

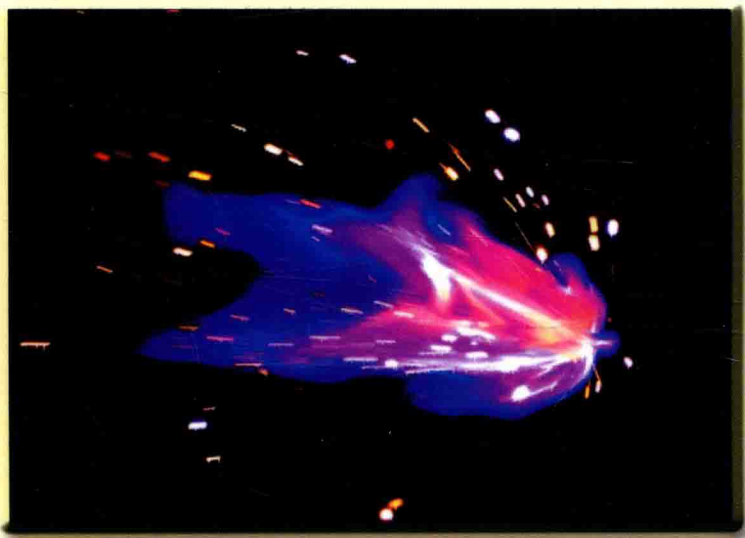


职业技术教育“十二五”课程改革规划教材
光电技术（信息）类

光 电探测技术与应用

GUANG DIAN TANCE JISHU
YU YINGYONG

主 编 黄 焰 肖 彬
孙冬丽
主 审 杨 晟



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



职业技术教育“十二五”课程改革规划教材
光电技术（信息）类

光 电探测技术与应用

GUANG DIAN TANCE JISHU
YU YINGYONG

主 编 黄 焰 肖 彬 孙冬丽
主 审 杨 晟



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本教材选取各种光电探测器所组成的典型电路作为教材的实践项目,通过介绍电路原理,给学生介绍各种光电效应,光电探测器的特性参数、使用方法及检测方法,使学生通过制作电路,掌握各种典型光电器件的使用方法,并能够在给出的典型电路的基础上做出适当的扩展,通过典型电路的改装实现更多的功能,完成对其他类型物理量的检测方法,真正学会使用光电探测器。

本教材适合高职高专类院校的光电子技术专业、测控技术专业的学生使用。设计配套的光电系统平台与教材相辅相成,可以提高学生的动手实践能力,并且可锻炼其自己动手搭建完整电路、解决电路问题的能力。另外,该光电实验平台也可用于光电子技术专业的学生进行专业实训以及完成毕业设计。

图书在版编目(CIP)数据

光电探测技术与应用/黄焰,肖彬,孙冬丽主编. —武汉:华中科技大学出版社,2016.3
职业技术教育“十二五”课程改革规划教材. 光电技术(信息)类
ISBN 978-7-5680-1035-1

I. ①光… II. ①黄… ②肖… ③孙… III. ①光电探测-高等职业教育-教材 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 157644 号

光电探测技术与应用

Guangdian Tance Jishu yu Yingyong

黄 焰 肖 彬 孙冬丽 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:聂莹

封面设计:秦茹

责任校对:张琳

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12.5

字 数:298千字

版 次:2016年3月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

光电探测技术是光电子专业学生的一门专业基础课,旨在通过介绍各种光电器件的工作原理和使用方法,让学生能够动手实践或设计一系列光电探测、光机控制的应用型电路。高职高专类学校的光电子技术专业学生的职业选择,主要面向与光电器件及系统的相关生产岗位,更需强调对光电探测器件的检测、使用,以及对所构建的光电探测系统的调试及使用,要求学生能够熟练地操作、使用各种类型的光电探测器件。因此,对于高职高专学生的教学不能够简单套用本科院校的模式和使用本科教材,而应该使用实践比例更大、教材内容基于生产实践过程的适合高职类学生就业需要的教材。

笔者在教学实践过程中,曾尝试以典型的光电探测应用实例为引导,减少原理性教学,将实践过程中遇到的问题作为引导,指导学生解决操作中遇到的问题,获得了良好的效果。编写本教材的过程中,笔者以实用性强,实践可行的应用电路作为项目式教学的引导,并与武汉光驰科技有限公司合作,设计出了一套光电技术创新实训平台,让学生能学以致用,在实验系统中验证器件的功能及调试参数。同时还能从该平台上扩展、开发高层次的新型电路,让学生充分掌握,活学活用。

本教材由武汉软件工程职业学院“光电探测与处理技术”课程团队组织编写,课程负责人黄焰对本书提出了总体设计,并编写了项目二、项目五、项目七、项目八、项目十;肖彬编写了项目四、项目六、项目九;孙冬丽编写了项目一、项目三。全书由黄焰统稿,杨晟主审并为本书编写提出了很多宝贵意见。本书在编写过程中,得到了武汉光驰科技有限公司李晓红经理的大力支持和帮助,谨此致谢!在编写的过程中,编者还参阅了许多同行专家的著作文献,在此一并真诚感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳求广大读者批评指正。

编 者

目 录

项目 1 光电探测系统的组成及特性参数	(1)
任务 1 典型的光电探测系统组成	(1)
任务 2 辐射度量与光度量	(4)
任务 3 光电探测器的特性参数与噪声	(7)
任务 4 半导体基础知识	(10)
任务 5 光电探测器中常见光源	(14)
知识拓展	(18)
思考与练习	(19)
项目 2 光敏电阻控制的夜明灯电路	(20)
任务 1 光敏电阻控制暗光亮灯电路	(20)
任务 2 声光控节能夜明灯开关电路	(21)
任务 3 光敏电阻的工作原理与检测方法	(22)
任务 4 光敏电阻的特性参数	(25)
任务 5 光敏电阻的其他控制电路	(30)
知识拓展	(31)
思考与练习	(34)
项目 3 光电池组成的照度计电路	(35)
任务 1 光电池基本电源电路	(35)
任务 2 光电池组成的光控开关电路	(35)
任务 3 光电池简易照度计电路	(36)
任务 4 光电池的工作原理	(37)
任务 5 光电池的特性参数	(39)
任务 6 光电池的其他控制电路	(42)
知识拓展	(47)
思考与练习	(50)
项目 4 光电二极管组成的光驱动直流电动机电路	(51)
任务 1 光驱动直流电动机电路的组成与原理分析	(51)
任务 2 光电二极管控制继电器电路的组成与原理分析	(52)
任务 3 光电二极管的工作原理与检测方法	(53)
任务 4 光电三极管的工作原理及检测方法	(57)
任务 5 光电三极管与光电二极管的特性比较	(59)

任务 6 光电二极管与光电三极管的其他应用电路	(62)
思考与练习	(64)
项目 5 一维 PSD 测量入射光点位置电路	(65)
任务 1 一维 PSD 测量入射光点位置电路	(65)
任务 2 认识 PSD	(67)
任务 3 雪崩光电二极管(APD)	(70)
任务 4 象限探测器	(73)
任务 5 光电耦合器件测量电动机转速电路	(78)
任务 6 光电耦合器的工作原理及检测方法	(80)
任务 7 光电耦合器件的特性参数	(83)
思考与练习	(86)
项目 6 光电倍增管(PMT)光谱辐射检测电路	(87)
任务 1 光电倍增管(PMT)光谱辐射检测电路的组成与原理分析	(87)
任务 2 光电管与光电倍增管	(89)
任务 3 光电倍增管供电与信号输出电路	(97)
任务 4 光电倍增管的应用	(101)
思考与练习	(103)
项目 7 线阵 CCD 测量物体尺寸实验	(104)
任务 1 线阵 CCD 测量物体尺寸实验	(104)
任务 2 CCD 的结构与工作原理	(111)
任务 3 CCD 的分类	(117)
任务 4 CCD 的特性参数	(120)
任务 5 CCD 的性能与应用	(122)
任务 6 CMOS 图像传感器	(124)
思考与练习	(130)
项目 8 热释电器件组成的红外报警电路	(132)
任务 1 热释电器件简单人体检测电路	(132)
任务 2 多级放大的热释电人体检测开关电路	(133)
任务 3 热释电红外防盗报警器	(133)
任务 4 用芯片 BISS0001 驱动热释电传感器的电路	(135)
任务 5 热释电传感器	(137)
任务 6 其他红外探测器	(141)
任务 7 红外探测器的应用	(144)
思考与练习	(149)
项目 9 光纤传感器测量物体位移电路	(150)
任务 1 光纤传感器测量物体位移电路组成与原理分析	(150)

任务 2 光纤传感器的工作原理	(153)
任务 3 光纤传感器烟雾报警应用	(165)
任务 4 光纤传感器微弯称重应用	(168)
思考与练习	(169)
项目 10 光电探测器件特性测试实验	(170)
任务 1 光敏电阻特性实验	(170)
任务 2 光敏二极管特性实验	(173)
任务 3 光敏三极管特性实验	(175)
任务 4 光电池特性实验	(178)
任务 5 光电耦合式传感器——转速测量	(182)
任务 6 PSD 光电位置传感器——位移测量	(183)
任务 7 热释电红外传感器特性实验——红外探测	(184)
任务 8 光纤传感器特性测试	(185)
任务 9 CCD 电荷耦合传感器的应用——莫尔条纹计数	(188)
任务 10 CCD 电荷耦合传感器——测径实验	(189)
参考文献	(190)

项目 1

光电探测系统的组成及特性参数

项目名称:光电探测系统的组成及特性参数。

项目分析:掌握光电探测系统的组成结构及半导体的基本知识,了解其特性参数。

相关知识:系统结构组成、特性参数分析及半导体的基本知识。

任务 1 典型的光电探测系统组成

1. 光电探测系统组成

光电探测系统基本组成部分可分为光源、被检测对象及光信号的形成、光信号的匹配处理、光电转换、电信号的放大与处理、微机、控制系统和显示等部分,如图 1-1 所示。按不同的需要,光电探测系统可以根据实际情况增加或删减某些环节,图 1-1 只表征基本原理,而实际系统的形式是多样的、复杂的。

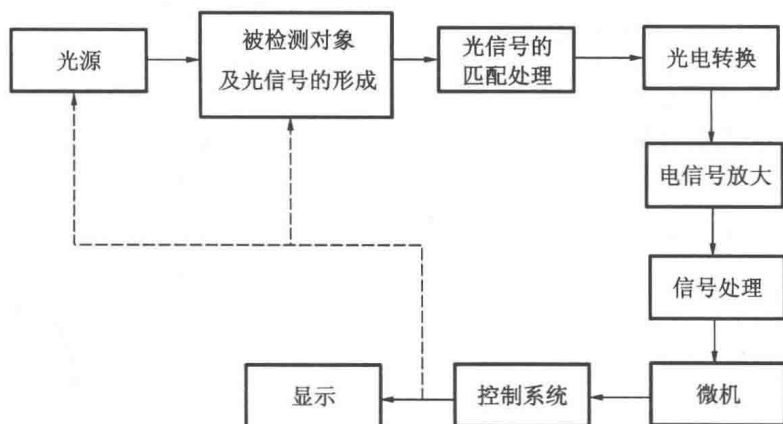


图 1-1 光电探测系统框图

下面对框图中主要部分进行简单说明。

1) 光源

光源是光电探测系统中必不可少的部分。在许多系统中按需要选择一定辐射功率、一

定光谱范围以及一定发光空间分布的光源,以此发出的光作为携带待测信息的物质,有时光源本身就是待测对象。光源既可是人工光源,也可是自然光源。

2) 被检测对象及光信号的形成

被检测对象指待测物理量。光源所发出的光束在通过该环节时,利用各种光学效应,如反射、吸收、折射、干涉、衍射、偏振等,携带上被检测对象的特征信息,形成待检测的光信号。

3) 光信号的匹配处理

该环节按实际要求可设置在被检测对象前面,也可设在其后面。在检测中,表征待测量的光信号可以是光强度的变化、光谱的变化、偏振性的变化、各种干涉和衍射条纹的变化以及脉宽或脉冲数,等等。要使光源发出的光或产生携带各种待测信号的光与光电探测器等环节实现合理的甚至是良好的匹配,经常需要对光信号进行必要的处理。

4) 光电转换

该环节是实现光电探测的核心部分。其主要作用是将光信号转换为电信号,以便利于采用电子技术进行信号的放大、处理、测量和控制等。完成这一转换主要是依靠各种类型的光电和热电探测器。

5) 电信号的放大与处理

该部分主要是由各种电子线路所组成。为实现各种检测目的,可按需要采用不同功能的电路来完成,对具体系统进行具体分析。应当指出,虽然电路处理方法多种多样,但必须注意整个系统的一致性,也就是说,电路处理与光信号获得、光信号处理以及光电转换均应统一考虑系统安排。

6) 微机及控制系统

通常把显示系统也包含在该环节当中。许多光电探测系统只要求给出待测量的具体值,即将处理好的待测量电信号直接经显示系统显示出来。

若需要利用检测量进行反馈,就要附加控制部分。如果控制关系比较复杂,则可采用微机系统给以分析、计算或判断等处理后,再由控制部分执行。目前随着单片机、单板机及小型微机的迅速发展,对复杂的光电探测系统都应考虑尽可能实现智能化的检测。

2. 典型光电探测系统举例

1) 红外防盗报警系统

图 1-2 所示的为红外防盗报警系统框图,利用行动中人体自身的红外辐射进行检测报警,其主要组成有菲涅尔透镜、光电变换及电路处理装置。人体红外辐射经红外菲涅尔物镜 L 汇聚到光电探测器 GD 上,随着人的运动,转换为交变的电信号输出。电信号经放大、鉴别后,控制管灯、警钟等装置进行报警。同时也可以利用报警信号进行其他后处理的控制,如关门、摄像、开高压等。

2) 光电计数器系统

对需要进行连续计数的场合,均可采用光电计数器系统来完成,如统计进门参加会议的人数、统计传送带上产品的数量、街口汽车的流量等。图 1-3 所示的为光电计数器系统在传送带上对产品进行计数的装置的原理图,其组成有光源、光电变换器件、电路处理机控制装置。将光源 GY 和光电探测器 GD 相对地安装在传送带的两侧,光源发出的光直接照射到光

电探测器上。当有产品通过时,将上述光路切断,对应光电探测器上产生暗脉冲,该脉冲信号经放大和整形后,由计数器计数并通过显示器输出。如需进行定量计数,每100件打一包,则可将计数信号通过译码器产生规定量的信号,用该信号去控制打包和换空包的动作。

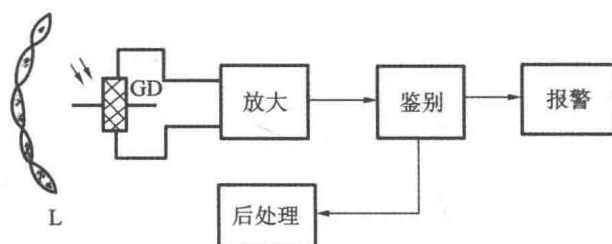


图 1-2 红外防盗报警系统框图

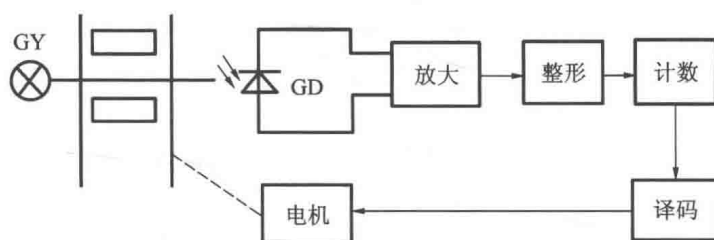


图 1-3 光电计数器系统框图

3) 光电控制水位系统

图 1-4 所示的为光电控制水位系统框图,在标志锅炉水位玻璃管的两侧,按所要求的最高和最低水位处,安装两组光源-光电器件对。由于水能透过可见光,因此常用水吸收性很强的红外光源相对红外敏感的探测器。

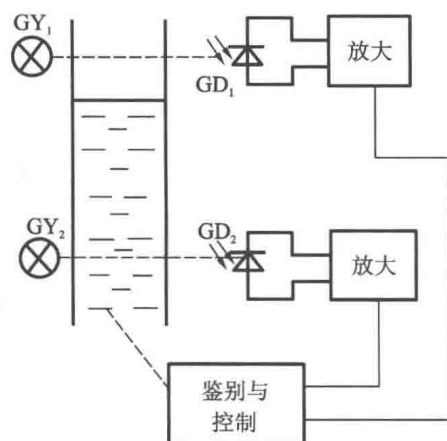


图 1-4 光电控制水位系统框图

其工作原理为:当水位高过上限时,挡住了光源 GY_1 射向光电探测器 GD_1 的红外光束,产生控制信号,该信号经放大后,控制进水阀门使之关闭。相反,水位低于下限时,光源 GY_2 发出的红外光束照到光电探测器 GD_2 上,产生另一个控制信号,该信号经放大后,控制出水阀门关闭并打开进水阀门。

任务 2 辐射度量与光度量

辐射是一种能的形式,它既具有电磁本质,又具有量子性质。在光的发射和吸收以及物质的量子 and 电子相互作用的基本过程的光电效应现象中,能表现出辐射的量子特性。在光的衍射、干涉和偏振现象中,能表现出辐射的波动特性。

为了对光辐射进行定量描述,需要引入计量光辐射的物理量。而对于光辐射的探测和计量,存在着辐射度单位和光度单位两套不同的体系。

两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的,但所用的物理符号是一一对应的。为了区别起见,在对应的物理量符号标脚标“e”表示辐射度物理量,脚标“v”表示光度物理量。下面对辐射度单位和光度单位进行介绍。

1. 辐射度量

1) 辐射能

辐射能 Q_e 是以辐射形式发射、传播或接受的能量,其单位是焦耳(J)。

2) 辐射通量

辐射通量 Φ_e 又称辐射功率(用 P 表示),定义为单位时间内通过一定面积的辐射能量,其表达式为

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

其单位为瓦特(W)或焦耳·秒(J·s)。

3) 辐射出射度

辐射出射度 M_e 是用来度量物体辐射能力的物理量,定义为辐射体单位面积所辐射的通量,其表达式为

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

其单位为瓦每平方米(W/m²)。

4) 辐射强度

辐射强度 I_e 定义为点辐射源在单位时间内、单位立体角内所辐射出的能量,其表达式为

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

其单位为瓦每球面度(W/sr)。

由辐射强度的定义可知,如果一个置于各向同性均匀介质中的点辐射体向所有方向发射的总辐射通量是 Φ_e ,则该点辐射体在各个方向的辐射强度 I_e 是常量,即

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1-4)$$

5) 辐射亮度

辐射亮度 L_e 定义为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量。如图 1-5 所示,其表达式为

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1-5)$$

式中： θ 是辐射面的面法线与给定方向间的夹角。辐射亮度的单位为瓦每球面度平方米 ($\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$)。

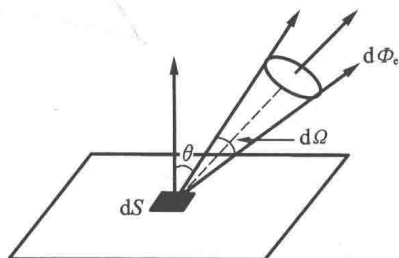


图 1-5 辐射源的辐射亮度

6) 辐射照度

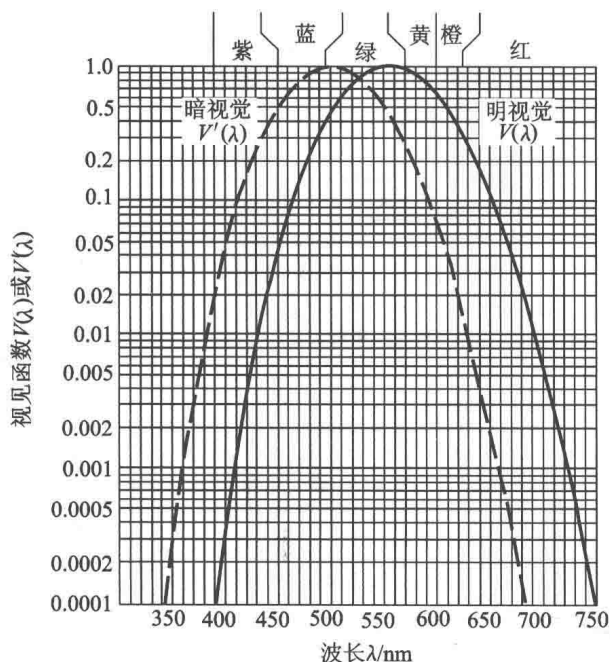
辐射照度 E_e 定义为照射在面元 dA 上的辐射通量 $d\Phi_e$ 与该面元的面积 dA 之比,其表达式为

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \tag{1-6}$$

其单位为瓦每平方米 (W/m^2)。

2. 光度量

由于人眼的视觉细胞对各种不同波长的光的感光灵敏度不一样,对绿光最灵敏,对红光灵敏度要低得多,而且不同的人对各种波长的光的感光灵敏度也有差异,故国际照明委员会根据大量的观察结果,用平均值的方法,确定了人眼对各种波长的光的平均相对灵敏度,称为视见函数 $V(\lambda)$,如图 1-6 所示。视见函数 $V(\lambda)$ 的最大值在 555 nm 处,对应的波长为黄绿光,其他波长的视见函数都小于 1,各种波长的光对应的视见函数值可查表得到。



人眼光谱视见函数表

光线颜色	波长/nm	$V(\lambda)$	光线颜色	波长/nm	$V(\lambda)$
紫	400	0.0004	黄	580	0.8700
紫	410	0.0012	黄	590	0.7570
靛	420	0.0040	橙	600	0.6310
靛	430	0.0116	橙	610	0.5030
靛	440	0.0230	橙	620	0.3810
蓝	450	0.0380	橙	630	0.2650
蓝	460	0.0600	橙	640	0.1750
蓝	470	0.0910	橙	650	0.1070
蓝	480	0.1390	红	660	0.0610
蓝	490	0.2080	红	670	0.0320
绿	500	0.3230	红	680	0.0170
绿	510	0.5030	红	690	0.0082
绿	520	0.7100	红	700	0.0041
绿	530	0.8620	红	710	0.0021
黄	540	0.9540	红	720	0.00105
黄	550	0.9950	红	730	0.00052
黄	555	1.0000	红	740	0.00025
黄	560	0.9950	红	750	0.00012
黄	570	0.9520	红	760	0.00006

图 1-6 视见函数曲线及函数值参考

光度量是人眼对应辐射度量的视觉强度值。

1) 光通量

光通量 Φ_v 是光辐射通量对人眼所引起的视觉强度值,其表达式为

$$\Phi_v = CV_\lambda \Phi_e \quad (1-7)$$

式中: C 为比例系数, 值为 683 lm/W ; Φ_v 单位为流明(lm)。

1 lm 为 1 cd 的均匀点光源在 1 lx 内发出的光通量。

2) 发光强度 I_v

发光强度 I_v 定义为光源在给定方向上的单位立体角内所发出的光通量,其表达式为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1-8)$$

其单位为坎德拉(cd)。

3) 光照度 E_v

光照度 E_v 定义为单位面积所接受的入射光的光通量,其表达式为

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-9)$$

其单位为勒克斯(lx), 相当于 1 m^2 面积上接收到 1 lm 的光通量。

4) 光亮度 L_v

光亮度 L_v 定义为光源表面一点处的面元 dA 在给定方向上的发光强度 dI_v 与该面元在垂直给定方向的平面上的正投影面积之比,其表达式为

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_v}{dA \cos\theta d\Omega} \quad (1-10)$$

式中: θ 为给定方向与面元法线间的夹角, 亮度的单位为坎德拉每平方米(cd/m^2)。

5) 光出射度 M_v

光出射度 M_v 定义为面光源在单位面积上辐射的光通量, 光出射度与光照度的对比如图 1-7 所示, 其表达式为

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-11)$$

其单位为流明每平方米(lm/m^2)。

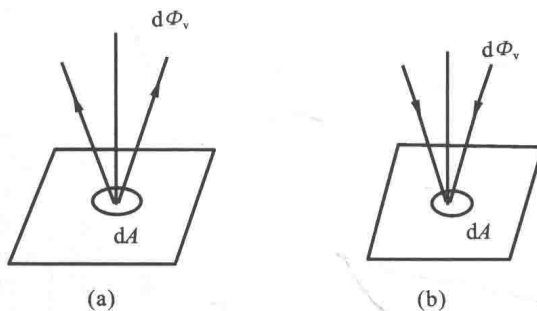


图 1-7 出射度与光照度

表 1-1 列出主要辐射度量和相应的光度量及其单位的对比。

表 1-1 常用辐射度量和光度量之间的对应关系

辐射度量				对应的光度量			
物理量名称	符号	定义式	单位	物理量名称	符号	定义式	单位
辐射能	Q_e	—	J	光量	Q_v	$Q_v = \int \phi_v dt$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
辐射通量	Φ_e	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光通量	Φ_v	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	lm
辐射出射度	M_e	$M_e = d\Phi_e/dS$	W/m^2	光出射度	M_v	$M_v = d\Phi_v/dA$	lm/m^2
辐射强度	I_e	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	W/sr	发光强度	I_v	$I_v = d\Phi_v/d\Omega$	cd
辐射亮度	L_e	$L_e = dI_e/(dS \cos\theta)$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	光亮度	L_v	$L_v = dI_v/(dA \cos\theta)$	cd/m^2
辐射照度	E_e	$E_e = d\Phi_e/dA$	W/m^2	光照度	E_v	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx

任务 3 光电探测器的特性参数与噪声

光电探测器是一种由入射光辐射引起可度量物理量效应的器件,种类很多。影响探测器性能的因素也很多,为了能够正确的选择和使用光电探测器,下面介绍探测器的主要性能参数和噪声参数。

1. 光电探测器的特性参数

1) 响应率

响应率定义为探测器的输出信号电压(U_s)或电流(I_s)与入射的辐通量 Φ_e 之比,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \text{电压响应率} \quad S_U &= \frac{U_s}{\Phi_e} \\ \text{电流响应率} \quad S_I &= \frac{I_s}{\Phi_e} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

电压响应率 S_U 的单位为伏特每瓦(V/W),电流响应率 S_I 的单位为安培每瓦(A/W)。

2) 光谱响应率

光谱响应率定义为探测器在波长为 λ 的单色光照射下,输出的电压 $U_s(\lambda)$ 或电流 $I_s(\lambda)$ 与入射的单色辐射通量 $\Phi_e(\lambda)$ 之比,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} S(\lambda) &= \frac{U_s(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} (\text{V/W}) \\ S(\lambda) &= \frac{I_s(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} (\text{A/W}) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

如果 $\Phi(\lambda)$ 是光通量,则 $S(\lambda)$ 单位为 V/lm 或 A/lm。

3) 噪声等效功率

如果投射到探测器敏感元件上的辐射功率所产生的输出电压(或电流)正好等于探测器本身的噪声电压(或电流),则这个辐射功率就称为噪声等效功率,通常用符号 NEP 表示。

噪声等效功率是信噪比为 1 的探测器探测到的最小辐射功率。其值越小,探测器所能探测到的辐射功率越小,探测器越灵敏。

4) 探测率与比探测率

通常用 NEP 的倒数表示探测率 D , 其表达式为

$$D = \frac{1}{\text{NEP}} \quad (1-14)$$

D 作为探测器探测最小光信号能力的指标, 对于探测器, D 越大越好。比探测率又称归一化探测率, 也称探测灵敏度。

5) 时间常数

时间常数 τ 表示探测器的输出信号随射入的辐射变化的速率, 用来衡量探测器的惰性, 定义为探测器的输出上升达到稳定值的 63% 所需要的时间 (上升时间 τ_{\uparrow}) 或下降到稳定值的 37% 所需要的时间 (下降时间 τ_{\downarrow}), 如图 1-8 所示。

2. 光电探测器的噪声

在一定波长的光照下光电探测器输出的光电信号并不是固定不变的, 而是围绕某值上下浮动, 这种浮动是光电探测器在光电转换时, 受到无用信号干扰产生的, 称为光电探测器的噪声, 如图 1-9 所示。

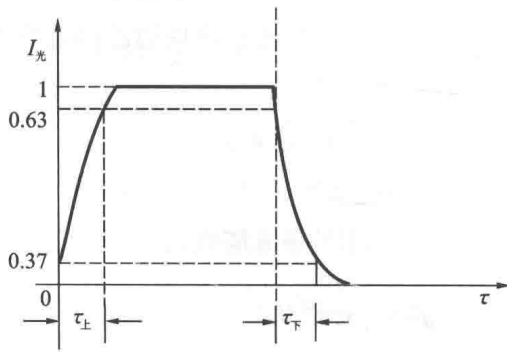


图 1-8 探测器的时间常数

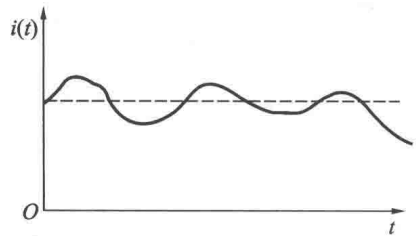


图 1-9 噪声信号

按噪声产生的原因, 噪声的分类如图 1-10 所示。

根据功率谱与频率的关系, 常见的噪声有两种, 一种是功率谱大小与频率无关, 称为白噪声; 一种是功率谱与 $1/f$ 成正比, 称为 $1/f$ 噪声, 如图 1-11 所示。

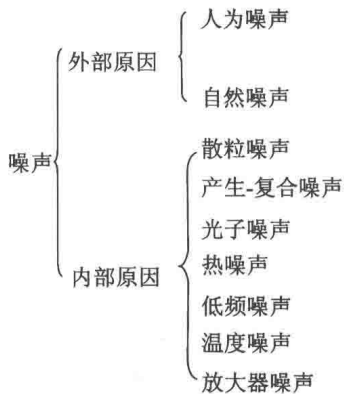
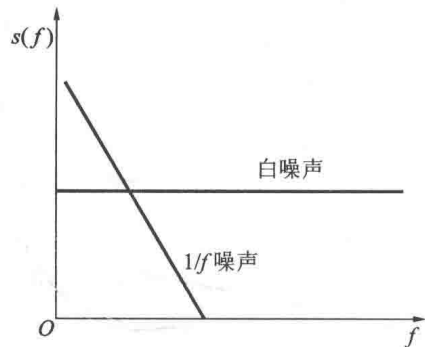


图 1-10 噪声的分类

图 1-11 白噪声和 $1/f$ 噪声

依据噪声产生的物理原因,光电探测器的噪声主要有热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声和低频噪声。

1) 热噪声

热噪声是导体和半导体中载流子在一定温度下随机的热运动所造成的噪声,其表达式为

$$\text{电压热噪声 } \bar{U}_{\text{NT}}^2 = 4kTR \cdot \Delta f \quad (1-15)$$

$$\text{电流热噪声 } \bar{I}_{\text{NT}}^2 = 4kT \cdot \frac{\Delta f}{R} \quad (1-16)$$

式中: k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度,单位为K; R 为器件的电阻值; Δf 为频带宽度。

热噪声是白噪声,与频率 f 无关。

2) 散粒噪声(散弹噪声)

散粒噪声是由穿越势垒的载流子的随机起伏所造成的噪声,散粒噪声电流表达式为

$$\bar{I}_{\text{NSH}}^2 = 2qI_{\text{DC}} \cdot \Delta f \quad (1-17)$$

式中: q 为电子电荷; I_{DC} 为器件输出平均电流; Δf 为频带宽度。

这种散粒噪声存在于所有光电探测器中。散粒噪声是白噪声,与频率 f 无关。

3) 产生-复合噪声

产生-复合(g-r)噪声是由于载流子的产生和复合的随机性,从而导致载流子浓度的起伏所产生的噪声。产生-复合噪声产生均方噪声电流,其表达式为

$$\bar{I}_{\text{Ng-r}}^2 = \frac{2qI(\tau/t)\Delta f}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2} \quad (1-18)$$

式中: I 为总的平均电流; τ 为载流子寿命; f 为噪声频率。

当 $2\pi f\tau \ll 1$ 时, $\bar{I}_{\text{Ng-r}}^2 = 2qI(\tau/t)\Delta f$,此时为白噪声。

4) 低频噪声(闪烁噪声、 $1/f$ 噪声)

光敏层的微粒不均匀或有不必要的微量杂质存在,当电流流过时在微粒间发生微火花放电而引起的微电爆脉冲所产生的噪声,称为低频噪声,也称 $1/f$ 噪声或闪烁噪声。

几乎在所有探测器中都存在这种噪声,其主要出现在1 kHz以下的频率范围,而且与调制频率 f 成反比,故称为低频噪声或 $1/f$ 噪声。

$$\bar{U}_{\text{NF}}^2 = \frac{K_f \cdot I^\alpha \cdot R^\gamma \cdot \Delta f}{f^\beta} \quad (1-19)$$

$$\bar{I}_{\text{NF}}^2 = \frac{K_f \cdot I^\alpha \cdot \Delta f}{f^\beta} \quad (1-20)$$

式中: K_f 是与原件制作工艺、尺寸、表面状态有关的系数; α 是与电流有关的量,通常取2; β 是与材料性质有关的量,取0.8~1.3; γ 是与电阻有关的量,取1.4~1.7。

5) 温度噪声

温度噪声是由于器件本身温度起伏引起的噪声,温度噪声与热噪声在产生原因、表示形式上有一定的差别——对于热噪声,材料的温度一定,引起粒子随机性波动,从而产生随机性电流;对于温度噪声,材料温度有变化,从而导致热流量的变化,这种热流量的变化导致物体产生温度噪声。

上述几种噪声的功率分布如图 1-12 所示。低频状态下, $1/f$ 噪声起主导作用; 中间频率范围内, 产生-复合噪声比较明显; 频率较高时, 白噪声起主要作用。

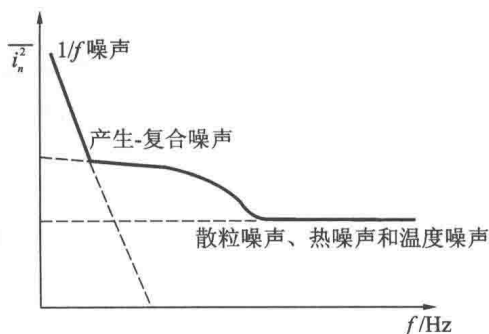


图 1-12 光电探测器噪声功率分布示意图

任务 4 半导体基础知识

1. 半导体基础知识基本概念

1) 共有化运动

原子组成晶体后, 由于电子壳层的交叠, 电子不再完全局限在某一个原子上, 可以由一个原子转移到相邻的原子上去, 因而, 电子将可以在整个晶体中运动。这种运动称为电子的共有化运动, 如图 1-13 所示。各原子中相似壳层上的电子才有相同的能量, 电子只能在相似壳层间转移。

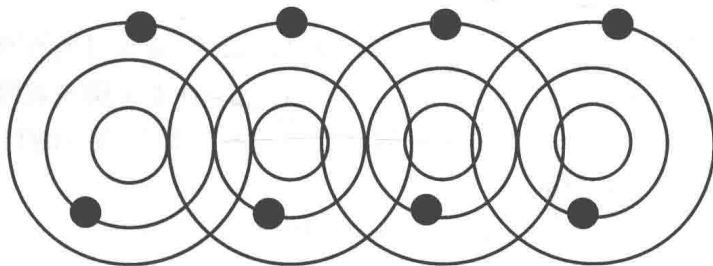


图 1-13 电子共有化运动

2) 能带

共有化的外层电子, 由于泡利不相容原理的限制, 不能再处于相同的能级上, 使得原来相同的能级分裂成 N 个和原来能级相近的新能级。由于 N 很大, 新能级中相邻两能级的能量差很小, 几乎可以看成连续的, N 个新能级具有一定的能量范围, 称为能带, 如图 1-14 所示。

对半导体来说, 填满电子的能带, 称为满带, 最上面的满带称为价带; 价带上面有一系列空带, 最下面的空带称为导带。价带和导带有带隙, 带隙宽度用 E_g 表示, 它代表价带顶和导带底的能量间隙, 称为禁带。能带结构如图 1-15 所示。