



普通高等教育“十二五”规划教材

GUANGDIANZI JISHU YUANLI YU YINGYONG

光电子技术

原理与应用

裴世鑫 崔芬萍 孙婷婷 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十二五”规划教材

光电子技术原理与应用

裴世鑫 崔芬萍 孙婷婷 编著

贵州师范学院内部使用

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书首先介绍了学习光电子技术所需要的辐射度学与光度学的基础知识,然后围绕光电子技术体系,以光源——光的传播——光的调制——光的探测——光成像——光显示——光存储为主线,从原理与应用两个方面,分章节讨论了光电子技术系统中的常用光源、光辐射的传播、光辐射的调制、光辐射的探测、光辐射的成像、光辐射的显示和光辐射的存储等原理与技术,最后介绍了光电子技术的一些典型应用。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、电子信息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、信息工程、应用物理学等专业及其相关专业的本科生教材,也可供有关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

光电子技术原理与应用 / 裴世鑫, 崔芬萍, 孙婷婷
编著. —北京: 国防工业出版社, 2016.8 重印
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 08980 - 6

I. ①光... II. ①裴... ②崔... ③孙...
III. ①光电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 198564 号

※

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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 22 字数 544 千字

2016 年 8 月第 1 版第 2 次印刷 印数 3001—4000 册 定价 39.80 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

前 言

光电子技术是光子技术与电子技术相结合的产物,现在的光电子技术已成为信息技术的基础,涵盖了信息的采集、传输、处理和存储等各个环节,光电子技术的发展对光电产业具有重要的意义,因此,光电子技术是光电信息科学与工程、电子信息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程等专业及其相关专业本科生的主干课程,一些学校将其设为物理学、应用物理学、材料物理学等专业的选修课。

作者在参阅了大量国内外优秀教材和科技论文,总结多次讲授光电子技术课程的教学经验的基础上,编写了本教材。本书比较全面地反映了光电子技术的基本理论和应用,首先介绍了光电子技术的背景知识,接着介绍了学习光电子技术所需要的辐射度学与光度学基础知识,然后围绕光电子技术体系,以光源出光到光信息被存储为主线,分章节讨论了光电子技术体系中的常用光源、光辐射的传播、光辐射的调制、光辐射的探测、光辐射的成像、光辐射的显示和光辐射的存储等原理与技术,最后举例介绍光电子技术在通信、气象、医疗等领域的典型应用。

全书共 10 章,第 1 章为绪论,着重介绍光电子技术的发展、应用和学习光电子技术的重要意义;第 2 章为辐射度学与光度学基础知识;第 3 章为光电子技术中的常用光源,虽然激光是现代光电子系统中最常用的光源,但考虑到很多学校将“激光原理”课程单独设置,而光电子技术的课程设置又是在激光原理之后,为此,有关激光原理与技术方面的内容在本书中不做详细介绍,重点介绍热辐射光源、气体放电光源和半导体光源,并对多数光电子技术教材都不做介绍,但在科研领域具有广泛应用的同步辐射光源从原理到技术都做了简要介绍;第 4 章为光辐射的传播,着重介绍光辐射在大气和几种晶体中的传播,为后面介绍光辐射的调制打下理论基础;第 5 章为光辐射的调制原理与技术,这一章以第 4 章中所介绍的光在磁光晶体、电光晶体和声光晶体中传播的理论为基础,介绍了光的电光调制、磁光调制、声光调制以及直接调制技术;第 6 章为光辐射的探测原理与技术,分别从探测器的物理效应、探测器的评价参数和典型的光电探测器等几个方面对光电探测器做了详细介绍;第 7 章为光辐射的成像技术,主要介绍常见光电成像器件的基本工作原理和各种光电成像系统的结构;第 8 章为光辐射的显示技术,介绍显示技术的发展及分类,着重对发光型和非发光型显示器件的原理和技术做了介绍;第 9 章为光信息存储技术,主要介绍光盘存储技术的原理和发展以及一些新的光信息存储技术;第 10 章是光电子技术的一些典型应用原理和技术,突出介绍了光电子技术在气象、通信、医疗、军事、遥感等领域的应用。

本书各章节的编排在注重知识点之间相互联系的同时,力求章节的独立性,每章内容都从基本原理入手,然后阐述基本概念、基础知识、基本理论,直至与之相关的技术,以便于教师根据不同专业的学时要求和专业需求独立选择适当的内容讲授。

本书由南京信息工程大学裴世鑫、崔芬萍和孙婷婷编著,其中第1章到第3章,第10章由裴世鑫编写,第4章到第6章由崔芬萍编写,第7章到第9章由孙婷婷编写;由裴世鑫统稿。在本书编写过程中,顾芳、苏静、徐林华、赵立龙、武旭华、王俊锋、赵静、张仙玲、夏江涛等老师对本书的编写提出了很多宝贵的建议,并参与了一些章节的校稿;肖韶荣教授、张成义教授、赖敏教授和詹煜副教授对本书的编写给予了大力指导和帮助。另外本书编写工作得到了南京信息工程大学教务处和南京信息工程大学物理与光电工程学院的大力支持,被列为“南京信息工程大学2010年度教材基金立项建设项目”,在此深表感谢。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、电子信息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、信息工程、应用物理学等专业及其相关专业的本科生教材,也可供有关工程技术人员参考使用。

由于光电子技术涉及的内容很多,且发展迅速,加之编者水平有限,书中在内容取舍、文字表述等方面存在的问题在所难免,敬请广大读者批评指正,以便我们再版修正。

裴世鑫

2013年8月于南京

目 录

第1章 绪论..... 1

- 1.1 光电子技术概念的演变..... 1
- 1.2 光电子技术及发展..... 1
- 1.3 光电子技术的内容..... 3
- 1.4 光电子技术的功能..... 4
- 1.5 光电子技术的应用..... 5
- 1.6 光电子产业及其发展趋势..... 6
 - 1.6.1 光电子产业的最新动态..... 6
 - 1.6.2 不断涌现的光电子新奇产业..... 7
- 1.7 学习光电子技术的意义..... 8

第2章 辐射度学与光度学基础知识..... 9

- 2.1 光的基本概念..... 9
 - 2.1.1 电磁波谱及其产生方式..... 9
 - 2.1.2 电磁波谱中的光学区..... 11
 - 2.1.3 光子及其能量和动量..... 11
- 2.2 立体角及其计算..... 12
 - 2.2.1 立体角的定义..... 12
 - 2.2.2 曲面的立体角..... 12
 - 2.2.3 立体角的计算举例..... 13
- 2.3 描述辐射场的物理量..... 14
 - 2.3.1 辐射度学中的基本物理量..... 14
 - 2.3.2 全辐射量与光谱辐射量..... 17

- 2.3.3 光子辐射量..... 18

- 2.3.4 辐射度学中的基本物理量小结..... 19

2.4 人眼与光度量..... 20

- 2.4.1 明视觉、暗视觉和中间视觉..... 20
- 2.4.2 视见函数..... 20
- 2.4.3 基本光度学量..... 22
- 2.4.4 光度学中的基本物理量小结..... 26

2.5 光度量与辐射度量的对照..... 26

- 2.6 辐射度学和光度学中的基本定律..... 27
 - 2.6.1 辐射强度余弦定理..... 27
 - 2.6.2 距离平方反比定律..... 28
 - 2.6.3 亮度守恒定律..... 29

第3章 光电子技术中的常用光源..... 30

- 3.1 光源的基本特征参数..... 30
 - 3.1.1 辐射效率和发光效率..... 30
 - 3.1.2 光谱功率分布..... 31
 - 3.1.3 空间光强分布..... 31
- 3.2 黑体辐射..... 32
 - 3.2.1 单色吸收比和单色反射比..... 32
 - 3.2.2 黑体..... 32
 - 3.2.3 基尔霍夫定律..... 32
 - 3.2.4 黑体辐射规律..... 33
- 3.3 热辐射光源..... 36
 - 3.3.1 黑体辐射器..... 36
 - 3.3.2 太阳..... 36

3.3.3 白炽灯	37	要特征	90
3.3.4 卤钨灯	38	3.8.4 中国大陆地区的同 步辐射光源	91
3.4 气体放电光源	39	第4章 光辐射的传播	94
3.4.1 气体放电光源的原 理及特点	39	4.1 光辐射的电磁理论	94
3.4.2 常用的气体放电 光源	40	4.1.1 麦克斯韦方程组	94
3.5 电致发光光源	43	4.1.2 电磁场的波动方程	96
3.5.1 电致发光光源的 发展	43	4.1.3 光辐射场的亥姆霍 兹方程	96
3.5.2 电致发光光源的 类型	43	4.1.4 电磁场的边界条件	97
3.5.3 交流粉末电致发光 光源	43	4.2 光辐射在大气中的传播	97
3.5.4 直流粉末电致发光 光源	45	4.2.1 大气的基本组成与 气象条件	98
3.5.5 薄膜电致发光光源	45	4.2.2 大气对光辐射的 衰减	99
3.6 激光	48	4.2.3 大气吸收及大气 窗口	101
3.6.1 激光发展简史	48	4.2.4 大气湍流效应	102
3.6.2 光与物质的相互 作用	49	4.3 光辐射在水中的传播	104
3.6.3 粒子数密度反转 分布	50	4.3.1 水对光束传播的 衰减	104
3.6.4 光学谐振腔与激光 的形成	51	4.3.2 光辐射在水中传播 时的散射现象	106
3.6.5 激光器的基本构成 要素	53	4.4 光辐射在电光晶体中的 传播	107
3.6.6 激光器的类型	54	4.4.1 折射率椭球	107
3.7 半导体光源	61	4.4.2 电致折射率变化	108
3.7.1 半导体基础知识	61	4.4.3 单轴晶体的电致折 射率变化	109
3.7.2 发光二极管	67	4.4.4 电光相位延迟	110
3.7.3 半导体激光器	75	4.5 光波在声光晶体中的传播	113
3.8 同步辐射光源	86	4.5.1 声波在声光介质中传 播时的两种形式	113
3.8.1 同步辐射光源的发 展与现状	86	4.5.2 拉曼—纳斯衍射	114
3.8.2 同步辐射光源的 构造	88	4.5.3 布喇格衍射	116
3.8.3 同步辐射光源的主 要特征	90	4.6 光辐射在磁光介质中的 传播	118

4.6.1 磁光效应	118	5.3.4 电光晶体材料 简介	159
4.6.2 磁光效应的一般 原理	121	5.4 声光调制	159
4.6.3 法拉第旋转效应	123	5.4.1 声光效应	159
4.6.4 法拉第磁光效应的 理论分析	124	5.4.2 声光调制系统的 组成	160
4.6.5 法拉第磁光效应的 测量	127	5.4.3 声光调制器的工作 原理	160
4.6.6 法拉第磁光效应的 应用	128	5.4.4 调制带宽	164
4.7 光波在光纤中的传播	130	5.4.5 声光波导调制器	165
4.7.1 光纤的结构	130	5.4.6 声光调制的应用	166
4.7.2 光纤的类型	131	5.5 磁光调制技术	167
4.7.3 光纤的结构参数	133	5.5.1 磁光调制器	168
4.7.4 光在阶跃光纤中传输 时的线光学分析	135	5.5.2 磁光波导型器件	169
4.7.5 光在渐变折射率光纤 中传输时的线光学 分析	137	5.5.3 磁光调制技术的应 用举例	170
4.7.6 光纤的传输特性	138	5.6 直接调制原理与技术	171
第5章 光辐射的调制原理与技术	142	5.6.1 半导体激光器(LD)的 直接调制	171
5.1 光辐射调制的基本原理与 类型	142	5.6.2 发光二极管(LED)的 直接调制	172
5.1.1 振幅调制	142	5.6.3 半导体光源的调制 深度	173
5.1.2 频率调制和相位 调制	144	5.6.4 半导体光源的脉冲编 码数字调制	173
5.1.3 强度调制	147	第6章 光辐射的探测原理与技术	175
5.1.4 脉冲调制	147	6.1 光电探测的物理基础	175
5.1.5 脉冲编码调制	148	6.1.1 光电发射效应	175
5.1.6 光辐射调制的基本 技术	149	6.1.2 光电导效应	175
5.2 机械调制	149	6.1.3 光伏效应	176
5.3 电光调制	151	6.1.4 温差电效应	177
5.3.1 电光强度调制	151	6.1.5 热释电效应	177
5.3.2 电光相位调制	156	6.1.6 光子效应和光热 效应	178
5.3.3 电光调制器的电学 性能	156	6.2 光电转换定律	178
		6.3 光电探测器的性能参数	179
		6.3.1 积分灵敏度 R	179

6.3.2	光谱灵敏度 R_λ 与相对光谱灵敏度 S_λ	179	测器	212
6.3.3	频率响应灵敏度度 R_f	181	6.7.1	光电管
6.3.4	决定光电流 i 的因素	182	6.7.2	光电倍增管
6.3.5	量子效率 η	182	第7章	光辐射的成像技术
6.3.6	通量阈 P_{th} 和噪声等效功率 NEP	182	7.1	光电成像技术概述
6.3.7	归一化探测度 D^*	183	7.1.1	光电成像技术的发展
6.3.8	光电探测器的噪声	184	7.1.2	光电成像技术的分类
6.4	基于光热效应的探测器	186	7.2	真空成像器件
6.4.1	热探测器原理概述	186	7.2.1	像管
6.4.2	热敏电阻	188	7.2.2	摄像管
6.5	基于光电导效应的探测器——光敏电阻	192	7.3	固体成像器件
6.5.1	光敏电阻的结构	192	7.3.1	CCD 摄像器件
6.5.2	光敏电阻的光电转换原理	192	7.3.2	CID 和 CMOS 摄像器件
6.5.3	光敏电阻的基本特性及主要参数	193	第8章	光辐射的显示技术
6.5.4	偏置电路	196	8.1	显示技术概述
6.5.5	典型的光敏电阻	197	8.1.1	显示技术
6.5.6	光敏电阻的使用注意事项	198	8.1.2	显示技术的应用
6.6	基于 PN 结光伏效应的探测器	198	8.1.3	显示技术的发展与分类
6.6.1	PN 结光伏探测器的光电转换规律	198	8.2	阴极射线管
6.6.2	光伏探测器的工作模式	199	8.2.1	黑白 CRT 的构造和工作原理
6.6.3	光电池(太阳电池)	200	8.2.2	彩色 CRT 的构造和工作原理
6.6.4	光电二极管	203	8.2.3	CRT 显示器的主要单元
6.6.5	光电三极管	211	8.2.4	CRT 的特征参数
6.7	基于外光电效应的光电探		8.3	等离子体显示
			8.3.1	等离子体知识概述
			8.3.2	PDP 显示屏的基本结构与工作原理
			8.3.3	PDP 板的显示

原理	251	第9章 光信息存储技术	276
8.3.4 PDP 显示器件的		9.1 光存储技术概述	276
特点	253	9.1.1 光存储技术的	
8.3.5 PDP 显示器件的性能		概述	276
指标	253	9.1.2 光存储技术的	
8.4 液晶显示	254	发展	277
8.4.1 液晶	254	9.1.3 光存储技术的	
8.4.2 液晶的电光效应	255	特点	278
8.4.3 液晶显示器件的		9.2 光盘存储系统及工作原理	279
结构与驱动特点	256	9.2.1 光盘存储器的	
8.4.4 液晶显示器件的		结构	279
种类与工作原理	257	9.2.2 光头的分类及	
8.4.5 液晶显示的驱动	260	结构	280
8.4.6 液晶显示的技术		9.2.3 光盘衬盘	281
参数	263	9.2.4 光盘存储的数据	
8.5 发光二极管显示	265	通路	282
8.5.1 LED 显示器件的		9.2.5 光盘的读写原理	283
显示原理	265	9.2.6 光盘的特性参数	284
8.5.2 LED 显示器件的		9.2.7 光盘的类型	284
扫描驱动电路	266	9.3 只读存储光盘	285
8.5.3 LED 显示器的		9.3.1 ROM 的存储原理	285
技术指标	266	9.3.2 ROM 主盘与副盘	
8.6 数字光处理显示	269	的制备	285
8.6.1 DMD 的结构	269	9.3.3 ROM 的“2P”复制	286
8.6.2 DLP 投影机的工作		9.4 一次写入光盘	287
原理	270	9.4.1 一次写入方式	287
8.6.3 DLP 投影机的		9.4.2 写/读光盘对存储	
主要工作方式	271	介质的基本要求	288
8.6.4 DLP 显示技术的		9.4.3 WORM 光盘的	
特点	272	存储原理	288
8.7 电泳显示	272	9.5 可擦重写光盘	290
8.7.1 电泳显示技术的		9.5.1 可擦重写相变	
发展	272	光盘存储原理	290
8.7.2 电泳显示原理	273	9.5.2 可擦重写磁光	
8.7.3 影响 EPD 显示		光盘存储	293
性能的因素	274	9.6 DVD 光盘技术	294
8.7.4 EPD 显示技术的		9.6.1 DVD 光盘的	
优势	275		

物理结构	295	反演原理	322
9.6.2 DVD 光盘的		10.4 光电子技术在激光制导	
数据结构	296	领域的应用	325
9.7 光信息存储新技术	297	10.4.1 激光制导的物理	
9.7.1 光全息存储	297	原理	325
9.7.2 光致变色存储	302	10.4.2 激光制导的	
9.7.3 电子俘获光存储	304	分类	326
9.7.4 持续光谱烧孔		10.4.3 激光寻的制导	
存储	306	武器	326
9.7.5 其他光存储技术	308	10.4.4 激光驾束制导	
第 10 章 光电子技术应用举例	313	武器	327
10.1 光电子技术在光纤		10.4.5 激光制导武器的	
通信领域的应用	313	发展趋势	328
10.1.1 光纤通信的		10.5 光电子技术在遥感技术中的	
发展	313	应用	329
10.1.2 光纤通信系统的		10.5.1 遥感技术的	
基本组成	314	分类	329
10.2 光电子技术在光纤		10.5.2 遥感技术系统	330
传感领域的应用	315	10.5.3 红外扫描成像遥	
10.2.1 光纤布喇格光栅传		感仪	330
感器的原理	315	10.5.4 遥感技术的	
10.2.2 分布式光纤传感器		特性	331
的原理	317	10.6 光电子技术在医学与生物学	
10.2.3 光纤传感器产品的		领域的应用	331
应用与开发	317	10.6.1 光活检技术	332
10.3 光电子技术在激光雷达中的		10.6.2 非消融性光疗	
应用	320	技术	333
10.3.1 激光雷达系统的结构		10.6.3 生物光子技术	335
与探测原理	320	10.6.4 医学微光机电	
10.3.2 瑞利—拉曼—米散射		系统(MOEMS)	336
激光雷达系统	321	参考文献	338
10.3.3 瑞利激光雷达的			

第1章 绪 论

光电子技术是光学技术和电子学技术的融合,靠光子和电子的共同行为来执行其功能,是继微电子技术之后迅速兴起的一个高科技领域,集中了固体物理、导波光学、材料科学、微细加工和半导体科学技术的科研成就,是一门具有强烈应用背景的新兴交叉技术学科,是继微电子技术之后,信息技术的另一个核心和基础。光电子技术的发展极大地推动了众多相关科学技术的相互渗透和相互作用,并由此形成了规模宏大、内容丰富的光电子产业,对科技、经济、军事和社会发展的各领域都具有重要的战略意义。

1.1 光电子技术概念的演变

随着 20 世纪科学技术的迅猛发展,学科之间互相渗透,在光学技术的发展过程中,人们发现许多在电子学中行之有效的技术方法,如编码、振荡、放大、调制等都可以移植到光学中;一些在电子学中使用的有源、可控器件也可以用光学的方法实现;同时,光学信息技术以其突出的特点吸引着电子技术与光学技术的融合,使信息载波从微波频域扩展到光波频域。随着光学技术与电子技术的互相渗透,人们发现可以将光、电各自的优势结合起来,形成综合利用光学技术和电子技术的新的技术学科,这就是早期的光电子技术。

现在我们所说的光电子技术是指以光电子学为理论基础,由光学和电子学相结合而形成的新技术学科,其主要内容是光电信号的形成、传输、采集、变换及处理,是信息技术的重要组成部分,其最大特点是所有被研究的信息,包括光学的、电学的或其他非光学的信息,通过机械、热、声、电、磁等各种效应调制到光载波上,然后通过光学的或是电学的手段处理光载波,最终完成对信息的处理。

1.2 光电子技术及发展

光电子技术发展的标志性成果是 1960 年激光器的问世。激光器的发明,是光学技术与电子技术的完美结合,不但是现代意义上光电子技术问世的标志,也成为研究光电子技术的强有力的工具,使光电子技术获得了飞速发展,此后,每十年,光电子技术都有一个里程碑式的发展。

在 20 世纪 60 年代,光电子技术的典型成就是各种激光器的相继问世,进而引起围绕激光及其应用领域的发展。1960 年,美国 T·H·梅曼研制成世界上第一台激光器——红宝石激光器,在世界范围内引起了极大的轰动,并形成了连锁反应,短短几年内,He-Ne 激光器、半导体激光器、钕玻璃激光器、氩离子激光器、CO₂ 激光器、化学激光器、染料激光器等包括气体、液体和固体在内的各类激光器相继出现。几乎在激光器问世之初,人们就开始探索激光的应用,尤其是在军事领域的应用,并为此投入了大量的人力、物力和财力;同时,激光器的出现从

技术上为光与物质的相互作用提供了强有力的保障,使激光物理学、导波光学、非线性光学等学科涌现出来。

20 世纪 70 年代,光电子技术领域的标志性成果是低损耗光纤的实现、半导体激光器的成熟以及 CCD 的问世。1970 年,美国研制成功损耗为 20dB/km 的石英光纤和室温连续运转的半导体激光器,这些重要突破,导致以光纤通信、光纤传感、光盘信息存储与显示以及光信息处理等为代表的光信息技术蓬勃发展。有关成果不仅从深度和广度上促进了相应学科,特别是半导体光电子学、导波光学和非线性光学的发展和彼此之间的相互渗透,而且还和数学、物理学、材料学等基础学科交叉,形成新的边缘领域,如:半导体超晶格量子阱理论与技术、纤维光学技术等。在 20 世纪 70 年代光电子技术发展的同时,应用也在展开,1972 年荷兰飞利浦公司演示了其模拟式激光视盘,70 年代初美国激光制导炸弹投入使用,而 70 年代中后期,日本、美国、英国开始建设光纤通信骨干网。

20 世纪 80 年代,光电子技术的典型成就是对量子阱结构材料和光纤技术的理论和应用所取得的成就。例如,通过对超晶格量子阱结构材料和工艺的深入研究,导致了超大功率量子阱阵列激光器的出现;通过对量子阱结构材料的非线性光学研究,使得以往只有在强激光作用下的介电材料中才能观察到的非线性光学效应,发展到在弱光激发的量子阱材料中也可以观察到很强的非线性,从而导致半导体光学双稳态功能器件的迅速发展;通过对光纤物理特性的深入研究,出现了利用光纤的偏振和相位敏感特性制作的光纤传感器;对光纤非线性光学效应和色散特性的研究,形成了光孤子概念,进一步推动了对特种光纤的研究,并于 80 年代末研制成功了掺稀土的光纤放大器与光纤激光器。这一时期光电子技术在应用方面的典型成就是:1982 年,第一台数字式激光唱机诞生,80 年代初,日、美、英等国的光纤通信骨干网相继建成,其他各国也竞相开始自己的光纤干线网建设。

20 世纪 90 年代,光电子技术的典型成就是在通信领域取得了极大成功。这一时期,无论是光电子器件还是光电子系统,均有大量产品走出实验室,形成了光纤通信产业,如海底光缆铺设,各国新铺设的通信骨干网纷纷实现光纤化,并向城域、区域网发展;各国光电子器件研制取得了实质性进展,半导体激光器已走向产业化,出现了分布反馈激光器;光无源器件得到长足发展,光纤耦合器、衰减器、放大器、隔离器、光开关、波分复用器等实用化,大大扩展了通信容量,增大了光通信在通信领域中的份额,使互联网深入到千家万户;同时光纤光栅等研究取得重大进展。到 1998 年 3 月,美国单根光纤的传输容量已经达到 Tbit/s,并已尝试光纤入户;除此之外,这一时期,光电子技术在光存储方面也取得了很大进展,光盘已成为计算机存储数据的重要手段,CD、VCD 已深入到千家万户,DVD 也于 90 年代中期开始走向家庭;同时,光计算机的研究也开展起来,加拿大多伦多大学等都报道了其光计算机研究的重大进展。

21 世纪的第一个十年已经过去,这一阶段,光电子技术的典型成果是满足了人们不断增长的信息需求。人类正在步入信息化社会,信息与信息交换的爆炸性增长对信息的采集、传输、处理、存储与显示都提出了严峻的挑战,国家经济与社会的发展、国防实力的增强等都更加依赖于使用信息的广度、深度和速度,而这取决于人们获取、传输、处理和存储信息的速度;同时,随着现代科学技术的迅速发展,人们在空间科学、现代防御体系、生命科学、遥感及管理科学等领域中都拥有巨量科学信息,需要在有限的时间、空间,甚至实时地进行信息处理。随着光电子技术的发展,以智能化超高速计算机系统和全光网为代表的超高速、超大容量信息处理和传输已经实现;同时,光存储也在向超高密度、超大容量方向发展;而光显示已进入

等离子体显示、液晶显示、场致发射显示、薄膜显示等平板显示技术取代阴极射线管(CRT)显示的时代。

1.3 光电子技术的内容

光电子技术是一个较为庞大的领域,在这个领域中包括信息传输,如光纤通信、空间和海洋中的光通信等;信息处理,如计算机光互连、光计算、光交换等;信息获取,如紫外线、可见光和红外波段的光电成像和遥感、光纤传感等;信息存储,如光盘、全息存储技术等;信息显示,如大屏幕平板显示、固体激光投影电视、激光打印和印刷等;激光加工,如激光快速原型/模具制造、激光微细加工和激光医学等;光化学、生物光子学和材料学;军用光电技术,如夜视仪、红外成像探测和激光武器等。因此,光电子技术是多学科相互渗透、相互交叉而形成的高新技术学科。

虽然光电子技术的内容非常庞杂,但总体可以分为激光技术、光电子器件与技术以及激光与光电子技术的应用三个方面。

1. 激光技术

激光被誉为20世纪下半叶可与原子弹、半导体、计算机相媲美的四项重大发明之一,也是光电子技术发展的典型成就,激光具有单色性好、方向性强、亮度高等特点,这些特点使得激光具有非常广泛的应用领域,因此,自1960年第一台红宝石激光器问世以来,激光理论和技术得到了迅速发展,而随着激光技术的发展,又极大地促进了光电子技术的蓬勃发展。现已发现的激光工作介质有几千种,波长覆盖了从软X射线到远红外区域。激光技术的核心是激光器,激光器的种类很多,可按工作物质、激励方式、运转方式、工作波长等不同方法分类。根据不同的使用要求,采取一些专门的技术提高输出激光的光束质量和单项技术指标,比较广泛应用的单元技术有共振腔设计与选模、倍频、调谐、Q开关、锁模、稳频和放大技术等。

2. 光电子器件与技术

光电子器件指的是利用光来运行或者能产生光的一类电子学器件,光的概念覆盖了太赫兹、红外、可见光及紫外区域。实际上,各种基于材料的电子学行为并对光进行存储、调制、操控的器件都可以统称为光电子器件,包括各种光源、探测器、光调制与光互连器件、成像器件、发射与接受设备、显示设备以及太阳能电池等。光电子学器件的范围非常广泛,从根本上说,光电子器件所涉及的问题无外乎基础物理学问题、器件的概念与设计问题、新材料基础与器件制作新技术等方面。

当前,光电子器件的研究热点包括:① 高效太阳能电池的研制,其本质是直接利用太阳能的问题,这是解决人类能源危机的根本出路;② 太赫兹(THz,即 10^{12} Hz)辐射的光源及探测器的研制,太赫兹辐射是大自然光谱中缺失的一部分,但其对生命体的成像和研究具有特别的意义,其产生和探测都是对固体物理学/光学研究的极大挑战;③ 光电子学集成电路,其目标之一是实现光子计算机;④ 新型相干光源的研制,包括二极管激光器和三极管激光器,平面垂直发射激光器等;⑤ 高效单色发光和白光照明问题,即如何提高电能的利用率等。

3. 激光与光电子应用技术

20世纪60年代激光问世以来,最初应用于激光测距等少数领域,到70年代,由于有了室温下连续工作的半导体激光器和传输损耗很低的光纤,光电子技术迅速发展起来。现在在全世

界铺设的通信光纤总长超过 1000 万千米,主要用于建设宽带综合业务数字通信网;以光盘为代表的信息存储和激光打印机、复印机和以发光二极管大屏幕为代表的信息显示技术称为市场最大的电子产品;人们对光电神经网络计算机技术抱有很大希望,希望获得功耗低的、响应带宽很大,噪声低的光电子技术。

1.4 光电子技术的功能

光电子技术有许多功能,概括起来包括以下几个方面:

1. 扩展人眼视觉功能

科学研究表明,人眼在吸收外界信息时,具有其他感官所不及的特征,如获取的信息量最多,大约占 80% 以上的信息量是由光通过眼睛输入的;获取信息的速度最快,看来的比听来的快 7 倍左右;获取信息后记得最牢,看来的比听到的要牢靠得多。所谓“耳听是虚,眼见为实”不是没有根据的。

然而,人眼由于自身生理特点的原因存在着许多局限性,极大地限制了它获得光信息的能力。光电子系统可以使人眼功能得到极大程度的增强。它大大地扩展了人眼在低照度下的视觉能力,利用各种夜视侦察、探测设备,能使伸手不见五指的黑夜成为白昼,大大扩展了人眼对于电磁波段的敏感范围;利用各种照相、显像设备,使红外线、紫外线和光射线的光图像能被肉眼所看见,大大扩展了人眼对于光学过程的分辨能力,按照现代的信息技术水平,已经可以做到在极其短暂的时间(10^{-15}s)内观察到信息的万千变化。

2. 电路集成功能

集成电路也叫微电子芯片,是微电子技术的“心脏”,是利用微细工艺处理技术,将成百上千甚至上万个彼此分立的电子元器件及其相互之间的连接线,按照一定的规律,全部制作在一块小小的半导体硅片或砷化镓上,从而将各种分立的元器件“集”合而“成”为一个完整的构体。集成度或集成密度是度量集成电路规模大小的一个重要指标,按照当前的技术水平,世界上最高集成度的集成电路能在一张普通邮票大小(35mm^2)的硅片上集成十亿个晶体管、电阻、电容、电感等元器件,最小尺寸只有 $0.08\mu\text{m}$ 。如此高的集成度,使得一台微处理机的芯片可以做得比小姆指的指甲还要小,一台每秒运算 100 万次以上的电子计算机体积只有一包香烟那样大小,而且省电,可靠性高。

然而,在光电子集成电路面前,即使是最大规模的集成电路仍是技低三分。光电子集成电路是将光学系统集成到一块半导体芯片上,与集成电路相比,具有运算速度快、存储容量大和保密性能好的优点,堪称当今世界最“神奇的魔片”,大有替代集成电路之势,科学家预测,高运算速率、大存储容量的“集成光路”的广泛使用,仅是个时间问题而已。

3. 信息存储功能

在信息存储能力上,光电子技术更比电子技术高一等。人们常将磁带、磁盘说成是由电磁兄弟联营的“信息储蓄所”,这不是没有道理的。因为声音和图像的存储与播放是基于“电生磁”和“磁生电”的原理,这是电子技术在信息存储领域的应用。然而,随着光盘技术的出现,无论是在存储的容量、信息的读写还是存储的寿命等方面,都比基于纯电子技术的磁带、磁盘等磁存储技术更胜一筹,将信息的存储能力推向更高的阶段。

光盘存储系统是一种借助于光电子技术,通过光学方法进行数据的读、写,既可录制文字信息,也可录制图像信息。为了提高声音和图像的质量,增强信息的保真度,现在使用的都是

数字式光盘。存储信息时,先将声音、图像等模拟信号转换成相应的数字信号,并将数字信号调制成相应的激光信号,然后用经过调制后的光信号照射到光盘的感光材料上,在它上面形成一圈圈由微小凹坑组成的纹迹,称为“光道”。光道实质上起着声像“化身”的作用。从光盘上提出(读出)信息是存入(写入)信息的逆变换。当用直径极细的激光束照射光盘上的凹坑时,就会根据凹坑的形状产生出强弱不同的反射光,再将这种光信号转换成相应的电信号,这种电信号是数字式的,经过数字模拟转换以后,就能使人们耳闻目睹原先录制下的优美清晰的声像节目。

光盘作为一种新型的信息载体,存储容量很大,一张光盘可以存储上亿个汉字,享有“掌上书库”的美称。光盘的使用寿命非常长,享有光存储技术的“寿星”之称。从光盘上读取或写入信息时,是通过一枚非常纤细精确的“激光针”(激光束)去拾取或写入所存储的信息。由于是非接触方式,它不产生机械摩擦,不会损伤光盘上的信息纹迹。只要用于制造光盘的材料性能稳定,从理论上讲,它的使用寿命是无限长的,实际使用寿命至少在10年以上。

4. 光通信功能

长期以来,在信息传输上,声音、文字及图像等信息都是以无线电波为载体进行传播的,广播、电视是其中的代表;然而,无线电波和光波同属电磁波范畴,因此,从理论上来说,借助于光电子技术,凡是传统电子学所能实现的问题,原则上都可延伸到光波段。随着20世纪60年代激光的问世,实现了基于激光的信息传输,使古老的光通信技术(如烽火通信)返老还童,呈现出一派蓬勃发展的生机。

以光纤电话为例,在发话端先将用户送出的声音通过电话机变成相应的电信号,再将电信号经过光端机变成相应的光信号,沿着光纤传送到对方。到了接收端,先由光端机将光信号变回电信号,再由电话机将电信号还原成声信号,送给通话的用户。

1.5 光电子技术的应用

从光电子技术的发展初期,人们就在不停地探索其应用价值,现在,光电探测、光通信、光电测量与控制、光电信息处理和光存储等的应用已经遍及军事、科研、工业、农业、环境、医疗等各个领域,光电子技术已经成为现代科学技术和人类生活不可缺少的环节。

1. 光电子技术在传统产业领域的应用

光电子技术具有精密、准确、快速、高效等特点,有助于全面提高工业产品的高、精、尖加工水平,并大幅度提高附加值及竞争能力。以激光加工技术为例,它应用于汽车、航空、航天、通信、微电子等工业,具有加工速度快、效率高、质量好、变形小、控制方便和易于实现自动化生产等优点,对提高产品质量、降低生产成本、提高国际市场竞争能力具有重要作用。例如在汽车制造、有源阵列液晶显示器和太阳能光伏技术等方面都有重要应用。光电子技术在汽车制造行业的应用极大地推进了汽车工业的发展,首先是高功率的激光器被用作切割、焊接材料的处理工艺;其次是机械视觉系统正在汽车制造加工中被广泛地应用,并通过产生的信息来调整制造加工工艺,并由此提高产品的质量;而利用激光超声对固体材料进行非破坏性测试也显示了其在汽车制造业中极大的应用潜力。

2. 光电子技术在军事领域的应用

光电子技术使国防军事具有快速反应和准确攻击的能力,它能为军事提供既快又准的信

息,使己方看得更清、反应更快、打得更准、生存能力更强。因此光电子技术被认为是军事领域的主流技术,国防军事现代化的重要支柱。

激光聚变不仅可以作为未来能源,它还有重要的军事应用价值。它可以模拟氢弹的爆炸过程,代替既费钱又不安全的空中或地下核试验,从而改进核武器的性能。目前激光致盲武器已装备部队,舰载和机载激光反导器已开始走出实验室。

光电子技术已成为军方的核心技术,美国的国防防务水平随着电光技术的开发呈现快速增长的势头。

3. 光电子在尖端科学技术领域的应用

光电子技术在科学技术的发展中起着巨大的推动作用。光电子技术涵盖众多学科与技术,特别是基础学科和技术,如材料科学和技术、计算机科学技术、生命科学及技术等。光电子技术所涉及的科学领域都是 21 世纪发展的尖端科学技术,如兆兆纪元和医学应用等。例如用光学生物医学仪器研究艾滋病已取得重要进展,利用自动化基因顺序测定器、扫描激光荧光计,科学家能够对艾滋病毒的全部基因作顺序测定。下一代艾滋病诊断技术将集中于测定外周血流中自由 HIV 的浓度,即病毒负荷。这种诊断测量对于发展有前途的抗艾滋病病毒新药、蛋白酶抑制剂,以及涉及联合这些抗病毒药物治疗确定其有效性是非常重要的。在这种尖端的分子生物学实验室中如果使用光学探测,如量化的聚合酶链反应 PCR 和量化衍生的 DNA,将对开展与 HIV 的战斗具有战略影响。

1.6 光电子产业及其发展趋势

当今全球范围内,已经公认光电子产业是 21 世纪的第一主导产业,是经济发展的制高点。跨入 21 世纪,人类充分利用了上个世纪的计算机技术和光电子技术发明,构造出前所未有的、基于因特网的信息社会。光电子技术属于信息技术的关键硬件设备之一,提供把全世界的计算机联系起来的可能,甚至可以和卫星或外星球组成网络,目前成为组成覆盖范围巨大的因特网的支柱技术。单就提供和保障人类信息需求和信息发展之手段而言,光电子技术产业的战略地位是不言而喻的。

1.6.1 光电子产业的最新动态

光子作为能量载体可提供极高功率密度与能量密度的光能、极短的光脉冲、极精细的光束等,创造出极端的物理条件:极高的温度、极高的压强、极低的温度和极精密的刻划与极精细的加工,从而使光电子学和光电子技术在信息、能源、材料、航空航天、生命科学、环境科学及国防军事领域中得到广泛的应用。光电子技术的内涵包括真空光电子技术及相关器件与系统,半导体光电子技术及相关器件与系统,激光技术及相关器件与系统,其他光电子材料及器件以及大型光电子装置等几个大的方面。下面仅就一些热点问题进行讨论。

1. 激光技术锋芒毕露

激光是 20 世纪的重大发明之一。一台普通的脉冲固体激光器,输出的光脉冲宽度是几百微秒,甚至毫秒量级,峰值功率只有几十千瓦级,显然满足不了诸如激光测距、激光雷达、高速摄影、高分辨率光谱学研究等的要求。正是在这些要求的推动下,1961 年人们研究了激光调 Q 技术和锁模技术,到 80 年代使激光脉冲宽度和峰值功率达到纳秒(ns)量级和吉瓦(GW)量级的巨型脉冲。1964 年科学家们又提出了压缩脉宽、提高功率的锁模技术,使脉宽达到皮秒