

半导体敏感器件及其应用丛书

光敏感器件及其应用

齐丕智 等 编著

科学出版社

75-42
8

半导体敏感器件及其应用丛书

光敏感器件及其应用

齐丕智 等 编著

科学出版社

1987

8710587

内 容 简 介

本书是半导体敏感器件及其应用丛书之一。这套丛书系统地介绍了各类半导体敏感器件的原理、设计、工艺、测试等方面的内容,并阐述了半导体器件与传感器在信息摄取、检测和控制处理等方面的实际应用。

本书专门讨论光敏感器件原理及其应用。内容包括基础知识、光电导器件、光敏二极管、光敏三极管、组合光敏器件和特种光敏器件以及光敏器件的应用和测试。在对光伏效应探测器件的介绍中,作者结合实践探讨了一些理论分析、设计和工艺中的问题,比较细致,是本书的重点。

本书可供从事光敏器件工作的工程技术人员参考,也可用作大专院校有关专业的教学参考书。

半导体敏感器件及其应用丛书

光敏感器件及其应用

齐丕智 等 编著

责任编辑 刘兴民 樊友民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年8月第一次印刷 印张:13 5/8

印数:0001—4,650 字数:304,000

统一书号:15031·844

本社书号:5273·15-7

定价:3.20元

半导体敏感器件及其应用丛书

序 言

半导体敏感技术是一门新兴技术，近几年发展较快。各种半导体敏感器件及其传感器日新月异，在国防、国民经济各部门以及人们的日常生活中得到越来越广泛的应用。

半导体敏感器件及其传感器能够把力、热、光、磁、气、湿度、射线、离子等物理、化学和生物等非电量转换成电信息。它具有体积小、精度高、灵敏度高、成本低、便于集成化、多功能化、易与微机接口等特点，从而被广泛用于国防建设、工农业生产、交通监控、灾害报警、医疗监护、自动控制和机器人、生命与宇宙科学研究，以及家用电器等各个领域。特别是作为摄取信息的功能部件，它已成为计算机检测与控制系统中不可缺少的重要组成部分，越来越受到人们的普遍重视。许多国家都把它列为八十年代的关键技术之一。

为了促进这门新技术的发展，电子工业部中国电子器件工业总公司于一九八三年八月召开了“全国半导体敏感器件工作会议”，会议商定集中全国部分高等院校、研究所和工厂中多年从事半导体敏感器件与传感器研究、生产和应用的专家、学者共同编写一套半导体敏感器件及其应用丛书。

为了加快编写进度，使这套丛书尽快与读者见面，在中国电子器件工业总公司领导下成立了该丛书编审组，由半导体敏感器件技术攻关组赵志刚、张博新、吕家骝、周立等人具体负责丛书编审的组织工作。编写工作是在广泛收集国内外先

进技术资料的基础上，并结合作者们多年来积累的实践经验进行的。在编写过程中，始终贯彻百花齐放、百家争鸣的方针，力求使该丛书具有科学性、系统性、先进性和实用性。从编写大纲的确定、编写、修改、直至终审定稿，始终采用个人撰写和集体会审、专家学者终审相结合的方法，从而进一步保证这套丛书的质量。

半导体敏感器件及其应用丛书共有九册：

《力学量敏感器件及其应用》；

《光敏感器件及其应用》；

《磁敏感器件及其应用》；

《气、湿敏感器件及其应用》；

《离子敏感器件及其应用》；

《温度敏感器件及其应用》；

《传感器与微计算机》；

《半导体致冷器件及其应用》；

《光电池及其应用》。

半导体敏感器件及其应用丛书编审组成员为：

陈文华	赵志刚	张博新	吕家骝	周立	刘恩科
黄得星	刘振茂	钟广学	程道喜	张澄	牛德芳
马英仁	齐丕智	康昌鹤	唐省吾	黄德培	方培生
张联铎	虞惇	陆瑞良	马德和	寇云起	

半导体敏感器件及其应用丛书

编 审 组

符 号 表

A_j	PN 结、MS 结等的结面积
$a(\lambda)$	吸收系数,即线性吸收系数
a	晶格常数
B	磁感应强度、磁通密度(单位: 特斯拉 T)
C	电容
C_T	势垒区(或空间电荷区)电容
D_n	电子扩散系数
D_p	空穴扩散系数
D	电位移,电通量密度
d	势垒区宽度
E	能量
E_g	禁带宽度,带隙
E_c	导带底
E_v	满带顶
E_F	费米能级
E_{Fn}	电子准费米能级
E_{Fp}	空穴准费米能级
E_t	复合中心或陷阱能级
E_i	禁带中央能级
E	电场强度
F	光子流密度(单位时间流过单位面积的光子数,单位: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
f	器件的工作频率或测量频率,调制光的调制频率
Δf	测量带宽
G	光生载流子的产生率,简称光产生率
H	磁场强度

h_{FE} 光敏三极管(即晶体管)共发射极直流放大系数

I 电流,发光强度

I_L 光电流

I_D 暗电流

I_0 PN结反向饱和电流

I_{SC} 光敏二极管短路光电流

I_p 空穴电流

I_n 电子电流

i_N 噪声电流

J 电流密度

J_r 空穴电流密度

J_n 电子电流密度

K_0 光学增益

K 增益,放大倍数

k 消光系数

L_n 电子扩散长度

L_p 空穴扩散长度

M_n 电子电流的(雪崩)倍增因子

M_p 空穴电流的(雪崩)倍增因子

N 杂质浓度,载流子总数

N_d 施主浓度或N区净杂质浓度

N_a 受主浓度或P区净杂质浓度

N_t 复合中心或陷阱浓度

$\mathcal{N}$ 复折射率(即光学导纳)

n 折射率,电子浓度

n_0 (热)平衡时电子浓度

Δn 非平衡电子浓度

n_i 本征电子浓度

P 辐射功率即辐射能通量(W)

p 空穴(总)浓度

p_0 (热)平衡空穴浓度

- Δp 非平衡空穴浓度
- p_i 本征空穴浓度
- Q 电荷
- q 电子电荷
- R 响应度; 电阻(亦作 r)
- R_L 负载电阻
- R_s 串联电阻
- R_j 结电阻(结的微分电阻与漏电阻的并联总电阻)
- S 表面复合速度
- T 温度, 单位: 开尔文 (K)
- t 时间, 时刻
- t_r 上升时间
- t_d 延迟时间
- t_s 贮存时间
- t_f 下降时间
- U 非平衡载流子复合率(即净复合率), 当 $U < 0$ 时, 则为(热)产生率
- V 电压, 电位差, 体积(亦作 v)
- V_D 势垒区电位差
- V_{oc} 光敏二极管开路光电压
- v_N 噪声电压
- v 速度, 光波相速度, 载流子漂移速度, ……
- v_m 载流在电场作用下的最大速度或饱和速度
- w_N N 区宽度
- w_P P 区宽度
- x_j 冶金结位置坐标
- x_P 势垒区 P 区边界位置坐标
- x_N 势垒区 N 区边界位置坐标
- Y 量子产额
- y 导纳参数
- z 阻抗参数

- α 晶体管共基极交流(短路)电流放大系数
- α_0 晶体管共基极直流电流放大系数
- α_n 电子电离率
- α_p 空穴电离率
- β 晶体管共发射极交流(短路)电流放大系数
- ϵ (绝对)介电常数, 电容率
- ϵ_r 相对介电常数
- ϵ_s 半导体相对介电常数
- η 量子效率
- η_i 内量子效率
- κ 空穴电离率与电子电离率之比
- λ 电磁辐射的波长, 即光波的波长
- μ_n 电子迁移率
- μ_p 空穴迁移率
- ν 电磁辐射的频率, 即光波的频率
- ρ 电阻率; 电荷体密度; 积分反射比
- $\rho(\lambda)$ 光谱反射比
- σ 电导率; 波数; 电荷面密度
- τ 时间常数, 时间间隔; 非平衡载流子寿命
- τ_n 非平衡电子寿命
- τ_p 非平衡空穴寿命
- τ_A 由俄歇过程决定的非平衡载流子寿命
- Φ 光通量
- ϕ 光通量密度, 辐射功率密度; 功函数
- ϕ_M 金属功函数,
- ϕ_s 半导体功函数
- ϕ_b 肖特基势垒高度
- χ_s 电子亲和能
- ψ 电位
- ω 圆频率

前 言

本书所要讨论的半导体光敏感器件,即基于半导体内光电效应将光信号转变为电信号的光辐射探测器件。它不包括用于能量转换的太阳电池,也不包括探测高能射线的辐射探测器、利用外光电效应的半导体阴极光电倍增管和利用半导体温敏效应的光辐射探测器。那些器件多已分属其他技术领域,并已有或将另有专著予以讨论。光敏感器件的功能是将光信号转变为电信号,所以通常称之为“光电器件”是自然而合理的。但是“光电器件”往往包括太阳电池等能量转换器件,有时还被作为光电子器件的简称,将半导体发光二极管(LED)、半导体激光器亦置于其讨论范围之内。为避免这种混淆并与本丛书各分册名称取得一致,本书采用“光敏感器件”一词,并简称光敏器件。

若以 1919 年 T. W. Case¹⁾ 取得硫化铊光电导探测器的专利权算起,半导体光敏器件已有了 60 余年的历史。经过数十年持续的努力,特别是由于受到近 20 多年来飞速发展的信息科学和半导体技术的推动,它已成为技术水平相当高的一类敏感器件。

首先,光敏器件所用的各种材料得到了较全面的研究和较广泛的应用,曾经或正在用于制造光敏器件的半导体材料不下数十种。它们的结构有单晶的和多晶薄膜的,也有非晶

1) T. W. Case U. S. Patent No. 1,301,227, April 22, 1919.

的;它们的成分有元素半导体的和化合物半导体的,也有多元混晶材料。用于波长在 $0.2\mu\text{m}$ (紫外线)到 $40\mu\text{m}$ (红外线)之间的任一频段的辐射探测器件,都有一种或数种材料可资选用。在这些材料中值得特别指出的有硅和碲镉汞。硅是现在研究得最深入的材料,原料丰富,工艺成熟,是制备近红外(波长 $1\mu\text{m}$ 左右)到紫外频段内光敏器件的优良材料。碲镉汞是 HgTe 和 CdTe 的混晶,纯 HgTe 是禁带宽度小于 0.03eV 的半金属,纯 CdTe 是禁带宽度为 1.53eV 的半导体,两者晶格常数十分相近,能以任意成分配成混晶,可用于制备长波限从 $0.8\mu\text{m}$ 到 $40\mu\text{m}$ 间的一系列 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光敏器件。这种材料于 1959 年发明后就受到广泛重视。经过多年努力,其制备技术和用它制备器件的工艺都已比较成熟,是一种极有前途的红外光敏器件材料。

第二,结合对半导体光电效应和器件原理的研究,广泛地试验和发展了各种类型的光敏器件。现在,可供实用的光敏器件就有光电导器件、光敏二极管、光敏三极管、雪崩光敏二极管 (APD)、场效应光敏管、电荷耦合光敏器件 (CCD)、组合型光敏器件等多种类型。各类器件又由于使用的材料、结构、工艺和封装的不同而有不同的型号。它们构成系列,性能各有特点,价格也各不相同,适用于不同的场合。对于促进器件的广泛应用,这是非常有利的。

第三,薄膜工艺的不断改进和平面工艺、大规模集成技术的采用,使光敏器件的制造工艺发展到很高的水平,质量迅速提高,成本迅速降低,并且导致了集成化和大规模集成化的光敏器件的诞生,大大促进了固体摄象技术的发展。例如,工业生产的 CCD 图象传感器件已用于摄象和遥感技术,被称为新一代红外摄象器件的集成焦平面摄象阵列正在取代红外摄象技术中传统的机械光斑扫描系统。这些摄象器件集成度极

高¹⁾, 可认为是光敏器件工艺发展和质量水平的重要标志之一。现在, 金属有机化学汽相沉积 (MOCVD)、分子束外延 (MBE)、Langmuir 膜 (一种单分子膜) 生长技术等新技术和异质结等新工艺已被引入光敏器件制造工业中。对这些新技术、新工艺的进一步的研究和应用, 使得我们可以预期, 光敏器件的制造工艺和质量水平还将进一步提高。

第四, 光敏器件的应用研究不断地取得新进展。一方面, 以光敏器件作敏感器件的传感器技术的发展, 使光敏器件的应用领域得以扩展, 进入了纺织、造纸、印刷、医疗、环保等领域; 另一方面, 在红外探测、辐射测量、光纤通信、自动控制等应用光敏器件较早的技术领域中, 光敏器件的应用研究在深入进行并取得新进展。例如, J. Giest 等人提出的硅光敏二极管自校准技术²⁾ 就为光辐射的绝对测量提供了一种很有前途的新方法。

上述情况表明, 光敏感器件的发展历史较长、发展水平较高而又方兴未艾。它种类繁多, 工作原理和制备工艺千差万别, 应用又相当广泛, 以我们的水平实难于在有限篇幅内作全面介绍。因此, 在已有专家对红外光敏器件和电荷耦合光敏器件编著专书讨论的情况下, 我们在本书所作的讨论中, 除略去光电磁 (PEM) 器件、光子牵引器件等应用较少的器件外, 对光电导器件和电荷耦合光敏器件也仅作原理性的一般介绍, 而将重点放在紫外-可见-近红外频段内的光伏型器件, 以求对这一应用十分广泛的器件进行较深入的讨论。

全书内容可分为三部分: 第一章简要复习和介绍一些有

1) 例如, 1982 年《电子技术》报道松下公司研制的 CPD 摄象器件(光敏二极管摄象阵列和 CCD 读出阵列的组合器件)的象元素为 404 (水平) × 256 (垂直)。

2) 在 7.3 节中有介绍。

关的基础知识,第二、三、四、五、六各章分别讨论各种光敏器件,第七、八两章则简单介绍光敏器件的应用和测试。

本书采用国际单位制和国家有关标准规定的量和单位。但是,为照顾本学科习惯,便于读者参阅文献,仍采用了个别惯用名称和单位,如将“线性吸收系数”称为“吸收系数”,单位取“ cm^{-1} ”而不是“ m^{-1} ”。

参加本书编写的同志分工如下:齐丕智、刘振茂编写第一、二两章;齐丕智、张烽生合写 3.1 节;何民才编写 3.2、5.5、6.1、6.3、6.5、7.1 等六节;尹长松编写第四章及 3.3 和 6.7 两节;陈伟秀编写 3.4、6.4 两节及 7.6.2 到 7.6.8 等七个小节;张烽生除参加 3.1 节的编写外,还编写了 3.5、5.6、6.2、7.2、7.5 及 7.6.1 等节;张君和编写了 5.1、5.2、5.3、5.4、6.6、7.3、7.4 等节及第八章。最后,全书由齐丕智汇总编排并编写附录。

在编写中,苏州半导体总厂陆瑞良和周德仁同志提供了部分资料;他们还与云南师范大学陈二永、电子工业部标准化研究所周立、西安交通大学刘恩科等同志一起,参加了本书大纲的讨论和初稿的审阅,在此一并致谢。

由于作者们的学识水平有限,且编写匆忙,因此本书在内容、文字、观点各方面必有不少失当、遗漏之处,望读者不吝赐教为感。

目 录

前言	xi
第一章 光敏器件的基础知识	1
1.1 半导体的光学性质	1
1.1.1 光在介质中的传播和光学常数	1
1.1.2 光子和半导体中的光吸收	15
1.1.3 半导体的光电效应	20
1.2 半导体光敏器件的性能参数	22
1.2.1 响应度、线性度和量子效率	23
1.2.2 响应时间	28
1.2.3 噪声等效功率和探测度	29
1.2.4 光敏器件的光谱特性	38
1.3 光生载流子的运动及连续性方程	40
1.3.1 光生载流子产生率	41
1.3.2 非平衡载流子的复合率及寿命	44
1.3.3 连续性方程的常用形式	53
第二章 光电导效应和光电导器件	58
2.1 光电导器件概述	58
2.2 光电导效应及光电导	61
2.3 光电导器件的特性	63
2.3.1 光电流及其增益	63
2.3.2 光电流的频率响应	66
2.3.3 光电导器件中的噪声	67
2.3.4 光电导器件的探测度	68
第三章 光敏二极管	74
3.1 PN 结光伏效应	75

3.1.1	定性讨论	75
3.1.2	定量分析	78
3.1.3	光照下 PN 结的伏安特性曲线	91
3.2	PN 结光敏二极管	94
3.2.1	量子效率	94
3.2.2	设计考虑	101
3.2.3	举例	119
3.3	其它无倍增型光敏二极管	124
3.3.1	PIN 光敏二极管	125
3.3.2	肖特基势垒光敏二极管	133
3.3.3	异质结光敏二极管	140
3.4	光谱响应的改善和蓝紫增强型光敏二极管	148
3.4.1	硅光敏二极管短波响应的限制机构	149
3.4.2	蓝紫增强型硅光敏二极管举例	156
3.5	光伏探测器	169
3.5.1	光伏探测器与太阳电池的差别	169
3.5.2	光伏探测器的特性及其与光导式二极管的差别	170
第四章	雪崩光敏二极管	181
4.1	雪崩电离与增益	181
4.2	结构设计 with 特性	187
4.3	暗电流与噪声指数	197
4.4	异质结雪崩光敏二极管	202
第五章	光敏三极管	207
5.1	光敏三极管的工作原理	207
5.2	光敏三极管的设计与制造	212
5.2.1	设计考虑原则	212
5.2.2	光敏三极管版图设计举例	214
5.2.3	光敏三极管的制造工艺	215
5.2.4	设计和制造的最佳化考虑举例	216
5.3	光敏三极管的灵敏度	217
5.3.1	具有组合器件结构的高灵敏度光敏三极管	218

5.3.2	单个的高灵敏度光敏晶体管	219
5.4	光敏三极管的光电特性	222
5.5	光敏三极管的响应时间	228
5.5.1	无基极偏流	231
5.5.2	基极偏流 I_b 远大于脉冲光电流 I_L	233
5.6	异质结光敏三极管	234
5.6.1	定性讨论	234
5.6.2	定量分析	236
5.6.3	发展中的异质结光敏三极管	248
第六章	集成光敏器件和特种光敏器件	252
6.1	光敏二极管阵列	252
6.2	光敏三极管阵列	262
6.2.1	光敏三极管的存贮模式	262
6.2.2	双发射极光电三极管阵列	263
6.2.3	在激光全息存贮系统中的应用	266
6.3	光敏二极管与放大器件的组合	268
6.4	半导体色敏器件	272
6.4.1	关于颜色的检测	272
6.4.2	半导体测色器件的测色原理	274
6.4.3	半导体色敏器件的制作工艺及基本特性	280
6.4.4	信号处理电路实例	284
6.5	结型场效应光敏管	286
6.6	光控晶体闸流管	290
6.6.1	概况	290
6.6.2	光控晶闸管的工作原理	292
6.6.3	光控晶闸管的参数	295
6.7	电荷耦合器件及其阵列	296
6.7.1	MOS 三层结构	296
6.7.2	CCD 结构与工作原理	301
6.7.3	CCD 摄像器件	304
6.7.4	埋沟 CCD	310

第七章 光敏器件的应用	314
7.1 应用光敏器件的基础知识	314
7.1.1 硅光敏二极管	314
7.1.2 硅光敏三极管	321
7.1.3 热稳定性与光谱匹配	325
7.1.4 实用基本电路	330
7.2 测光仪器	337
7.3 利用光敏二极管实现光辐射的绝对测量	350
7.4 光耦合器	355
7.5 光电开关	363
7.6 实用电路举例	370
7.6.1 波导电弧的探测	370
7.6.2 光敏三极管在程序控制铣床上的应用	373
7.6.3 冲床安全保护用双控光电开关电路	374
7.6.4 反射式光传感器滚珠检测电路	376
7.6.5 反射式光传感器脉搏检测电路	378
7.6.6 半导体彩色传感器实际测色电路	378
7.6.7 干涉条纹计数用光电检测装置	380
7.6.8 光敏式重力加速度测试仪	381
第八章 光敏器件测试方法基础	385
8.1 半导体光敏器件测试方法总则	385
8.2 静态特性的测试	387
8.3 动态特性的测试	392
8.4 光谱特性的测试	394
附录	
一 辐射度单位和光度单位	397
二 光源简介	405
三 常用物理常数	418