

“十二五”国家重点图书出版规划项目

OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY AND NEW MATERIALS

光电子技术与新型材料

● 王 玥 李 刚 李彩霞 主编



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TN2/37

2013

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光电子技术与新型材料

王玥 李刚 李彩霞 主编

北方工业大学图书馆



C00348215

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

全书共分 10 章,主要包括:光电子技术发展的历史、现状和趋势;光的本性和电磁理论;激光的产生原理,各种不同类型激光的产生;光在电光晶体中的调制特性;光的各种探测技术;多种产生激光的材料与器件;用于太阳能电池的光伏材料,基于表面等离子激元的新型光伏材料;各种光电显示技术中所用的材料;太赫兹波技术;左手介质在光电子技术研究中的作用、构成原理以及应用等。

本书是光电子技术,电子科学与技术,材料科学与工程等相关专业本科生教材、研究生教学参考书,也可供相关专业科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

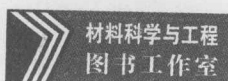
光电子技术与新型材料/王玥,李刚,李彩霞主编.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5603-4110-1

I. ①光… II. ①王…②李…③李… III. ①光电子技术-高等学校-教材②光电材料-高等学校-教材
IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 122264 号



材料科学与工程
图书工作室

责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 416 千字

版 次 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4110-1

定 价 30.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

光电子技术是电子科学与技术、光电信息科学与工程的重要组成部分,是21世纪的尖端科学技术,它对整个科学技术的发展起着巨大的推动作用,在国防建设、工农业生产、交通、信息、天文、医疗等国民经济的各个领域都有着重要的应用。光电子材料在光电子技术中起着基础和核心的作用,本书除了讲述光电子技术之外,还介绍了目前光电子技术方向的新型材料。

本书不仅是作者在多年来从事光电子教学和科研工作积累总结的基础上完成的,而且作者希望通过本书能够尽可能多地反映当今国内外该领域研究的最新成果,以注重基础性和实用性的同时体现前沿性为特色,将该领域的最新成果展现给读者。全书共分10章,第1章为绪论,介绍光电子技术发展历史、发展现状以及发展趋势;第2章为光的本性和电磁理论;第3章为激光的产生原理,介绍各种不同类型激光的产生;第4章重点阐述光在电光晶体中的调制特性;第5章为光的各种探测技术;第6章介绍各种产生激光材料与器件;第7章讲述用于太阳能电池的光伏材料,并介绍了基于表面等离子激元的新颖光伏材料;第8章为各种光电显示技术中所用的材料;第9章为太赫兹波技术;第10章针对目前左手介质在光电子技术中的研究,对此材料的构成原理、实现以及应用作了介绍。

本书是光电子技术,电子科学与技术,材料科学与工程等相关专业本科生教材、研究生教学参考书,也可供相关专业科技人员参考。

本书由王玥、李刚和李彩霞主编。第1章,第2章,第4章,第7章的7.6、7.7节和第9章由王玥编写;第3章,第6章和第8章由李刚编写;第5章,第7章的7.1~7.5节和第10章由李彩霞编写。

本书编者感谢北京大学李龙威在绘图方面给予的帮助。

由于光电子技术涉及内容非常之多,而且相关的材料与技术发展迅速,加之作者的水平有限,难免存在不妥之处,敬请读者批评指正,我们会及时作出修订。

编 者

2013年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 光电子技术发展历史	1
1.2 光电子技术发展现状	2
1.3 光电子技术发展趋势	3
1.4 光电子技术产业应用领域	4
习题	6
参考文献	6
第2章 光的本性与光电磁理论	7
2.1 电磁波谱	7
2.2 光子的基本概念	8
2.3 色散介质和各项异性介质中的电磁波	13
2.4 色散介质中的波速	19
2.5 各向异性介质与本构关系	24
习题	27
参考文献	27
第3章 激光产生原理	28
3.1 光的受激辐射放大	28
3.2 激光放大的阈值条件	36
3.3 激光器的泵浦技术	38
3.4 半导体激光器工作原理	41
习题	47
参考文献	47
第4章 光调制技术	48
4.1 光的偏振	48
4.2 马吕斯定律	49
4.3 电光效应原理	50
4.4 各向异性介质的电光调制	54
4.5 电光调制	63
4.6 声光调制和磁光调制	67

4.7 半导体光调制器	68
习题	70
参考文献	71
第5章 光电探测技术	72
5.1 辐射度学与光度学的基础知识	72
5.2 半导体的光电效应	77
5.3 光电探测器件的基本特性参数	87
5.4 真空光电探测器件	92
5.5 光电探测技术	103
习题	117
参考文献	118
第6章 激光材料与器件	120
6.1 激光晶体材料	120
6.2 激光器件分类	125
6.3 固体激光器	126
6.4 气体激光器	132
6.5 半导体激光器	135
6.6 化学激光器	144
6.7 自由电子激光器	147
6.8 光纤激光器	148
6.9 液体激光器	149
6.10 X射线激光器	149
6.11 物质波(原子)激光器	150
习题	150
参考文献	150
第7章 光伏材料与器件	152
7.1 光伏探测器的工作原理及其两种工作模式	152
7.2 光伏探测器的性能参数	156
7.3 光电池和光电二极管	160
7.4 光电三极管	176
7.5 太阳能电池材料	180
7.6 表面等离子光伏技术	190
习题	196
参考文献	197

第 8 章 光电显示材料	198
8.1 光电显示技术概述	198
8.2 显示参量与人眼的因素	200
8.3 液晶显示技术	206
8.4 发光二极管显示技术	219
8.5 新型光电显示技术	225
习题.....	234
参考文献.....	234
第 9 章 太赫兹波技术与应用	235
9.1 太赫兹波	235
9.2 太赫兹波的产生	238
9.3 电子学的太赫兹发射源	244
9.4 太赫兹波的探测	246
9.5 太赫兹时域光谱系统	250
习题.....	254
参考文献.....	254
第 10 章 超常媒质光电材料与应用	255
10.1 左手材料的基本概况	255
10.2 左手材料的电学特性	260
10.3 左手材料的光学特性	262
10.4 左手介质的偏振特性	268
10.5 左手材料的构造	272
10.6 左手材料的应用和发展前景	276
习题.....	278
参考文献.....	279

第1章 绪论

光电子技术是光子技术与电子技术相结合形成的一门技术。电子技术研究电子的特性与行为及其在真空或物质中的运动与控制;而光子技术研究光子的特性及其与物质的相互作用,以及光子在自由空间或物质中的运动与控制。两者相结合的光电子技术主要研究光与物质中的电子相互作用,及其能量相互转换的相关技术,以光源激光化、传输光纤化、手段电子化及现代电子理论的光学化为特征,是一门新兴的综合性交叉学科。它将电子学使用的电磁波频率提高到光频段,产生了电子学所不能实现的很多功能,成为继微电子技术之后兴起的又一门高新技术,并与微电子技术共同构成信息技术两大重要支柱。

1.1 光电子技术发展历史

光电子技术是继微电子技术之后近40年迅猛发展的综合性高新技术。20世纪60年代,光电子技术领域最典型的成就是各种激光器的相继问世。1960年,美国的梅曼研制成功世界上第一台激光器——红宝石激光器,我国于1961年8月在中国科学院(原长春光学精密机械研究所)也研制成功第一台红宝石激光器。这一突破在科技界引起了轰动,并形成了连锁反应,在短短的几年时间内,激光理论、激光器件和激光应用得到广泛研究,导致了氦氖激光器、半导体激光器、钕玻璃激光器、氩离子激光器、二氧化碳激光器、YAG激光器、化学激光器、染料激光器等固体、气体、液体、半导体激光器相继出现,这些激光器为光与物质相互作用的研究提供了一个崭新的、极其有效的工具。1962年半导体激光器的诞生是近代科学技术史上的一个重大事件。

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电荷耦合元件(CCD)的问世。其中,光纤通信和CCD这两项成果获得2009年诺贝尔物理学奖。经历十多年的初期探索,随着半导体光电子器件和硅基光导纤维两大基础元件在原理和制造工艺上的突破,光子技术与电子技术开始结合并形成了具有强大生命力的信息光电子技术和产业。80年代,出现了基于超晶格结构的量子阱阵列激光器。90年代,光电子技术在通信领域取得了极大成功,无论是器件还是系统,均有大量产品走出实验室,形成了光纤通信产业。另外,光电子技术在光储存方面也取得了很大进展,光盘已成为计算机储存的重要手段,CD、VCD已深入到千家万户,DVD也于90年代中期走进了家庭。

21世纪正在步入信息化社会,信息与信息交换量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,而这取决于获取、传输、处理、显示和存储信息的速度。此外,光显示逐渐呈现出等离子体显示(PDP)、液晶显示(LCD)、有机电致发光显

示(OLED)、场致发射显示(EI)等平板显示取代阴极射线管(CRT)显示的趋势。近几年,纳米光电子技术获得了长足发展。它的迅速崛起会对未来的光电子材料、光通信、生命科学、计算机和新能源技术等产生革命性的影响,从而大大推动人类政治经济社会的发展进程和彻底改变战争的对抗形式。

总的来说,光电子技术是一个比较庞大的体系,它的发展包括很多方面,包括信息传输,如光纤通信、空间和海底光通信以及未来太赫兹波通信等;信息处理,如计算机光互连、光计算、光交换等;信息获取,如光学传感和遥感、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、激光打印和印刷等。其中信息光电子技术是光电子学领域中最为活跃的分支。在信息技术发展过程中,电子作为信息的载体作出了巨大的贡献。但它也在速率、容量和空间相容性等方面受到严峻的挑战。采用光子作为信息的载体,其响应速度可达到飞秒量级、比电子快三个数量级以上,加之光子的高度并行处理能力,不存在电磁串扰和路径延迟等缺点,使其具有超出电子的信息容量与处理速度的潜力。

1.2 光电子技术发展现状

当今全球范围内已经公认光电子产业是本世纪的第一主导产业,是经济发展的制高点。进入21世纪,人类充分利用了20世纪的计算机技术和光电子技术,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的手段而言,光电子技术产生的战略地位是不言而喻的。

21世纪的光电子技术正在快速地发展,结合众多工艺与技术如光电子学、力学、电子学、材料学、微纳电子学等,光电子技术已成为国防、航空宇宙、光学加工、电子、通信、显示、测试仪器等领域发展的基础。面对电子科学与技术的迅猛发展,许多发达国家如美国、德国、日本、英国、法国等,都将光电子技术纳入了国家发展计划,如美国的“星球大战计划”、欧洲的“尤里卡计划”、日本的“科技振兴基本对策”等都把光电子技术列为重点支持领域。2004年全球光电产业产值为2 268亿美元,到2010年,全球光电行业市场容量达到4 500亿美元。

近20多年来,中国的改革开放使中国的光电子产业和技术取得了长足发展和前所未有的进步。在多项国家级战略性科技计划中,光电子、激光、光显示等技术均受到相当大的重视。“863”七大领域中就有光电子技术和激光技术。同时伴随着全球市场的转移,信息技术和制造在中国的发展为光电子行业的壮大铺平了道路。中国政府已把光电子产业作为十大优先发展产业之一,并给予重点扶持。根据中国科学技术协会的统计,中国光电子产业年增长率为10%~20%。

国内武汉光谷的建设大大推进了国内乃至国际的光电产业发展。武汉光谷建成了国内最大的光纤光缆、光电器件生产基地,最大的光通信技术研发基地和最大的激光产业基地。到2010年,其光纤光缆的生产规模居全球第一,国内市场占有率达60%,国际市场占

有率为12%;光电器件、激光产品的国内市场占有率为50%,在全球产业分工中占有一席之地。2011年,武汉光谷总收入达到3 810亿元,同比增长30.2%,规模以上工业总产值2 898亿元,其中最大产业光电子收入超过1 400亿元。2012年收入突破5 000亿元,达到5 006亿元,同比增长31.39%;其中工业总产值4 012亿元,高新技术产业产值3 783亿元。根据规划,到2015年,光谷力争实现企业总收入1万亿元,2020年实现企业总收入3万亿元。

在国家政策的大力支持下,最近几年,国内一些光电子企业迅速崛起,已经打破国际对光电市场的垄断局面。以平板显示和LED产业为代表的中国光电产业已经初步形成以环渤海、长三角、珠三角、中西部等四大区域集聚发展的总体产业规划。中国光电产业重点城市的分布,目前基本形成了“一东一中”两带的产业布局,即西起成都、东至合肥的光电产业“中部产业带”,以及北起大连、南至珠海的光电产业“东部产业带”。

1.3 光电子技术发展趋势

光电子材料和元器件是光电子产业的基础,对光电子产业的发展起着决定性的作用。光电子材料和元器件在整个光电子产业市场中占有30%的巨大份额,特别是微纳加工技术的不断进步,为研究新型光电子材料如光子晶体、人工超材料提供了有力保障,是目前纳米光子学领域发展迅速的前沿方向。

1. 光子学及光子学器件

光子学技术主要包括光子的产生、探测、控制和处理,因此必须有相应的光子学器件。光子学器件的时间响应和单信道超大容量要比电子学器件高得多,这对信息技术的发展有很大的推动作用。高密度、高相干性的激光光源始终对光信息工程起着重要作用,特别是半导体激光器。多量子阱器件、高密度垂直腔面发射器、量子级联器件、微腔辐射与微腔光子动力学器件的发展,不断地降低激光阈值、提高激光转换效率与输出功率,扩展波段、改善模式、压缩线宽、实现激光光源的阵列化和集成化,使计算机向着高速和智能化方向发展。由于光学信号处理具有高度并行化的优点,使光子能在信息处理中发挥大容量和高速度的特征,为此研制出高效低功耗的光子器件仍然是关键所在。

2. 光存储器件

20世纪末期兴起的光存储,特别是光盘存储技术对信息的存取产生了重大影响,已形成上百亿美元的产业。数字光盘存储技术正向更高存储密度和更高存储速度方向发展。研制和生产蓝光半导体激光器并用于光盘存储读写,利用近场光学扫描显微镜(NSOM)进行高密度信息存储,运用角度多功、波长多功、空间多功与移动多功等的全息存储代替聚焦光束逐点存储的方法等,可以实现和作为缓冲巨量信息存储。发展三维存储技术,如光子引发的电子俘获三维存储光盘和光盘烧孔存储等高密度存储等。

3. 光电传感器件

光电传感器件在光信号的电学处理方面,在通信、工业过程控制、光电信号处理以及光计算领域发挥着巨大作用,其蕴涵的市场份额是极为巨大的。近几年来光纤传感器的市场销售量直线上升,呈现出蓬勃发展的景象。

4. 光显示器件

信息的显示体现了真正的人机互动关系,光显示器件在光子与光电子材料与器件产业领域占有极为重要的地位。在该领域可发展液晶显示(LCD)、等离子体显示(PDP)、有机电致发光显示(OLED)、YAG 激光显示等产业化工程。

5. 光能量转换器件

研究并开发高效硅基太阳能电池、CIS 高效太阳能电池等的产业化是能量光电子产业的一个重要组成。该领域涉及环保和新型可再生性能源,因此应主动出击,加强与国际组织的合作以借力发展。此外,LED 照明领域的发展潜力巨大,它的技术进步达到了日新月异的程度。各国在 LED 照明发展领域纷纷推出相关政策及优惠措施,其中日本计划 2015 年 LED 占一般照明市场的 50%、韩国占 30%、中国大陆占 20%。

6. 新型光子功能材料和非线性光学材料与器件

在大力发展目前比较成熟的光子材料及器件的同时,投入大量的人力财力,研究开发那些具有广阔市场前景、有望形成新型经济增长点的光子材料和器件,这其中涉及光催化环保材料、稀土发光材料、红外焦平面阵列材料与器件、新型光电子信息处理与传感材料与器件,以及其他一大类非线性光学材料与器件等。此外,人工超材料包括光子晶体与左手介质成为未来一段时间内的主要研究和开发方向。

未来中国光电产业发展空间将呈现四大趋势:

(1) 持续承接国外先进地区的光电产业转移,产业转移也将向快速、纵深方向发展。

(2) 国内的产业布局将总体呈现“从沿海到内地梯度转移”的演变趋势,一些经济比较发达、产业配套环境较好的内地城市,将最先承接到光电产业的转移。

(3) 地方政府的意志一定程度上将成为产业汇集的主要推动之一,政府在光电产业发展过程中所承担的推动作用是由光电产业本身高技术、高投资的特征决定的。

(4) 不同区域的产业发展将逐步呈现一定的差异化,随着国家对产业统筹规划的重视,未来光电产业的布局也将更加科学、规范、合理。

1.4 光电子技术产业应用领域

光电子技术产业指的是应用光电子技术原理的元器件和利用这些光学元器件作为其主要部件的仪器、设备的生产制造业,以及为这些产品提供软件的产品。

1.4.1 激光技术

激光技术是光电前沿科学技术发展不可缺少的支柱之一。作为光电子主导产品的激光器的发展,经历了原理上的四次变革,体积日益变小,功率不断增大,可靠性和功率得到了很大提高。半导体二极管激光器和固体激光器技术发展十分迅速,其中最为突出的进展是固态化。现今,固体激光器的平均输出功率已从百瓦级提高到了千瓦级。半导体激光器的功率也有很大提高,其结构和性能也正在经历重大变化。与此同时,开发出的实用价值高的新波长和宽带可调谐激光器,包括对人眼无伤害的 $1.54\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 的激光器、蓝光激光器和 X 光激光器。

激光是 20 世纪的重大发明之一,它具有高亮度、良好的单色性和相干性及方向性,所

以激光作为光波段的相干辐射光源和信息载波,它的应用不仅遍及工业、军事、通信、医学和科学研究等诸多领域,而且创造了高新科学技术记录中的许多之最。例如:激光能产生最大的能量密度,激光输出脉冲功率达 $1.3 \times 10^{16} \text{ W}$,并可产生亿度以上高温,能焊接、加工和切割最难熔的材料;激光能产生最高的压强,光压强达 3×10^{11} 大气压,可以实现激光聚变点火;激光能产生最短的脉冲,780 nm 达 4 fs,用超短激光脉冲研究光合作用,能看到皮秒($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$)或飞秒($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)内发生的变化;激光能做最精密的刻划,能制造最小的光机电一体化设备,加工的最小机械零件从几微米到几十微米,制作的大规模集成线路的线宽已达到 $0.18 \mu\text{m}$,纳米器件和量子光学器件最终可达 50 nm ,测量精度更高;激光能产生最大的信息量,已接近 3 T 目标,即通信传输容量、运算速度、三维立体存储密度;激光能产生最保密的通信系统,光量子通信是目前理论证明的最安全的通信系统,已有几个国家建立了量子通信系统;激光能产生最低的温度,激光冷却可将原子冷却到 20 nK,接近绝对零度,量子冷却到基态,为量子光学和量子力学的实验研究准备了条件。此外,激光技术可用于精密制导、毁灭性武器、瞄准、跟踪、监测、频谱分析等。

1.4.2 信息传输与存储

光纤是随着光通信的发展而不断发展的,各种结构和类型的光纤支持着光通信产业的发展。目前,单根光纤传输的信息量已达到万亿位。光纤作为光通信信息传输的介质,它的色散和损耗将直接影响到通信系统的传输容量和中继距离,而常规的单模光纤已不能满足新一代通信技术的要求,因此光纤技术又有了新的发展。迄今,光纤已经经历了由短波长($0.85 \mu\text{m}$)到长波长($1.3 \sim 1.55 \mu\text{m}$),由多模到单模光纤以及特种光纤的发展过程,并开发出了色散移位光纤、非零色散光纤和色散补偿光纤。

现在大部分主干网用的都是光纤,信息的载体都是光。由于密集波分复用技术的发展,一根头发丝粗细的光纤就可以传输一亿门电话线路,这是电缆所无法比拟的。再如信息存储技术,光盘由 VCD 发展到 DVD,容量增大了好几倍。采用蓝光波段的光作为信息载体,可使同样大小的光盘的容量增大近十倍。而且光具有相干性,可以实现全息存储,在不到一个平方厘米的芯片上,可以把北京图书馆所有的书都存进去。一张蓝光 DVD 光盘容量已经达到了 400 GB 以上,大大满足了现在人们对高清影片存储的需求。

在计算机方面,未来的发展趋势是光要进入计算机中,发挥光子的优势实现开关的互联,利用光消除电子传输带来的瓶颈效应,用光纤代替金属导线传导信息,这将使计算机运行速率大大提高,并且光纤在恶劣环境中不会影响到信息的传输,所以未来会用到更加结实耐用而又处理速度极快的计算机。

1.4.3 平板显示

平板显示(FPD)技术包括液晶显示(LCD)、等离子体显示(PDP)、电致发光显示(EL)、有机电致发光显示(OLED)、真空荧光显示(VFD)和发光二极管显示(LED)等。除在民用领域广泛应用外,已在虚拟显示、高清晰度显示、语言和图形识别等军用领域得到应用。近年来,正在对液晶显示以及其他平板显示器件和技术进行大力改进,如为解决等离子体显示发光效率、亮度、寿命、光串扰和对比度等问题,正在进行诸如大面积精细图形制作和保护层等工艺方面的改进,取得了较快进展。从整体来说,平板显示技术将继续

向着彩色化、高分辨率、高亮度、高可靠性、高成品率和廉价方向发展。

在LCD大力发展的同时,LED与OLED也在迅速崛起,LED作为一种低耗、高效、廉价的产品被广泛地应用于生活及工业建设中。2008年北京奥运会鸟巢的照明设备就是采用了LED,亮度高而且节能。LED也被应用于笔记本电脑的背光源,这种背光的笔记本电脑屏幕有亮度高、寿命长的特点。OLED作为一种新型平板显示其实早已问世,但由于LCD的技术成熟,产量大,成本低,所以OLED的新技术发展受到了限制。但是OLED本身作为发光材料具有寿命短的优点,如果这一难题得到攻克,这种显示器具有相当大的潜质,它将是未来平板显示发展的方向。

习 题

1. 简述光电子技术概念。
2. 说明光电子技术的主要应用领域。
3. 试说明光电子技术最新发展趋势与前沿方向。

参考文献

- [1] 狄红卫,张永林.光电专业本科课程体系构建探索[J].高等理科教育,2002(6):36-37.
- [2] 何文瑶.光电子技术发展态势分析[J].科技进步与对策,2008(9):194-196.
- [3] 杨永才,何国兴,马军山.光电信息技术[M].上海:东华大学出版社,2002.
- [4] 王昕.光电显示技术发展研究[J].光电技术应用,2006(3):9-13.
- [5] 李强.光电子技术及产业发展[J].中国新技术产品,2008(11):97-98.
- [6] 王睿,司磊,梁永辉,等.光电专业本科课程体系构建探索[J].高等教育研究学报,2007,30(3):38-40.
- [7] 卫平.中国光电子产业竞争力评价和分析[M].北京:中国标准出版社,2007.
- [8] 李永泰.台湾光电子产业的发展及做法[J].海峡科技与产业,2000(6):12-13.
- [9] 季国平.蓬勃发展的光电子产业[J].世界电子元器件,2001(6):16-17.
- [10] 干福熹.光电子技术和产业发展[J].中国科学院院刊,1996(5):366-367.
- [11] 教育部高等教育司.光电信息工程专业发展战略研究报告[M].北京:高等教育出版社,2006.

第2章 光的本性与光电磁理论

历史上,对光的认识大致经历了四个过程:几何光学、波动光学、光电磁理论以及量子光学。虽然这些理论是复杂的,但是在不断发展演变的过程中成功地解释了各种复杂的、精确的光实验现象。

当光通过物体而物体的尺度远远大于光波长时,光是不容易被观察到的,因此它的行为可以通过满足一定几何定则的射线来描述。这种描述光的方法称为射线光学(几何光学)。简单地说,几何光学是波动光学在波长无限小时的极限处理方法,它是研究光的最简单理论,在任何介质中,光的传播形式都是射线形式。虽然这种方法可以解释日常生活中大部分光现象,但是仍有许多现象几何光学不能解释。几何光学与光的位置和方向息息相关,因此,在研究光的传播、设计光学仪器和成像系统中有广泛应用。

光是一种电磁波,可以利用电磁辐射理论来描述。电磁波中包含两个相互耦合的矢量波:一个是电场波,另一个是磁场波。然而在实际中,许多光现象可以通过标量波动理论来描述,即通过单个标量波函数描述光波,这种光波的近似处理方法被称为波动光学。波动光学是光学中非常重要的组成部分,内容包括光的干涉、光的衍射、光的偏振等,无论理论还是应用都在物理学中占有重要地位。粒子在光场或其他交变电场的作用下,产生振动的偶极子,发出次波。用这样的模型来说明光的吸收、色散、散射、磁光、电光等现象,甚至光的发射也是波动光学的内容。

光的电磁理论包含波动光学,即包含几何光学,如图2.1所示。几何光学和波动光学都是近似描述光的特性,二者的有效性来源于能够成功复现光的严格电磁理论的近似结果。

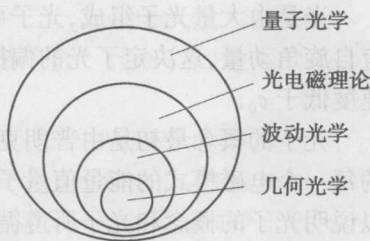


图2.1 四种不同光学范畴示意图

2.1 电磁波谱

电磁波是由同相振荡且相互垂直的电场波和磁场波在空间中传播形成的,它的传播方向垂直于电场与磁场构成的平面。它在真空中的传播速度约为 3.0×10^8 m/s。电磁波包括的范围很广,实践证明,从低频到高频的无线电波、微波、红外线、太赫兹波、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线都是电磁波。不同波段的频率和波长见表2.1。为了对各种电磁波有全面的了解,人们按照波长或频率的顺序把这些电磁波排列起来,这就是电磁波谱。

在整个电磁波谱中,光波的波段非常短,包含三个部分:紫外区($10 \sim 390$ nm)、可见光区($390 \sim 760$ nm)和红外区(760 nm ~ 1 mm),相应的频率范围为: $3.0 \times 10^{11} \sim 3.0 \times 10^{16}$ Hz。

表 2.1 电磁波谱

电磁波	频率范围 /Hz	空气中波长	作用类型
宇宙射线	$> 10^{20}$	$< 10^{-12} \text{ m}$	原子核
X 射线	$10^{20} \sim 10^{16}$	$10^{-3} \sim 10 \text{ nm}$	内层电子跃迁
远紫外光	$10^{16} \sim 10^{15}$	$10 \sim 200 \text{ nm}$	电子跃迁
紫外光	$10^{15} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$200 \sim 390 \text{ nm}$	电子跃迁
可见光	$7.5 \times 10^{14} \sim 4.0 \times 10^{14}$	$390 \sim 760 \text{ nm}$	价电子跃迁
近红外光	$4.0 \times 10^{14} \sim 1.2 \times 10^{14}$	$0.76 \sim 2.5 \text{ }\mu\text{m}$	振动跃迁
红外光	$1.2 \times 10^{14} \sim 10^{11}$	$2.5 \sim 1\,000 \text{ }\mu\text{m}$	振动或转动跃迁
微波	$10^{11} \sim 10^8$	$0.1 \sim 100 \text{ cm}$	转动跃迁
无线电波	$10^8 \sim 10^5$	$1 \sim 1\,000 \text{ m}$	原子核旋转跃迁
声波	$20\,000 \sim 30$	$15 \sim 10^6 \text{ km}$	分子运动

2.2 光子的基本概念

光是由大量光子组成,光子可以传播电磁能量,具有动量,其静止质量为零。光子具有自旋角动量,这决定了光的偏振特性。光子在真空中的传播速度是 c_0 ,在介质中的传播速度低于 c_0 。

光子的概念最初是由普朗克在解决黑体辐射光谱的疑难问题中提出来的,他将腔内的每一个电磁模式的能量值量子化后解决了黑体辐射的光谱问题,通过引入光谐振腔,可以说明光子的概念和光子所遵循的规则。

根据光的电磁理论,光在体积为 V 的无损谐振腔中的特性完全可以通过电磁场表征。而这个电磁场是由不同频率、不同空间分布以及不同偏振的离散的正交模式叠加而成。电场矢量为 $\text{Re}[\mathbf{E}(\mathbf{r},t)]$,其中 $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ 为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \sum_q A_q \mathbf{U}_q(\mathbf{r}) e^{j\omega_q t}$$

这里, q 表示不同的模式,第 q 个模式的复振幅是 A_q ,角频率是 ω_q ,模式的空间分布特性由复函数 $U_q(\mathbf{r})$ 表示,且满足归一化条件 $\int_V |U_q(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = 1$ 。空间分布函数的选择并不是唯一的。在边长为 d 的立方谐振腔中,通常空间分布函数选择驻波形式

$$U_q(\mathbf{r}) = \left(\frac{2}{d}\right)^{3/2} \sin \frac{q_x \pi x}{d} \sin \frac{q_y \pi y}{d} \sin \frac{q_z \pi z}{d} \quad (2.1)$$

这里 q_x, q_y, q_z 是整数,每一个模式中包含的能量为

$$E_q = \frac{1}{2} \varepsilon \int \mathbf{E}(\mathbf{r},t) \cdot \mathbf{E}^*(\mathbf{r},t) d\mathbf{r} = \frac{1}{2} \varepsilon |A_q|^2 \quad (2.2)$$

在经典电磁理论中,能量是任意非负值,与质量大小无关。总的能量是所有模式中能量的总和。

2.2.1 光子能量

在光子学中,电磁模式的能量是量子化的,离散在不同的光子能级中,如图 2.2 所示。在频率为 ν 的模式中,光子的能量为

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (2.3)$$

式中, $\hbar$ 是普朗克常数, $\hbar = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $\hbar = h/2\pi$ 。

如果一个模式没有光子存在,它的能量为 $E_0 = \frac{1}{2}h\nu$,称该能量为零点能;如果一个模式内包含 n 个光子,则这个模式总能量为

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.4)$$

在大部分实验中,零点能并不能直接被观察到,主要原因是实际中测试得到的是两个能级差。而零点能是通过物质在静场作用下以及其精确的方法证明存在的,在原子的自发辐射中有重要作用。

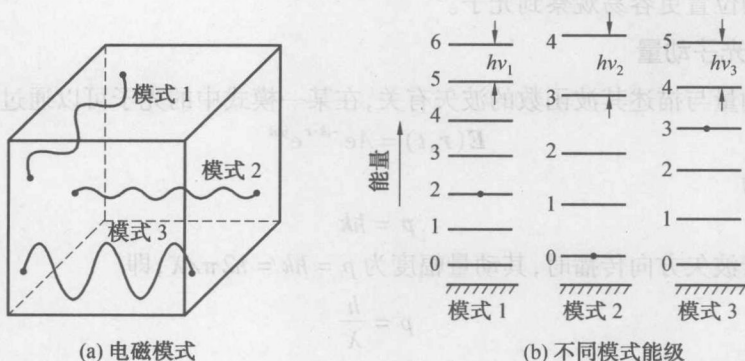


图 2.2 电磁模式的能级

光子能量的大小很容易计算,波长为 $1 \mu\text{m}$ 的红外光子,由 $\lambda\nu = c_0$ 可得其频率是 $3 \times 10^{14} \text{ Hz}$,它的能量 $h\nu = 1.99 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.24 \text{ eV}$,相当于一个电子在 1.24 V 电压作用下加速运动获得的能量。波长与能量满足如下关系

$$\lambda (\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E(\text{eV})} \quad (2.5)$$

波长的倒数常用来表示能量的单位,表示为 cm^{-1} ,也称为波数(1 cm^{-1} 相当于 $1.24 \times 10^{-4} \text{ eV}$ 能量,并且 1 eV 相当于 8068.1 cm^{-1})。光子频率、波长、能量与波数的关系如图 2.3 所示。

光子的能量随着频率的增加而增大,因此随着频率的增加,光的粒子特性更加明显,而衍射和干涉等波动性在高频时很难观察到。特别是,短波长的 X 射线与 γ 射线总是表现出粒子性,而射频、微波波段总是表现出波动性。

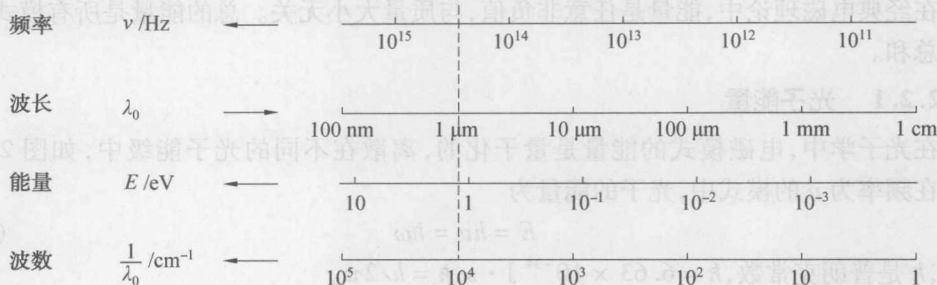


图 2.3 光子频率、波长、能量与波数的关系

2.2.2 光子位置

每一个光子都可以通过波函数 $AU(\mathbf{r})e^{i\omega t}$ 描述。然而,当一个光子入射到一个位于 $\mathbf{r}$ 的单位面元 dS (dS 垂直于光子的传播方向) 时,它的不可分辨性会引起它能被完全探测或根本不会被探测,因此,光子的位置不能精确确定,需通过光强来描述,即 $I(\mathbf{r}) \propto |U(\mathbf{r})|^2$ 。在某点 $\mathbf{r}$ 给定的面元上能够观察到光子的几率与光强成正比,即

$$p(\mathbf{r})dA \propto I(\mathbf{r})dA$$

在光强较强的位置更容易观察到光子。

2.2.3 光子动量

光子的动量与描述其波函数的波矢有关,在某一模式中的光子可以通过平面波描述

$$E(\mathbf{r}, t) = Ae^{-jk \cdot \mathbf{r}} e^{i\omega t}$$

因此其动量为

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \quad (2.6)$$

光子沿着波矢方向传播时,其动量幅度为 $p = \hbar k = \hbar 2\pi/\lambda$, 即

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

2.2.4 光子偏振

早期研究表明,光是不同频率、不同方向以及不同偏振态的模式叠加。模式的选择并不是唯一的,这个重要的概念是通过光的偏振特性来阐述的。

1. 线偏振光子

考虑光是由两个沿 z 方向传播的平面波叠加而成,一个偏振方向是 x 方向,另一个是 y 方向

$$E(\mathbf{r}, t) = (A_x + A_y)e^{-jkz} e^{i\omega t} \quad (2.7)$$

然而,即使相同的电磁场也可在不同坐标系 (x', y' ; 相对于原坐标系旋转 45°) 中表示,此时光可以表示为 x', y' 方向偏振模式的叠加

$$E(\mathbf{r}, t) = (A_{x'} + A_{y'})e^{-jkz} e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

式中 $A_{x'} = \frac{1}{\sqrt{2}}(A_x - A_y)$; $A_{y'} = \frac{1}{\sqrt{2}}(A_x + A_y)$

如果知道 x 方向偏振模被一个光子占据, y 方向偏振模没有被光子占据,那么在 x' 方向偏振的光子几率是多大呢? 这个问题通常用到概率统计方法,在每个偏振方向找到光子