



PTOELECTRONIC
DEVICES

光电子器件

(第2版)

汪贵华 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光 电 子 器 件

(第 2 版)

汪贵华 编著

國 防 工 業 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. —2 版. —北京:国防工业出版社,
2014. 1

ISBN 978-7-118-09274-5

I. ①光... II. ①汪... III. ①光电器件 IV. ①TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 015674 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 20 字数 498 千字

2014 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

光电子器件是光电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,本书主要介绍光电探测器件和光电成像器件。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,分辨力越来越高。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。

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、医学检测和透视等等,从军用产品扩展到民用产品,其使用范围难以胜数,是一个巨大的产业。

本书从光电转换机理入手,详细地分析光电探测器和成像器件的理论、原理、结构、特性、应用,系统地阐述了光电探测和成像器件的基本体系。该课程能较大地提高读者的理论和基础知识,能让读者系统、全面地掌握光电探测与成像技术的精髓,提高专业水平和能力,从而更好地适应现代科技的发展以及社会对专业人才的需求。

该书稿在南京理工大学使用了十几年,并经过二十年的课程建设,多次修改得以正式出版。与第1版相比,第2版增加了一些理论基础知识,这对于完善其体系是十分必要的。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。虽然经过二十年的课程教授和内容补充,然而受作者水平和精力的限制,尚有许多器件和相关知识没有被涉及到,还需要深化和完善。书中难免存在错误以及不足,恳请读者给予指正。

本书的出版得到了江苏省教育厅高等学校精品教材的项目支持,特此表示感谢!本书的课件已经发到出版社,作者将保持更新。该课程是本校的精品课程,教学资料将公布在南京理工大学的网站上。作者愿意与读者交流,以期达到共同进步和提高自己的目的。

编者

2013年11月

目 录

第 1 章 光电导探测器	1	2.2.1 光电池的结构	36
1.1 光电子器件的基本特性	1	2.2.2 光电池的电流与电压 ...	37
1.1.1 光谱响应率和响应率.....	1	2.2.3 光电池的主要特性	38
1.1.2 最小可探测辐射功率和 探测率.....	4	2.3 光电二极管.....	41
1.1.3 光吸收系数.....	6	2.3.1 PN 结型光电二极管.....	42
1.2 光电导探测器原理	8	2.3.2 PIN 型光电二极管	46
1.2.1 光电导效应.....	8	2.3.3 雪崩型光电二极管 (APD)	48
1.2.2 光电导电流	10	2.4 光电三极管.....	51
1.2.3 光电导增益	11	2.4.1 光电三极管结构和 工作原理	51
1.2.4 光电导灵敏度	12	2.4.2 光电三极管的主要 性能参数	52
1.2.5 光电导惰性和响应 时间	12	第 3 章 光电阴极与光电倍增管.....	54
1.2.6 光电导的光谱响应 特性	14	3.1 光电发射过程.....	54
1.2.7 电压响应率	16	3.1.1 外光电效应	54
1.2.8 探测率 D_{λ}^*	18	3.1.2 金属的光谱响应	55
1.3 光敏电阻.....	19	3.1.3 半导体光电发射过程 ...	55
1.3.1 光敏电阻的结构	20	3.1.4 实用光电阴极	58
1.3.2 光敏电阻的特性	20	3.2 负电子亲和势光电阴极.....	60
第 2 章 结型光电探测器.....	25	3.2.1 负电子亲和势光电阴极的 原理	60
2.1 光生伏特效应.....	25	3.2.2 NEA 光电阴极中的电子 传输过程	62
2.1.1 PN 结	25	3.2.3 NEA 阴极的量子 产额	62
2.1.2 PN 结电压电流公式.....	27	3.2.4 负电子亲和势阴极的工艺 及结构	66
2.1.3 PN 结光生伏特效应.....	29	3.3 真空光电管.....	67
2.1.4 光照平行结的定态 情况	30	3.3.1 真空光电管工作原理 ...	68
2.1.5 光照垂直于 PN 结的 定态情况	32	3.3.2 真空光电管的主要 特性	68
2.1.6 光照垂直于 NP 结的 定态情况	34		
2.2 光电池.....	36		

3.4	光电倍增管	70		增强器	116
3.4.1	光电倍增管结构和工作原理	71	4.6.3	第二代微光像增强器的优点	117
3.4.2	光电倍增管主要特性和参数	74	4.6.4	第二代微光像增强器的缺点	117
3.4.3	光电倍增管的供电电路	80	4.7	第三代微光像增强器	118
第4章	微光像增强器	83	4.8	第四代微光像增强器	120
4.1	像管的基本原理和结构	83	第5章	摄像管	123
4.1.1	光电阴极	84	5.1	摄像管的工作方式	123
4.1.2	电子光学系统	84	5.2	摄像管的性能指标与评定	124
4.1.3	荧光屏	88	5.2.1	摄像管的灵敏度	124
4.1.4	光学纤维面板	89	5.2.2	摄像管的光电转换	125
4.2	像管主要特性分析	90	5.2.3	摄像管的分辨率	127
4.2.1	像管的光谱响应特性	90	5.2.4	摄像管的惰性	130
4.2.2	像管的增益特性	94	5.2.5	摄像管的灰度	131
4.2.3	像管的光传递特性	96	5.3	氧化铅光电导视像管	131
4.2.4	像管的背景特性	97	5.3.1	氧化铅靶结构	131
4.2.5	像管的传像特性	98	5.3.2	视像管的结构	132
4.2.6	像管的时间响应特性	99	5.3.3	视像管的工作原理	133
4.2.7	空间分辨特性	99	5.3.4	氧化铅视像管特性	135
4.3	红外变像管	106	第6章	CCD和CMOS成像器件	137
4.3.1	玻璃管型的红外变像管	106	6.1	电荷耦合器件的基本原理	137
4.3.2	金属型红外变像管	107	6.1.1	MOS结构特征	137
4.4	第一代微光像增强器	108	6.1.2	CCD的势阱深度和存储电荷能力	139
4.5	微通道板	110	6.1.3	电荷耦合原理	141
4.5.1	通道电子倍增器	110	6.1.4	电荷耦合的机理	141
4.5.2	微通道板的增益特性	111	6.2	电荷耦合器件基本结构	144
4.5.3	电流传递特性	112	6.2.1	转移电极结构	144
4.5.4	微通道板的噪声	113	6.2.2	转移信道结构	145
4.5.5	微通道板的噪声因子	114	6.2.3	通道的横向限制	147
4.6	第二代微光像增强器	115	6.2.4	输入结构	148
4.6.1	近贴式MCP像增强器	115	6.2.5	输出结构	149
4.6.2	静电聚焦式MCP像		6.3	CCD的主要特性	150
			6.4	电荷耦合成像器件	154
			6.4.1	线阵电荷耦合成像器件	154
			6.4.2	面阵电荷耦合成像器件	

(ACCID)	155	探测元 IRFPA	195
6.4.3 两种面型结构成像 器件的比较	158	7.2.8 单片式阵列之 MIS 像元 IRFPA	195
6.4.4 扫描方式与读出转移 动作	159	7.2.9 准单片式阵列结构	196
6.5 彩色 CCD 成像器件	162	7.3 IRFPA 的性能参数	196
6.5.1 补色滤光片结构	162	7.3.1 光伏型红外探测器的电压 响应率	197
6.5.2 Bayer 滤光片结构	166	7.3.2 光伏型红外探测器的噪声 和探测率	200
6.6 CMOS 型成像器件的像素 构造	167	7.3.3 光子探测器的背景 辐射限制	201
6.6.1 PN 结光电二极管 方式	167	7.3.4 IRFPA 的其他特性 简述	205
6.6.2 MOS 光电门方式	169	7.4 红外成像器件与材料的制备	207
6.6.3 掩埋型光电二极管 方式	170	7.4.1 材料制备技术	207
6.7 CMOS 成像器件的彩色像素	172	7.4.2 衬底的选择与制备	209
6.8 CMOS 与 CCD 图像器件的 比较	174	7.4.3 PN 结的制作	210
第 7 章 致冷型红外成像器件	180	第 8 章 微测辐射热计红外成像器件	212
7.1 SPRITE 红外探测器	180	8.1 热探测器的基本原理	212
7.1.1 碲镉汞的性质	180	8.1.1 热探测器的基本 原理	212
7.1.2 SPRITE 探测器的工作 原理与结构	181	8.1.2 热探测器的温度 噪声限制	214
7.1.3 SPRITE 探测器的 响应率	184	8.2 微测辐射热计的工作原理	215
7.2 红外焦平面阵列的结构和 工作原理	187	8.2.1 微测辐射热计的工作 模式	215
7.2.1 红外探测的原理	187	8.2.2 微测辐射热计的工作 原理	217
7.2.2 红外焦平面阵列 特点	188	8.3 微测辐射热计的结构	219
7.2.3 红外焦平面阵列的 材料	188	8.4 微测辐射热计的响应率	223
7.2.4 混合式 IRFPA 之倒装式 结构	189	8.4.1 微测辐射热计热平衡 方程	223
7.2.5 混合式 IRFPA 之 Z 平面 结构	190	8.4.2 无偏置的热平衡方程 的解	224
7.2.6 单片式阵列之 PtSi 肖特基势垒 IRFPA	191	8.4.3 加偏置的热平衡	225
7.2.7 单片式阵列之异质结		8.4.4 $V-I$ 曲线的计算	226
		8.4.5 负载线	227
		8.4.6 带偏置的微辐射计的 低频噪声	229

8.4.7	微辐射计性能的数值 计算	230	9.4.2	隔离结构	256
8.5	微测辐射热计的噪声	233	9.4.3	微机械加工传感器的 制作流程设计	256
8.5.1	辐射计的电阻噪声	233	9.4.4	热释电成像器件的 集成电路	258
8.5.2	偏置电阻的噪声	235	第10章	紫外探测与成像器件	261
8.5.3	热传导引起的温度 噪声	236	10.1	紫外光的特性	261
8.5.4	辐射噪声	236	10.1.1	紫外光波段的划分	261
8.5.5	整个电噪声	237	10.1.2	大气对紫外光的 吸收	262
8.5.6	前置放大器噪声	239	10.1.3	紫外辐射源	263
8.6	微辐射计信噪比	239	10.2	紫外成像器件概述	264
8.6.1	噪声等效功率 (NEP)	239	10.3	紫外像增强器	265
8.6.2	噪声等效温差 (NETD)	240	10.4	GaN 的性质	268
8.6.3	探测率	240	10.5	GaN 和 GaAlN 材料的 生长技术	270
8.6.4	与理想辐射计相 比较	241	10.5.1	分子束外延	270
8.6.5	Johnson 噪声近似	242	10.5.2	有机金属化学气相 沉积	271
第9章	热释电探测器和成像器件	243	10.6	器件的制作	273
9.1	热释电探测器的基本原理	243	10.7	紫外成像器件的基本结构	274
9.1.1	热释电效应	243	10.7.1	PIN 结构紫外 探测器	275
9.1.2	热释电探测器特性 分析	245	10.7.2	金属/(Al)GaN 肖特基 势垒结构	277
9.2	热释电材料和探测器	249	10.7.3	ITO/N-GaN 肖特基 势垒结构	277
9.2.1	热释电材料	249	10.7.4	金属—半导体—金属 (MSM)紫外探测器	278
9.2.2	热释电探测器的结构 形式	251	第11章	X 射线探测与成像器件	281
9.2.3	热释电探测器的 特点	252	11.1	X 射线的特性	281
9.3	混合型热释电成像器件的 设计	253	11.1.1	X 射线的产生	281
9.3.1	热隔离以提高温度 响应	253	11.1.2	X 射线透过和吸收 特性	282
9.3.2	像素间热隔离以改进 MTF	254	11.1.3	X 射线量的表征	283
9.3.3	斩波器的结构	254	11.2	X 射线探测与成像器件的 分类	284
9.4	单片热释电成像器件	255	11.2.1	X 射线成像器件的	
9.4.1	热释电薄膜材料	256			

分类	284
11.2.2 X 射线计算机断层扫描 技术	287
11.3 X 射线成像器件系统的 性能指标	287
11.4 CsI/MCP 反射式 X 射线 光电阴极	289
11.4.1 反射式 X 光阴极的 物理过程	290
11.4.2 反射式 X 光阴极的 量子效率	291
11.5 窗材料/阴极透射式 X 光 阴极	293
11.5.1 窗材料/阴极透射式 X 光 阴极物理过程	293
11.5.2 窗材料/阴极透射式 X 光 阴极的量子效率	293
11.6 X 射线像增强器	294
11.6.1 X 射线像增强器的基本 结构	294
11.6.2 近贴型 X 射线像 增强器	295
11.7 X 射线影像光电二极管	

阵列成像器件	295
11.8 直接数字 X 射线影像器件 ...	296
11.8.1 光电导体 X 射线的 吸收	296
11.8.2 电子—空穴对 产生能	297
11.8.3 电荷传输和移动 距离	297
11.8.4 X 射线光电导体 材料	298
11.8.5 非晶 Se 的性质	299
11.8.6 样品制备	304
11.8.7 动态成像的直接转换 探测器的结构	305
11.8.8 动态成像的直接转换 探测器的工作原理	306
11.8.9 直接转换成像器件的 分辨本领	307
11.8.10 动态成像的直接转换 探测器的灵敏度	308
参考文献	310

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。

本节只叙述光电器件的响应特性、探测率以及吸收系数,其他特性在各章叙述。

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,有光谱响应率 R_λ 和积分响应率 R 。

1. 光谱响应率

光谱电压响应率 $R_{u\lambda}$:光电器件在单色(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

$$R_{u\lambda} = \frac{du_{s\lambda}}{dP} \quad (1-1)$$

光谱电流响应率 $R_{i\lambda}$:光电器件在单色(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

$$R_{i\lambda} = \frac{di_{s\lambda}}{dP} \quad (1-2)$$

$R_{u\lambda}, R_{i\lambda}$ 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 $R(\lambda)$ 。

相对光谱电流响应率 $R_i(\lambda)$:

$$R_i(\lambda) = \frac{R_{i\lambda}}{R_{im}} \quad (1-3)$$

式中 R_{im} ——光谱电流响应率的最大值。

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 :即单色辐射下,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

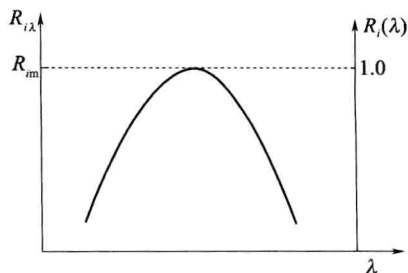


图 1-1 光电器件的光谱响应曲线

$$\eta_{\lambda} = \frac{N_{s\lambda}}{N_{p\lambda}} \quad (1-4)$$

式中 $N_{p\lambda}$ ——单色入射辐射量子数,指光子数;

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

把 $R_{i\lambda}$ 转化为 η_{λ} :

$$\eta_{\lambda} = \frac{di_{s\lambda}/e}{dP/h\nu} = \frac{di_{s\lambda}/e}{dP/\frac{hc}{\lambda}} = \frac{hc}{e\lambda} R_{i\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} R_{i\lambda} \quad (1-5)$$

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

式中 e ——电子电量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$;

h ——普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$;

ν ——入射光的频率;

c ——真空中的光速, $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

在式(1-5)和式(1-6)中,若 λ 以 μm 为单位,则 $R_{i\lambda}$ 以 A/W 为单位;若 λ 以 nm 为单位,则 $R_{i\lambda}$ 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所决定,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,即光子数;

N_s ——由 N_p 所产生的信号量子数,一般是电子数。

响应率实质上反映了器件的灵敏程度,所以在许多场合下,响应率又被叫做灵敏度或积分灵敏度,而相应的光谱响应率叫做光谱灵敏度。

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,单位是流明(lm)。

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

$$K = \frac{\phi}{P} \tag{1-12}$$

在可见光谱范围内,辐射响应率与光度响应率的关系

$$R_{u\phi} = R_u/K \tag{1-13}$$

$$R_{i\phi} = R_i/K \tag{1-14}$$

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

$$P_\lambda = \frac{dP}{d\lambda} \tag{1-15}$$

光源辐射功率谱密度随波长的分布曲线如图 1-2 所示,是光源的特性。

将光源辐射功率谱密度归一化,即

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

式中 P_m ——单色辐射功率最大值;

$P(\lambda)$ ——单色辐射功率的相对值。

取电流响应率作为实例进行计算,即

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

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

式(1-18)中 K_λ 为光谱光视效能,单位为 lm/W ,如图 1-3 所示,光视效能的归一化,就是光谱光视效率 $V(\lambda)$ 。

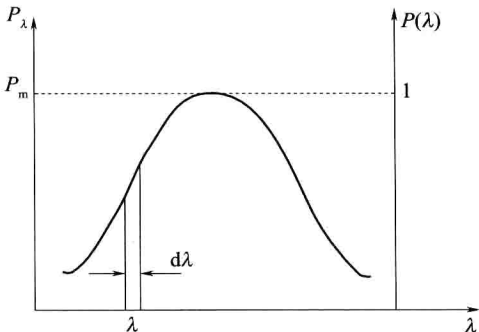


图 1-2 光源光谱辐射功率谱密度的分布

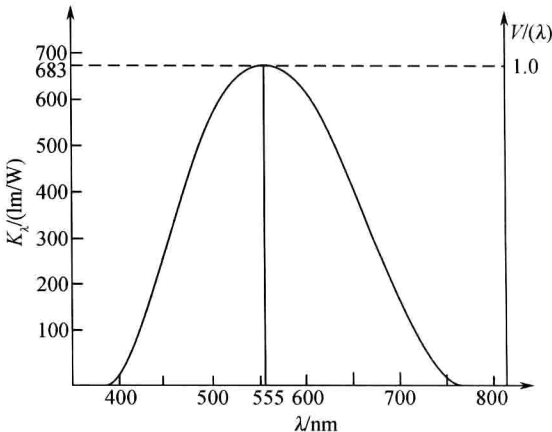


图 1-3 光谱光视效能与波长的关系

$$R_i = \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda) \cdot P_m \cdot R_i(\lambda) R_{im} d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) P_m d\lambda}$$

$$= \frac{R_{im} \int_0^{\infty} P(\lambda) \cdot R_i(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} = \alpha \cdot R_{im} \quad (1-19)$$

式中 α ——器件同光源的光谱匹配系数 $\alpha = \frac{\int_0^{\infty} P(\lambda) \cdot R_i(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda}$ 。它反映了器件响应的波长范围同光源光谱的吻合程度。用面积 A_1 、 A_2 形象地表示,如图 1-4 所示。

$$R_i = R_{im} \cdot \frac{A_2}{A_1} \quad (1-20)$$

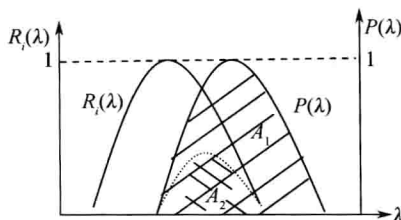


图 1-4 器件的光谱响应同光源的光谱辐射的匹配程度

在光源固定的情况下,面积 A_1 是不变的,如果 $R(\lambda)$ 与 $P(\lambda)$ 曲线重合得越多,面积 A_2 越大,也就是光谱匹配越好, α 越大;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。光谱匹配系数在光电探测中具有重要意义。

自然界中任何光源都有一定的光谱辐射分布范围,而每一种光谱辐射分布范围都含有自然界及所照物体的信息,这些信息对于人类有重要的价值,必须加以探测。

由于任何光电探测器都有一定光谱探测范围,其探测的光谱范围有限。

要探测那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,希望光电探测器的 $R(\lambda)$ 尽量与光源的 $P(\lambda)$ 匹配。例如,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。

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,也是进行光电探测成像器件研究的基本方向。

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人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—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,噪声均方值与面积和带宽成正比,为了消除这两个因素的影响,便于器件性能的比较,定义:

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

式中 A ——器件接收面积；

Δf ——工作带宽。

那么探测率

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

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

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

式中 Ω ——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 与入射光强度和样品厚度成正比,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)得

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1-28)$$

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

$$\Delta I = I_0 [1 - \exp(-\alpha d)] \quad (1-29)$$

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。

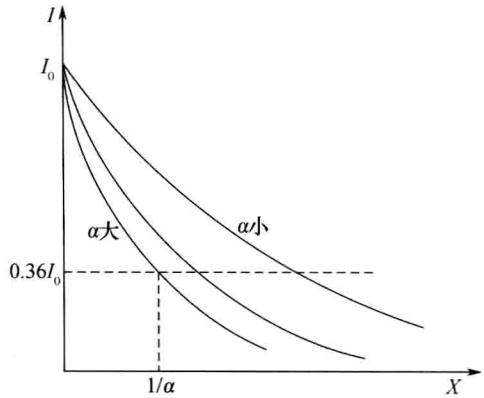


图 1-5 光强度随吸收系数和入射深度的关系曲线

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。对于光探测,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

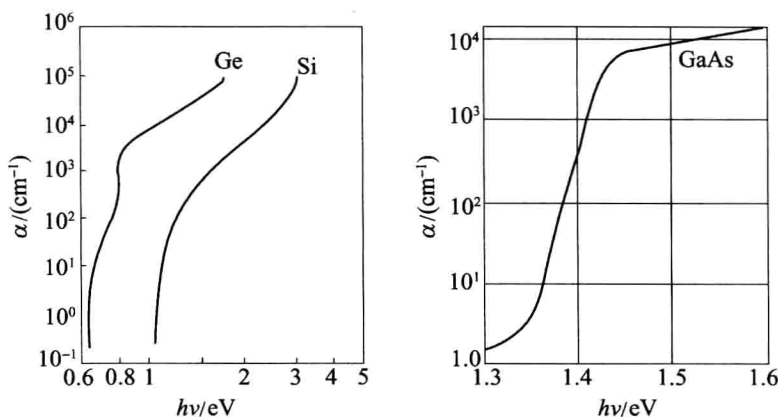


图 1-6 Si、Ge 和 GaAs 的吸收系数与光子能量的关系

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

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。光子能量大于禁带宽度才有光吸收。

杂质能吸上的电子吸收光子能量后,跃迁到导带,这称为杂质光吸收。对于杂质光吸收,要求入射光子能量大于杂质电离能 ΔE , $h\nu \geq \Delta E$,如图 1-8 所示。

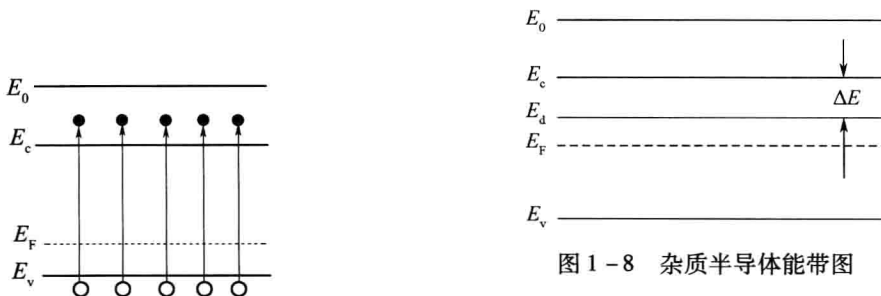


图 1-7 吸收光子后价电子被激发

图 1-8 杂质半导体能带图

$$\Delta E = E_c - E_d \quad (1-34)$$

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

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

杂质光吸收导致的光电导大大地扩展了探测的长波域,但是其热噪声较大,所以需要低温致冷,使用起来不方便。

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。

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

设电阻率为 ρ 、电阻 R 与导体长度 l 成正比,与截面积 S 成反比,则

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

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

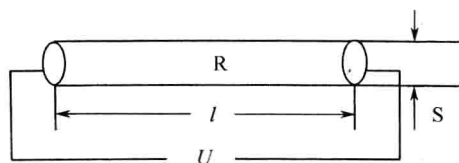


图 1-9 欧姆定律示意图