

高等学校通用教材

光电子技术基础教程

郭培源 梁丽 编著

GUANGDIANZI JISHU JICHU JIAOCHENG



北京航空航天大学出版社

高等学校通用教材

光电子技术基础教程

郭培源 梁 丽 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了光电子技术的基本概念、基本原理与应用。全书共分7章,内容包括光的基础知识及发光源,光辐射在介质波导中的传播,光辐射的调制;光辐射的探测技术,CCD成像系统;光电显示技术和光信息存储技术。

书中内容注重理论与实践相结合,一方面注重光电子技术的基本概念、基本原理的讲述,另一方面注重介绍光电子技术的应用成果。

本书可作为高等院校的电子科学与技术、光信息科学与技术、电子信息、测控技术与仪器和光机电一体化专业的本科生或研究生的教学用书,也可作为相关专业科研人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光电子技术基础教程/郭培源等编著. —北京:北京
航空航天大学出版社,2005.9

ISBN 7-81077-684-3

I. 光… II. 郭… III. 光电子技术—教材
IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063467 号

光电子技术基础教程

郭培源 梁 丽 编著

责任编辑 金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:15 字数:336千字

2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷 印数:5000册

ISBN 7-81077-684-3 定价:19.00元

前 言

光电子技术作为一门研究光与物质相互作用而发展起来的新兴学科,已经成为现代信息科学的一个极为重要的组成部分,以光电子技术为基础的光电信息技术是当前最活跃的高新技术之一。光电子技术以其独特的优点——具有极快的响应速度、极大的频宽与信息容量、极高的信息效率推动着信息科学技术的发展,具有越来越强的竞争力。光电信息产业已成为 21 世纪最具有代表意义的主导产业,谁在光电子产业方面取得主动权,谁将在 21 世纪尖端科学的较量中夺魁。现代信息技术的发展和科技进步需要培养一大批掌握光电子技术的专门人才,也迫切需要普及光电子技术方面的知识。

自 20 世纪 60 年代激光器诞生以来,光电子技术在理论及应用方面都取得了巨大进展,光电子技术与微电子技术结合,相互交叉,相互渗透,形成了光电信息技术。集成电路的集成技术已经达到传统技术的极限,为新技术的应用解决了光电器件的集成问题。通信中使用了光纤技术,促进了光技术的发展。而电子技术引进光技术,更期待着能带动电子技术的发展。激光器的发明使光波的调制与解调成为可能,进而使电子技术的各种基本知识,如振荡与放大、调制与解调等概念几乎都移植到了光频段。电子学与光子学之间的鸿沟在概念上正在逐渐消失,进而产生了光频段的电子技术——光电子技术。光电子技术是电子技术在光频段内的不断开拓和发展,光电子技术是一个具有非常光明发展前途的领域,同时也将随时可能出现和电子技术不同的研究思路。处于这样的时期,掌握该领域的基础知识,学习特有的考虑问题的方法是非常重要的。

本教材比较全面系统地介绍了光电子技术的理论和应用基础。内容取材合适、深度适宜,富有启发性,便于学习,符合认知规律,有利于激发学生学习兴趣及各种能力的培养,能反映本学科国内外科学研究和教学研究的先进成果,并注意理论联系实际。教材内容包括光的基础知识及发光源,光辐射在介质波导中的传播,光辐射的调制;光辐射的探测技术,CCD 成像系统;光电显示技术和光信息存储技术。教材从基本原理入手,系统讲解光电子技术的基本概念、基础知识和基本理论,各章节的编排以及章节内容的安排既注重知识之间的有机联系,又考虑各自的独立性,并配有习题,以便于读者自学,也便于教师根据不同专业对光电子技术课程的不同要求、学时数的多少选取适当的内容。

《光电子技术基础教程》是光电子系列教材之一,下有《光电检测技术与应用》、《光纤器件及通信技术》和《光电器件原理与应用》。

本书在编写过程中,参阅了大量的国内外文献,在此向这些文献的作者表示感谢。光电子系列教材中的基础理论及应用在浙江大学杭州高联信息技术有限公司生产的 CSY-2000G

光电传感器实验系统上得到了验证性实验。

参加本教材编写工作的有郭培源教授(前言、第5~7章)、梁丽副教授(第1~4章),于瑞雪研究生在教材的插图、编排、录入等过程中做了大量的工作。

郭培源负责全书的策划、组织编写、统稿和定稿。

现代光电子技术发展日新月异,本书内容若有疏漏和错误,欢迎专家学者、使用本教材的教师、学生和工程技术人员提出宝贵意见,以便今后不断改进。

作 者

2004年5月

2003 年以来为外校编辑出版的主要教材目录(不含一般图书)

书 号		书 名	编著者	定 价
346-1	软件及应用类	现代电气控制及 PLC 应用技术	王永华等	27.00
302-X		Verilog 数字系统设计教程	夏宇闻	38.00
164-7		嵌入式系统原理及应用开发技术	桑楠等	23.00
428-X		EDA 技术及其应用	汉译西等	29.00
377-1		计算机图形学理论与实践	李春雨等	30.00
864-7		微机原理及接口技术	邵鸿余编	30.00
554-5	自动控制及测试技术	传感器技术及应用	薛永毅等	23.00
121-3		测控电路及装置	孙传友等	26.50
184-1		测控系统原理与设计	孙传友等	28.50
378-X		智能传感器与信息系统	梁威等	21.00
375-5		现代测控技术及虚拟仪器	曹玲芝等	18.00
460-3		虚拟仪器与 Labview TM 7.0 Express 程序设计	周求湛等	21.00
349-6	光及电子工程类	自动控制原理(修订版)	冯巧玲等	32.00
483-2		电工电子技术实验教程	孙君曼等	18.00
482-4		模拟与数字电子技术实验教程	徐国华等	18.00
668-1		电子线路设计指导	李银华等	18.00
667-3		电路实验教程	徐国华等	15.00
873-6		电子工艺及电子工程设计	汤元信等	20.00
912-0		光纤通信及网络技术	徐宝强等	18.00
684-3		光电子技术基础教程	郭培源等	19.00
605-3		光学原理教程	梁柱等	20.00
319-4		模拟电子技术基础学习指导与提高	王成珍著	16.00
344-5		数字电子技术基础学习指导与提高	刘盾等	18.00
497-2	基础类	材料力学教程	戴葆青等	25.00
498-0		理论力学教程	王崇革等	25.00
407-7		材料力学实验	王育平等	9.00
676-2		机械工程材料成形技术	王爱珍	28.00
499-9	机械制图类	计算机三维图形技术	杨德星等	22.00
* 205-8		工程图学基础(少学时)	王农等	24.50
* 206-8		工程图学与计算机绘图(多学时)	王颖等	29.00
* 547-2		建筑制图与阴影透视	赵景伟等	31.00

注: 1. 带 * 号图书各配有对应的制图习题集。

2. 书号 684-3 的《光电子技术基础教程》是系列教材之一, 下有《光电检测技术与应用》、《光纤器件及通信技术》和《光电器件原理与应用》共 4 本, 于 2005 年—2006 年相继出版。

3. 书中难免出现问题, 敬请教师、读者提出。

责任编辑: 金友泉 电话 010-82317036 邮编 100083 地址: 北京学院路 37 号北航出版社编辑部。

目 录

第 1 章 光的基础知识及发光源	1
1.1 光的基本属性	1
1.1.1 光的波动性——光波	2
1.1.2 光的粒子性——光子	5
1.2 热辐射的概念	6
1.2.1 辐射本领和吸收本领	6
1.2.2 基尔霍夫辐射定律	7
1.3 绝对黑体的辐射规律	8
1.3.1 黑体辐射的实验规律	8
1.3.2 维恩公式和瑞利-金斯公式	9
1.3.3 普朗克公式	9
1.4 激光原理	10
1.4.1 玻尔假说与粒子数正常分布	10
1.4.2 光与物质的共振相互作用	12
1.4.3 激光产生的条件	25
1.4.4 激光器的基本结构及输出	31
1.4.5 激光的特性	40
1.5 典型激光器	42
1.5.1 固体激光器	42
1.5.2 气体激光器	46
1.5.3 液体激光器	57
1.5.4 半导体激光器	59
习题与思考题	74
第 2 章 光辐射在介质波导中的传播	76
2.1 光线在介质界面的反射与折射	76
2.2 光波在平板介质波导中的传播	79
2.2.1 平板介质波导的射线理论分析	79
2.2.2 平板介质波导的波动理论分析	87

2.3 光波在光纤波导中的传播	92
2.3.1 光纤的基本知识	92
2.3.2 阶跃光纤波导的射线理论分析	96
2.3.3 渐变折射率光纤	100
2.3.4 阶跃光纤波导的波动理论分析	101
2.3.5 光纤的损耗和色散	104
习题与思考题	109
第3章 光辐射的调制	110
3.1 光辐射调制原理	110
3.1.1 振幅调制	111
3.1.2 频率调制和相位调制	111
3.1.3 强度调制	112
3.1.4 脉冲调制	113
3.1.5 脉冲编码调制	114
3.2 电光调制	114
3.2.1 电光效应	115
3.2.2 电光强度调制	122
3.2.3 电光相位调制	127
3.2.4 电光调制器的电学性能	128
3.2.5 电光器件	131
3.3 声光调制	136
3.3.1 声光效应	136
3.3.2 声光相互作用的两种类型	138
3.3.3 声光器件	143
3.4 磁光调制	151
3.4.1 旋光现象	151
3.4.2 法拉第效应	152
3.4.3 磁光器件	153
3.5 直接调制	155
3.5.1 半导体激光器(LD)直接调制的原理	156
3.5.2 半导体发光二极管(LED)的调制特性	157
3.5.3 半导体光源的模拟调制	157
3.5.4 半导体光源的脉冲编码数字调制	158

习题与思考题	159
第 4 章 光辐射的探测技术	160
4.1 光电探测的物理效应	160
4.1.1 外光电效应——光电发射效应	161
4.1.2 内光电效应	162
4.1.3 光热效应	164
4.1.4 光电转换定律	166
4.2 光探测器性能参数和噪声	166
4.2.1 光探测器的性能参数	166
4.2.2 光探测器的噪声	169
4.3 光电探测器	171
4.3.1 光电探测器类型	171
4.3.2 典型光电探测器	171
4.4 光电探测方式	176
4.4.1 直接探测	176
4.4.2 外差探测	178
习题与思考题	181
第 5 章 CCD 成像系统	182
5.1 CCD 工作原理	182
5.1.1 电荷存储	182
5.1.2 电荷耦合(传输)	184
5.1.3 电荷的注入和检测	184
5.2 CCD 物理特性	187
5.3 CCD 电荷耦合摄像原理	187
5.4 CCD 性能与特点	190
5.5 CCD 摄像传感器的典型应用	191
习题与思考题	196
第 6 章 光电显示技术	197
6.1 显示器件的性能指标	197
6.2 显示器件的发光、色彩、视觉、彩色重现	199
6.3 阴极射线管	201

6.3.1 基本结构与工作原理	201
6.3.2 主要单元	203
6.4 液晶显示	206
6.4.1 液晶的基本知识	206
6.4.2 液晶大屏幕显示	208
6.5 等离子体显示	210
习题与思考题	214
第7章 光信息存储技术	215
7.1 光盘存储的特点	216
7.2 光盘存储原理	217
7.3 光盘存储系统的关键技术	221
7.4 只读存储光盘	223
7.5 一次写入光盘	224
7.6 光信息存储新技术	227
习题与思考题	230
参考文献	231

第 1 章 光的基础知识及发光源

1.1 光的基本属性

在日常生活中,光是最为人们所熟悉的东西。如果没有光,人们简直无法生活。但是,人们认识光的本性却经过了艰难而又曲折的道路。

光学是物理学中发展较早的一个分支,光学研究可追溯到 2 000 年前。约在公元前 400 多年,中国的《墨经》记载了世界上最早的光学实验以及所获得的关于影、针孔成像、镜面成像、虹霓和月蚀的知识。差不多相同的时期,西方也有一些光学研究,公元前 300 年,希腊欧几里得的《反射光学》已有光的直线传播性和反射定律的叙述。

到 17 世纪,光学才有了真正的发展。1621 年斯涅尔发现光的折射定律,与早先已发现的光的直线传播定律和反射定律一起构成几何光学的基础。此时,关于光的本性问题形成了两种不同的学说,一种是以牛顿(Newton)为代表的微粒说,另一种是以惠更斯(C. Huygens)为代表的波动说。

微粒说认为,光是由发光体发出的光粒子(微粒)流所组成的,这些光微粒与普通的实物小球一样遵从相同的力学规律。波动说认为,光和声一样是一种波动,是由机械振动的传播而引起的一种波动。这两种学说都能解释光的反射和折射现象。但是,在解释光线从空气进入水中的折射现象时,微粒说需要假设水中的光速大于空气中的光速;而波动说需要假设水中的光速小于空气中的光速。当时人们还不能准确地用实验方法测定光速,因而无法根据折射现象去判断这两种学说的优劣。但由于牛顿在科学界的崇高威望,光的微粒说在很长一段时间内占据着统治地位。

19 世纪初,杨氏(T. Young)和菲涅耳(A. J. Fresnel)等人发现光有干涉、衍射和偏振等现象,波动说可以解释这些现象,而微粒说则无能为力。1850 年,佛科(J. B. L. Foucault)用实验方法测定了水中的光速,证实水中的光速小于空气中的光速。这些事实都对波动说提供了重要的实验论据。

19 世纪 60 年代,麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了电磁场理论,并得出光是一定频率范围内的电磁波,为波动说建立起更为坚实的理论基础。

可是,从 19 世纪末到 21 世纪初,人们又发现了一系列不能用波动说解释的现象,如黑体辐射、原子的线状光谱和光电效应等,人们在解释这些光和物质相互作用的现象时,认识到必须认为光具有粒子性。1900 年普朗克(M. Planck)提出辐射的量子论,1905 年爱因斯坦(Ein-

stein)发展了普朗克的量子化假设,在一种全新的意义上提出了光子学说。光子学说认为,光是具有一定能量和动量的粒子所组成的粒子流,这种遵从崭新量子力规律的粒子称为光子。因此,人们认识到光具有波动和粒子的双重性质——光具有波粒二象性。

1.1.1 光的波动性——光波

1864年麦克斯韦发表了“电磁场的动力理论”这一著名论文,总结了前人在电磁学方面的研究成果,建立了描述电磁场变化规律的麦克斯韦方程组,从理论上预见了电磁波的存在。电磁场理论认为,光是一定频率范围内的电磁波,而电磁波就是变化电磁场的传播。若在空间某区域有变化电场 E (或变化磁场 H),那么在邻近区域将引起变化的磁场 H (或变化电场 E),这种变化的电场和磁场相互激发、相互感生,由近及远以有限的速度在空间传播,形成电磁波。1887年赫兹(H. Hertz)应用电磁振荡的方法证实了电磁波是客观存在的,并证明了电磁波和光波具有共同特性,从而验证了麦克斯韦电磁理论的正确性。电磁场的基本性质如下:

(1) 在电磁场中,电场矢量 E 、磁场矢量 H 和传播方向 k 三者相互垂直,这说明电磁波是横波。 E 、 H 和 k 三个矢量的方向成右手螺旋关系。

(2) 沿给定方向传播的电磁波, E 与 H 的振动方向都是在各自垂直于传播方向 k 的平面内,这一特性称为偏振性。

(3) 空间各点 E 和 H 都作周期性变化,并且它们的相位相同。任一时刻,在空间任一点, E 和 H 在量值上的关系为

$$\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$$

式中: ϵ 为介质中的介电系数; μ 为介质中的磁导率。

(4) 电磁波在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-1)$$

式中: ϵ_0 为真空中的介电系数; μ_0 为真空中的磁导率。在国际单位制中,指定 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$,由精密测定 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,推算得 $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。光是一种电磁波, c 就是光在真空中的传播速度。

电磁波在介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (1-2)$$

传播速度 v 取决于介质的 ϵ 和 μ 。通常, ϵ 和 μ 是电磁波频率 ν 的函数。因此介质中不同频率的电磁波具有不同的传播速度,这就是电磁波在介质中的色散现象。

电磁波的波谱范围很广,包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 γ 射线等。这些电磁波本质上完全相同,只是波长不同而已。真空中电磁波的波长 λ 与频率 ν 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1-3)$$

真空中电磁波的传播速度 $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为常量,所以频率不同的电磁波在真空中具有不同的波长。频率愈高,对应的波长就越短。按照频率或波长的顺序把电磁波排列起来,即是电磁波谱,如图 1-1 所示。

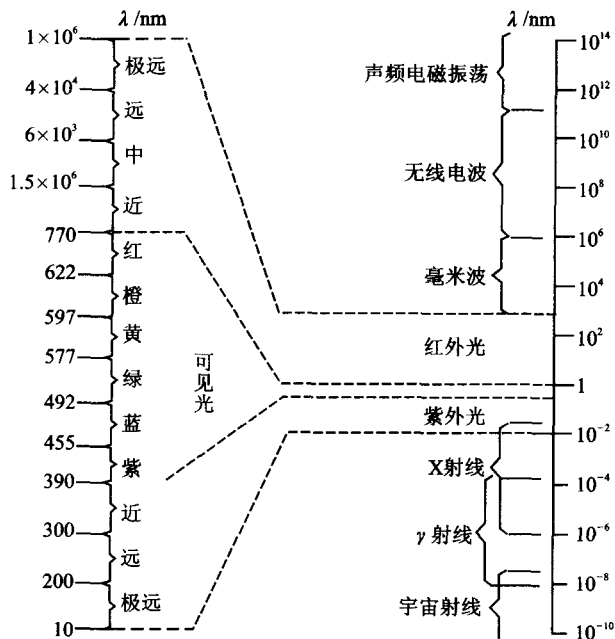


图 1-1 电磁波谱

表 1-1 列出了电磁波段的详细划分及用途。目前已经发现并得到广泛利用的电磁波有波长达 10^4 m 以上的,也有波长短到 10^{-5} nm 以下的。下面对各种不同性质的电磁波分别作简单的介绍。

表 1-1 电磁波段的详细划分及用途

电磁波谱	波长范围	频率范围/MHz	主要产生手段	用途
无线电波	长波	3~30 km	电子线路	越洋长距离通信、导航
	中波	200 m~3 km		AM 广播、电报通信
	短波	10~200 m		AM 广播、电报通信
	超短波	1~10 m		FM 广播、电视、导航
	微波	1 mm~1 m	行波管 调速管 磁控管	电视、雷达、导航

续表 1-1

电磁波谱		波长范围	频率范围/MHZ	主要产生手段		用 途
光 波	红外线	0.76 μm~1 mm	$3\times 10^5\sim 4\times 10^8$	热体	激 光	雷达、光纤通信、导航
	可见光	0.40~0.76 μm	$4\times 10^8\sim 7.5\times 10^8$	电弧灯		
	紫外线	0.03~0.40 μm	$7.5\times 10^8\sim 10^{10}$	汞灯		医用、照相制版
X 射线		0.1 nm~0.03 μm	$10^{10}\sim 3\times 10^{12}$	X 射线管		医用、探伤、分析晶体结构
γ 射线		1.0 pm~0.1 nm	$3\times 10^{12}\sim 3\times 10^{14}$	加热器		金属探伤、研究核结构

无线电波是一种频率不超过 300 MHz,即波长超过 1mm 的电磁波。通常,无线电波是由晶体管等元器件制作的电子线路中产生的,因此频率纯度很高;并通过对电子线路进行调制,便可用来传递各种信息。无线电波已广泛应用于无线电广播、电视、移动电话、卫星转播、雷达和电磁炉等众多领域,成为日常生活中不可缺少的东西。

可见光在整个电磁波谱中只占很小的一部分,只有波长范围在 $0.40\sim 0.76\ \mu\text{m}$ 之间的电磁波能使人眼产生光的感觉。不同波长的电磁波在人眼中所呈现的颜色各不相同,随着波长的缩短,呈现的颜色依次为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫,而人们日常感受到的白光则是各种颜色的可见光的混合。

红外线比红光的波长更长,人眼看不见,波长范围在 $0.76\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ 之间。它可细分为近红外、中红外、远红外和极远红外四部分。自然界中凡是温度高于绝对零度的物体都会发射红外线,这个特性对于观察和测定肉眼看不见的对象具有特殊的意义。利用目标和背景温度及物体发射能力的差异可做成各种被动的红外仪器,对目标进行探测、跟踪、搜索及成像,并能直接反映物体的温度分布、空间方位及运动状态等若干特征参量。红外技术已广泛应用于军事、科学研究、工农业生产、医学和日常生活等各个领域。

紫外线比紫光的波长更短,人眼也看不见,波长范围在 $0.03\sim 0.40\ \mu\text{m}$ 之间。它可细分为近紫外、远紫外和极远紫外三部分。炽热物体的温度很高时,就会辐射紫外线。太阳光中有大量紫外线,汞灯中也有大量紫外线。紫外线有显著的化学效应和荧光效应,可用于医疗杀菌和照相制版等行业。

X 射线比紫外线的波长更短,波长范围在 $0.1\ \text{nm}\sim 0.03\ \mu\text{m}$ 之间。X 射线管是靠高速电子流轰击原子中的内层电子而产生 X 射线的。X 射线具有很强的穿透能力,它透过各种物体的本领与组成物质的原子量有关;它能使胶片感光,使荧光屏发光。利用这种性质可透视人体内部的病变,检查金属部件的内伤和分析晶体的结构。

γ 射线是放射性原子衰变或用高能粒子与原子核碰撞时所发出的一种波长极短的电磁波,其波长范围在 $1.0\ \text{pm}\sim 0.1\ \text{nm}$ 之间。 γ 射线常作为一种放射线使用,可用于金属探伤和研究原子核的结构。

光是一种波长很短的电磁波,靠着电磁场在空间中传播,电磁场的传播具有波动性。应用

光的电磁理论,能解释光的反射、折射、干涉、衍射、偏振和双折射等与光的传播特性有关的现象。

1.1.2 光的粒子性——光子

人们在解释黑体辐射、光电效应等涉及到光和物质相互作用的现象时,认识到光不仅具有波动的特性,同时也具有粒子的特性,从而导致出现了光子学说。光子学说认为,光是由一群以光速 c 运动的光量子(简称光子)所组成。光子的基本性质如下:

(1) 光子具有能量 E ,而这种能量与一定的光频率 ν 相对应,如式(1-4)所示。

$$E = h\nu \quad (1-4)$$

式中: h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

(2) 光子具有质量 m ,但光子静态质量 $m_0 = 0$,光子动态质量 m 与光子能量 E (或光的波长 λ) 的关系为

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad (1-5)$$

(3) 光子具有动量 p ,而这种动量与一定的光波长 λ 、一定的传播方向 k 相对应

$$p = \frac{h}{\lambda} n_0 = \hbar k \quad (1-6)$$

式中: n_0 为光子行进方向上的单位矢量; $\hbar = h/2\pi$; $k = (2\pi/\lambda)n_0$ 。

(4) 光子具有自旋,并且自旋的量子数为整数,所以光子的集合服从玻色-爱因斯坦(Bose-Einstein)统计规律。

按照光的量子理论,光子是组成光辐射场的基本物质单元。组成光辐射场的大量数目的光子分别处于不同的光子统计状态,光子的运动状态简称为光子态。光子态是按光子所具有的不同能量(或动量数值)、光子行进的方向以及偏振方向相互区分的。处于同一光子态的光子彼此之间是不可区分的,又因为光子是玻色子(其自旋量子数为整数1),在光子集合中,光子数按其运动状态的分布不受泡里不相容原理的限制。可以有多个光子处于同一种光子态上,这种现象称为简并。处于同一光子态的平均光子数目称为光场的简并度,用 δ 表示。光子集合中光子数按态的分布服从玻色-爱因斯坦统计分布规律。在温度为 T 的平衡热辐射场中,处于频率为 ν (或能量为 $h\nu$) 的光子态的平均光子数,即光子简并度 δ 为

$$\delta = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1-7)$$

式中: T 为热力学温度; h 为普朗克常数, k 为玻耳兹曼常数。

对于光频波段,在常温(例如 $T = 300 \text{ K}$)下,普通热光源的光子简并度极低,约为 10^{-20} 量级。但采用特别的方法,有可能在光频段获得极高的简并度,形成一种新的光源,这就是后面将要介绍的光的受激辐射现象。这种新光源发出的光,单色亮度高,大量光子处于相同的光子态,有确定的运动方向、频率和偏振,称之为相干光。相干光比起通常情况下存在的非相干光

有许多优越性。

波长为 λ 的光是质量为 $m = h/c\lambda$ 、能量为 $E = h\nu$ 、动量为 $p = (h/\lambda)n_0$ 的光子的集合体,光的传播实际上是光子的辐射流。光子学说可以解释光的发射、光的吸收、光电效应等与光和物质相互作用有关的现象。

应当指出,单独用经典的波或粒子概念之一去描述光,都不足以解释光的全部现象,必须说光具有“波粒二象性”——光不仅具有波动性,而且具有粒子性。式(1-4)和式(1-6)把光的双重性质——波动性和粒子性联系起来,频率 ν 和波长 λ 是描述波动性的,而能量 E 和动量 p 则是描述粒子性的。

波动性和粒子性是光的客观属性,两者总是同时存在的。只不过在一定条件下,波动的属性表现明显;而当条件改变时,粒子的属性又变得明显。例如,当光在传播过程中,其波动性较为明显,所表现的干涉、衍射和偏振等现象要用波动观点来解释,这时往往把光看成由一系列的光波组成。而当光和物质相互作用时,其粒子性较为明显,所表现的黑体辐射、吸收光谱和光电效应等现象要用粒子观点来解释,这时往往又把光看成是由一个一个光子组成的粒子流。现在所说的粒子和波动,已经不是牛顿微粒说中的粒子,也不是惠更斯所理解的波动。现在是粒子中渗透着波动性,波动中渗透着粒子性,它们所包含的意义比原来的粒子和波动深刻得多。

1.2 热辐射的概念

任何温度高于 0 K 以上的物体都在发射各种波长的电磁波,这种由于物体中的分子、原子受到热激发而产生的辐射称为热辐射。热激发的方式可以是加热、通电、光照、化学反应或核反应。如果将一块铁加热逐渐升高温度,它经历的变化是从有点微微发热到热烘烘再到热浪逼人,而且物体的颜色开始时是暗淡的,后来渐渐变成暗红到发黄再到亮得耀眼。实验表明,在一定时间内,物体辐射能的多寡以及辐射能按波长的分布都与温度有关,并且热辐射具有连续的辐射谱,波长自远红外区延伸到紫外区。为了真正理解热辐射的规律,下面先介绍热辐射的一些基本概念。

1.2.1 辐射本领和吸收本领

如上所述,物体辐射的能量与温度 T 和波长 λ 有关。设物体的温度为 T ,如果在单位时间内,从物体表面单位面积辐射出来的波长在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 范围内的辐射能为 $dM_e(\lambda, T)$,那么 $dM_e(\lambda, T)$ 与波长间隔 $d\lambda$ 的比值称为物体的单色辐射出射度或单色辐射本领,用 $M_e(\lambda, T)$ 表示。即

$$M_e(\lambda, T) = \frac{dM_e(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (1-8)$$

单色辐射出射度反映了在不同温度下辐射能按波长分布的情况。它不仅随波长和温度而变,还与物体本身的性质和表面状态有关。

在单位时间内,从物体表面单位面积辐射出来的各种波长的总辐射能,称为物体的辐射出射度或总辐射本领,用 $M_e(T)$ 表示。它与温度有关,还与物体本身的性质有关。根据式(1-8),在一定温度 T 时,物体的辐射出射度和单色辐射出射度的关系为

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_e(\lambda, T) d\lambda \quad (1-9)$$

任何物体向周围发射辐射能的同时,也吸收周围物体发射的辐射能。入射到透明物体上的辐射能,一部分被吸收,一部分被反射,还有一部分被透射。对于不透明的物体,入射的辐射能只有被吸收和被反射两部分。物体吸收的能量与入射的能量之比称为物体的吸收比,物体反射的能量与入射的能量之比称为物体的反射比。物体的吸收比和反射比,也是随物体的温度和入射辐射能的波长而改变的。用 $\alpha(\lambda, T)$ 和 $\rho(\lambda, T)$ 分别表示物体在温度 T 时,对于波长在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 范围内的辐射能的单色吸收比和单色反射比。对于不透明的物体,单色吸收比和单色反射比之和等于 1,即

$$\alpha(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) = 1 \quad (1-10)$$

在任何温度下,若物体能把照射到其上的任何波长的辐射能完全吸收,即 $\alpha(\lambda, T) = 1$,则称该物体为绝对黑体(简称黑体)。

1.2.2 基尔霍夫辐射定律

1869年,基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)从理论上提出了关于辐射传播过程的重要定律:在同样的温度下,任何物体对相同波长的单色辐射出射度与单色吸收比之比值都相等,并等于该温度下黑体对同一波长的单色辐射出射度。即

$$\frac{M_1(\lambda, T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_2(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = L = M_b(\lambda, T) \quad (1-11)$$

式中: $M_b(\lambda, T)$ 为黑体的单色辐射出射度。这一定律指出了物体的辐射出射度和吸收比之间的内在联系,表明:

- (1) 一个好的吸收体也是一个好的辐射体;
- (2) 任何物体的辐射出射度都小于同温度、同波长的黑体的辐射出射度;
- (3) 黑体的辐射出射度摆脱了对具体物体的依赖关系,显然是最简单的,也更便于研究。

这样,只要知道黑体的辐射出射度,便能了解一般物体的辐射性质。因此,黑体辐射理论的探索,是热辐射领域的中心问题。