

面向“十二五”高等学校应用型人才培养规划教材

光信息科学与技术基础 理论及实验

魏计林 孟继轲 李 科 编著

GUANGXINXI KEXUE YU JISHU JICHU
LILUN JI SHIYAN

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

面向“十二五”高等学校应用型
人才培养规划教材

光信息科学与 技术基础理论及实验

魏计林 孟继轲 李 科 编著

中国铁道出版社

2010年·北京

内 容 简 介

本书系统地阐述了光信息科学与技术的基本原理和基础实验。主要包括:光电技术基础理论与实验、CCD 技术原理及相关实验、全息照相技术原理及相关实验、光纤基础理论与实验及光纤传感原理与实验等。

本书为光通信、光学、光电类(包括信息工程、电子科学与技术、光信息科学与技术、测控技术等)专业的本科生教材,也可作为相关专业的研究生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光信息科学与技术基础理论及实验/魏计林,孟继轲,李科编著. —北京:中国铁道出版社,2010.7

面向“十二五”高等学校应用型人才培养规划教材

ISBN 978-7-113-11554-8

I. ①光… II. ①魏… ②孟… ③李… III. ①信息光学—高等学校—教材 IV. ①0438

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 140368 号

书 名:光信息科学与技术基础理论及实验

作 者:魏计林 孟继轲 李科 编著

责任编辑:李丽娟

电话:(010)51873135

教材网址:<http://www.tdjiaocai.com>

编辑助理:张 博

封面设计:郑春鹏

责任校对:孙 玫

责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京市兴顺印刷厂

版 次:2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:12.25 字数:298 千

书 号:ISBN 978-7-113-11554-8

定 价:24.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前言

Preface

光信息科学与技术是现代光学与信息科学相交叉的学科,其内容涉及光信息的采集、传输、存储、处理、显示等各个环节,现已在高新技术领域中得到了广泛的应用。其中的光电技术、全息照相技术与光纤技术是现代分析测量、图像采集与存储、光通信及光传感领域的关键技术,也是本书讨论的主要内容。

目前国内已出版的相关教材很多,但有关基础实验的教材却为数不多。为了使学生能更好地提高动手能力,熟知基础器件并掌握基本理论,作者编写了一套光信息科学与技术专业综合实验讲义,内容包括基础实验部分和专业实验部分,经过多年的试用及修改,逐步趋于完善。本书是在原讲义的基础上重新组织编写的,在基础实验部分增加了对应的理论内容,使得实验和理论紧密结合,突出重点,注重实用,尽量体现出“系统性、科学性、前沿性”,力求将现有的理论和技术从简描述,使学生掌握这些关键技术的基本理论与基础实验,为其今后在光信息科学与技术领域进行研究工作打下坚实的基础。

全书共分6章,第1章是光电技术基础理论部分,包括辐射度学和光度学的基本理论与器件,各类光电探测器的工作原理和特性参数;第2章是光电技术基础实验,内容包括半导体光源特性、光电探测器特性和CCD器件的相关实验;第3章介绍了全息照相技术的原理及相关实验;第4章是光纤的基础理论,内容包括光纤的构成、传输理论及特性、光纤器件等,使学生对光纤有全面的了解;第5章介绍了光纤传感的基本原理,并侧重介绍了光纤光栅传感器的相关知识;第6章是光纤实验技术,主要包括光纤基础实验和光纤传感实验两部分。

本书由魏计林策划、统稿及审核,书中第1、2、3章由孟继轲编写,第4、5、6章由李科编写。

由于作者水平有限,编写过程中难免出现错误与不周之处,望同行专家和广大读者批评指正,作者万分感激。

作 者

2010年2月

④ 目录 Contents

1 光电技术基础理论	1
1.1 光辐射与光源	1
1.2 光电探测器的理论基础	14
1.3 光电子发射探测器	21
1.4 光伏探测器	34
1.5 CCD 光电探测器	46
复习思考题	58
2 光电技术实验	59
2.1 半导体光源 LED 的基本特性	59
2.2 光电探测器基本特性测试	64
2.3 CCD 原理及其应用实验	73
3 全息照相	87
3.1 全息照相的基本原理及分类	87
3.2 全息照相实验	94
复习思考题	107
4 光纤基础知识	108
4.1 光纤概述	108
4.2 光纤传输的基本理论	110
4.3 光纤的特性	120
4.4 光纤器件	135
复习思考题	149

5 光纤传感技术基础	150
5.1 光纤传感基础	150
5.2 光纤光栅基础	152
复习思考题	159
6 光纤实验技术	160
6.1 光纤基础实验	160
6.2 光纤传感实验	171
6.3 常用实验仪器介绍	181
参考文献	190

1 光电技术基础理论

1.1 光辐射与光源

光电技术的理论基础是光的波粒二象性。光是以电磁波形式传播的物质,电磁波谱的频率范围很宽,只有 $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 的光才能被人眼所感知。因此我们把此波段的电磁辐射称为光辐射,把发出光辐射的物体称为光源。通常光辐射可分为热辐射和非热辐射两大类,而光源的种类很多,光电技术中把所用的光源简单划分为自然光源和人造光源。

1.1.1 辐射的基本概念

光学中,用来定量描述辐射能强度的量有两类:一类是物理的,称为辐射度学或辐射度参数,它适用于整个电磁辐射谱区;另一类是生理的,以人眼所见的光辐射对大脑的刺激程度来进行计量,称为光度学或光度参数,它只适用于 $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 的可见光谱区,超过这个谱区便没有意义。辐射度参数和光度参数在概念上不一样,但它们的计量物理量基本相同。

1. 辐射度参数

辐射度参数是计量辐射源在辐射波长范围内发射连续光谱或单色光谱能量的参数。

(1) 辐射能

辐射能 Q_e 是一种以电磁波的形式发射、传播或接收的能量,单位为 J。当辐射能被物质吸收时,可以转换成其他形式的能量,如热能、电能等。当物质吸收了强度调制的辐射能后,可以通过检测热波、声波等形式的能量来研究物质的性质。

(2) 辐射通量

辐射通量 Φ_e 又称为辐射功率 P_e ,是辐射能的时间变化率,即单位时间内发射、传播或接收的辐射能,表示为

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-1)$$

单位为 W。

(3) 辐射出射度

辐射出射度 M_e 是面光源表面任一面元向半球面空间内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元 dA 之比,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-2)$$

单位为 W/m^2 。

(4) 辐射强度

辐射强度定义为点辐射源在给定方向上单位立体角内的辐射能量,即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-3)$$

单位为 W/sr 。在所有方向上辐射强度都相同的点辐射源,在有限立体角内发射的辐射通量为

$$\Phi_e = I_e \Omega \quad (1-4)$$

在空间所有方向($\Omega=4\pi$)上发射的辐射通量为

$$\Phi_e = 4\pi I_e \quad (1-5)$$

实际上,一般辐射源多为各向异性的辐射源,其辐射强度随方向而变化。

(5) 辐射亮度

辐射亮度 L_e 定义为光源表面某一点处的面元在给定方向上的辐射强度与该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积之比,即

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \phi} = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \phi} \quad (1-6)$$

单位为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ 。对于非自发光表面也可以类似定义。 L_e 的数值与扩展辐射源表面的性质有关,并且随方向而变。

(6) 辐射效率

光源所发射的总辐射通量 Φ_e 与外界提供给光源的功率 P 之比称为光源的辐射效率 η_e , 即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} \times 100\% \quad (1-7)$$

辐射效率 η_e 无量纲。

对限定在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐射效率为

$$\eta_{e\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} d\lambda}{P} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 $\Phi_{e\lambda}$ 为光谱辐射通量。

(7) 辐射照度

辐射照度 E_e 是投射在单位面积上的辐射通量,即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-9)$$

单位为 W/m^2 。 E_e 和 M_e 的单位相同,其区别仅在于前者是描述辐射接收面所接收的辐射特性,而后者为描述扩展辐射源向外发射的辐射特性。

(8) 辐照量

辐照量是光电接收器接收辐射能量的重要度量参数。照射到物体表面某一面元的辐射照度 E_e 在时间 t 内的积分称为辐照度 H_e , 即

$$H_e = \int_0^t E_e dt \quad (1-10)$$

单位为 J/m^2 。

2. 光度参数

光度参数和辐射度参数的计量基本相同,辐射度参数也可用来表示光度参数,只是光度参数只在光谱的可见波段才有意义。为避免混淆,在辐射度参数符号上加下标“e”,而在光度参数符号上加下标“v”,光度参数和辐射度参数的对应关系由表 1-1 给出。

表 1-1 辐射度参数和光度参数的比较

辐射度参数				光度参数			
名称	符号	定 义	单位	名称	符号	定 义	单位
辐射能	Q_e		J	光量	Q_v	$Q_v = \Phi_v t$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
辐射通量	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W	光通量	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm
辐射出射度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2	光出射度	M_v	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lm/m^2
辐射强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd
辐射亮度	L_e	$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \phi} = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \phi}$	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$	光亮度	L_v	$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \phi} = \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \phi}$	cd/m^2
辐射照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m^2	曝光量	H_v	$H_v = \int_0^t E_v dt$	$\text{lx} \cdot \text{s}$

光度量中最基本的单位是发光强度,单位为 cd,它是国际单位制中七个基本单位之一。其定义是发出频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ (对应空气中 555 nm 波长)的单色辐射,在给定方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683} \text{ W}/\text{sr}$ 时,在该方向上的发光强度为 1 cd 。

光通量的单位是 lm,它是发光强度为 1 cd 的均匀点光源在 1 sr 内发出的光通量。

光照度的单位是 lx,它相当于 1 lm 的光通量均匀地照在 1 m^2 面积上所产生的光照度。

3. 物体热辐射

物体通常以两种不同的形式辐射能量:

第一种是热辐射。凡高于绝对零度的物体都具有辐射的能力。温度低的物体发射红外光,温度升高到 500°C 时开始发射一部分暗红色光,再升高到 1500°C 时开始发白光。物体靠加热保持一定温度使内能不变而持续辐射的辐射形式称为物体热辐射或温度辐射。凡能发射连续光谱,且辐射是温度的函数的物体称为热辐射体,如一切动植物、太阳、钨丝白炽灯。

第二种是发光。物体不是靠加热使辐射维持下去,而是靠外能激发辐射,这种辐射称为发光。发光光谱是非连续光谱,且不是温度的函数。靠外能激发发光的方式有电致发光(气体放电产生的辉光)、光致发光(日光灯发射的荧光)、化学发光(磷在空气中缓慢氧化发光)、热发光(火焰中的钠或钠盐发射的黄光)。发光是非平衡辐射过程,发光光谱主要是线光谱或带光谱。

下面讨论物体热辐射的基本定律。

(1) 普朗克辐射定律

能完全吸收从任何方向入射的各种波长的辐射,而且在某一温度下、每一方向上所有波长下都有最大辐射功率的物体称为黑体。黑体是余弦辐射体,其光谱辐出度 $M_{\text{es}\lambda}$ 由普朗克公式表示为

$$M_{\text{es}\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-11)$$

式中 k ——玻尔兹曼常数;

h ——普朗克常数；

T ——绝对温度；

c ——真空中光速。

式(1-11)表明,黑体表面 A 向半球面空间发射波长 λ 的光谱辐通量除以面积 A 的商 $M_{\text{es}\lambda}$ 是黑体温度 T 和波长 λ 的函数,这就是普朗克辐射定律。

(2) 斯特藩—玻尔兹曼定律

将式(1-11)对波长 λ 求积分,得到黑体面 A 发射的总辐出度为

$$M_{\text{es}} = \int_0^{\infty} M_{\text{es}\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-12)$$

式中 σ 是斯特藩—玻尔兹曼常数,它由下式决定

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)] \quad (1-13)$$

由式(1-12)可知, M_{es} 与 T 的 4 次方成正比,这就是黑体辐射的斯尼藩—玻尔兹曼定律。

(3) 维恩位移定律

将普朗克公式(1-11)对波长 λ 求微分后令其等于零,则得到最大光谱辐射出射度 $M_{\text{es}\lambda_{\text{max}}}$ 所对应的波长 λ_{max} 与绝对温度 T 的关系为

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} \quad (\mu\text{m}) \quad (1-14)$$

可见,最大光谱辐射出射度对应的波长与绝对温度的乘积是常数。当温度升高时,最大光谱辐射出射度对应的波长向短波方向偏移,这就是维恩位移定律。

将式(1-14)代入式(1-11),得到黑体最大光谱辐出度为

$$M_{\text{es}\lambda} = 1.309 T^5 \times 10^{-15} \quad [\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}^5)] \quad (1-15)$$

以上三个定律统称为黑体辐射定律。

1.1.2 光源的基本特性参数和光源的选择

光源作为光能量的供给元件,是光电技术中的关键。选好光源是光电技术应用的重要环节,同时用好光源器件,对光源性能参数的理解和掌握也是非常必要的。因此,了解光源的基本特性参数,按实际工作需要选择光源,是我们设计光电系统和解决具体光电检测问题的关键环节之一。

1. 光源的基本特性参数

(1) 辐射效率和发光效率

在给定 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内,某一光源发出的辐射通量与产生这些辐射通量所需的电功率之比,称为该光源在规定光谱范围内的辐射效率,即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P} \quad (1-16)$$

式中 $\Phi_e(\lambda)$ ——光源的光谱辐射通量；

P ——电功率；

η_e ——光源辐射效率。

如果光电测量系统的光谱范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 那么应尽可能选用 η_e 较高的光源。

对于可见光范围,某一光源的发光效率 η_v 为

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = K_m \frac{\int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P} \quad (1-17)$$

式中 $\Phi_e(\lambda)$ ——可见光光谱通量;

$V(\lambda)$ ——明视觉光谱光视效率;

K_m ——明视觉最大光谱光视效能。

η_v 的单位为 lm/W(流明每瓦)。在照明领域或光度测量系统中,一般应选用 η_v 较高的光源。表 1-2 中所列的为一些常用光源的发光效率。

表 1-2 常用光源的发光功率

光源种类	发光效率(lm/W)	光源种类	发光效率(lm/W)
普通钨丝灯	8~18	高压汞灯	30~40
卤钨灯	14~30	高压钠灯	90~100
普通荧光灯	35~60	球形氙灯	30~40
三基色荧光灯	55~90	金属卤化物灯	60~80

(2) 光谱功率分布

自然光源和人造光源大多是由单色光组成的复色光。光源在不同光谱上辐射出的光谱功率不同,常用光谱功率分布来描述。若令其最大值为 1,那么经过归一化后的光谱功率分布称为相对光谱功率分布。

光源的光谱功率分布通常可分成四种情况,如图 1-1 所示。图(a)称为线状光谱,由若干条明显分隔的细线组成,如低压汞灯;图(b)称为带状光谱,它由一些分开的谱带组成,每一谱带中又包含许多细谱线,如高压汞灯、高压钠灯就属于这种分布;图(c)为连续光谱,所有热辐射光源的光谱都是连续光谱;图(d)是混合光谱,它由连续光谱与线状、带状光谱混合而成,一般荧光灯的光谱就属于这种分布。

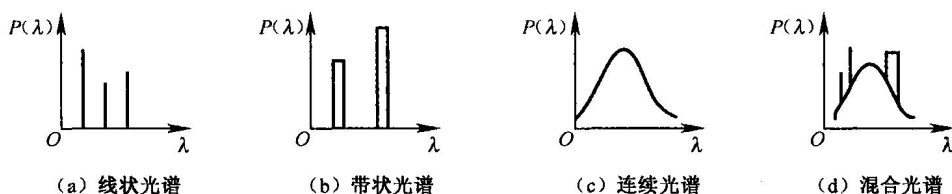


图 1-1 光谱功率分布

在选择光源时,它的光谱功率分布应由测量对象的要求来决定。在目视光学系统中,一般采用可见区光谱辐射比较丰富的光源。

(3) 空间光强分布

对于各向异性光源,其发光强度在空间各方向上是不同的。若在空间某一截面上,自原点向各径向取矢量,矢量的长度与该方向的发光强度成正比。将各矢量的端点连起来,就得到光源在该截面上的发光强度曲线,即配光曲线。在光学仪器中,为了提高光的利用率,一般选择发光强度高的方向作为照明方向。为了进一步利用背面方向的光辐射,还可以在光源的背面安装反光罩,反光罩的焦点位于光源的发光中心上。

(4) 光源的色温

黑体的温度决定了它的光辐射特性。对非黑体辐射,它的某些特性常可用黑体辐射特性来近似表示。对于一般光源,经常用分布温度、色温或相关色温表示。

①分布温度:辐射源在某一波长范围内辐射的相对光谱功率分布,与黑体在某一温度下辐射的相对光谱功率分布一致,那么该温度就称为该辐射源的分布温度。这种辐射体的光谱辐射亮度可表示为

$$L_e(\lambda, T_v) = \epsilon \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_v} - 1} \quad (1-18)$$

式中 T_v ——分布温度;

ϵ ——发射率,是一与波长无关的常数。

这类辐射体又称为灰体。

②色温:辐射源发射光的颜色与黑体在某一温度下辐射光的颜色相同,则该温度称为该辐射源的色温。由于一种颜色可以由多种光谱分布产生,所以色温相同的光源,它们的相对光谱功率分布不一定相同。

③相关色温:对于一般光源,它的颜色与任何温度下的黑体辐射的颜色都不相同,这时的光源用相关色温表示。在均匀色度图中,如果光源的色坐标点与某一温度下的黑体辐射的色坐标点最接近,则该黑体的温度称为该光源的相关色温。

(5) 光源的颜色

光源的颜色包含了两方面的含义,即色表和显色性。用眼睛直接观察光源时所看到的颜色称为光源的色表。例如高压钠灯的色表呈黄色,荧光灯的色表呈白色。当用这种光源照射物体时,物体呈现的颜色与该物体在完全辐射体照射下所呈现的颜色的一致性,称为该光源的显色性。国际照明委员会(CIE)规定了14种特殊物体作为检验光源显色性的“试验色”。白炽灯、卤钨灯、镝灯等几种光源的显色性较好,适用于辨色要求较高的场合,如彩色电影、彩色电视的拍摄和放映、染料、彩色印刷等行业。高压汞灯、高压钠灯等光源的显色性差一些,一般用于道路、隧道、码头等辨色要求较低的场合。

2. 光源选择的基本要求

前面谈到光源的基本特性参数时,介绍了某些方面光源的选择情况。在具体的光电检测系统中,根据实际工作的要求选择光源,这些要求主要包括以下几个方面。

(1) 对光源发光光谱特性的要求

除去那些直接检测规定光源或辐射源特性的光电检测系统外,要求光源特性必须满足检测的需要。其中重要的要求之一,就是光源发光的光谱特性必须满足检测系统的需要。按照检测任务的不同,要求的光谱范围也不同,如可见光区、紫外光区或红外光区等。有时要求连续光谱,有时又要求几个特定的光谱段。系统对光谱范围的要求都应在选择光源时给以满足。

为增大光电检测系统的信号和信噪比,这里引入光源和光电探测器之间光谱匹配系数的概念,以此描述两光谱特性间的重合程度或一致性。光谱匹配系数 α 定义为

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\int_0^\infty W_\lambda \cdot S_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty W_\lambda d\lambda} \quad (1-19)$$

式中 W_λ ——在波长 λ 时光源光辐射通量的相对值;

S_λ ——在波长 λ 时光电探测器灵敏度的相对值。

A_1 和 A_2 的物理意义如图 1-2 所示,它们分别表示 $W_\lambda \cdot S_\lambda$ 和 W_λ 两曲线与横轴所围成的面积。由此可见,匹配系数 α 是光源与探测器配合工作时产生的光信号与光源总通量的比值。实际选择时,应综合兼顾二者的特性,使匹配系数尽可能大些。

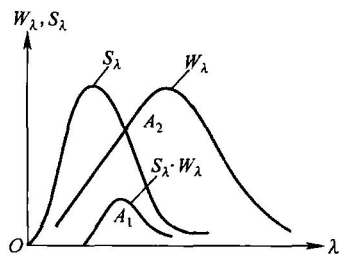


图 1-2 光谱匹配关系

(2) 对光源发光强度的要求

为确保光电检测系统的正常工作,通常对系统所采用的光源或辐射源的强度有一定的要求。光源强度过低,系统获得信号过小,以至无法正常检测;光源强度过高,又会导致系统工作的非线性,有时可能损坏系统、待测物或光电探测器等,同时也导致不必要的能源消耗而造成浪费。因此在系统设计时,必须对探测器所需获得的最大、最小光通量进行正确估计,并按估计值来选择光源。

(3) 对光源稳定性的要求

不同的光电检测系统对光源的稳定性有不同的要求。通常依据不同的检测量来确定,例如:脉冲量的检测,包括脉冲数、脉冲频率、脉冲持续时间等,对光源的稳定性要求可稍低些,只要确保不因光源波动产生伪脉冲和漏脉冲即可。对调制光相位的检测,稳定性要求与上述要求相似。又如光量或辐射量中强度、亮度、照度或通量等的检测系统,对光源的稳定性就有较严格的要求。关键是满足使用中的精度要求,同时也应考虑光源的造价,过分的要求会使设备昂贵,而对检测并无好处。

稳定光源发光的方法很多,一般可采用稳压电源供电。当要求较高时,可采用稳流电源供电,所用光源应预先进行老化处理。当有更高要求时,可对发出光进行采样,然后反馈控制光源的输出。计量用标准光源通常采用高精度仪器控制下的稳流源供电。

(4) 对光源其他方面的要求

用于光电检测系统中的光源除上述基本要求外,还有一些具体要求,如灯丝的结构和形状,发光面积的大小和构成,灯泡玻壳的形状和均匀性以及光源发光率和空间分布等。这些方面均应按检测系统的要求给以满足。

上述光源的基本参数描述和选择光源的基本要求主要是针对人造光源组成的光电检测系统而言的。对于自然光源,如太阳、月亮、地球、星体、天空和地球上各种各样的物体及组成物质的基本粒子等,这些光源的辐射通常很不稳定,而且无法控制,人们通常根据实际需求用光电探测系统对自然光源的特性进行直接测量以获取光源的辐射信息,再根据获取的光源辐射信息进行科学研究,以达到服务于人类的目的。

1.1.3 半导体光源

半导体光源是光电检测系统中比较重要的光源,尤其在光纤技术中被广泛应用。它具有体积小、输出功率大、寿命长、可靠性高、坚固耐用等特点。

1. 半导体光源 LED/LD 的发光机理

半导体光源包括半导体发光二极管和半导体激光器,主要由 P-N 结构成,因此其工作原理基本相同。

(1) P-N 结的发光特性

半导体光源的发光机理从半导体 P-N 结的光电特性入手。为了更好地进行说明,我们引入了一些必要的半导体物理中的概念。

①共有化运动

众所周知,半导体单晶材料中的原子同其他晶体材料一样,是按一定规律紧密排列的。在各个原子之间之所以保持一定的距离,是因为在各原子之间存在着相互作用力,这些结合力就是共价键。由于半导体单晶体中相邻原子靠得很近,因而组成的单晶材料原子中的电子不仅受到自身原子的作用,还要受到相邻原子的作用。相邻原子的电子轨道(量子态)将发生一定程度的相互交叠,通过交叠的轨道,电子可以从一个原子转移到另一个原子上去,电子的这种运动称为共有化运动。

②价带、导带、带隙

电子在晶体中的共有化运动可以有各种速度,因此对应于某个原子能级,晶体中量子态的能级不是单一的,而是分裂为彼此能量很接近的 N 个能级(对应为晶体原子中所包含的原子数)。由于材料中原子的数目 N 很大,而能级之间的间隔又很小,这样一组密集的能级称为能带,或称为许可带。

一般原子中内层电子的能级都是被电子填满的,它们的共有化运动比较弱,对应的能带也比较窄。当原子组成晶体后,这些内层能级相对应的能带,也是被电子填满的,这样的能带称为满带。最外层的价电子,因受到自身原子的束缚作用比较弱,而受到相邻原子的作用相对较强。因此它们的共有化运动比较强,对应的能带也较宽。价电子填充的能带称为价带,价带以上的能带基本上是空的,空的能带称为空带,空带中最低的带称为导带,价带与导带之间的带隙称为禁带,禁带宽度代表一个能带到另一个能带的能量差。

在温度低至绝对零度的情况下,晶体中的电子均在价带之中,而导带是完全空着的。由于满带已经被电子填满,根据泡利原理,它们是不能导电的。如果价带中的电子受热或光的激发,就会跃迁到上面的导带中去,从而产生电流,晶体材料就可以导电了。我们把导带底的能量记作 E_c ,把价带顶的能量记作 E_v 。在 E_c 和 E_v 之间的禁带是不存在电子的。我们把 E_c 与 E_v 之差记作 E_g ,称为禁带宽度,也就是前述的带隙。如果 E_g 较大,则需要较大的激励能量把价带中的电子激发到导带中去。绝缘体材料的 E_g 很大,价带中的电子很难跃迁到导带中去,因而它表现出良好的绝缘性能;导体材料的 E_g 很小,因此它表现出良好的导电性能;半导体材料的 E_g 介于导体和绝缘体之间,因而它的导电能力也介于两者之间。当价带中电子被激发到导带后,在价带中就留下电子的空位。在电场的作用下,价带中邻近的电子也会将这个空位填充,而空出自己的位置,这就好像空位自身在电场的作用下产生移动一样。空位的作用好像一个带正电的粒子,在半导体物理学中,把它称为空穴。价带中的电子可以吸收外界能量而跃迁到导带中去,在价带中形成空穴。同样,导带中的电子也可以跃迁到价带中,在价带将空穴填补,这一过程称为复合。

(2)P型半导体、N型半导体和P-N结

在实际的半导体单晶材料中,往往存在着与组成晶体的基质原子不同的其他元素的原子——杂质原子,以及在晶体形成过程中出现的各种缺陷。材料提纯的目的,是为了去除有害杂质,消除或减少某些缺陷。但是这些杂质原子对半导体起着决定性的作用,半导体的性质可以通过掺入微量的杂质(简称掺杂)来控制。我们知道,按照掺杂的不同,可以得到电子型半导体和空穴型半导体材料。

所谓本征半导体,是指含杂质和缺陷极少的纯净、完整的半导体,其特点是在半导体材料中,导带电子的数目和价带空穴的数目相等,如图 1-3(a)所示。通常把本征半导体称为I型半导体。

所谓电子型半导体(N型半导体),就是通过掺杂使导带的电子数目比价带空穴的数目大得多的半导体,如图 1-3(b)所示。

所谓空穴型半导体(P型半导体),就是通过掺杂使价带空穴的数目比导带电子数目大得多的半导体,如图1-3(c)所示。

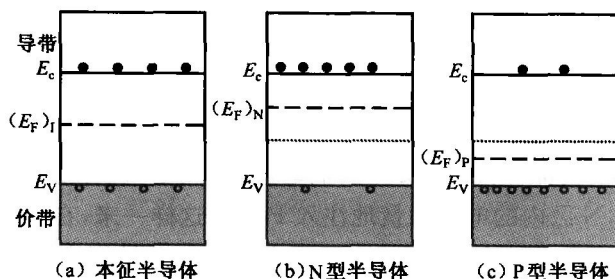


图1-3 半导体能带图

半导体物理学的理论分析和实验结果表明,半导体的物理性质在很大程度上取决于所含杂质的种类和数量。更重要的是,把不同类型的半导体结合起来,就可以制作成各种各样的半导体器件。

P型半导体与N型半导体结合的界面称为P-N结,是许多半导体器件(包括半导体激光器、发光二极管)的组成核心。前面提到,在P型半导体内有多余空穴,在N型半导体内有多余电子,当这两种半导体结合在一起时,P区内的空穴向N区扩散,在靠近界面的地方留下了带负电的离子;N区内的电子向P区扩散,在靠近界面的地方留下了带正电的离子。这样一来,在界面两侧就形成了带相反电荷的区域,称为空间电荷区。由这些相反电荷形成一个自建电场,其方向是由N区指向P区,如图1-4所示。由于自建电场的存在,在界面的两侧产生了一个电势差 V_D ,这个电势差阻碍空穴和电子的进一步扩散,最终达到平衡状态,如图1-5所示,因此我们把 V_D 称为阻碍空穴和电子扩散的势垒。理论分析表明,可以利用一个能级 E_F (称为费米能级)来描述电子和空穴分布的规律。对于 E_F 以下的能级,电子占据的可能性大于1/2,空穴占据的可能性小于1/2;对于 E_F 以上的能级,电子占据的可能性小于1/2,空穴占据的可能性大于1/2。在平衡状态下,P区和N区有统一的费米能级。对于P区,因为晶体内有許多空穴,所以价带顶在费米能级附近;对于N区,因为晶体内有許多电子,所以导带底在费米能级附近。

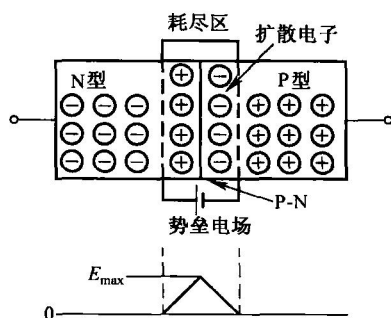


图1-4 P-N结势垒电场的形成

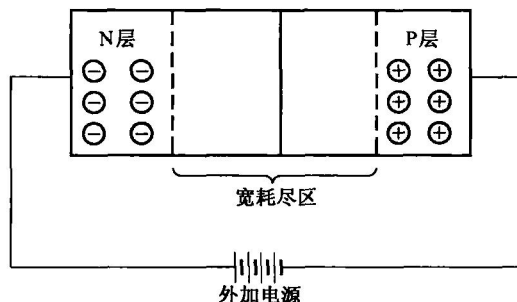


图1-5 P-N结处于平衡状态

(3) 发光二极管的发光机理

半导体发光二极管是固体发光光源,其发光机理源于半导体 P-N 结的正向电光特性。当把正向电压 V 加在 P-N 结上时,抵消了一部分势垒电压,势垒高度只剩下 $(V_D - V)$ 的数值。外加的正向电压破坏了原来的平衡状态,P 区和 N 区的费米能级分离开来。这时,可以用两个所谓的准费米能级来描述电子和空穴分布的规律。把 N 区的准费米能级记作 $(E_F)_N$,对于 $(E_F)_N$ 以下的能级,电子占据的可能性大于 $1/2$ 。把 P 区的准费米能级记作 $(E_F)_P$,对于 $(E_F)_P$ 以上的能级,空穴占据的可能性大于 $1/2$ 。当把足够大的正向电压加在 P-N 结上时,P 区内的空穴大量地注入 N 区,N 区内的电子大量地注入 P 区。这样一来,在 P 区和 N 区靠近界面的地方,电子和空穴产生了复合。在复合时,电子把大约等于禁带宽度 E_g 的能量释放出来。在辐射跃迁的情况下,能量将转变为一个频率为 $\nu = E_g/h$ 的光子,其中 h 是普朗克常数。

半导体 LED 光源的发光过程如图 1-6 所示。LED 是一种直接注入电流的光发射器件,当 LED 的 P-N 结加上正向偏压,注入的大量电子、空穴产生复合,分别自发发射一系列频率 $\nu = E_g/h$ 的光波。这些光波之间没有固定的相位关系,可以有不同的偏振方向,并且每个粒子所发射的光沿所有可能的方向传播。这就是通常所说的自发辐射跃迁,其发射波长 λ 可用下式表示:

$$\lambda = \frac{1.2396}{E_g} \quad (1-20)$$

不同的半导体单晶材料的 E_g 值不同,发光波长也不同。因为电子和空穴都是处于能带中,不同的电子和空穴的能级有所差别,但其频率接近于 ν 。GaAs 的 $E_g = 1.435 \text{ eV}$,故可用它来制作 $0.85 \mu\text{m}$ 波长的红外 LED。InGaAsP 的 $E_g = 0.75 \sim 1.35 \text{ eV}$,对应的发射波长为 $1.65 \sim 0.92 \mu\text{m}$ 。

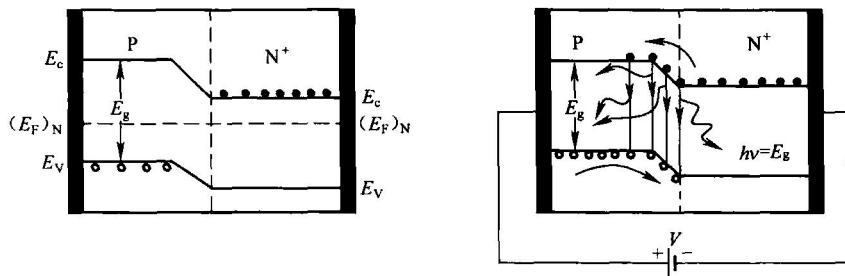


图 1-6 半导体 LED 光源的发光过程

(4) 半导体激光器工作原理

对于半导体激光器(LD),存在光反馈和受激辐射的过程。半导体材料的光子吸收、自发发射和受激发射一般可以用如图 1-7 所示的两能级图来表示。图中 E_1 表示基态能量, E_2 表示激发态能量。按照普朗克定律,这两个能态之间的辐射跃迁涉及发射或吸收一个能量 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子。通常状况下电子处于基态 E_1 ;当能量为 $h\nu$ 的光子射入时,能态 E_1 中的某个电子能够吸收光子能量,被激发到能态 E_2 ,如图 1-7(a)所示。由于 E_2 能态是一种不稳定的状态。电子很快就返回到基态,从而发射出一个能量为 $h\nu$ 的光子。这个过程是在无外部激励的情况下发生的,因此称为自发辐射,如图 1-7(b)所示。这种发射是各向同性的,并且其相位、偏振态是随机的,表现为非相干光特性。另外一种情况是,暂时停留在 E_2 上的电子,由于

外部激励向下跃迁到基态,如图1-7(c)所示。当有一个能量为 $h\nu$ 的光子入射到系统时,电子会立即受到激励而往下跃迁到基态,同时释放一个与入射光子同相位、同偏振态、能量同为 $h\nu$ 的光子,这种情况称为受激辐射。在热平衡状态下,受到激发的电子的密度非常小,入射到系统的大多数光子都会被吸收,受激辐射可以忽略,材料对光能量来说是消耗性的。仅当激发态中的电子数大于基态中的电子数时,受激辐射才会超过吸收,这种状态在激光物理学中称为粒子数反转。粒子数反转状态并不是一种平衡状态,必须利用各种“泵浦”方法将材料中的电子抽运到这种状态。

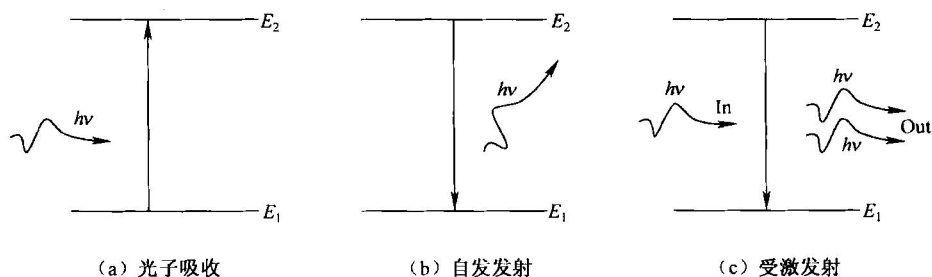


图1-7 光子吸收的三种形式

对于图1-4所示的P-N结,正向通电注入电子填满那些较低能态便能实现粒子数反转,该材料从原来对光具有吸收性进而变为对光具有放大作用。半导体激光器中,在电泵浦作用下能够对光有放大作用的区域称为有源区,其实就在图1-5所示的P-N结附近。如图1-8所示,处于粒子数反转状态的有源区对某波长光有放大作用。设有微弱的光由左向右传输,在光放大作用下逐渐增强,到达右镜面立刻反射向左传输又再逐渐增强,到达左镜面反射而形成正反馈过程。显然,只有在传播方向与镜面垂直的一部分光才能够在镜面的帮助下实现放大反馈。当这个放大反馈环路的光增益足以抵消一切光损耗时,就在谐振腔内建立了等相面与反射镜面平行的驻波,即产生激光振荡。对于图1-4所示的P-N结,当未注入电流时,其材料对光呈现吸收性;当注入电流较小时,P-N结开始发光;电流继续增大,光放大增强,放大一反馈环路的增益一旦超过损耗,就产生振荡,半导体激光器就由自发发射状态转入激射状态,产生振荡时的注入电流称为阈值电流。

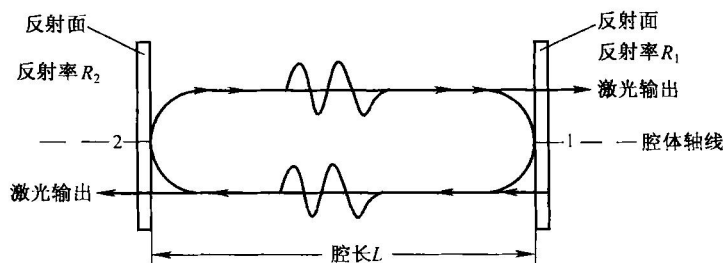


图1-8 平面反射腔

2. 半导体光源 LED/LD 的性能参数

半导体光源已在光电技术中广泛采用,在了解器件的结构与工作原理的基础上应该进一步弄清器件的特性,以便尽量发挥器件的效能并避免损坏器件。对于半导体光源,比较重要的性能参数主要包括:峰值波长 λ_p 、光谱半宽 $\Delta\lambda$ 、阈值电流 I_{th} 、输出功率 P_0 、微分转换效率 η 、脉