



高等院校光电子实验规划示范教材



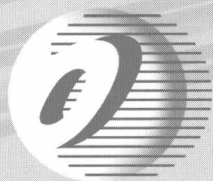
“光电名师堂”
系列教材

光电信息技术 基础实验

GUANGDIAN XINXI JISHI
JICHU SHIYAN

常大定 曾延安 张南洋生 编著

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



高等院校光电子实验规划示范教材



“光电名师堂”
系列教材

光电信息技术 基础实验

GUANGDIAN XINXI JISHI
JICHU SHIYAN

常大定 曾延安 张南洋生 编著

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

光电信息技术基础实验/常大定 曾延安 张南洋生 编著. —武汉:华中科技大学出版社,
2008年10月

ISBN 978-7-5609-4820-1

I. 光… II. ①常… ②曾… ③张… III. 光电子技术-实验-高等学校-教材
IV. TN2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 152229 号

光电信息技术基础实验

常大定 曾延安 张南洋生 编著

策划编辑:徐晓琦

封面设计:潘 群

责任编辑:刘 勤

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)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:10.5 插页:1

字数:225 000

版次:2008年10月第1版

印次:2008年10月第1次印刷

定价:19.80元

ISBN 978-7-5609-4820-1/TN·128

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



丛书编委会

主 编：刘劲松

编 委：陈海清 常大定 刘德明

王 英 曾延安 曹丹华

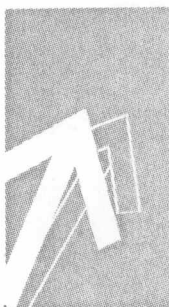
内 容 简 介

本书从光电信息技术的基础知识出发,介绍了基于光电探测系统所需要掌握的光电探测器、光电信号处理和光电系统设计的基础实验。

全书共分为四章,第一章介绍了光电探测器基础知识,第二章介绍了各类单元探测器和CCD阵列探测器的性能测试实验,第三章介绍了光电信号电路处理及典型探测系统实验,第四章介绍了光电图像混合处理实验。

本书可供高等院校光电信息科学与工程类专业、测控技术与仪器专业、应用物理学专业的本科生和研究生使用,也可供工程技术人员参考。

总 序



光学专业在很长一段时间内主要涉及光学仪器和光电测试设备。随着激光技术、光电子技术、微电子技术和计算机技术的迅猛发展,给光学专业赋予了崭新的内涵,迅速发展成为内容广泛的光电子专业,包含能量光电子、信息光电子、生物光电子、医疗光电子和消费光电子等诸多方面,形成了一个涉及众多专业领域的综合性学科。与此相适应,形成了丰富的光电子实验教学内容。然而,目前的实验教材或讲义是针对不同的内容而各自独立编写的。这种状况已不能满足新形势下光电子学科发展和人才培养的需要,因此编辑出版一套有相互关联的光电子系列实验教材就显得十分必要。本套教材旨在这方面做一个有益的尝试。

本套教材将现有光电子技术实验内容以系列教材的形式出版,既体现了光电子学科领域的系统性,又能在每本分册中体现该门实验课程的特点,并能够随着光电子领域科学技术的不断发展来扩展新的分册。本套教材的出版,可望为高等学校光电信息类专业的光电子实验课程提供一套内容较为全面的实验教材,亦可供高等职业学校相近专业以及光电工程技术人员参考。

本套教材分为四个分册:《工程光学实验》、《光纤光学与通信技术实验》、《激光原理与技术实验》和《光电信息技术基础实验》。《工程光学实验》,包括应用光学和物理光学实验等主要内容;《光纤光学与通信技术实验》,包括光纤基础实验、光纤通信技术实验和光纤通信系统实验;《激光原理与技术实验》,重点介绍激光基本物理量测量、固体激光系统、激光单元技术和激光应用系统的有关实验;《光电信息技术基础实验》,以光电探测器、光电弱信号探测、光电技术综合应用及光电图像处理为实验的核心内容。

本套教材的作者在相关课程的教学方面具有丰富的经验,但限于水平,难免出现错误和疏漏,欢迎广大同行和读者提出批评和建议。

丛书编委会

2008年10月

序



在科学技术日新月异的今天,光电信息技术得到了长足发展。尤其是近 20 年来,国家发展光电技术和产业的一系列战略决策不断出台,国内重点建立了多个“光谷”中心,一大批光电信息领域的技术和产业相继出现,“光电信息产业是 21 世纪最具魅力的朝阳产业,它将成为 21 世纪的高科技主导产业”这一观念得到越来越多人的肯定和认同。

以国家需求与社会发展为导向,培养具有信息工程知识背景,宽基础、高素质的光电专业人才是普通高等院校光电学科专业教学的一项重要任务。这几年来,教育部光电信息科学与工程教学指导委员会对全国高校光电专业提出了人才培养多样化原则,各有关高校的光电专业都在积极探索适应国家需求与社会发展的培养方案,有的已经制订了新的人才培养计划,有的正在确立科学的、适合人才市场需求的教学体系,人才培养模式已呈现百花齐放、各得其所的繁荣局面,编写质量高、系统性强的规划教材也成为专业建设的重要任务,所以,能为这套“普通高等院校光电子实验规划示范教材”作序,我感到很有意义。

光电信息学科要求学生具有较强的专业实验能力,一定的光电信息系统设计能力和工程实践能力,这对相关实验课程的设置和教学提出了更高的要求。这套教材以“实验”为亮点,以“实用”为特色,将光电子实验教学内容完整而系统地整合到四本既独立又相互联系的书,既体现了光电学科领域的系统性,又能在每本分册中体现该门实验课程的特点,并能够随着光电子领域科学技术的不断发展来扩展新的分册,便于读者有选择、有重点的选择阅读和自学。

华中科技大学光电学院的专业建设尤其是实验室建设、实验教学成果在这套系列教材中得到了很好的体现。刘劲松教授亲自组织多位专家、教授进行论证,各分册由教授光电子实验课程多年的教师担纲写作,并得到了华中科技大学出版社的大力支持,历时两年多,陆续完成这套丛书,可望为高等学校光电信息类专业的光电子实验课程提供一套内容较为全面的实验教材。我深信这套优秀教材的编写者们与出版者们一定会尽其所能,以严谨的态度,不断提高教材的水平,为培养数以千万计的光电专业创新型人才、复合型人才做出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士

姚建铨

2008 年 9 月 30 日于 HKUST

前言



光电技术是一门涵盖学科范围广泛的综合技术,它以无源和有源的光电器件为基本组成,综合利用光学精密机械、电子学、计算机和控制技术等科学成果和技术方法,以用于开发不同需要的装置、设备和工程系统。光电技术分为两大类:光电能量技术和光电信息技术。

光电能量技术主要研究大容量、高功率光辐射能的产生、控制以及向其他能量形式的转换。光电能量技术研究的范围主要包括:激光核武器;核原料的激光同位素分离;激光核聚变;太阳能电池和太阳能利用;各种光加工;光化学反应等。光电信息技术是以光电器件为主体,研究和发展光电信息的形成、传输、接收、变换、处理和应用。光电信息技术研究的范围主要包括:光电源器件(包括激光器)和可控功能器件及集成;光通信和综合信息网络;光频微电子;光电方法用于瞬态光学观测;激光、红外、微光探测、定向和制导;光电精密测试、在线检测和控制;混合光电信息处理、识别和图像分析;光电人工智能和机器人视觉;光逻辑运算和光计算机;光存储及光电显示;生物光子学等。目前,这一学科正在国防空间技术、工农业生产和医疗等领域得到越来越广泛的应用。

由于光电技术所包含的内容十分广泛,本书仅涉及光电信息技术范围中有关光电精密测试、在线检测、混合光电信息处理的一些基础内容。

本书共分四章。由于光电探测器是光电系统由光信息转换为电信息的关键点,所以本书第1章概述了有关光电探测器的基础知识、各类探测器的工作原理及特性参数,为后续实验内容打下理论基础。第2章为光电探测器的原理及性能测试实验,该章共列出六项实验,包括各种不同类型的单元光电探测器和目前应用广泛的电荷耦合器件(CCD),通过这些实验加深对各类探测器工作原理和外部特性的理解。第3章为光电信号处理实验,该章列出了十一项实验,包括两部分内容:一部分内容列出光电系统中有关电微弱信号处理的实验,为设计低噪声放大器打下基础,并加深对相关器、同步积分器、多点信号平均器和单光子计数原理的理解;另一部分列出几类典型光电系统的设计原理和信息处理方法的实验。第4章为图像光电混合处理技术实验,介绍了以液晶空间光调制器特性实验为基础的有关光电混合处理技术。

本书第1章、第2章第2.1~2.4节、第3章第3.1~3.4节、第3.11节由常大定编写,第2章第2.5节、2.6节,第3章第3.5~3.10节由曾延安编写,并修改第2章、第3章。第4章由张南洋生编写。全书由常大定担任主编并负责本书的统稿工作。

武汉大学张良培教授审阅了全书,并提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,参考并借鉴了国内外同行的相关文献和著作,在此对有关作者、专家表示诚挚的感谢。

由于编著者学识有限,书中难免出现错误和疏漏,恳请读者批评指正。

编者

2008.6.10

目 录

第 1 章 光电探测器基础知识	(1)
1.1 光电探测器工作原理	(1)
1.2 光电成像器件工作原理	(14)
第 2 章 光电探测器的原理及性能测试实验	(26)
2.1 光电二极管、光电三极管光照特性的测试	(26)
2.2 硅光电池负载特性的测试	(28)
2.3 光电倍增管特性和参数的测试	(30)
2.4 红外探测器性能测试	(33)
2.5 电荷耦合器件 CCD 的原理及驱动实验	(42)
2.6 线阵 CCD 特性测量实验	(49)
第 3 章 光电信号处理实验	(52)
3.1 低噪声放大器实验	(52)
3.2 相关器的研究及其主要参数测量	(58)
3.3 同步积分器的研究及其主要参数测量	(68)
3.4 多点信号平均器	(74)
3.5 单光子计数	(84)
3.6 线阵 CCD 输出信号的二值化	(101)
3.7 线阵 CCD 的数据采集	(104)
3.8 光电控制电路设计与装调	(107)
3.9 光电透过率测量系统实验	(110)
3.10 摄像机原理及应用	(114)
3.11 光电跟踪	(122)
第 4 章 光电图像混合处理技术	(127)
4.1 液晶空间光调制器特性实验	(127)
4.2 图像的光电混合实时减法和微分运算	(133)
4.3 图像的光电混合实时相关识别	(139)
4.4 空间光调制三维形貌测量实验	(144)
4.5 矢量矩阵的光电混合运算	(150)
参考文献	(157)

第1章 光电探测器基础知识

光电信息技术可以定义为:以光电器件为主体,研究和发展光电信息的形成、传输、接收、变换、处理和应用的一门技术。由此可见,光电器件是光电信息技术的基础,全面了解和掌握各类光电探测器是应用光电信息技术的基础。

利用光电效应和热电效应把光信息转变为电信息的各种器件称为光电器件。这里的“光”包括紫外、可见及红外三个电磁波段。光电器件的用途主要有两类:其一是用来观察微弱光信号,作这一用途的器件通常称为“探测器”,或者严格地称为“辐射探测器”;其二是在自动控制中作为光电转换器。除这两类用途外,还有一些特殊用途,例如把光电器件作为电源的光电池。

本章首先介绍光电探测器的物理基础,介绍光电探测器赖以工作的物理效应和光电探测器的特性参量,比较各类光电探测器的特性,为后续实验章节作一基础理论准备。

1.1 光电探测器工作原理

光电探测器的工作原理主要基于光辐射与物质的相互作用所产生的光电效应和热电效应。下面分别介绍这两类效应。

1.1.1 光电效应及其器件

固体的电学性质取决于固体中电子的运动状态。当光束投射到固体表面时,进入体内的光子如果直接与电子作用(如吸收、动量传递等),引起电子运动状态的改变,则固体的电学性质随之发生改变,这类现象统称为固体的光电效应。这里强调“直接”两字,如果光子不是直接与电子作用,而是能量被固体晶格振动吸收引起固体的温度升高,导致固体电学性质的改变,这种情况不能称为光电效应,而是热电效应。

光电效应有多种,按照是否发射电子,光电效应分为内光电效应和外光电效应。内光电效应又包括光电导效应、光生伏特(光伏)效应、光子牵引效应和光磁电效应等。

在光电效应中,光子直接与物质中的电子相互作用。物质吸收光子后,将引起物质内部电子能态的改变。这种变化与光子能量大小有关,所以光电效应是一种波长选择性物理效应。

1. 光电导效应及其器件

半导体的导电性能与其中的自由载流子浓度有关。在某一温度下,由于热激发电子从不断振动的晶格获得能量,从价带跃迁至导带而产生自由载流子(电子和空穴);同时,由于复合作用,自由载流子不断减少。在一定温度下,上述两个过程达到动态平衡,这时半导体中的自由载流子称为热平衡载流子。如果半导体受到光照,则入射光子将激发出新的载流子,该半导体的电导率增大。增加的这部分载流子称为非平衡载流子或光生载流子。半导体材料吸收光辐射而产生载流子,从而使半导体的光导率发生变化的现象称为光电导效应。

2 光电信息技术基础实验

根据半导体材料对光辐射吸收类型的不同,光电导效应又分为本征光电导效应和非本征(杂质)光电导效应。

对于本征半导体,在无光照时,由于热激发只有少数电子从价带跃迁至导带。这时半导体的电导率很低,定义为

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (1.1.1)$$

式中: n_0 、 p_0 分别为无光照时电子和空穴的浓度; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; σ_0 一般称为半导体材料的暗电导; e 为电子电荷。

当光入射到光导体材料上时,半导体价带中的电子吸收光子后从价带跃迁至导带,产生电子-空穴对,从而使半导体的电导率增大,这种现象称为本征光电导效应。电导率增量又称为光电导,定义为

$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (1.1.2)$$

式中: Δn 和 Δp 分别是电子和空穴浓度的增量,即光生载流子浓度。由式(1.1.2)可知,导带中的光生电子和价带中的光生空穴对光电导都有贡献,所以光电导效应实际上是非平衡多数载流子过程。

要使电子从价带跃迁至导带,入射光子的能量至少要和本征半导体的禁带宽度 E_g 一样大,因此要求

$$h\nu \geq E_g \quad (1.1.3)$$

或者

$$hc/\lambda \geq E_g \quad (1.1.4)$$

式中: ν 是入射光频率; λ 是光的波长; c 是光速; h 是普朗克常量。由式(1.1.4)可写出本征光电导的长波限(或称截止波长) λ_0 为

$$\lambda_0 = hc/E_g \quad (1.1.5)$$

或者

$$\lambda_0(\mu\text{m}) = 1.24/E_g(\text{eV}) \quad (1.1.6)$$

即波长大于 λ_0 的光辐射不能产生本征光电导效应。式(1.1.6)表明,本征半导体的禁带宽度 E_g 越小,则 λ_0 越长。选择 E_g 不同的半导体材料可制成长波限不同的光电导探测器。

非本征光电导则是入射光激发非本征半导体中杂质能级上的束缚态电子(N型)或空穴(P型)而产生光生载流子,从而使其电导率发生变化。非本征半导体电导率的增量可表示为

$$\Delta\sigma_n = e(\Delta n\mu_n) \quad (\text{N型}) \quad (1.1.7)$$

$$\Delta\sigma_p = e(\Delta p\mu_p) \quad (\text{P型}) \quad (1.1.8)$$

图 1.1.1 所示为本征和非本征半导体光电导过程。

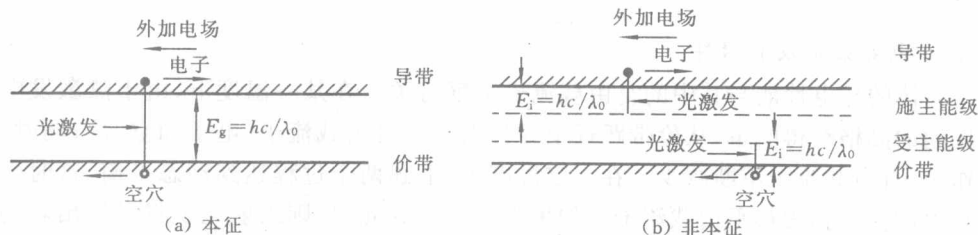


图 1.1.1 本征和非本征半导体光电导过程

非本征光电导的长波限为

$$\lambda_0 = hc/E_i \quad (1.1.9)$$

或

$$\lambda_0(\mu\text{m}) = 1.24/E_i(\text{eV}) \quad (1.1.10)$$

式中: E_i 为杂质电离能(eV)。通常 E_i 远小于禁带宽度 E_g , 所以非本征光电导的 λ_0 远大于本征光电导的 λ_0 。由于杂质电离能较小, 因而易受热激发的影响, 只有在极低温度下才能保持较低的暗电导。

光照射到半导体材料上, 开始时光生载流子逐渐增多, 经过一定时间后载流子浓度才趋于一稳定值。此后, 若突然停止光照, 光生载流子浓度并不立即下降至零, 而是经过一定时间才趋于零。这种现象称为弛豫现象, 光照射到半导体材料上后, 建立稳定的光生载流子所需要的时间, 或停止光照后光生载流子浓度下降到零所需的时间, 称为弛豫时间。弛豫时间的长短反映了光电导惰性的太小。

利用光电导效应制作的光电探测器称为光电导探测器, 简称 PC 探测器。光电导探测器可根据不同类型的光电导效应分为本征型光电导探测器和杂质型光电导探测器, 也可根据半导体晶体排列的差异分为单晶光电导探测器和多晶光电导探测器, 还可按光谱响应范围区分为紫外可见光电导探测器及红外辐射敏感的探测器。比较典型的光电导探测器光谱响应于在可见光区有硅、锗、硫化镉(CdS)、硒化镉(CdSe)光电导探测器, 近红外区有硫化铅(PbS)、碲化铋(IbSb)光电导探测器, 碲镉汞(Hg_{1-x}Cd_xTe)光电导探测器则根据材料元素组分 x 的变化可在 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 三个大气窗口中都有较高的光谱响应度。

2. 光伏效应及其器件

由半导体理论可知, 在半导体 PN 结的 N 区导带中有较多的电子, P 区价带中有较多的空穴。在 PN 结中由于存在载流子浓度梯度, 便发生电子向 P 区、空穴向 N 区扩散。扩散的结果使 P 区带负电, N 区带正电, 如图 1.1.2 所示, 形成由不能够移动的离子组成的空间电荷区(也称为耗尽区), 同时也随之出现由耗尽区引起的内建电场, 内建电场将阻止电子继续向 P 区扩散, 阻止空穴继续向 N 区扩散, 这时 PN 结处于平衡状态。

在入射光作用下, 如果光子能量大于禁带宽度 E_g , 则在 P 区、结区和 N 区都会引起本征激发而产生电子-空穴对, 破坏原来的平衡状态。结区两边的光生少数载流子在结区内建电场的作用下向相反方向运动, P 区的电子穿过 PN 结进入 N 区, N 区的空穴进入 P 区。如果 PN 结处于开路状态, 这些光生电子和空穴就积累在 PN 结附近, 使 P 区获得附加的正电荷 p^+ , N 区获得附加的负电荷 n^- , 结果使 P 区电势升高, N 区电势降低, 于是 PN 结两端形成了光生电动势。这种现象称为光生伏特效应, 简称光伏(PV)效应。由于光照产生的载流子各自向相反的方向运动, 结果在 PN 结内部形成自 N 区向 P 区的光生电流 I_p , 它与漂移电流方向相同, 与扩散电流方向相反。同时, 由于光照使 PN 结两端产生光生电动势, 相当于在 PN 结两端加正向电压 V , 如图 1.1.3 所示, 使 PN 结势垒由 eV_D 降为 $eV_D - eV_0$, 这个正向电压使 P 区空穴和 N 区电子向对方扩散, 形成正向注入电流, 这个正向电流表示为

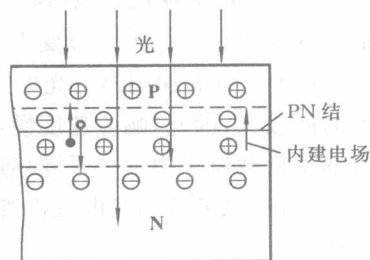


图 1.1.2 光伏效应示意图

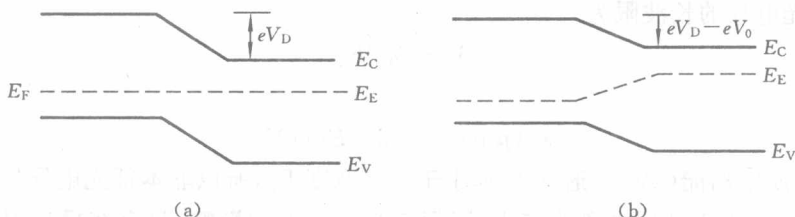


图 1.1.3 光照前后 PN 结能带结构

$$I_+ = I_s (e^{eV/KT} - 1) \quad (1.1.11)$$

式中: I_s 为 PN 结反向饱和电流; k 为玻耳兹曼常量; T 为绝对温度; V 为光生电压; I_+ 的方向自 P 区流向 N 区。

与光电导效应相反, 光伏效应是一种少数载流子过程。少数载流子的寿命通常短于多数载流子的寿命, 当少数载流子被复合掉时, 光伏信号就终止了。由于这个原因, 基于光伏效应的光探测器通常比用相同材料制作的光电导探测器的响应更快。

利用光生伏特效效应制成的光探测器称为光伏探测器, 简称 PV 探测器。这类探测器是由对光照敏感的“结”构成的, 因此按结的种类不同, 又可分为 PN 结型、PIN 结型、异质结型和金属-半导体结型(肖特基势垒型)。最常用的光伏探测器有光电池、光电二极管、光电三极管、PIN 管、雪崩二极管等。

光伏探测器与光电导探测器相比较, 主要区别在以下几个方面。

(1) 产生光电变换的部位不同。光电导探测器是均质型, 光无论照在它的哪一部分, 受光部分的电导率都要增大; 而光伏探测器是结型, 只有到达结区附近的光才产生光伏效应。

(2) 光电导探测器没有极性, 工作时必须外加偏压; 而光伏探测器有确定的正、负极, 不需外加偏压也可把光信号变为电信号。

(3) 光电导探测器的光电效应主要依赖于非平衡载流子中的多子产生与复合运动, 弛豫时间较大, 因此, 响应速度慢, 频率响应性能较差; 而光伏探测器的光伏效应主要依赖于结区非平衡载流子中的少子漂移运动, 弛豫时间较小, 因此, 响应速度快, 频率响应特性好。另外, 像雪崩二极管和光电三极管还有很大的内增益作用, 不仅灵敏度高, 还可以通过较大的电流。

基于上述特点, 光伏探测器的应用非常广泛。一般多用于光度测量、光开关、报警系统、图像识别、自动控制等方面。

3. 光电发射(外光电)效应及光电倍增管

某些金属或半导体吸收光辐射而激发出自由电子, 当其能量足以克服表面势垒时, 可逸出金属或半导体表面而向真空发射光电子, 这种现象称为光电发射(外光电)效应。可以发射光电子的金属或半导体材料称为光电发射体。

外光电效应有下列基本规律。

1) 光电发射第一定律

当入射辐射的光谱分布不变时, 饱和光电流 I_p 与入射的辐射通量 Φ 成正比。

2) 光电发射第二定律

光电发射第二定律由爱因斯坦发现, 故又称爱因斯坦定律。该定律指出, 发射体发射的

光电子的最大动能随入射光子光频的增加而线性增加,而与入射光的强度无关,爱因斯坦方程可表达为

$$\frac{1}{2}m_e V_m^2 = h\nu - W_\phi \quad (1.1.12)$$

式中: m_e 为光电子质量; V_m 为出射光电子的最大速度; ν 为光频; W_ϕ 为光电发射体的逸出功,逸出功定义为光电发射体内费米能级到真空能级的能量差; h 为普朗克常量。

利用爱因斯坦提出的光量子理论很容易解释上述两个定律。爱因斯坦指出,每个光子的能量为 $h\nu$,每个电子的发射都是由于吸收了一个光子的能量的结果。因此辐射通量越大,光子越多,激发光电子逸出光电发射体表面的数量也越多,从而使光电流与辐射通量成正比。入射光子的频率越高,每个光子的能量越大,电子在吸收光子能量后除了付出逸出表面所需的逸出功外,留下的动能也越大。

从以上的定律还可以推论出以下规律。

3) 光电发射的长波限

在入射光子的光频范围内存在一长波限,波长大于此长波限的光子将不会引起光电发射。长波限随不同光电发射体的逸出功而异,可利用式(1.1.12),使 $V_m=0$,求得

$$\nu_0 = \frac{W_\phi}{h} \quad \text{或} \quad \lambda_0 = \frac{ch}{W_\phi}$$

如果 W_ϕ 的单位为电子伏(eV),则

$$\lambda_0 = \frac{1239}{W_\phi} \text{ (nm)} \quad (1.1.13)$$

4) 光电发射过程

长期的研究认为,光电子发射可以看作三级过程:第一步是发射体吸收光子,激发高能量的电子;第二步是高能电子向真空界面运动,运动过程中由于与晶格及其他粒子碰撞而损失能量;第三步是电子越过表面势垒逸出真空。电子从吸收光子到逸出发射体表面的时间是很短的,这个时间约为 3×10^{-13} s。

利用光电发射效应制作的光电探测器主要有光电倍增管。这种器件目前仍在科学研究和工程中应用,其某些优异特性到目前为止仍是其他光电探测器所无法替代的。

光电倍增管是利用外光电效应把微弱光转换为光电子,并使光电获得倍增的探测器。其工作原理如图1.1.4所示。图中K是光阴极,C为聚焦极, $D_1 \sim D_{10}$ 为倍增极(打拿极),所加电压逐级增加(每级约80~150 V),A为收集电子的阳极。

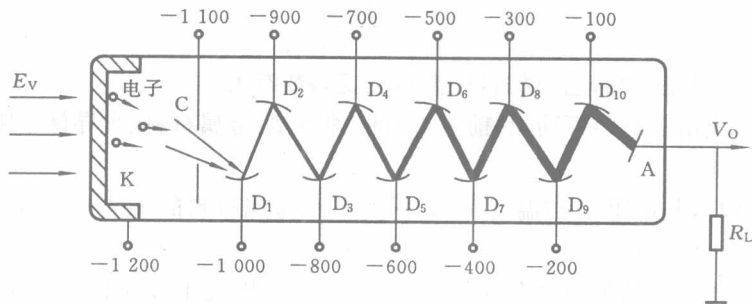


图 1.1.4 光电倍增管工作原理

在入射光子的激发下,逸出光电阴极的光电子被电场加速打到第一倍增极 D_1 上,在高速初始电子激发下, D_1 产生二次电子发射;这些电子又被电场加速并入射到 D_2 上,激发出更多的电子,这样电子逐次倍增直到 D_{10} 。最后,经倍增的光电子被阳极 A 收集而输出阳极电流。光电倍增管是利用光电发射和二次电子发射相结合,把微弱的光信号转换为较大电信号的一种真空光电器件。

1.1.2 热效应及其器件

物质的某些性质随入射光的加热作用引起的温度变化的现象称为热效应。热效应的特点是入射光与材料的晶格相互作用,晶格因吸收光能而增加振动能量,引起材料的温度上升,从而引起与温度有关的材料电学参量发生变化。这与光子能量直接转换给光电子的光电效应有本质不同。

在热效应中,物质因吸收入射光而引起温度的变化,从而导致其某些物理性质的变化。热效应与入射光的波长无关,因而材料温度的变化仅取决于光功率(或者变化速率),而与入射光的光谱成分无关。

热效应的种类很多,主要有热膨胀效应(如气体热膨胀、固体热应变等)、电阻温度效应(如金属电阻、半导体电阻、超导体电阻、正温度系数热敏电阻等)、温差电效应(如变折射率、变介电常量等)、热释电效应(如变极化)、热释磁效应(如变磁化)、吸收限温度效应、磷光发射、液晶、能斯特效应等。目前已获得广泛应用的是电阻温度效应、温差电效应和热释电效应。由于这三种热敏效应都是电学量随温度的变化关系,因而统称为热电效应。

1. 电阻温度效应及其器件

入射光的加热作用引起材料的电阻率变化的现象称为电阻温度效应。由于早期(1880年)由 S. P. Langley 利用金属电阻的电阻效应制作成称为“(电阻)测辐射热计(bolometer)的探测器,所以亦称这种效应为测辐射热计效应。

材料的电阻与温度的关系可由电阻温度系数 α_T 来表征。实验发现,材料温度变化 ΔT 引起的阻值变化 ΔR 与材料的阻值 R 及 ΔT 成正比,即

$$\Delta R = \alpha_T R \Delta T$$

当 ΔT 足够小时,则有

$$dR = \alpha_T R dT$$

由此得到

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1.1.14)$$

式中: α_T 称为电阻温度系数,它与材料种类和温度系数有关。

电阻温度效应由于材料不同,目前主要有四种类型:金属材料、半导体电阻材料、复合电阻材料和超导材料。

对于金属材料,其电阻 R 与温度 T 成正比,所以金属材料的 α_T 与 T 成正比。在室温下金属材料的 α_T 约为 0.003 3。

半导体材料的电阻值随温度升高按指数规律下降,因此半导体材料的 α_T 是负的,其绝对值大于金属材料的 α_T 。当 $T=300\text{ K}$ 时,半导体材料的 α_T 约为 -0.033 ,其绝对值比金属材料的 α_T 大一个数量级。

超导材料在其超导转变温度时,对于传统的超导材料在 1.3 K,高温超导材料在 77 K 附近,有非常大的电阻温度系数 $\alpha_T=50$,目前也可以制作成探测器,但这需要严格控制在超导转变温度很窄的范围内。

应用电阻温度效应所制作的光电探测器一般称为热敏电阻。目前用半导体材料制作的热敏电阻应用较多,比较典型的是用氧化锰、氧化镍、氧化钴这类金属氧化物制作的热敏电阻,它们具有电阻温度系数高、响应度高的特点。

2. 温差电效应及其器件

当由两种不同材料制成的两个结点出现温差时,在该两点间的电路上便有电流流过,即产生温差电动势,这种现象称为温差电效应,也称为赛贝克效应。温差电动势的大小与温度差成正比,即

$$\epsilon_{12} = M_{12} \Delta T$$

式中, M_{12} 为温差电动势率,也称为赛贝克系数。 M_{12} 的意义是单位温差所产生的电动势的净增量,单位为 $V \cdot ^\circ C^{-1}$ 。金属材料的 M_{12} 值一般不大,约为几 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 到几十 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$ 。半导体的 M_{12} 值较高。

应用温差电效应制作的器件主要有热电偶和热电堆。目前此类器件中用线、条状的实体金属材料制作的热电偶多用于接触测温;用薄膜半导体材料制作的热电堆(由许多个热电偶串联而成)多用于辐射测量,例如用来标定各类光源、测量各种辐射量、作为红外分光光度计或红外光谱仪的辐射接收元件等。

3. 热释电效应及其器件

某些晶体(如硫酸三甘肽、铌酸锶钡等)受光照射时温度升高,从而在晶体的特定方向上,由于自发极化随温度变化而引起表面电荷的变化。这种现象称为热释电效应。

在 32 种晶体中有 20 种是压电晶体,它们都是非中心对称的。其中有 10 种具有自发极化特性,这些晶体称为极性晶体。对压电晶体施加应力能产生电极化;反之,对其施加电场会使压电晶体发生应变。对于极性晶体,即使外加电场和应力都为零,但由于晶体内的正、负电荷中心并不重合,因而具有一定的电矩,也就是说晶体本身具有自发极化(P)特性。所以单位体积的总电矩可能不等于零,这是因为参与晶格热运动的某些离子可能同时偏离平衡态,这时晶体中的电场将不等于零,晶体就变成极性晶体。于是在与自发极化强度垂直的两个晶面上就会出现大小相等、符号相反的面束缚电荷。极性晶体的自发极化通常是观察不出来的,因为在平衡条件下它被通过晶体和从外部传至晶体表面的自由电荷所补偿,如图 1.1.5(a)所示。极化的变化影响补偿电荷的变化是与温度有关的。如果强度变化的光辐射入射到晶体上,晶体温度便产生变化,最后导致面束缚电荷跟着发生变化。于是晶体表面上就出现能测量出的电荷,如图 1.1.5(b)所示。自由电荷对面束缚电荷的中和作用所需时间很长,大约数秒到数小时,而晶体的自发极化弛豫时间很短,约为 10^{-12} s。因此,当晶体温度按一定频率变化时,自由电荷来不及中和变化的面束缚电荷,这样,晶体表面就呈现出相应于温度变化的面束缚电荷变化,这就是热释电效应。

当温度变化时,晶体中离子间的距离与链角发生变化,从而使极化强度发生变化。当温度升高时,自发极化强度变小。当温度 T 等于某一特定温度 T_c 时,极化晶体的极化强度为零,此时极化晶体发生相变,一般称 T_c 为居里温度。在利用热功当量释电效应制作探测器时希望 T_c 越高越好,它是评价热释电探测器的一个品质因数。