

光电子器件

GUANGDIANZI QIJIAN

汪贵华 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内容简介

光电子器件

汪贵华 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书着重讲授光电子探测与成像器件的基础理论和基本知识。主要内容有:半导体光电探测器、光电倍增管、微光像增强器、真空摄像管、CCD 和 CMOS 成像器件、致冷和非致冷红外成像器件、紫外成像器件、X 射线成像器件。

本书适合电子科学与技术、光电子技术、物理电子学等专业本科生作为教材使用,也可供相近专业的研究生阅读,同时可供从事光电子器件研究和从事光电子技术的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电子器件 / 汪贵华编著. —北京:国防工业出版社,
2009.1

ISBN 978 - 7 - 118 - 06035 - 5

I. 光... II. 汪... III. 光电器件 - 高等学校 - 教材
IV. TN15

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第173491号



※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18 1/4 字数 454 千字

2009年1月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前言

光电子器件是光电子技术的关键和核心部件,是现代光电技术与微电子技术的前沿研究领域,是信息技术的重要组成部分。光电子器件的范围很广,本书将主要讲授光电子探测器件和光电子成像器件。目前,光电子器件发展十分迅猛,不断采用新技术、利用新材料、研究新原理、开发新产品,各种新型器件不断涌现、器件性能不断提高。从可见光探测向微光、红外、紫外、X 射线探测的器件,其探测范围从 γ 射线至远红外甚至到亚毫米波段的广阔的光谱区域,其探测元从点探测到多点探测至二维成像器件,像元数越来越多,分辨本领越来越大。通过微光学机械电子技术的集成工艺,光电子器件的体积越来越小,集成度越来越高,各种新型固体成像器件不断被开发成功,在很多方面代替了传统的真空光电器件。随着光信息技术的需求,探测器频率响应不断被提高。本书从光电转换原理入手,详细地分析了光电探测器和光电成像器件的原理、结构、特性、应用。

光电子器件应用范围十分广阔,如家用摄像机、手机相机、夜视眼镜、微光摄像机、光电瞄具、红外探测、红外制导、红外遥感、指纹探测、导弹探测、医学检测和透视等,从军用产品扩展到民用产品,其使用领域难以胜数。

学习了本课程将较大地提高读者的理论知识和基础知识,使读者能系统全面地掌握光电探测与成像技术的精髓,提高专业水平和专业能力。本课程经过十多年的课程建设,书稿也在学校使用了多年,经多次修改才得以正式出版。希望通过本书能激励读者更好地扩展研究和学习光电技术新领域,更好地适应现代科技的发展以及社会对专业人才的需求。

本书的出版得到了江苏省教育厅的支持,特此表示感谢。该课程的信息量十分巨大,题材广泛,技术性强,涉及到大量的基础知识和理论,虽然作者经过多年的课程教授和内容补充,然而水平有限和精力限制,还有许多新的知识需要不断学习和扩充,书中难免存在错误以及不足,恳请读者给予指正,提出意见以供改进。

编者

2008 年 9 月

目 录

第1章 光电导探测器	1	(APD)	37
1.1 光电子器件的基本特性	1	2.4 光电三极管	40
1.1.1 光谱响应率和响应率	1	2.4.1 光电三极管结构和 工作原理	40
1.1.2 最小可探测辐射功率和 探测率	4	2.4.2 光电三极管的主要 性能参数	41
1.1.3 光吸收系数	5	第3章 光电阴极与光电倍增管	43
1.2 光电导探测器原理	7	3.1 光电发射过程	43
1.2.1 光电导效应	7	3.1.1 外光电效应	43
1.2.2 光电导电流	9	3.1.2 金属的光谱响应	44
1.2.3 光电导增益	10	3.1.3 半导体光电发射过程	44
1.2.4 光电导灵敏度	11	3.1.4 实用光电阴极	47
1.2.5 光电导惰性和响应 时间	11	3.2 负电子亲和势光电阴极	49
1.2.6 光电导的光谱响应 特性	13	3.2.1 负电子亲和势光电阴极的 原理	49
1.2.7 电压响应率	15	3.2.2 NEA 光电阴极中的电子 传输过程	51
1.2.8 探测率 D_A^*	17	3.2.3 NEA 阴极的量子 产额	51
1.3 光敏电阻	18	3.2.4 负电子亲和势阴极的工艺 及结构	55
1.3.1 光敏电阻的结构	18	3.3 真空光电管	56
1.3.2 光敏电阻的特性	19	3.3.1 真空光电管工作原理	57
第2章 结型光电探测器	23	3.3.2 真空光电管的主要 特性	57
2.1 光生伏特效应	23	3.4 光电倍增管	59
2.1.1 PN 结	23	3.4.1 光电倍增管结构和工作 原理	60
2.1.2 PN 结光生伏特效应	25	3.4.2 光电倍增管主要特性和 参数	63
2.2 光电池	26	3.4.3 光电倍增管的供电 电路	69
2.2.1 光电池的结构	26		
2.2.2 光电池的电流与电压	27		
2.2.3 光电池的主要特性	28		
2.3 光电二极管	31		
2.3.1 PN 结型光电二极管	31		
2.3.2 PIN 型光电二极管	35		
2.3.3 雪崩型光电二极管			

第4章 微光像增强器.....	72	第5章 摄像管	112
4.1 像管的基本原理和结构.....	72	5.1 摄像管的工作方式	112
4.1.1 光电阴极	73	5.2 摄像管的性能指标与评定	113
4.1.2 电子光学系统	73	5.2.1 摄像管的灵敏度	113
4.1.3 荧光屏	77	5.2.2 摄像管的光电转换	114
4.1.4 光学纤维面板	78	5.2.3 摄像管的分辨率	116
4.2 像管主要特性分析	79	5.2.4 摄像管的惰性	119
4.2.1 像管的光谱响应特性	79	5.2.5 摄像管的灰度	119
4.2.2 像管的增益特性	83	5.3 氧化铅光电导视像管	120
4.2.3 像管的光传递特性	85	5.3.1 氧化铅靶结构	120
4.2.4 像管的背景特性	86	5.3.2 视像管的结构	121
4.2.5 像管的传像特性	87	5.3.3 视像管的工作原理	122
4.2.6 像管的时间响应特性	88	5.3.4 氧化铅视像管特性	123
4.2.7 空间分辨特性	88	第6章 CCD和COMS成像器件	126
4.3 红外变像管	95	6.1 电荷耦合器件的基本原理	126
4.3.1 玻璃管型的红外变像管	95	6.1.1 MOS结构特征	126
4.3.2 金属型红外变像管	96	6.1.2 CCD的势阱深度和存储电荷能力	128
4.4 第一代微光像增强器	97	6.1.3 电荷耦合原理	130
4.5 微通道板	99	6.2 电荷耦合器件基本结构	130
4.5.1 通道电子倍增器	99	6.2.1 转移电极结构	131
4.5.2 微通道板的增益特性	100	6.2.2 转移信道结构	132
4.5.3 电流传递特性	101	6.2.3 通道的横向限制	134
4.5.4 微通道板的噪声	102	6.2.4 输入结构	135
4.5.5 微通道板的噪声因子	103	6.2.5 输出结构	136
4.6 第二代微光像增强器	104	6.3 CCD的主要特性	137
4.6.1 近贴式MCP像增强器	104	6.4 电荷耦合成像器件	139
4.6.2 静电聚焦式MCP像增强器	105	6.4.1 线阵电荷耦合成像器件	139
4.6.3 第二代微光像增强器的优点	106	6.4.2 面阵电荷耦合成像器件(ACCID)	141
4.6.4 第二代微光像增强器的缺点	106	6.4.3 两种面型结构成像器件的比较	142
4.7 第三代微光像增强器	107	6.4.4 扫描方式与读出转移动作	145
4.8 第四代微光像增强器	109	6.5 彩色CCD成像器件	147
		6.5.1 彩色摄像器件	148
		6.5.2 数码相机	151

6.6 CMOS 型成像器件的像素构造	152	和探测率	182
6.6.1 PN 结光电二极管方式	153	7.3.3 光子探测器的背景辐射限制	183
6.6.2 光电门 + FD 方式	154	7.3.4 IRFPA 的其他特性简述	187
6.6.3 掩埋型光电二极管 + FD 方式	155	7.4 红外成像器件与材料的制备	190
6.7 CMOS 成像器件的彩色像素	157	7.4.1 材料制备技术	190
6.8 CMOS 与 CCD 图像器件的比较	158	7.4.2 衬底的选择与制备	191
第 7 章 致冷型红外成像器件	164	7.4.3 PN 结的制作	193
7.1 SPRITE 红外探测器	164	第 8 章 微测辐射热计红外成像器件	194
7.1.1 碲镉汞的性质	164	8.1 热探测器的基本原理	194
7.1.2 SPRITE 探测器的工作原理与结构	165	8.1.1 热探测器的基本原理	194
7.1.3 SPRITE 探测器的响应率	168	8.1.2 热探测器的温度噪声限制	196
7.2 红外焦平面阵列的结构和工作原理	171	8.2 微测辐射热计的工作原理	197
7.2.1 红外探测的原理	171	8.2.1 微测辐射热计的工作模式	197
7.2.2 红外焦平面阵列的特点	172	8.2.2 微测辐射热计的工作原理	199
7.2.3 红外焦平面阵列的材料	172	8.3 微测辐射热计的结构	201
7.2.4 混合式 IRFPA 之倒装式结构	173	8.4 微测辐射热计的响应率	205
7.2.5 混合式 IRFPA 之 Z 平面结构	174	8.4.1 微测辐射热计热平衡方程	205
7.2.6 单片式阵列之 PtSi 肖特基势垒 IRFPA	175	8.4.2 无偏置的热平衡方程的解	206
7.2.7 单片式阵列之异质结探测元 IRFPA	179	8.4.3 加偏置的热平衡	207
7.2.8 单片式阵列之 MIS 像元 IRFPA	179	8.4.4 V—I 曲线的计算	208
7.2.9 准单片式阵列结构	180	8.4.5 负载线	209
7.3 IRFPA 的性能参数	180	8.4.6 带偏置的微辐射计的低频噪声	211
7.3.1 光伏型红外探测器的电压响应率	181	8.4.7 微辐射计性能的数值计算	212
7.3.2 光伏型红外探测器的噪声	182	8.5 微测辐射热计的噪声	215
		8.5.1 辐射计的电阻噪声	215
		8.5.2 偏置电阻的噪声	217
		8.5.3 热传导引起的温度噪声	218
		8.5.4 辐射噪声	218

8.5.5 整个电噪声	219	10.1.1 紫外光波段的划分	243
8.5.6 前置放大器噪声	221	10.1.2 大气对紫外光的吸收	244
8.6 微辐射计信噪比	221	10.1.3 紫外辐射源	245
8.6.1 噪声等效功率 (NEP)	221	10.2 紫外成像器件概述	246
8.6.2 噪声等效温差 (NETD)	222	10.3 紫外像增强器	247
8.6.3 探测率	222	10.4 GaN 的性质	250
8.6.4 与理想辐射计相比较	223	10.5 GaN 和 GaInN 材料的生长技术	252
8.6.5 Johnson 噪声近似	224	10.5.1 分子束外延	252
第9章 热释电探测器和成像器件	225	10.5.2 有机金属化学气相沉积	253
9.1 热释电探测器的基本原理	225	10.6 器件的制作	255
9.1.1 热释电效应	225	10.7 紫外成像器件的基本结构	256
9.1.2 热释电探测器特性分析	227	10.7.1 PIN 结构紫外探测器	257
9.2 热释电材料和探测器	231	10.7.2 金属/(Al)GaN 肖特基势垒结构	259
9.2.1 热释电材料	231	10.7.3 ITO/N-GaN 肖特基势垒结构	259
9.2.2 热释电探测器的结构形式	233	10.7.4 金属—半导体—金属 (MSM) 紫外探测器	260
9.2.3 热释电探测器的特点	234	第11章 X射线探测与成像器件	263
9.3 混合型热释电成像器件的设计	235	11.1 X射线的特性	263
9.3.1 热隔离以提高温度响应	235	11.1.1 X射线的产生	263
9.3.2 像素间热隔离以改进MTF	236	11.1.2 X射线透过和吸收特性	264
9.3.3 斩波器的结构	236	11.1.3 X射线量的表征	265
9.4 单片热释电成像器件	237	11.2 X射线探测与成像器件的分类	266
9.4.1 热释电薄膜材料	238	11.2.1 X射线成像器件的分类	266
9.4.2 隔离结构	238	11.2.2 X射线计算机断层扫描技术	269
9.4.3 微机械加工传感器的制作流程设计	238	11.3 X射线成像器件系统的性能指标	269
9.4.4 热释电成像器件的集成电路	240	11.4 CsI/MCP 反射式 X 射线光电阴极	271
第10章 紫外探测与成像器件	243	11.4.1 反射式 X 光阴极的	
10.1 紫外光的特性	243		

第1章 光电导探测器

1.1 光电子器件的基本特性

光电子器件的种类很多、很广,由于其类型和用途不同,对其性能和参数的要求也不同,评价的参数和方法也不尽相同,在此处只能就其共性进行描述。由于本课程主要涉及光电探测器和光电成像器件两大类,所以对它们的性能参数也分两大类。对光电探测器有响应特性、噪声特性,包括响应率、探测率、时间常数及噪声等;对光电成像器件,除上面参数外,还有成像特性,包括分辨率、空间频率特性以及空间抽样特性等。信号噪声比是反映器件总体特性的综合参数,对描述光电探测器以及光电成像器件都是必不可少的。

本节只叙述光电子器件的响应特性、探测率以及吸收系数,其它特性在各章叙述。

1.1.1 光谱响应率和响应率

光电探测器输出信号电压或电流与单位入射光功率之比,即单位入射光功率作用下探测器输出信号电压或电流称为响应率,包括光谱响应率 R_λ 和积分响应率 R 。

1. 光谱响应率 R_λ

光谱电压响应率 $R_{u\lambda}$:光电子器件在单色(在波长 λ 附近一个很小的波长范围内)辐射功率 dP 作用下产生的信号电压为 $du_{s\lambda}$,则

$$R_{u\lambda} = \frac{du_{s\lambda}}{dP} \tag{1-1}$$

光谱电流响应率 $R_{i\lambda}$:光电子器件在单色(在波长 λ 附近一个很小的波长范围内)辐射功率 dP 作用下产生的信号电流为 $di_{s\lambda}$,则

$$R_{i\lambda} = \frac{di_{s\lambda}}{dP} \tag{1-2}$$

$R_{u\lambda}$ 、 $R_{i\lambda}$ 简写为 R_λ ,就是光谱响应率。对其归一化,可得相对光谱响应率 $R(\lambda)$,即

$$R(\lambda) = \frac{R_\lambda}{R_m} \tag{1-3}$$

式中 R_m ——光谱响应率的最大值。

光谱响应率随波长分布的曲线就是光谱响应曲线,如图 1-1 所示,图中同时标出了相对光谱响应率。

光谱量子效率 η_λ :单色辐射下,辐射量子数所产生的光电子数,即产生光生载流子数与辐射光子数之比,即

$$\eta_\lambda = \frac{N_{s\lambda}}{N_{p\lambda}} \tag{1-4}$$

式中 $N_{p\lambda}$ ——单色入射辐射量子数,一般指光子数;

$N_{s\lambda}$ ——由 $N_{p\lambda}$ 产生的信号量子数,如电子数。

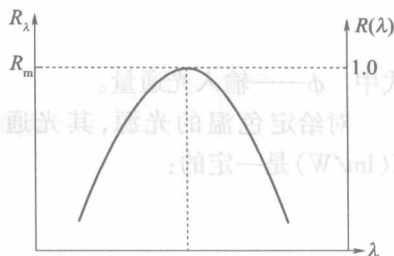


图 1-1 光电子器件的光谱响应曲线

把 R_{ia} 转化为 η_λ , 有

$$\eta_\lambda = \frac{di_{sa}/e}{dP/\frac{hc}{\lambda}} = \frac{hc}{e\lambda} R_{ia} = \frac{1.24}{\lambda} R_{ia} \quad (1-5)$$

$$R_{ia} = \frac{\lambda}{1.24} \eta_\lambda \quad (1-6)$$

在式(1-5)和式(1-6)中,若 λ 以 μm 为单位,则 R_{ia} 以 A/W 为单位;如果 λ 以 nm 为单位,则 R_{ia} 以 mA/W 为单位。此公式计算简单,常在工程中应用到。

光谱响应率 R_λ 及量子效率 η_λ 仅由器件的响应特性决定,而与光源无关。

2. 响应率

积分响应率简称为响应率 R , 为器件输出信号与输入功率之比。

电压响应率 R_u :

$$R_u = \frac{U_s}{P} \quad (1-7)$$

式中 P ——入射辐射功率;

U_s ——输出信号电压。

电流响应率 R_i :

$$R_i = \frac{I_s}{P} \quad (1-8)$$

式中 I_s ——输出信号电流。

量子效率 η :

$$\eta = \frac{N_s}{N_p} \quad (1-9)$$

式中 N_p ——入射辐射量子数;

N_s ——由 N_p 所产生的信号量子数。

响应率实质上反映了器件的灵敏程度,所以在许多场合下,响应率又被称为灵敏度或积分灵敏度,而相应的光谱响应率称为光谱灵敏度。

如果器件在可见光波段有响应,可用光度量定义响应率 R_ϕ 。

光度量的电压响应率和电流响应率分别为

$$R_{u\phi} = \frac{U_s}{\phi} \quad (1-10)$$

$$R_{i\phi} = \frac{I_s}{\phi} \quad (1-11)$$

式中 ϕ ——输入光通量。

对给定色温的光源,其光通量 ϕ 与辐射功率 P 之比是一定的,即光源的光视效能 $K(\text{lm/W})$ 是一定的:

$$K = \frac{\phi}{P} \quad (1-12)$$

辐射响应率与光度响应率的关系为

$$R_{u\phi} = R_u / K \quad (1-13)$$

$$R_{ip} = R_i / K \quad (1-14)$$

3. 光谱响应率与响应率的关系

光源辐射功率谱密度 P_λ 定义为单位波长范围内的辐射功率,即

$$P_\lambda = \frac{dP}{d\lambda} \quad (1-15)$$

光源辐射功率谱密度随波长的分布曲线是光源的特性,如图 1-2 所示。

将光源辐射功率谱密度归一化,即

$$P(\lambda) = \frac{P_\lambda}{P_m} \quad (1-16)$$

式中 P_m ——单色辐射功率的最大值;

$P(\lambda)$ ——单色辐射功率的相对值。

取电流响应率作为实例,简单写为响应率 R :

$$R = \frac{I_s}{P} = \frac{\int_0^\infty R_\lambda dP}{\int_0^\infty dP} = \frac{\int_0^\infty P_\lambda R_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda d\lambda} \quad (\text{A/W}) \quad (1-17)$$

$$R_\phi = \frac{\int_0^\infty P_\lambda R_\lambda d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} P_\lambda K_\lambda d\lambda} \quad (\text{A/lm}) \quad (1-18)$$

式(1-18)中 K_λ 为光谱光视效能,单位为 lm/W ,如图 1-3 所示。

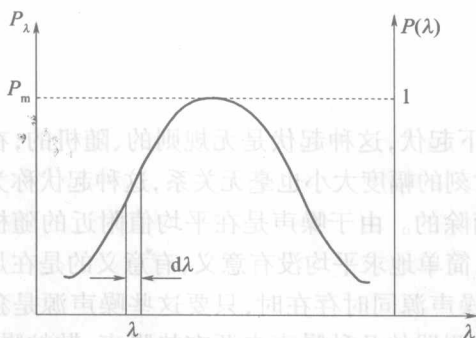


图 1-2 光源光谱辐射功率谱密度的分布

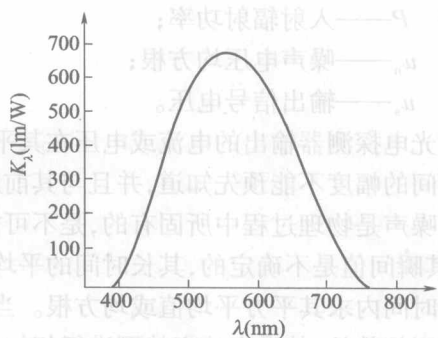


图 1-3 光谱光视效能与波长的关系

$$R = \frac{\int_0^\infty P(\lambda) \cdot P_m \cdot R(\lambda) R_m d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) P_m d\lambda} = \frac{R_m \int_0^\infty P(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) d\lambda} = \alpha \cdot R_m \quad (1-19)$$

式中 α ——器件同光源的光谱匹配系数, $\alpha = \frac{\int_0^\infty P(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) d\lambda}$ 。它反映了器件响应的波

长范围同光源光谱的吻合程度,可用面积 A_1 、 A_2 形象地表示,如图 1-4 所示。

$$R = R_m \cdot \frac{A_2}{A_1} \quad (1-20)$$

在光源固定的情况下,面积 A_1 是不变的, $R(\lambda)$ 与 $P(\lambda)$ 曲线重合得愈多,面积 A_2 愈大,也就是说光谱匹配愈好, α 愈大;反之,如果两曲线没有重合之处, $\alpha = 0$, 即二者完全失配,则该光电器件对该光源没有探测能力。光谱匹配是选择光电探测器,如像管、光电倍增管、红外成像器件的光电转换材料的重要依据。通常希望 $R(\lambda)$ 尽量与 $P(\lambda)$ 匹配。由于夜视器件大部分工作在夜晚,其红外波段辐射较集中,因此,制作夜视探测器要尽量向红外方向延伸。要探测哪个波段的光辐射的信号,就要使器件的响应范围与光辐射的波段尽量一致。

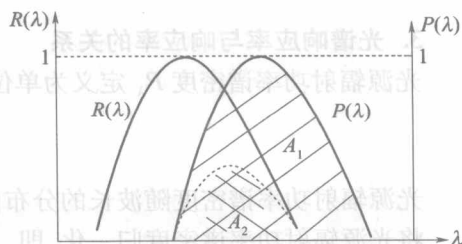


图 1-4 器件的光谱响应同光源的光谱辐射的匹配程度

1.1.2 最小可探测辐射功率和探测率

光电器件能否探测到足够的辐射功率,是灵敏限的问题,因此,最小可探测功率为一切光电探测器的重要参数。

1. 最小可探测辐射功率 $P_{\min}$

当输出信号电压等于输出噪声电压均方根值时的探测器的入射辐射功率称为最小可探测辐射功率,即

$$P_{\min} = \frac{P}{u_s/u_n} = \frac{u_n}{R_u} \quad (1-21)$$

式中 P ——入射辐射功率;

u_n ——噪声电压均方根;

u_s ——输出信号电压。

光电探测器输出的电流或电压在其平均值上下起伏,这种起伏是无规则的、随机的,在某一瞬间的幅度不能预先知道,并且与其前后相邻时刻的幅度大小也毫无关系,这种起伏称为噪声。噪声是物理过程中所固有的,是不可能人为消除的。由于噪声是在平均值附近的随机起伏,其瞬间值是不确定的,其长时间的平均值为零,简单地求平均没有意义,有意义的是在足够长的时间内求其平方平均值或均方根。当有多个噪声源同时存在时,只要这些噪声源是独立且互不相关的,其噪声功率就可进行相加。光电探测器的几种噪声来源有热噪声、散粒噪声、产生一复合噪声、 $1/f$ 噪声、温度噪声以及放大器噪声等。

在信号较弱时,光电探测器的噪声会显著地影响信号探测的准确性,另外,噪声也限制了系统可能探测到的最小信号功率,因为信号太弱,就被噪声所淹没,难以被发现。

当入射辐射较弱时,所产生的信号电压等于噪声电压时,此时信号被淹没在噪声之中,而不能分辨信号,此时该入射的辐射功率为该探测器所能探测到的最小功率,因此,又称为噪声等效功率(Noise Equalance Power, NEP)。当然, $P_{\min}$ 越小,器件的探测能力越强, $P_{\min}$ 越小越好,但这不符合人们的习惯表示方法,因此引入探测率。

2. 探测率 D

定义:对 $P_{\min}$ 取倒数作为衡量探测器探测能力的参数称为探测率,即

$$D = \frac{1}{P_{\min}} = \frac{1}{NEP} = \frac{u_s/u_n}{P} \quad (1-22)$$

D 越大,表示器件的探测性能越好。

探测率与探测器的面积和工作频率带宽有关,为了将不同面积和不同工作带宽的器件进行比较,必须消除两个因素的影响。

研究指出,探测率与器件的面积和工作带宽成反比。

$$P'_{\min} = \frac{P_{\min}}{(A \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}}} \quad (1-23)$$

式中 A ——器件接收面积;

Δf ——工作带宽。

那么探测率

$$D^* = \frac{1}{P'_{\min}} = \frac{1}{P_{\min}} (A \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} = D (A \Delta f)^{\frac{1}{2}} \quad (1-24)$$

通常 D^* 也叫探测率,又叫比探测率,单位是 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

$$D^* = \frac{u_s/u_n}{P} (A \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} = \frac{R_u}{u_n} (A \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} \quad (1-25)$$

表示探测器接收面积为 1cm^2 、工作带宽为 1Hz 时的单位入射辐射功率所产生的信噪比。

D^* 的测量是在一定的条件下进行的,如一定的黑体光源的温度、调制频率、测量系统的带宽等,测量值的 $D^*(T, f, \Delta f)$ 如 $D^*(500, 900, 5)$ 。

为了描述单色情况,还引入光谱探测率 D^*_λ ,它表示器件对波长为 λ 的辐射的探测率,用 $D^*(\lambda, f, \Delta f)$ 标出。

目前基本上用 D^* 取代了 D ,若无特殊说明,本书所称的探测率均针对 D^* 而言。

如果探测器的噪声不是由器件本身,而是由外界辐射所决定,如由背景辐射所决定,这样的探测器往往需要致冷屏蔽。致冷屏的开口决定了探测器视场的大小。在这种情况下,探测器是探测器视场的函数,为了消除参数依赖于视场的关系,引入 D^{**} ,它的定义为

$$D^{**} = \sqrt{\frac{\Omega}{\pi}} D^* \quad (1-26)$$

在式(1-26)中, Ω 是探测器视场的立体角,等于响应元向挡板的孔所张的有效立体角。

1.1.3 光吸收系数

光入射到材料,会发生吸收、色散、反射、折射等现象。对半导体而言,材料吸收光的原因,在于光与处在各种状态的电子、晶格原子和杂质原子的相互作用。

设入射光的强度为 I_0 ,入射到样品厚度为 x 处的光强度为 I ,则经过 dx 的厚度,光强度的减少量为 dI , dI 与入射光强度和厚度成正比,即

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad (1-27)$$

负号表示光强度的衰减, α 为线吸收系数,单位为 $(1/\text{cm})$ 。

设初始入射光强度为 I_0 ,则由式(1-27)可得

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1-28)$$

光吸收特性曲线如图 1-5 所示。由图可见,吸收系数大,光吸收主要发生在材料的表层;吸收系数小,光入射得深。如果样品厚度为 d ,则样品吸收的光强度 ΔI 为

$$\Delta I = I_0(1 - e^{-\alpha d}) \quad (1-29)$$

当厚度 $d = 1/\alpha$ 时,光强 $I = I_0/e$,约为入射光强的 36%,此时的厚度称为吸收厚度,有 64% 的光在 $1/\alpha$ 厚度内被吸收,即在吸收厚度内吸收了大部分的光,如图 1-5 所示。当样品厚度 $d \gg 1/\alpha$ 时,光在样品内被全部吸收。吸收系数是光波长 λ 的函数 $\alpha(\lambda)$,且各材料的吸收系数不同,吸收系数与材料的禁带宽度以及掺杂浓度等有关。图 1-6 为 Si、Ge、GaAs 半导体的吸收系数与光子能量的关系。

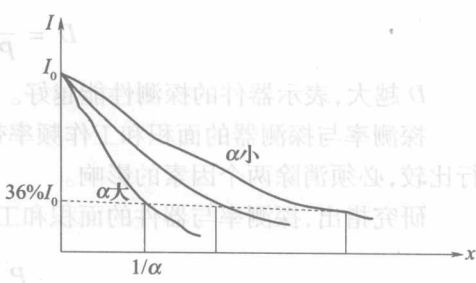


图 1-5 光强度随吸收系数和入射深度的关系曲线

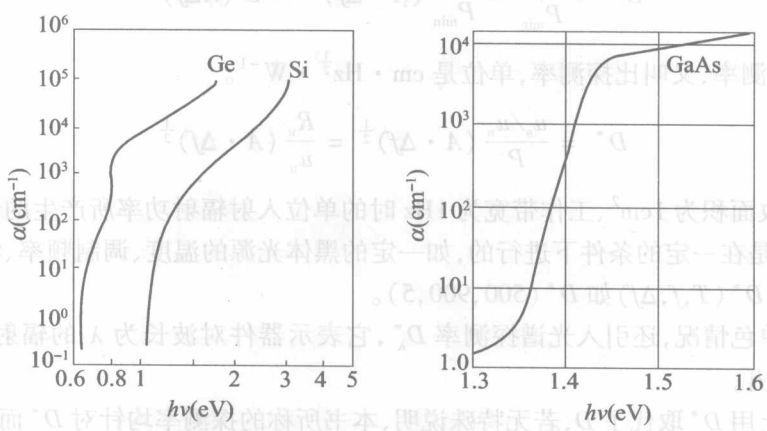


图 1-6 Si、Ge 和 GaAs 的吸收系数与光子能量的关系

半导体的光吸收有本征吸收、杂质吸收、自由载流子吸收、激子吸收、晶格振动吸收等多种吸收机制。其中,最主要的吸收是本征吸收。

如图 1-7 所示,价带中的电子吸收了能量足够大的光子后,受到激发,越过禁带,跃入导带,并在价带中留下一个空穴,形成了电子—空穴对,这种跃迁过程所形成的光吸收过程称为本征吸收。

要产生本征吸收,光子的能量 $h\nu$ 必须大于或等于禁带的宽度 E_g ,即

$$h\nu \geq E_g \quad (1-30)$$

换算成光波长 λ 的表达式,得

$$hc/\lambda \geq E_g \quad (1-31)$$

就是说,波长 λ 必须满足

$$\lambda \leq hc/E_g \quad (1-32)$$

$\lambda_{th} = hc/E_g$ 称为本征吸收的长波限,又称为阈值波长。

$$\lambda_{th} = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})}(\mu\text{m}) \quad (1-33)$$

所以要产生本征光吸收,光波长 λ 必须小于长波限。

对于杂质光吸收,要求入射光子能量大于杂质电离能 E_i , $h\nu \geq E_i$,如图 1-8 所示。

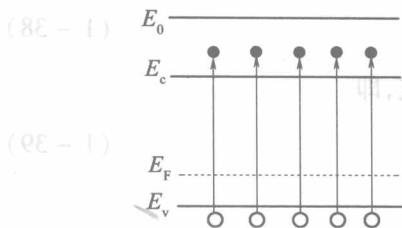


图 1-7 吸收光子后价电子被激发

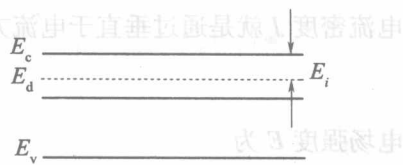


图 1-8 杂质半导体能带图

$$E_i = E_c - E_d \quad (1-34)$$

式中 E_c, E_d ——分别为导带底和杂质能级。

杂质光吸收的长波限为

$$\lambda_{th} = hc/E_i = \frac{1.24}{E_i(\text{eV})}(\mu\text{m}) \quad (1-35)$$

1.2 光电导探测器原理

半导体光电探测器是根据内光电效应制成的光电器件。材料在吸收光子能量后,出现光生电子—空穴,由此引起电导率变化或电流电压现象,称为内光电效应,是相对于外光电效应而言的。光电导器件是光电器件的重要组成部分。本节主要分析光电导原理、器件结构、特性等。

当半导体材料受光照时,吸收光子引起载流子浓度增大,产生附加电导率使电导率增加,这个现象称为光电导效应。

材料对光吸收有本征型和非本征型,所以光电导效应也有本征型和非本征型。当光子能量大于禁带宽度时,把价带中的电子激发到导带,在价带中留下自由空穴,从而引起材料电导率的增加,这是本征光电导效应。若光子能量激发杂质半导体的施主或受主,使它们电离,产生自由电子或空穴,从而增加材料电导率,这种现象就是非本征光电导效应。

材料受光照引起电导率的变化,在外电场作用下就能得到电流的变化,通过测量回路的电流,就能检测到电导率的变化。

1.2.1 光电导效应

1. 欧姆定律

以金属导体为例,金属导体的电阻为 R ,在导体两端加以电压 U ,导体内就形成电流 I ,如图 1-9 所示。

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-36)$$

设电阻率 ρ 、电阻 R 与导体长度 l 成正比,与截面积 S 成反比,则

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-37)$$

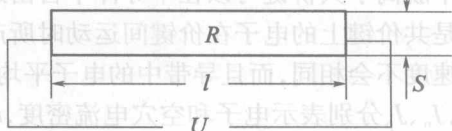


图 1-9 欧姆定律示意图

电导率 σ 为

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1-38)$$

电流密度 J 就是通过垂直于电流方向的单位面积的电流,即

$$J = \frac{I}{S} \quad (1-39)$$

电场强度 E 为

$$E = \frac{U}{l} \quad (1-40)$$

则

$$J = \frac{U}{\rho \frac{l}{S} \cdot S} = \sigma E \quad (1-41)$$

$J = \sigma E$ 仍表示欧姆定律,它把通过导体中某一点的电流密度和该处的电导率及电场强度联系起来,称为欧姆定律的微分形式。

2. 漂移速度和迁移率

电子在电场作用下沿着电场的反方向做定向运动称为漂移运动,定向运动的速度称为漂移速度。

如图 1-10 所示,设导体中电子浓度为 n , 电子的漂移速度为 V_d , 导体截面面积为 S , 则单位时间内通过截面的电子数 $nV_d \times l \times S$, 则

$$I = neV_d \cdot S \quad (1-42)$$

$$J = neV_d \quad (1-43)$$

当导体内部电场恒定时,电子应具有一个恒定不变的平均漂移速度,电场强度增大时,平均漂移速度也增大;反之亦然,所以平均漂移速度的大小与电场强度成正比,即

$$V_d = \mu E \quad (1-44)$$

式中 μ ——电子迁移率,表示单位电场下电子的平均漂移速度,单位为 $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。

μ 值与材料特性有关,如在 300K 时, Si 的 $\mu_n = 1350 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $\mu_p = 500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$; 而在 300K 时, GaAs 的 $\mu_n = 8000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $\mu_p = 400 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, μ 值大的材料适用于快速响应的高频器件。

$$J = ne\mu E = \sigma E \quad (1-45)$$

其中

$$\sigma = ne\mu \quad (1-46)$$

式(1-46)表达了电导率和迁移率之间的关系。

3. 半导体的电导率

半导体的导电作用是电子导电和空穴导电的总和,如图 1-11 所示。导电的电子是在导带中脱离了共价键可以在半导体中自由运动的电子;而导电的空穴是在价带中,空穴电流实际上是共价键上的电子在价键间运动时所产生的电流。显然,在相同电场作用下,两者的平均漂移速度不会相同,而且导带中的电子平均漂移速度要大些。 μ_n 、 μ_p 分别表示电子、空穴的迁移率, J_n 、 J_p 分别表示电子和空穴电流密度, n 、 p 分别表示电子、空穴的浓度,则

$$J = J_n + J_p = (ne\mu_n + pe\mu_p) \cdot E \quad (1-47)$$

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \quad (1-48)$$