

高等学校教材

光电探测技术

王清正 胡 渝 林崇杰 编

电子工业出版社

光电探测技术

王清正 胡渝 林崇杰 编

电子工业出版社

内 容 简 介

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。
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。

光电探测技术

王清正 胡 渝 林崇杰 编

责任编辑: 连潮东

电子工业出版社出版 (北京海淀区万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
山东电子工业印刷厂印刷
(山东淄博周村)

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13.25 字数: 399千字
1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷
印数: 1—2000册 定价: 2.70元

ISBN 7-5053-0454-2/TN·153

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、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，有关出版社紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续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“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形式的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映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。广大编审者、各编审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、出版工作还会有缺点和不足之处，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

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990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征稿,推荐出版,责任编辑兰信钜。

本教材由成都电讯工程学院担任主编,清华大学彭江得担任主审。

本课程的参考学时数为60~80学时。全书共分十章。第一章为光探测器物理基础,介绍光电效应、热效应、光-电转换定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-电转换定律的统计理论、光探测器中的热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声、温度噪声和电流噪声;第三、四、五章为光子探测器,分别介绍光电子发射、光电导及光伏探测器;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,介绍偏置与放大电路的设计原则,光电导及光伏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、系统性能及系统举例;第九章为光外差探测方法,介绍光外差探测的基本原理、系统性能及应用;第十章为微弱信号检测技术,介绍相关检测原理、锁定放大器、取样积分器及单光子计数器。具有半导体物理、统计物理学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、六、九章,胡渝编写第二、四、五、十章,林崇杰编写第三、八章,第七章由林崇杰、胡渝合编,王清正统编全稿。对于主审特别认真、负责地审稿,为本书修改提出许多宝贵意见,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。

作者

1982年2月于成都

目 录

绪 论	(1)	3.1.3 实用光电阴极	(46)
第一章 光探测器的物理基础	(4)	3.1.4 负电子亲和势(NEA)光电阴极	(47)
§ 1.1 光电效应和热效应	(4)	§ 3.2 光电二极管	(48)
1.1.1 光电效应	(4)	3.2.1 真空光电二极管	(48)
1.1.2 热效应	(9)	3.2.2 充气光电二极管	(49)
§ 1.2 光-电转换的基本规律	(12)	§ 3.3 光电倍增管	(49)
1.2.1 光-电转换过程的简单描述	(13)	3.3.1 光电倍增管的工作原理	(49)
1.2.2 光-电转换过程的半经典理论	(13)	3.3.2 倍增极	(53)
1.2.3 探测方式	(17)	3.3.3 光电倍增管的基本特性	(54)
§ 1.3 光探测器的特性参数	(17)	3.3.4 光电倍增管的供电电路	(57)
第二章 光电子计数统计与光探测器噪声	(24)	§ 3.4 应用举例	(60)
§ 2.1 光电子计数统计	(24)	3.4.1 闪烁计数器电路	(60)
2.1.1 光电子计数统计特性	(24)	3.4.2 薄膜测量电路	(61)
2.1.2 光电子计数变量K的数字特征	(26)	3.4.3 光电显微镜变换电路	(61)
2.1.3 量子效率 η	(27)	第四章 光电导探测器	(63)
2.1.4 单色点探测	(27)	§ 4.1 单晶光电导探测器的工作原理	(63)
§ 2.2 光电变换过程的统计分析	(28)	4.1.1 光电导探测器的光电流	(63)
2.2.1 光电探测输出过程——散粒噪声过程	(28)	4.1.2 光电导探测器的等效电路	(65)
2.2.2 理想光探测器的输出光电流及噪声	(31)	§ 4.2 光电导探测器的噪声	(66)
§ 2.3 噪声的性质及其谱密度	(32)	§ 4.3 光电导探测器的性能参数	(67)
2.3.1 噪声的统计特性	(33)	4.3.1 响应率	(67)
2.3.2 噪声功率谱密度	(33)	4.3.2 光谱特性	(67)
2.3.3 噪声相关性	(35)	4.3.3 探测率	(68)
§ 2.4 光探测器噪声	(36)	4.3.4 温度特性	(69)
2.4.1 散粒噪声	(36)	4.3.5 频率响应及响应时间	(69)
2.4.2 热噪声	(37)	§ 4.4 实用光电导探测器	(70)
2.4.3 产生-复合噪声	(39)	4.4.1 单晶光电导探测器	(71)
2.4.4 温度噪声	(40)	4.4.2 多晶光电导探测器	(75)
2.4.5 电流噪声($1/f$ 噪声)	(41)	第五章 光伏探测器	(79)
第三章 光电子发射探测器	(43)	§ 5.1 光伏探测器的工作原理	(79)
§ 3.1 光电子发射	(43)	5.1.1 光照下理想 p-n 结方程及特性曲线	(79)
3.1.1 金属的光电子发射	(43)	5.1.2 光伏探测器的等效电路	(80)
3.1.2 半导体的光电子发射	(44)	§ 5.2 光伏探测器的噪声	(81)
		§ 5.3 光伏探测器的性能参数	(82)
		5.3.1 响应率	(82)
		5.3.2 探测率	(83)

5.3.3	光谱特性	(83)	7.3.3	光探测器几种典型的前置放大器	(132)
5.3.4	频率响应及响应时间	(84)	§ 7.4	常用光探测器偏置与放大举例	(134)
5.3.5	温度特性	(85)	7.4.1	光电导探测器偏置与放大	(134)
§ 5.4	常用光伏探测器	(85)	7.4.2	光伏探测器偏置与放大	(135)
5.4.1	光电池	(86)	7.4.3	热释电探测器阻抗变换与放大	(136)
5.4.2	光电二极管	(88)	第八章	直接探测方法	(138)
5.4.3	PIN 光电二极管	(90)	§ 8.1	直接探测的基本原理	(138)
5.4.4	雪崩光电二极管(APD)	(92)	8.1.1	光探测器的平方律特性	(138)
5.4.5	光电三极管	(95)	8.1.2	直接探测系统的信噪比	(139)
5.4.6	碲镉汞、碲锡铅红外光伏探测器	(97)	8.1.3	直接探测系统的 NEP	(140)
5.4.7	红外电荷耦合器件(CCD)	(98)	§ 8.2	光探测器的内增益对直接探测系统性能的影响	(141)
5.4.8	其它光伏探测器	(101)	§ 8.3	强度调制的副载波直接探测系统	(143)
第六章	热探测器	(105)	8.3.1	AM/IM 系统	(144)
§ 6.1	热探测器的一般原理	(105)	8.3.2	FM/IM 系统	(145)
6.1.1	热探测器的热回路	(105)	§ 8.4	直接探测系统	(146)
6.1.2	热探测器的最小可探测功率	(106)	8.4.1	模拟信号直接探测系统	(146)
§ 6.2	热释电探测器	(107)	8.4.2	数字信号直接探测系统	(149)
6.2.1	热释电探测器的工作原理	(107)	第九章	光外差探测方法	(154)
6.2.2	热释电探测器的特性	(108)	§ 9.1	光外差探测的基本原理	(154)
6.2.3	几种常用的热释电探测器	(111)	9.1.1	基本原理	(154)
6.2.4	热释电探测器的应用	(113)	9.1.2	光外差探测的信噪比和噪声等效功率 NEP	(157)
§ 6.3	测辐射热电偶和热电堆	(113)	§ 9.2	光外差探测的空间条件和频率条件	(162)
6.3.1	测辐射热电偶的工作原理	(113)	9.2.1	光外差探测的空间条件	(162)
6.3.2	测辐射热电偶的特性	(114)	9.2.2	用聚焦透镜降低空间准直要求	(164)
6.3.3	测辐射热电堆	(116)	9.2.3	光外差探测的频率条件	(165)
§ 6.4	测辐射热计	(116)	§ 9.3	光零差探测	(166)
6.4.1	热敏电阻测辐射热计的工作原理	(116)	9.3.1	光零差探测的基本原理	(166)
6.4.2	敏热电阻测辐射热计的特性	(119)	9.3.2	光零差探测的信噪比和最小可探测功率	(166)
§ 6.5	其它类型的热探测器	(122)	§ 9.4	三频光外差探测	(167)
第七章	光探测器的偏置与放大	(124)	9.4.1	三频光外差探测的基本原理	(168)
§ 7.1	放大器噪声	(124)	9.4.2	三频光外差探测的信噪比和最小可探测功率	(169)
7.1.1	放大器 E_n - I_n 噪声模型	(124)	§ 9.5	光通道对光外差探测的影响	(171)
7.1.2	放大器噪声系数	(125)	9.5.1	大气湍流对光外差探测的影响	(171)
7.1.3	最佳源电阻 R_{opt}	(127)	9.5.2	信号光与本振光的偏振匹配	(172)
§ 7.2	光探测器的偏置	(127)			
7.2.1	光探测器的偏置	(128)			
7.2.2	几种常用的偏置电路	(128)			
§ 7.3	光探测器的前置放大器	(131)			
7.3.1	光探测器前置放大器特点	(131)			
7.3.2	前置放大器的设计原则和步骤	(131)			

§ 9.6 光外差探测技术的应用.....	(174)
9.6.1 CO ₂ 激光外差通信系统.....	(174)
9.6.2 外差探测激光雷达.....	(176)
9.6.3 相干光纤通信系统.....	(178)
9.6.4 相位型光纤传感器.....	(181)
第十章 微弱信号检测技术.....	(183)
§ 10.1 探测系统的实际灵敏度及等效 噪声带宽.....	(183)
§ 10.2 相关检测原理.....	(185)
10.2.1 相关函数.....	(185)
10.2.2 相关检测.....	(187)
§ 10.3 锁定放大器.....	(189)

10.3.1 锁定放大器的工作原理.....	(190)
10.3.2 锁定放大器主要参数.....	(191)
§ 10.4 取样积分器.....	(193)
10.4.1 取样积分器的工作原理.....	(193)
10.4.2 取样积分器的主要参数.....	(197)
§ 10.5 单光子计数器.....	(200)
10.5.1 光电倍增管的输出信号及噪声 电平谱.....	(200)
10.5.2 光子计数器的工作原理	(201)

参考文献.....	(204)
------------------	--------------

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,已在国防、空间技术、工农业生产和医疗等领域得到愈来愈广泛的应用。在这些领域中,几乎都涉及到把光信号转换成电信号的问题,亦即光辐射的探测问题。

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,在光辐射探测领域进行了大量工作。其中最为突击的成就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变成现实。此外,就探测方法而言,在传统的直接探测(又称非相干探测)的基础上又发展了光外差探测(又称相干探测)方法。虽然在技术上后者比前者复杂得多,其实际应用不及前者广泛,但近年来,随着相干光通信及光纤传感等技术的发展,对光探测系统灵敏度的要求越来越高。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(包括可见和红外辐射)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)发生变化。

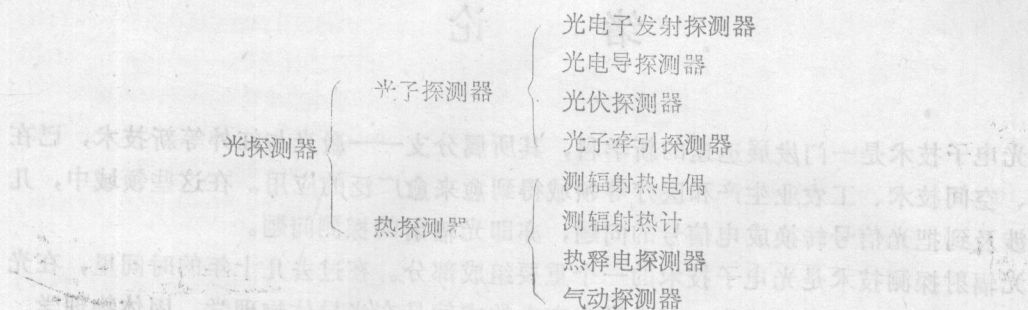
光辐射的探测过程是把光信号通过光探测器转换成电信号的过程。在探测过程中,光探测器的作用是发现信号、测量信号,并为随后的应用提取某些必需的信息。近年来,激光已广泛用于测距、通信、定位、制导、遥感、工农业生产和科学研究中以进行各种测量和控制。在这些应用中都需要将光信号转换成电信号(或图像信息),光探测器是上述应用中实现光-电转换的关键元件,光探测器性能的优劣对整个探测系统的性能影响很大。例如,在光通信系统中,一般总是希望有尽可能大的通信容量和长的传输距离,在调制带宽允许的情况下,系统的灵敏度主要取决于光探测器的灵敏度。

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专业的重要地位,《光电探测技术》已列为该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;再者,考虑到目前还缺少适合广大从事光电子技术工作的工程技术人员需要的有关光辐射探测技术方面的参考书,因此编者力求使这本教材具有较广泛的适用性;同时,还考虑到读者的大多数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围绕“探测技术”,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关键元件。按照对光辐射响应方式的不同，或者工作机理的不同，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，每一类探测器又可分为许多种。现概括如下：



最后简要介绍一下光探测器的发展。

最早用来探测可见光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。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，这些探测器日趋完善，性能也有了较大改进和提高。但是，这些探测器的探测率仍较低，时间常数也较大。从50年代开始对热释电探测器进行了一系列的研究，发现它具有许多独特的优点，因而近年来这方面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，除发展最早、技术上最成熟、响应波长从近紫外到近红外的光电倍增管以外，硅和锗光电二极管、铅盐、Ⅲ-V族化合物、锗掺杂等器件，目前都已达到相当成熟的阶段，主要性能已接近理论极限。三元合金探测器是60年代出现的光子探测器。在十年左右的时间， $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的低温(77K)探测器都已接近背景限。其中碲镉汞探测器正向小于 $8\mu\text{m}$ 、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 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的探测器目前已达到相当水平。

近年来，还发展了新型负电子亲和势半导体光电阴极。这种新型光电阴极量子效率高，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、能承受大功率脉冲、室温工作、不需外加电源等优点，在短光脉冲的测量等方面是非常有用的。

由多元系材料制成的光子探测器除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。近年来对这种探测器的研究工作取得了明显进展。在 $1.30\mu\text{m}$ 处，这种探测器的量子效率高达50%以上，暗电流仅 $10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2$ 量级。但是这类探测器要达到Si-APD那样性能完善的水平，并付诸实际使用，还必须解决许多难

题。

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系统的要求，从而推动了阵列探测器的发展。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体化，即将探测器、FET 等元件置于同一基片上。这可大大缩小体积、改进性能、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。该器件已用于热成像系统等领域。将光探测器阵列与 CCD 结合起来，可实现信息传输。

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(本书中泛指可见光和红外辐射)的器件。它通过把光辐射转换成易于测量的电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计算,首先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。

§ 1.1 光电效应和热效应

光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效应。下面分别介绍这两类效应。

1.1.1 光电效应

当光辐射入射到光电材料上时,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的现象统称为光电效应。光电效应实质上是入射光与物质中束缚于晶格的电子或自由电子的相互作用。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。

本节着重介绍在光探测技术中获得广泛应用的光电导、光伏和光电子发射效应。

一、光电导效应

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”。如果半导体材料受到光照,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。

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,并定义为

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (1.1)$$

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。

当光入射到半导体材料上时, 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

$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (1.2)$$

称为光电导。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。由上式可知, 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。

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浓度所需要的时间或停

止光照后光生载流子浓度下降到零所需要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。在某些应用中要求光电导的惰性尽量小, 否则光电导就跟不上光信号的变化。图1-1示出了本征光电导上升和下降的弛豫过程。

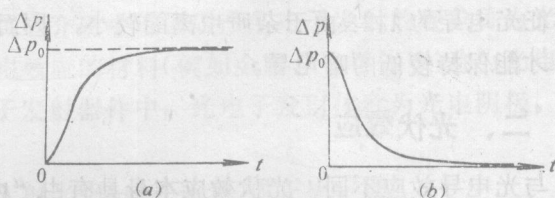


图1-1 本征光电导上升和下降的弛豫过程

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

$$h\nu \geq E_g \quad (1.3)$$

或者

$$hc/\lambda \geq E_g \quad (1.4)$$

式中, ν 是入射光频率, λ 是光的波长, c 是光速, h 是普朗克常数。由式(1.4)可写出本征光电导的长波极限波长(或截止波长) λ_0 为

$$\lambda_0 = hc/E_g \quad (1.5)$$

或者

$$\lambda_0 (\mu\text{m}) = 1.24/E_g (\text{eV}) \quad (1.6)$$

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, 这种现象称为非本征(杂质)光电导效应。在入射光作用下非本征半导体电导率的增量可表示为

$$\Delta\sigma_n = e(\Delta n\mu_n) \quad (\text{n型}) \quad (1.7)$$

$$\Delta\sigma_p = e(\Delta p\mu_p) \quad (\text{p型}) \quad (1.8)$$

与本征光电导一样, 非本征光电导也存在着弛豫现象。

在图1-2中示出了本征和非本征光电导过程。

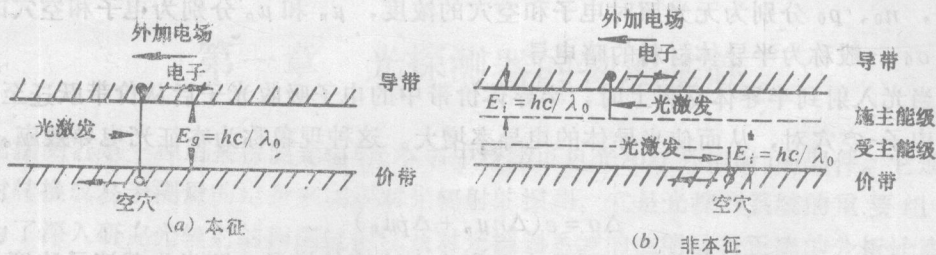


图1-2 本征和非本征光电导过程

非本征光电导的长波限为

$$\lambda_0 = hc/E_i \quad (1.9)$$

$$\text{或} \quad \lambda_0 (\mu\text{m}) = 1.24/E_i (\text{eV}) \quad (1.10)$$

式中， E_i 为杂质电离能。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。只有在极低温下，才能保持较低的暗电导。

二、光伏效应

与光电导效应不同，光伏效应本身具有由“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。下面以p-n结中的光伏效应为例来说明光伏效应的机理。

众所周知，在半导体p-n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p-n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区的扩散。扩散的结果使p区带负电，n区带正电。如图1-3所示，这些聚集在p-n结附近的正、负电荷便形成了从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”）。“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p-n结处于平衡状态。

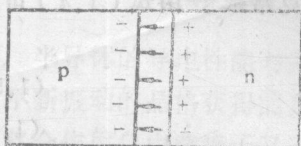


图1-3 p-n结中的“内建电场”

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。结两边的光生少数载流子在结区电场作用下向相反方向运动，p区的电子穿过p-n结进入n区，n区的空穴进入p区。如果p-n结处于开路状态，这些光生电子及光生空穴就积累在p-n结附近，使p区获得附加的正电荷，n区获得附加的负电荷。结果使p区电势升高，n区电势降低，于是在p-n结两端形成了光生电动势，这种光照无偏置的p-n结产生光生电动势的现象称为光生伏特效应或简称为光伏(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p-n结内部形成自n区向p区的光生电流 I_p 。同时，由于光照使p-n结两端产生光生电动势，相当于在p-n结两端加正向电压 V ，如图1-4所示，使p-n结势垒由 eV_D 降为 $eV_D - eV$ 。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，这个正向电流可表示为

$$I_+ = I_s(e^{eV/RT} - 1) \quad (1.11)$$

式中， I_s 为 p-n 结反向饱和电流， k 为玻耳兹曼常数， T 为绝对温度， V 为光生电压。 I_+ 的方向为由 p 区流向 n 区。

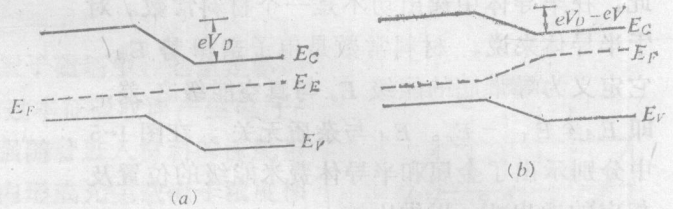


图1-4 光照前、后 p-n 结能带结构

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成的光电导探测器响应更快。

三、光电子发射(外光电)效应

在入射光的作用下，处于真空或其它介质中的物质产生电子发射的现象称为光电子发射效应或者外光电效应。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，光电子发射体称为光电阴极。光电子发射服从如下的基本规律：

(1) 发射的光电流(光电子数)与入射光强(或光通量)成正比，即

$$I_K = S_K \phi \quad (1.12)$$

式中， S_K 为比例系数，它反映了光电子发射体对入射光的灵敏度，单位为 A/W (ϕ 为光强)或者 A/lm (ϕ 为光通量)。

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

$$\frac{1}{2} m v_m^2 = h\nu - W_\phi \quad (1.13)$$

式中， m 是电子质量， v_m 是光电子的最大初速度， W_ϕ 是光电子发射体的逸出功。逸出功定义为电子发射体内部费米能级到真空能级的能量差。

(3) 光电子发射过程包括：① 电子吸收光子后能量增大；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(或气体)中逸出等三个过程。但是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 10^{-12} s。

对于任何金属或合金而言，费米能级 E_F 及相应的逸出功 $W_\phi = E_{vac} - E_F$ 是一个材料常数，产生光电子发射所必需的入射光子的最小能量等于金属的逸出功，即要求 $h\nu \geq W_\phi$ 或者 $hc/\lambda \geq W_\phi$ 。由此得金属光电子发射体的长波极限为

$$\lambda_0 = hc/W_\phi \quad (1.14)$$

由于金属的逸出功仅为几个电子伏特，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器件。

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是一个材料常数。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 与真空能级之差，即 $E_A = E_{c\text{真}} - E_c$ 。 E_A 与杂质无关。在图 1-5 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。

一般半导体材料具有正的电子亲和势，即 E_A 为正值或 $E_{c\text{真}} > E_c$ 。同样，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，因此其光谱响应可扩展到近红外波段。

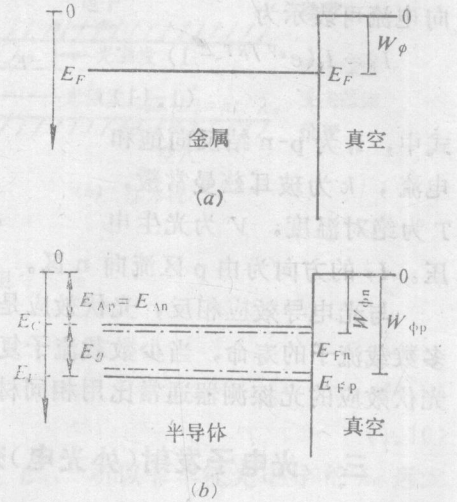


图1-5 (a) 金属的能带结构。示出了 E_F 和 W_ϕ 。(b) n 型和 p 型半导体的能带结构。 E_{Fn} 和 E_{Fp} 分别为 n 型和 p 型半导体的费米能级，二者不同，所以逸出功 $W_{\phi n}$ 和 $W_{\phi p}$ 也不同，但电子亲和势相同，即 $E_A = E_{An} = E_{Ap}$ 。

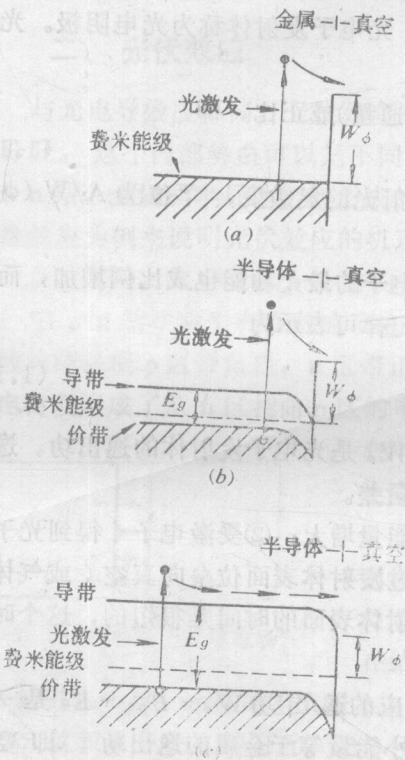


图1-6 光电子发射过程。(a) 金属光电子发射体；(b) 具有正电子亲和势的半导体光电子发射体；(c) 具有负电子亲和势的半导体光电子发射体。

另一类光电子发射体具有负电子亲和势。所谓负电子亲和势就是将半导体表面经过特殊处理，使其导带底的能级高于真空能级。这时电子亲和势宛如不存在或者为负值。因此，在这样的半导体内，激发到导带内的电子如果在到达激活表面未被复合，就可能“离开”光电子发射体。在图 1-6 中示出了金属、正电子亲和势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，入射光子的能量仅需等于或超过半导体的能隙，就能产生光电子发射，因而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。

以上着重介绍了获得广泛应用的几种光电效应，下面简单介绍一下光磁电效应和光子牵引效应。

四、光磁电效应

如图 1-7 所示, 将半导体样品置于磁场中, 能量足够的光子垂直入射到半导体样品上, 通过本征吸收而产生电子-空穴对。由于材料的吸收作用, 光强随着进入材料的深度呈指数规律下降, 所以在半导体样品内形成光生载流子浓度梯度, 于是光生载流子将从浓度大的表面向浓度小的体内扩散。在扩散过程中光生载流子切割磁力线。由于带相反电荷的电子和空穴朝相同的方向运动以及磁场产生的洛伦兹力的作用, 电子和空穴分别向样品的两端偏转, 于是在样品两端产生累积电荷, 从而建立起一个电场。这就是光磁电效应。

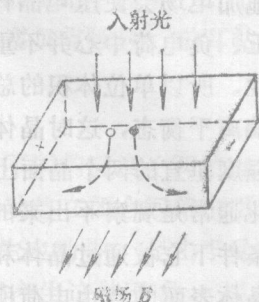


图 1-7 光磁电效应示意图

五、光子牵引效应

由于光子具有动量, 在半导体材料中传播的光子与材料中的自由载流子碰撞发生动量传递, 载流子从光子获得动量, 在坡印廷矢量方向上受到有效的推动。在开路条件下, 半导体样品内将建立一个纵向电场以阻止载流子的运动, 样品两端便产生一个电压。这种现象称为光子牵引效应。基于光子牵引效应制成的光子牵引探测器, 主要用于脉冲 CO_2 激光的探测。

1.1.2 热效应

物质的某些性质随入射光的加热作用引起的温度变化而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, 从而导致物质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决定于光功率 (或其变化速率), 而与入射光的光谱成分无关。

一、热释电效应

某些晶体(例如硫酸三甘肽、铌酸锂、铌酸锶钡等)受光照时温度升高, 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。

众所周知, 置于电场中的电介质(如晶体)会产生极化现象。电介质的极化强度以极化矢量 P 表示。其定义为

$$P = \Sigma p / \Delta V \quad (1.15)$$

式中, Σp 为电介质的总电矩, ΔV 为介质的体积。实验研究发现, 对于某些晶体, 极化矢量与外加电场 E 之间有如下关系

$$P_i = P_{0,i} + \chi_{i,j} E_j \quad (i, j = x, y, z) \quad (1.16)$$

式中 P_0 是非零的自发极化矢量, i, j 是相应于坐标轴的标记, $\chi_{i,j}$ 是极化率张量。