



GH

高等专业学校 规划教材
工科电子类

光电探测技术

王清正 胡渝 林崇杰 编

光电探测技术

32

9

电子工业出版社

53.632
112

光电探测技术

王清正 胡渝 林崇杰 编著

电子工业出版社

9610165

(京)新登字055号

内容提要

本书主要介绍光探测器的物理基础、基本原理与外特性，以及光辐射探测技术及其在有关领域的应用。

本书可以作为高等工科院校有关专业光辐射探测技术的教材，也可供从事光电子技术工作的研究人员、工程技术人员及高等院校其他有关专业的师生参考。

D014/15

光电探测技术

王清正 胡渝 林崇杰 编著

责任编辑 连潮东

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 18.25 字数: 460千字

1994年10月第1版 1994年10月第1次印刷

印数: 2000册 定价: 10.30元

ISBN 7-5053-2464-0/TN·720

100108

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定，我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978~1990年，已编审、出版了三个轮次教材，及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神，“以全面提高教材质量水平为中心，保证重点教材，保持教材相对稳定，适当扩大教材品种，逐步完善教材配套”，作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想，组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会，在总结前三轮教材工作的基础上，根据教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的，以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作，由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿，其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的，其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的，其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社，为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评和建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

修订版前言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1991~1995年编审出版规划,由电子物理与器件教材编审委员会激光与红外编审小组审定、推荐出版,责任编辑魏光辉。

本教材由电子科技大学王清正担任主编,电子科技大学蔡伯荣担任主审。

本课程的参考学时数为60学时。在修编过程中,编者按修订大纲要求,重新编写了原教材的第七和第八章,对该书的其余各章的部分章节作了必要的修改和补充,并增加“应用”一章。修订后全书共分十一章。第一章为光探测器的物理基础,介绍光电效应、光热效应、光—电转换的基本规律及光探测器的特性参数;第二章为光电子计数统计和光探测器的噪声,介绍光—电转换的统计理论和光探测器中的噪声;第三、第四及第五章为光子探测器,分别介绍光电子发射探测器、光电导探测器及光伏探测器;第六章为热探测器,介绍热释电探测器、测辐射热电偶及热电堆、热敏电阻测辐射热计等;第七章为光探测器的偏置与放大,介绍光探测器偏置与放大电路的设计原则、常用光探测器的偏置和放大电路;第八章为直接探测方法,介绍直接探测的基本原理、改善直接探测系统性能的途径及应用举例;第九章为光外差探测方法,介绍光外差探测、光零差探测及三频光外差探测的基本原理、光外差探测系统的性能及应用举例;第十章为微弱信号检测技术,介绍相关检测的原理、锁定放大器、取样积分器及单光子计数器;第十一章为光电探测技术的应用举例,介绍基本探测电路及光电探测技术在光通信、测距、雷达、表面光洁度和二维温度分布的测量、光电开关以及入侵报警等方面的应用。具有半导体物理、统计物理及电子电路基础知识的读者阅读本书不会发生困难。

本教材由王清正编写绪论、第一、第六、第九及第十一章,胡渝编写第二、第四、第五、第七及第十章,林崇杰编写第三和第八章,王清正统编全稿。对于主审特认真负责地审稿、为本书的修订提出许多宝贵建议,在此表示诚挚的感谢!在本书修订中,还得到兰信钜教授、魏光辉教授的关心和支持,在此表示诚挚的感谢!由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

1993年7月于成都

目 录

绪 论	1	3.2.1 真空光电二极管	51
第一章 光探测器的物理基础	4	3.2.2 充气光电二极管	52
§1.1 光电效应和光热效应	4	§3.3 光电倍增管	53
1.1.1 光电效应	4	3.3.1 光电倍增管的工作原理	53
1.1.2 光热效应	11	3.3.2 倍增极	56
§1.2 光—电转换的基本规律	14	3.3.3 光电倍增管的基本特性	58
1.2.1 光—电转换过程的简单描述	14	3.5.4 光电倍增管的供电电路	61
1.2.2 光—电转换过程的半经典理论	15	§3.4 微通道板	63
1.2.3 探测方式	19	3.4.1 微通道板的结构及工作原理	64
§1.3 光探测器的特性参数	19	3.4.2 微通道板的增益与自饱和	65
第二章 光电子计数统计与光探 测器噪声	27	3.4.3 微通道板的噪声	67
§2.1 光电子计数统计	27	3.4.4 微通道板的应用	67
2.1.1 光电子计数统计特性	27	§3.5 应用举例	68
2.1.2 光电子计数变量 K 的数字特征	29	3.5.1 闪烁计数器电路	68
2.1.3 量子效率 η	30	3.5.2 薄膜测量电路	69
2.1.4 单色点探测	30	3.5.3 光电显微镜变换电路	70
§2.2. 光电变换过程的统计分析	31	第四章 光电导探测器	72
2.2.1 光探测器输出过程——散粒噪 声过程	31	§4.1 光电导探测器的工作原理	72
2.2.2 理想光探测器的输出光电流 及噪声	34	4.1.1 光电导探测器的光电流	72
§2.3 光电探测器的噪声及其谱密度	35	4.1.2 光电导探测器的工作模式及 等效电路	74
2.3.1 噪声的统计特性	36	§4.2 光电导探测器的噪声	75
2.3.2 噪声功率谱密度	36	§4.3 光电导探测器的性能参数	76
2.3.3 噪声相关性	39	4.3.1 响应率	76
§2.4 光探测器的噪声	39	4.3.2 光谱特性	77
2.4.1 散粒噪声	39	4.3.3 比探测率	77
2.4.2 热噪声	40	4.3.4 温度特性	78
2.4.3 产生—复合噪声	42	4.3.5 频率响应及响应时间	78
2.4.4 温度噪声	43	§4.4 实用光电导探测器	80
2.4.5 电流噪声($1/f$ 噪声)	44	4.4.1 本征型光电导探测器	80
第三章 光电子发射探测器	46	4.4.2 杂质型光电导探测器	89
§3.1 光电子发射	46	第五章 光伏探测器	92
3.1.1 金属的光电子发射	46	§5.1 光伏探测器的工作原理	92
3.1.2 半导体的光电子发射	47	5.1.1 光照下理想 $p-n$ 结方程及特性 曲线	92
3.1.3 实用光电阴极	49	5.1.2 光伏探测器的等效电路	93
3.1.4 负电子亲和势(NEA)光电阴极	50	§5.2 光伏探测器的噪声	94
§3.2 光电二极管	51	§5.3 光伏探测器的性能参数	95
		5.3.1 响应率	95

5.3.2	比探测率	95	7.3.1	光探测器前置放大器的特点	164
5.3.3	光谱特性	96	7.3.2	光探测低噪声放大技术	165
5.3.4	频率响应及响应时间	97	§7.4	常用光探测器的偏置与前置放大 大举例	169
5.3.5	温度特性	98	7.4.1	光电导探测器的偏置与前置放 大器举例	169
§5.4	常用光伏探测器	98	7.4.2	光伏探测器的偏置与前置放大 器举例	170
5.4.1	p-n结光电二极管	99	7.4.3	热释电探测器的阻抗变换与前置 放大	174
5.4.2	PIN光电二极管	101	第八章	直接探测方法	177
5.4.3	雪崩光电二极管(APD)	103	§8.1	直接探测的基本工作原理	177
5.4.4	光电三极管	106	8.1.1	直接探测的基本物理过程	177
5.4.5	碲镉汞(HgCdTe)、碲锡铅 (PbSnTe)红外光伏探测器	112	8.1.2	直接探测系统的信噪比	178
5.4.6	碲化铟(InSb)红外光伏探测器	113	8.1.3	直接探测系统的噪声等效功率 (NEP)	179
5.4.7	其它光伏探测器	113	§8.2	接收光学系统及背景辐射	180
5.4.8	固体成像器件	120	8.2.1	接收光学系统	180
第六章	热探测器	130	8.2.2	光探测器对应的视场及背景辐射	182
§6.1	热探测器的一般原理	130	8.2.3	光探测器与光纤耦合	184
6.1.1	热探测器的热回路	130	§8.3	光探测器的内增益对直接探测 系统性能的影响	184
6.1.2	热探测器的最小可探测功率	131	§8.4	信号处理方法对直接探测系统 性能的影响	186
§6.2	热释电探测器	132	8.4.1	电子系统的带宽	187
6.2.1	热释电探测器的工作原理	132	8.4.2	强度调制的副载波直接探测系统	188
6.2.2	热释电探测器的特性	134	§8.5	直接探测方法应用举例	190
6.2.3	热释电材料	139	8.5.1	光功率测量	190
6.2.4	几种常用的热释电探测器	140	8.5.2	条形码阅读器	192
6.2.5	热释电探测器的应用	142	8.5.3	激光数码唱机	193
§6.3	测辐射热电偶和热电堆	143	§8.6	直接探测系统灵敏度的计算	196
6.3.1	测辐射热电偶的工作原理	143	8.6.1	模拟信号直接探测系统	196
6.3.2	测辐射热电偶的特性	144	8.6.2	数字信号直接探测系统	193
6.3.3	测辐射热电堆	145	第九章	光外差探测方法	205
§6.4	测辐射热计	146	§9.1	光外差探测的基本原理	205
6.4.1	热敏电阻测辐射热计的工作原理	146	9.1.1	基本原理	205
6.4.2	热敏电阻测辐射热计的特性	148	9.1.2	光外差探测的信噪比和噪声等效 功率	208
§6.5	其它类型的热探测器	151	§9.2	光外差探测的空间条件和频 率条件	216
第七章	光探测器的偏置与放大	153	9.2.1	光外差探测的空间条件	216
§7.1	放大器噪声	153	9.2.2	用聚焦透镜降低空间准直要求	218
7.1.1	放大器 E_n - I_n 噪声模型	153	9.2.3	光外差探测的频率条件	219
7.1.2	放大器噪声系数	154	§9.3	光零差探测	220
7.1.3	最佳源电阻 R_{opt}	156	9.3.1	光零差探测的基本原理	220
7.1.4	电阻温度与噪声	156			
7.1.5	晶体管的噪声特性	157			
§7.2	光探测器的偏置	160			
7.2.1	光探测器常用偏置电路	160			
7.2.2	光伏探测器常用偏置电路	161			
7.2.3	光电导探测器常用偏置电路	162			
7.2.4	其它光探测器的偏置电路	163			
§7.3	光探测器的前置放大器	164			

9.3.2 光零差探测的信噪比和噪声等效功率	220	10.4.1 取样积分器的工作原理	248
§9.4 三频光外差探测	221	10.4.2 取样积分器的主要参数	252
9.4.1 三频光外差探测的基本原理	221	10.4.3 多通道取样平均	254
9.4.2 三频光外差探测的信噪比和最小可探测功率	223	§10.5 光子计数器	255
§9.5 光通道对光外差探测的影响	224	10.5.1 光子计数方法	255
9.5.1 大气湍流对光外差探测的影响	224	1.5.2 光子计数器的工作原理	257
9.5.2 信号光偏振态起伏对光外差探测的影响	226	§10.6 光学多道分析仪	258
§9.6 光外差探测技术的应用	227	10.6.1 并行检测器	258
9.6.1 CO ₂ 激光外差通信系统	227	10.6.2 光多道分析仪(OMA)	261
9.6.2 激光雷达	230	10.6.3 光多道分析仪的应用	261
9.6.3 相干光纤通信系统	232	第十一章 应用	264
9.6.4 相位型光纤传感器	234	§11.1 基本探测电路	264
第十章 微弱信号检测技术	237	11.1.1 光电开关电路	264
§10.1 探测系统的实际灵敏度及等效噪声带宽	237	11.1.2 恒定光探测电路	265
§10.2 相关检测原理	239	11.1.3 调制光探测电路	266
10.2.1 相关函数	239	11.1.4 光电三极管的逻辑电路	267
10.2.2 相关检测	241	11.1.5 光电二极管比较电路	267
§10.3 锁定放大器	244	§11.2 应用举例	268
10.3.1 锁定放大器的工作原理	244	11.2.1 高速光纤通信系统	268
10.3.2 锁定放大器的主要参数	246	11.2.2 光电测距仪	270
§10.4 取样积分器	247	11.2.3 表面光洁度的相关检测	271
		11.2.4 二维温度分布的测定	273
		11.2.5 红外成像雷达	274
		11.2.6 光电开关	275
		11.2.7 入侵报警器	277

绪 论

光电子技术是一门发展迅速的新学科，其所属分支——激光与红外等新技术已在工业生产、军事、通信技术和空间技术等领域得到愈来愈广泛的应用。在这些领域中，几乎都涉及到把光辐射转换成易于测量和处理的电学量的问题，亦即光辐射的探测问题。用于探测光辐射的器件通常称之为光探测器。

光辐射探测技术是光电子技术的一个重要组成部分。在过去几十年的时间里，人们在光辐射探测技术方面做了大量工作。其中最为突出的成就是在半导体物理学、固体物理学、光学和低温技术发展的基础上，新型相干光源及高灵敏度的光探测器已变成现实。此外，就探测方法而言，在传统的直接探测（又称为非相干探测）方法的基础上又发展了光外差探测（又称为相干探测）方法。在技术上虽然后者比前者复杂得多，在实际应用中后者不及前者广泛，但是近年来随着相干光通信、光雷达及光纤传感技术的发展，对光辐射探测系统的灵敏度要求越来越高。由于探测灵敏度极高的光外差探测方法具有明显的优越性、因而越来越受到重视。

众所周知，光辐射（包括可见光辐射和红外光辐射等）也是电磁辐射这个大家族的成员，它同样传输能量，并以光速向前传播。光探测器之所以能探测光辐射就是因为光辐射（即光频电磁波）传输能量。入射到光探测器上的光辐射使之产生光生载流子（或发射光电子）或使其本身的特性（如温度等）发生变化。前者称之为光电效应，后者称之为光热效应。

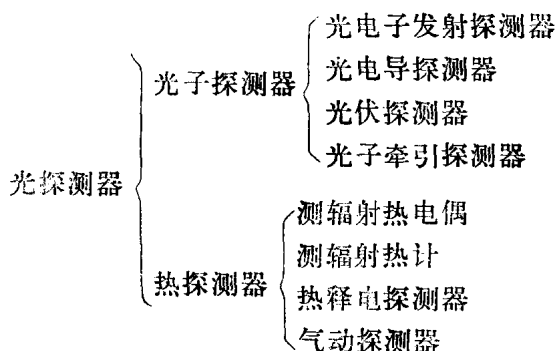
光辐射的探测过程是光探测器把光辐射转换成电学量的过程。在探测过程中，光探测器的作用是发现信号、测量信号，并为随后的应用提取某些必需的信息。近年来，激光已广泛用于通信、雷达、测距、定位、制导、遥感、工业生产和科学研究中，以传递信息、进行各种测量和控制。在这些应用中都需要将光辐射信号转换成电信号（或图像信息），光探测器是上述应用中实现光-电转换的关键元件，光探测器性能的优劣将影响整个探测系统的性能。

此外，光探测器还是现代光学仪器的重要组成部分。过去依靠人眼直接观察、瞄准的光学仪器代之以利用光探测器把光辐射信号转换成电信号以进行显示或控制。

总的来说，光电子技术主要研究相干光的产生、控制及其探测技术。第一方面的内容已在《激光原理》、《激光器件》课程中进行了详尽的讨论；第二方面的内容也已在《激光技术》课程中进行了讨论；第三方面的内容就是本书讨论的对象。

考虑到光辐射探测技术在光电子技术中的重要地位，已将《光电探测技术》列为光电子技术专业及相近专业本科生的必修课程，本教材就是为适应这一要求编写的；其次，考虑到从事光电子技术工作的需要，编者力求使本教材具有较广泛的适用性；最后，编者还考虑到本书的大多数读者是光探测器的使用者，而不是光探测器的设计和制造者，所以本书的基本内容在安排上始终围绕“探测技术”，把重点放在以下三个方面：（1）光辐射探测的基本理论；（2）光探测器的基本原理和外特性；（3）实用的光辐射探测技术。

光探测器是光辐射探测系统的核心元件。按照对光辐射响应方式的不同，或者工作原理的不同，光探测器可分为光子探测器和热探测器两大类。按照光探测器工作原理的不同，每一类光探测器又可分为许多种。现概括如下：



最早用来探测可见光辐射和红外辐射的光探测器是热探测器。其中，热电偶早在1826年就已发明出来。1880年又发明了金属薄膜测辐射热计。1946年制成了金属氧化物热敏电阻测辐射热计。1947年又发明了气动探测器。经过多年的改进和发展，这些光探测器日趋完善，性能也有了较大改进和提高。但是，与光子探测器相比，这些光探测器的探测率仍较低，时间常数也较大。从五十年代开始人们对热释电探测器进行了一系列研究工作，发现它具有许多独特的优点，因此近年来有关热释电探测器的研究工作特别活跃，发展异常迅速。热释电探测器的发展已使得热探测器这个领域大为改观，以致有人估计热释电技术将成为发展电子—光学工业的先导。当前热探测器发展的焦点集中在热释电探测器上。热释电探测器的工艺已趋成熟，材料研究与器件应用正在发展中。

应用广泛的光子探测器，除了发展最早、技术上也最成熟、响应波长从紫外到近红外的光电倍增管以外，硅和锗材料制作的光电二极管、铅锡、Ⅲ-V族化合物、锗掺杂等光探测器，目前都已达到相当成熟的阶段，其主要性能已接近理论极限。三元合金光探测器是六十年代出现的光子探测器。在十年左右的时间内， $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的低温(77K)光探测器都已接近背景噪声限。其中碲镉汞(HgCdTe)探测器正向小于 $8\mu\text{m}$ 、大于 $14\mu\text{m}$ 的波长发展，特别是室温工作的 $1\sim 3\mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的光探测器已达到相当水平。

近年来，还发展了新型负电子亲和势半导体光电阴极。这种新型光电阴极的量子效率高达30%，具有较高的灵敏度，光谱响应扩展到近红外区。

1970年以后又出现了一种利用光子牵引效应制成的光子牵引探测器。其主要用于 CO_2 激光的探测。已用锗、砷化镓、碲等材料做出了光子牵引探测器。这种光探测器的响应率和探测率都较低，因此不适于探测来自室温目标或等离子体的散射光，但其具有响应快、能承受大功率光脉冲、室温工作、不需外加电源等优点，在窄光脉冲的测量方面非常有用。

由多元系材料制成的光子探测器除上面已提及的三元合金探测器以外，特别值得一提的是新近发展起来的InGaAs光探测器。这种光探测器正好与光纤的最低色散点($\sim 1.30\mu\text{m}$)和最低损耗点($\sim 1.55\mu\text{m}$)相匹配。近年来对这种光探测器的研究工作取得了显著的进展。

八十年代中期，出现了利用掺杂的GaAs/AlGaAs材料、基于子带跃迁的新型光探测器——量子阱探测器。这种器件工作于 $8\sim 12\mu\text{m}$ 波段，工作温度为77K。由于这种器件在军事和民用中的重要性，发展非常迅速。尽管从研制成功至今仅几年时间，但其性能已达

到较高水平。其电压响应率达 10^6V/W ，比探测率 D^* 达 $6.0 \times 10^{10}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

随着激光与红外技术的发展，在许多情况下单个光探测器已不能满足探测系统的需要，从而推动了阵列（线阵和面阵）光探测器的发展。另一方面，光探测器材料性能的改进和制造工艺的不断完善，又为阵列光探测器的发展提供了可能。

目前，光探测器的另一个发展方向是集成化，即把光探测器、FET（场效应管）等元件置于同一基片上。这可大大缩小体积、改善性能、降低成本、提高稳定性并便于装配到系统中去。

电荷耦合器件（CCD）也是近年来研究的一个重要方面，其性能已达到相当高的水平。将光探测器阵列与CCD器件结合起来，可实现信息的传输。该器件已应用到热成像等领域。

第一章 光探测器的物理基础

光探测器是一种用来探测光辐射的器件。它通过把光辐射转换成易于测量的电学量来实现对光辐射的探测。它是光探测系统的重要组成部分。为了深入研究光辐射的探测过程以及对光探测系统的性能进行正确的分析,了解光探测器赖以工作的物理效应、光—电转换的基本规律和光探测器的特性参数是必要的。下面先介绍光辐射与物质的相互作用所产生的光电效应和光热效应,然后介绍光—电转换的基本规律和光探测器的特性参数。

§ 1.1 光电效应和光热效应

1.1.1 光电效应

当光辐射入射到光电材料上时,光电材料发射电子或者其电导率发生变化,或者产生感生电动势,这种现象统称为光电效应。光电效应实质上是入射光辐射与物质中束缚于晶格的电子或自由电子的相互作用所引起的。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。在光辐射作用下,光电材料电导率发生变化,或产生感生电动势的现象称为内光电效应。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。在光辐射作用下,光电材料发射电子的现象称为外光电效应,又称为光电子发射效应。

在光电效应中,光子直接与物质中的电子相互作用。物质吸收光子以后,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,亦即与入射光辐射的波长有关,所以光电效应是一种波长选择性物理效应。

本节着重介绍在光电探测技术中获得广泛应用的光电导效应、光伏效应和光电子发射效应。

一、光电导效应

半导体中有两类传导电流的载流子,即导带中的电子和价带中的空穴。它们统称为自由载流子。半导体的导电性能与其中的自由载流子的浓度有关。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,由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又不断减少。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”。如果半导体受到光辐射的照射,则入射光子将激发出新的载流子,使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光生载流子从而使半导体的电导率发生变化的现象称为光电导效应。

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。

现在考虑如图1-1所示的半导体样品。对于本征半导体,在无光辐射入射时,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，在本征半导体中 $n_0 = p_0$ ； μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率，电子和空穴的迁移率分别定义为电子的漂移速率 v_n 及空穴的漂移速率 v_p 与电场强度 E 之比，即单位电场作用下电子或空穴的运动速度

$$\mu_n = \frac{v_n}{E} = \frac{v_n L}{V} \quad (1.1.2)$$

$$\mu_p = \frac{v_p}{E} = \frac{v_p L}{V} \quad (1.1.3)$$

式中 V 是外加电压； L 是加电压方向半导体样品的长度。 σ_0 通常又称为半导体材料的暗电导率。由于样品的暗电阻 $R_0 = \frac{1}{\sigma_0} \frac{L}{A}$ ，所以半导体的暗电导 $g_0 = \sigma_0 A/L$ ，其中 A 是半导体样品的横截面积。

当光辐射入射到半导体样品上时，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，这就使半导体中的载流子浓度在原来的热平衡值上增加 Δn 和 Δp ， Δn 和 Δp 使半导体的电导率有一个增量 $\Delta\sigma$ ， $\Delta\sigma$ 可表示为

$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (1.1.4)$$

显然， Δn 和 Δp 使半导体的电导有一增量

$$\Delta g = \Delta\sigma A/L \quad (1.1.5)$$

通常我们称 Δg 为半导体的光电导。由式(1.1.4)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。

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（亦称带隙） E_g 一样大，因此要求

$$h\nu \geq E_g \quad (1.1.6)$$

或者

$$hc/\lambda \geq E_g \quad (1.1.7)$$

式中 ν 是入射光辐射的频率， λ 是入射光辐射的波长， c 是光速， h 是普朗克常数。由式(1.1.7)可写出本征半导体光电导的长波极限波长（或截止波长） λ_0 为

$$\lambda_0 = hc/E_g \quad (1.1.8)$$

或者

$$\lambda_0 (\mu\text{m}) = 1.24/E_g (\text{eV}) \quad (1.1.9)$$

波长大于 λ_0 的光辐射不能产生本征光电导效应。上式表明，本征半导体的带隙 E_g 越小，则 λ_0 越长。这就告诉我们，可以选择 E_g 值不同的半导体材料来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辐射激发非本征半导体中杂质能级上的束缚态电子（n型半导体，其 $n_0 \gg p_0$ ）或空穴（p型半导体，其 $p_0 \gg n_0$ ）而产生光生载流子，使其电导率发生变化。这种现象称为非本征（杂质）光电导效应。在入射光辐射作用下非本征半导体电导率的增量可表示为

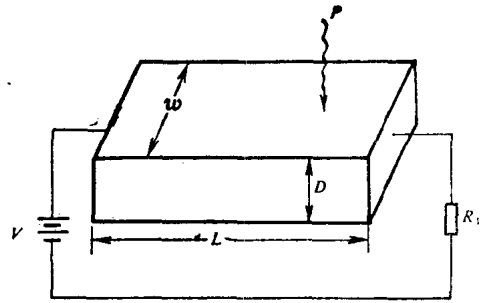


图 1-1 光电导原理图

$$\Delta\sigma_n = e(\Delta n\mu_n) \quad (\text{n型}) \quad (1.1.10)$$

$$\Delta\sigma_p = e(\Delta p\mu_p) \quad (\text{p型}) \quad (1.1.11)$$

所以非本征光电导为

$$\Delta g_n = \Delta\sigma_n A/L \quad (\text{n型}) \quad (1.1.12)$$

$$\Delta g_p = \Delta\sigma_p A/L \quad (\text{p型}) \quad (1.1.13)$$

在图1-2中示出了本征和非本征光电导过程。

非本征光电导的长波极限波长为

$$\lambda_0 = hc/E_i \quad (1.1.14)$$

或 $\lambda_0(\mu\text{m}) = 1.24/E_i(\text{eV}) \quad (1.1.15)$

式中 E_i 是杂质电离能。通常 E_i 远小于带隙 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，因而易受热激发影响，只有在极低温下才能保持较低的暗电导。

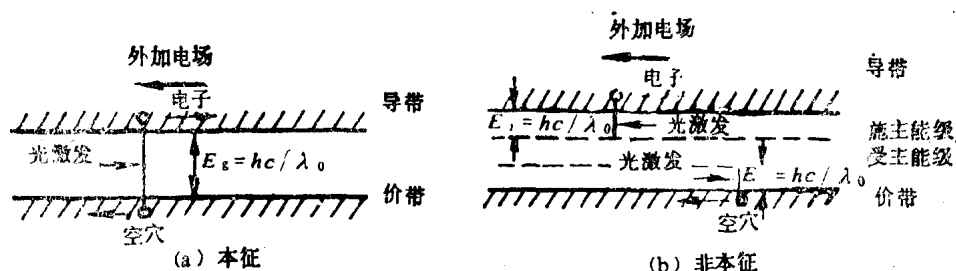


图 1-2 本征和非本征光电导过程

光辐射入射到本征或非本征半导体材料上，开始时随着时间的增加光生载流子逐渐增多，经过一定时间后，载流子浓度才逐渐趋于一稳定值。此后，若突然遮断入射的光辐射，光生载流子并不立即下降至照射前的水平，而是经过一定时间才趋于照射前的水平。这种现象称为光电导的弛豫现象。光辐射入射到本征或非本征半导体材料上，建立稳定的光生载流子浓度所需要的时间或停止照射后光生载流子浓度下降到照射前的水平所需要的时间称为光电导的弛豫时间或时间常数，可以证明，对于无“陷阱”存在的本征半导体，其时间常数与载流子寿命相等。弛豫时间的长短反映了光电导惰性的。在某些应用中要求光电导的惰性应尽量小，否则光电导就跟不上入射光辐射的变化。图1-3示出了本征光电导上升和下降的弛豫过程。

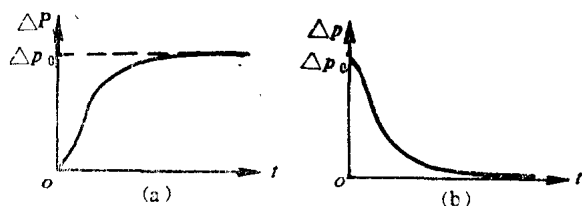


图 1-3 本征光电导上升和下降的弛豫过程

二、光生伏特效应

与光电导效应不同，光生伏特（简称光伏）效应具有由“内建电场”形成的内部势垒将电子和空穴分开。这个内部势垒可以是不同类型的半导体（n型或p型）接触形成的p-n结、p-i-n结、金属和半导体接触形成的肖特基势垒以及异质结势垒等。目前应用最多、最重

要的光伏效应是半导体p-n结中的光伏效应。下面以p-n结中的光伏效应为例来说明光伏效应的机理。

所谓p-n结，是对一种半导体材料掺入不同导电类型的杂质而形成p型和n型半导体面接触的结构。我们设想在p型半导体和n型半导体未接触之前，p区内受主杂质全部电离，空穴浓度远大于电子浓度。同样，在n区施主杂质全部电离、电子浓度远大于空穴浓度。

p区和n区接触以后，因为p区空穴浓度远大于n区空穴浓度，而n区电子浓度远大于p区电子浓度，因此便发生空穴从p区向n区扩散，电子从n区向p区扩散。扩散的结果使p区和n区交界面的n区一侧缺少自由电子，只剩下带正电的电离施主。p区一侧缺少自由空穴，只剩下带负电的电离受主。如图1-4所示。这两类杂质离子构成一偶极层，从而产生一个从n区指向p区的电场，这个电场一般称为“内建电场”（或“内部势垒”）。但在交界面以外的区域则仍然与接触之前一样保持电中性。这个电场的方向正好驱使p区的电子向n区漂移，n区的空穴向p区漂移，也就是说载流子的漂移运动方向正好与其扩散运动的方向相反。扩散的电子和空穴愈多，所产生的“内建电场”就愈强，受该电场作用的反方向运动的电子和空穴也就愈多。最后达到平衡状态。这时多数载流子（p区的空穴和n区的电子）的扩散作用与少数载流子（p区的电子和n区的空穴）由于内建电场的漂移作用相抵消，流过p-n结的净电流为零，p-n结两端电压为零。此称零偏状态。如果将p-n结正向偏置，即p区接电源正极，n区接电源负极，所加电压为V，如图1-5所示，p-n结势垒由 eV_D 下降为 $eV_D - eV$ ，漂移电流就相应减小，而扩散电流与平衡时一样大，因此流

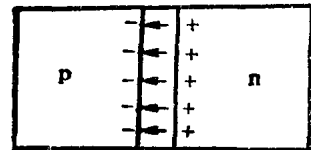


图 1-4 p-n结中的内建电场

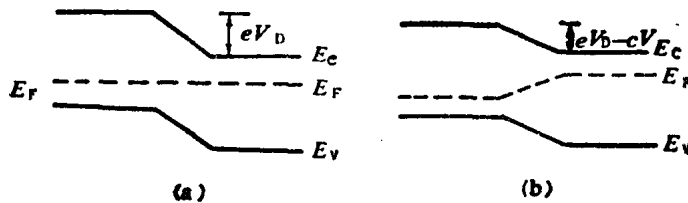


图 1-5 p-n结的能带结构

过p-n结的扩散电流大于漂移电流，这样，就有较大的正向净电流流过p-n结。如果p-n结反向偏置，即p区接电源负极，n区接电源正极，则p-n结势垒变成 $e[V_D - (-V)]$ ，结果漂移电流超过扩散电流，从而有较小的净电流通过p-n结。不过这个净电流与正向偏置时正向电流方向相反。这个电流在反向击穿前几乎不随外加电压的变化而变化，故称其为反向饱和电流。通过p-n结的电流与p-n结上电压的关系示于图1-6中的曲线1，并可表示为

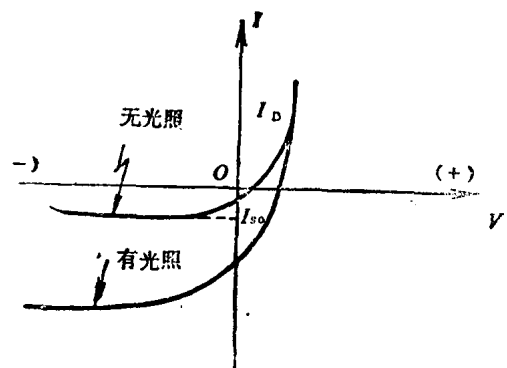


图 1-6 p-n结的I-V曲线

$$I_+ = I_{s0} [e^{eV/kT} - 1] \quad (1.1.16)$$

式中 I_{s0} 是反向饱和电流， V 是偏置电压， k 是玻耳兹曼常， T 是绝对温度。

在零偏置条件下，假定光辐射入射到p-n结的p区表面，如果入射光子的能量 $h\nu$ 大于或等于半导体材料的带隙 E_g ，则在p区内将激发出电子-空穴对。由于p区的多数载流子是空穴，在热平衡时空穴浓度较大，因此光生空穴对p区空穴浓度影响很小。而光生电子对p区的电子浓度影响很大，从p区表面到p区内部形成电子浓度梯度，引起电子从表面向内部扩散。到达p-n结区的电子立即被内建电场扫向n区。为了使在p区内产生的电子能全部被扫进n区，p区厚度应小于电子扩散长度。入射的光子也可到达n区内，在那里也会激发出电子-空穴对，其中的空穴由于扩散及内建电场的作用进入p区。所以入射光辐射所产生的电子-空穴对被内建电场分离开，空穴流入p区，电子流入n区。这样入射光辐射就引起由n区流向p区的光电流 I_p 。

电子与空穴的这一流动，使p区的电势高于n区电势，这相当于在p-n结上加一正向偏压。如图1-5所示，这个正向电压使p-n结势垒由 eV_D 降至 $eV_D - eV$ 。这个正向电压还引起电流 $I_+ = I_{s0}(e^{eV/kT} - 1)$ 流过p-n结。 I_+ 的方向正好与上述的光电流 I_p 的方向相反。所以，在入射光辐射作用下流过p-n结的总电流为

$$I = I_{s0}(e^{eV/kT} - 1) - I_p \quad (1.1.17)$$

这时p-n结的 $I-V$ 关系曲线如图1-6中的曲线2所示。

通常我们把光辐射照射无偏置的p-n结而产生光生电压的现象称为光生伏特（光伏）效应。

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寿命，当少数载流子复合掉时，光生电压就消失了。由于这个原因，基于光伏效应的光伏探测器比用相同材料制成的光电导探测器响应更快。

四、光电子发射(外光电)效应

在频率为 ν 的光辐射作用下，处于真空或其它介质中的物质吸收光子能量 $h\nu$ 后，其电子动能增加。在向表面运动的电子中有一部分电子能量较大，除在途中由于与晶格或其它电子碰撞而损失部分能量外，尚有足够的能量足以克服物质表面的逸出功 W_0 ，穿出表面进入真空或其它介质中。这种现象称为光电子发射效应或外光电效应。具有外光电效应的材料（例如金属、半导体等）称为光电子发射体。在利用外光电效应制成的光电子发射器件中，光电子发射体又叫做光电阴极。

研究发现，光电子发射服从如下基本规律：

(1) 发射的光电流(光电子数)与入射光强(或光通量)成正比，即

$$I_k = S_k \Phi \quad (1.1.18)$$

其中 S_k 是比例系数，它反映了光电子发射体对入射光的灵敏度，单位是A/W(Φ 为光强)或者A/lm(Φ 为光通量)。

(2) 入射光辐射的频率增加时，从材料表面逸出的光电子的最大动能也成比例增加，而与人射光强无关。这就是著名的爱因斯坦定律。这个定律可表示为

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = h\nu - W_0 \quad (1.1.19)$$

式中 m 是电子质量, v_m 是光电子穿出发射体表面后的速度, W_ϕ 是光电子发射体的逸出功。逸出功定义为光电子发射体内的费米能级到真空能级的能量差。

(3) 光电子发射过程包括以下几个阶段: ①电子吸收光子能量后其能量增大; ②受激电子(得到光子能量的电子)从发射体内向真空界面运动; ③电子越过发射体表面位垒向真空(或其它介质)中逸出。但是电子从吸收光子能量到逸出发射体表面的时间是很短的, 这个时间约为 10^{-12} s。

对于金属或合金来说, 费米能级 E_F 及相应的逸出功 $W_\phi = E_{\text{真空}} - E_F$ 是一个材料常数, 产生光电子发射所必需的人射光子的最小能量等于金属材料的逸出功, 即要求 $h\nu \geq W_\phi$ 或者 $hc/\lambda \geq W_\phi$ 。由此得到金属光电子发射体的长波极限为

$$\lambda_0 = hc/W_\phi \quad (1.1.20)$$

由于金属光电子发射体的逸出功在几个电子伏特量级, 因此, 金属光电子发射体只能用于制作探测可见光和紫外光的光电子发射探测器。

半导体材料广泛用作光电子发射体。由于半导体的能带结构随掺杂的数量不同而发生变化, 遂引起费米能级的位置发生变化, 因此在半导体中逸出功不再是一个常数。对于半导体来说, 材料常数是电子亲和势 E_A 。它定义为导带底的能级 E_c 与真空能级 $E_{\text{真空}}$ 之差, 即 $E_A = E_{\text{真空}} - E_c$ 。 E_A 与杂质无关。在图1-7中分别示出了金属和半导体费米能级的位置及相应的逸出功, 以供比较。在图1-7中, E_{Fn} 和 E_{Fp} 分别是n型和p型半导体的费米能级, 二者不相同, 所以二者的逸出功也不相同, 但电子亲和势相同, 即 $E_A = E_{An} = E_{Ap}$ 。

普通的半导体材料具有正的电子亲和势, 即 E_A 为正值或 $E_{\text{真空}} > E_c$ 。与金属光电子发射体一样, 为了产生光电子发射, 要求一个光子的能量足以将一个电子激发到高于表面势垒的能级。半导体光电子发射体比金属光电子发射体需要的光激发能量小, 因此半导体光电子发射体的光谱响应可扩展到近红外波段。

另一类半导体光电子发射具有负的电子亲和势。所谓负电子亲和势就是将半导体表面进行特殊处理, 使其导带底的能级 E_c 高于真空能级 $E_{\text{真空}}$ 。这时电子亲和势宛如不存在或为负值。在这种半导体内, 激发到导带的电子如果在到达激活表面前未被复合掉, 那么它就可“离开”光电子发射体。在图1-8中示出了金属光电子发射体、正电子亲和势光电子发射体及负电子亲和势光电子发射体的光电子发射过程。对于具有负电子亲和势的半导体光电子发射体, 入射光子的能量仅需等于或大于半导体的能隙就能产生光电子发射, 因此其光谱响应扩展到近红外波段。但其量子效率随波长的增加而下降。

四、光磁电效应

如图1-9所示, 将半导体样品置于磁场中, 磁场方向既与光辐射入射方向垂直, 又与

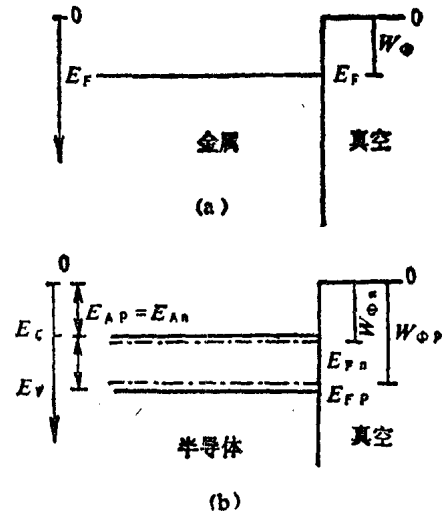


图 1-7 金属和半导体的费米能级
(a) 金属的能带结构; (b) n型和p型半导体的能带结构