料归根结底是长期在太阳光的照射下靠太阳能生息的动植物演变而成的。换句话说,太阳光以大气和地表所吸收的热能为基础,通过气象活动维持适当的气温,同时促进所有动植物的生物体活动,即维持了所谓的生态学周期。

太阳以“光”的形式抚育大地,施予恩泽。光被物质吸收后所释放出的热、大气和水养育着生灵,“光”本能地“产生光明”,向我们长久不断地发出信息,让我们感到它的存在是必要的、是可以给我们“带来幸福”的。光在很久以前就是人类生活不可缺少的东西,在《圣经》的“创世说”的开篇中,关于光的产生是这样写的——在那以后,神说道:“让光照射出来吧!”,于是产生了光。

近年来,随着信息化社会的到来,在扮演尖端技术角色的微电子学领域内,为了加快技术进步,不断地要求这些新技术可以“更

多”、“更快”、“耗能更少”地处理信息。图 1.1 所示的是在电子信息处理技术从三极电子管发展到最近的半导体集成电路的过程中,有源器件和电路系统的技术进步历程。由图可见,随着时代的推移,器件逐渐小型化,处理速度高速化,而消耗电能越来越少。根据单位(1 比特)信息处理成本不断降低这一经济学原理,这种技术进步趋势今后也不会改变。但是,随着技术要求日益提高,信息处理硬件的微细加工的极限开始显现出来,束缚了技术的日益发展。为了打破这种技术屏障,科学家们想到了光学技术,设想将信息信号加在光波上,不断地开发光信息处理技术,利用光信息处理技术的超高速、大容量、低能量的特点对信息进行处理。另外,在光能利用方面,太阳能发电和激光加工所代表的光能技术日益成熟,逐渐实用化。正如在激光核聚变的实例中所看到的那样,利用光的高能量密度的特性,可以将兆焦[耳]的能量在短时间内聚焦在微小的空间内,这项新技术是其它能源所不可能实现的。

人类自远古开始就接受着太阳的恩惠,即使是夜晚也借助于油灯生活。在托马斯·爱迪生发明了电灯后,夜生活才得以真正地实现,这一切也才是 120 年前发生的事情。有了电之后,它逐渐

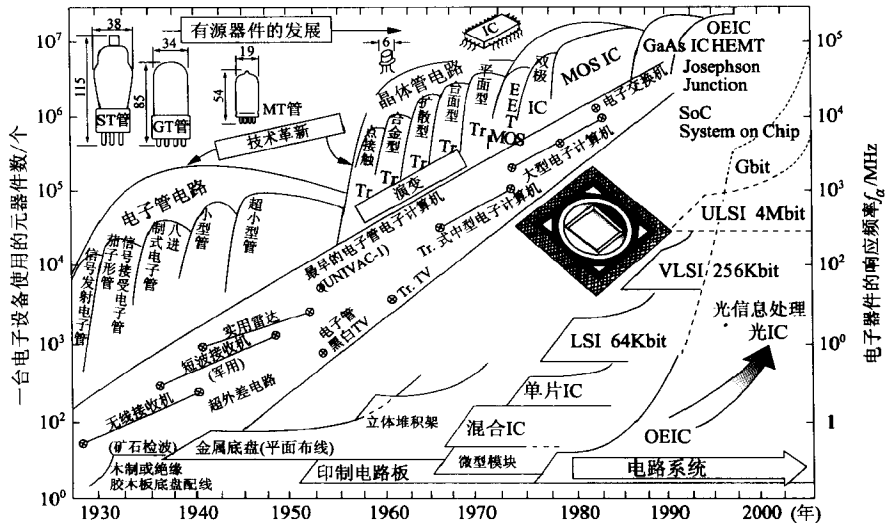


图 1.1 电子技术和器件的进步图¹⁾

1) 从电子管发展到晶体管,又从集成电路发展到集成光路,一直是在“更快”、“更多”、“耗能更少”地处理信息这个经济学原理的“指导”下取得的。下一个目标就是实现光信息处理。

应用到动力、电热、通信等领域,才有了我们今天的文明。而且,在20世纪电学、电子工程学发展的基础上,21世纪必将不断地开拓出以光信息和光能源为主流的新的尖端科学和尖端技术领域。

1.2 日益进步的 optics 应用技术

图1.2所示的是按照光的特性对光进行的分类,以及 optics 技术在人类文明进程中发挥重要作用的领域,比如:能源、材料及设备、信息及通信、 optics 机械、光加工技术、光测量技术、光医疗技术等。

首先应该说光是文明活动的动力源,在被称为“文明之粮食”的能源领域内,科学家通过研究和开发,不断地探求太阳能发电、激光加工、激光核聚变、光纤照明、激光医疗等新的应用。其中,太

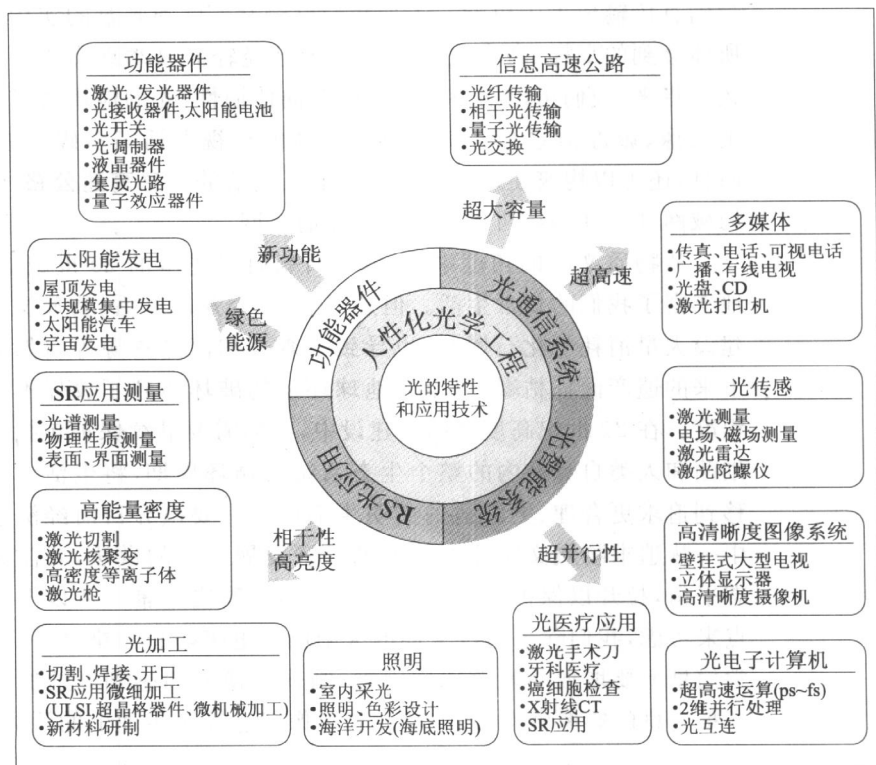


图 1.2 根据光的特性所进行的分类及其新的应用领域

太阳能发电可以解决化石燃料枯竭和地球环境问题,所以成为了绿色能源的冠军,寄予了厚望。此外,光的高能量密度的特性已经在激光加工、激光手术医疗、通过激光切割进行新材料研制等领域内正在得到应用。通过同步加速器的同步辐射(SR)所产生的被称为神奇之光的高亮度 X 射线,可以进行微量元素分析和蛋白质结构分析,还可以对各种材料进行特性测量。另外,利用 SR 光的焦点深和精度高两个特点,SR 光的应用技术正在不断地推广到微机械加工等精加工领域。

此外,根据光的性质还开发了各种各样具有新功能的装置,包括被称为“文明之佳肴”的更舒适更安全的信息处理、信息传输等,这些新研发的装置将成为 21 世纪新文明的有利武器。“光”是高频率的电磁波,可以快速传输。最近,由于可以产生 10 兆分之 1 秒的非常短的光脉冲,超高速光电子计算机、平面图像并行处理的超高速信息处理器、超大容量存储器等新技术相继问世。还有,利用激光的相干性,光波携带高密度信息进行传输的光通信使大容量信息传输成为了可能。正如我们已经从 CD 和光盘的实用化中所体会到的那样,高密度信息的记录已经轻而易举地实现了。不久的将来,我们可以期待利用光的双向传输性,光的应用将扩展到把图像、影像信息和通信融合为一体的可视电话等多媒体领域。而且,还可以构筑使用光纤通信和卫星通信的信息高速公路,通过局域网和互联网还可以编织成全球通信网。

从物质文明的角度来看,取得日新月异进步的 20 世纪,极大地丰富了我们的日常生活。但是,从另一个角度来看,物质文明的建设大量消耗了化石燃料,也导致了森林和海洋资源等自然界留下来的遗产面临枯竭,以至于地球环境的破坏达到了放任不管的程度。在 21 世纪高度文明的建设中,我们需要继续保护包括地下细菌和人类自身在内的整个生态系统的循环周期,将生活方式转移到追求更合理、更舒适的文明生活中来。要摒弃目前经济核算中一味追求物质文明开发的所谓经济发展主义的做法,要注重生态平衡,拉开以保护生态系统为重点的文明之序幕。从以上的观点来考虑,我们除了通过上述的太阳能发电来防止污染之外,在视觉信息上要增加心理学感性因素,制作出使人们感到舒适的具有高雅气息的影像资料,通过颜色和影像信息控制生理上的活力,真正营造出人性化光学工程这一新的领域。图 1.3 所示的是在 21 世纪文明建设中,光产业所追求的新的目标。

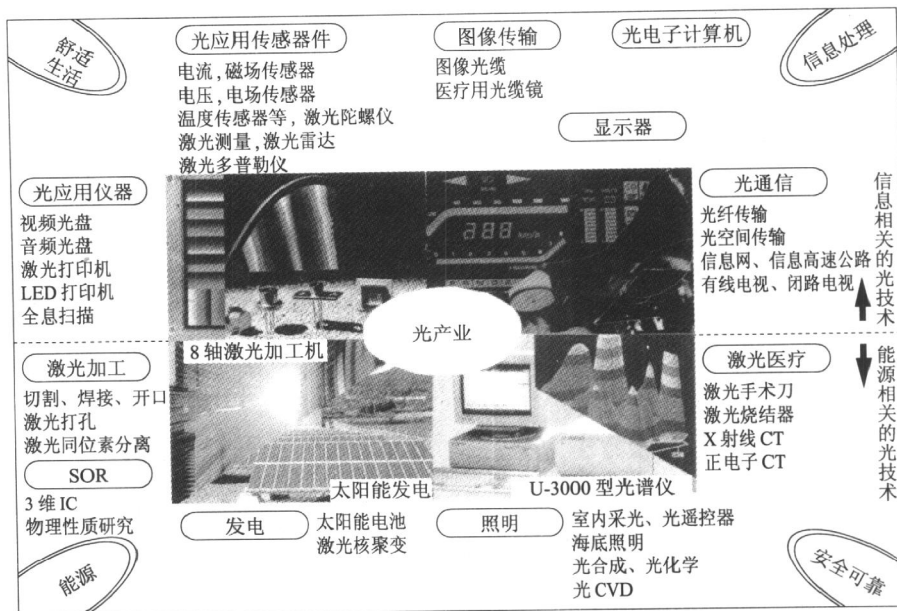


图 1.3 在 21 世纪文明建设的高新技术中各种光产业的应用领域

第 2 章

半导体的光学性质

在学习光电子学的时候,我们首先要学习其必要的基本知识——半导体和光之间的相互作用。

光是电磁波,同时也是光子(photon),即光量子。因此,在理解半导体的光学性质的时候,有必要从量子论的角度加以考虑。在本章中,我们举出实际的测量例子来说明光学性质,同时简单易懂地说明半导体和光之间的相互作用。

2.1 半导体和光之间的相互作用

2.1.1 半导体的光学特性

当光照射到半导体上的时候,一部分入射光被表面反射,剩余的或者被半导体吸收或者透过半导体。半导体的种类不同,光反射和透射的比率也不同。也就是说,半导体的反射率和吸收系数与入射电磁波的频率有关。另外,入射光的强度不同,所产生的现象也不同。如果强光照射到半导体上而被吸收,则可以看到不同波长的发光现象等。如上所述,根据半导体不同的种类、入射光的波长和强度不同,光和半导体的相互作用也不同,如图 2.1 所示。

决定半导体和光相互作用的主要是能带结构,这个能带结构是由原子按一定规则排列的晶体结构所决定的。这个现象可以通过比较半导体的颜色直感地加以理解。例如,硅(Si)是灰色的不透明晶体,而磷化镓(GaP)是美丽橘黄色的透明晶体。与 Si 相比,GaP 的带隙能量约为它的 2 倍,与绿色光的能量相当。

无论是低频电波,还是微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线等这些波长范围较宽的电磁波,由于它们的能量不同,将会对晶格和各种状态的电子产生影响,显示出各自的光响应特性。像 X 射线那样短波长的电磁波,将会激发每个原子的内层电子。另外,波