

半导体敏感器件及其应用丛书

光电池及其应用

刘恩科 等 编著

科学出版社

半导体敏感器件及其应用丛书

光电池及其应用

刘恩科 等 编著

科学出版社

1989

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，并说明了半导体敏感器件与传感器在信息摄取、检测、控制处理等方面的实际应用。

本书比较全面地介绍了半导体光电池的原理、设计、制造及应用。内容既包括光电池的物理基础及基本结构，也包括同质结、异质结、表面势垒及非晶硅光电池的基本特性及具体实例，同时还介绍了它们的最新发展。

本书可供从事半导体敏感器件，特别是从事光电池研制、应用的工程技术人员阅读，也可作为工科大中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

光电池及其应用

刘恩科 等 编著

责任编辑 樊友民 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 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

1989年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1989年8月第一次印刷 印张：14 1/8

印数：0001—1,610 字数：320 000

ISBN 7-03-001125-2/TN·65

定价：9.50 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了越来越广泛的应用。

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化成电信息。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,易与微型计算机接口等特点,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 and 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,愈来愈受到人们的普遍重视。许多国家都把它列为 80 年代的关键技术之一。

为了促进这门新兴技术的发展,原电子工业部中国电子器件工业总公司于 1983 年 8 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、吕家骧、周立等具体负责丛书编审的组织工作。编写工作是在广泛搜集国内外先进

技术资料的基础上,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,始终采用个人撰写与集体会审、专家学者终审相结合的方法,从而进一步保证了这套丛书的质量。

半导体敏感器件及其应用丛书共九册:

《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》

《传感器的信号处理及接口》

《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、吕家镛、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

前 言

作为能量转换器件，半导体光电池早已引起了人们的广泛注意。全世界每年发表在数十种学术杂志和大型国际学术讨论会上的、有关光电池研究进展情况的学术论文达数百篇之多。目前，对光电池的研究，从基础理论、新材料的制备、工艺的改进、新型电池的制造、高效率光电池的研制，直到光电池应用中的稳定性分析以及光电池在各个领域中的应用等各个方面都在广泛深入地开展着。

作为对半导体光电池原理与应用的描述，本书不可能完全覆盖光电池研究的各个领域，但我们力求能比较全面地阐述光电池的基本原理、设计、制造及应用，并尽可能地介绍目前光电池研究的进展及动向，以供读者参考。

本书共十章。第一、二章扼要叙述半导体光电池的物理基础及基本结构；第三、四、五章分别讨论同质结光电池的基本原理、设计及制造；第六、七章分别讨论异质结及表面势垒光电池的基本原理及具体实例；第八章介绍非晶硅光电池的基本特性、当前的发展水平和研究动向；最后两章则分别介绍光电池的应用及发电系统。

本书可以作为大专院校从事光伏效应研制的师生及研究生的教学参考书，亦可作为专门从事光电池研制和应用的工程技术人员的工具书。若将本书作为电子工程和应用物理领域中的工作人员的参考书，读者则应具有一般的“固体物理”和“半导体物理”的基本知识。

本书第一章(1.4节)、第二章、第三章(3.6、3.7节)、第六

章(6.1—6.3节)由刘恩科编写。第六章(6.4节)由刘恩科、王希义编写。第七章(7.1—7.4节)由刘恩科、朱长纯编写。第一章(1.1—1.3节、1.5及1.6节)、第七章(7.6节)由朱长纯编写。第三章(3.1—3.5节)、第四章由张声良编写。第五章、第七章(7.5节)由王希义编写。第八章由贾全喜编写。第九章、第十章由陈二永、陈庭金编写。附录部分由贾全喜、朱长纯整理。全书最后由刘恩科进行修改与整理。

全书由哈尔滨工业大学刘振茂和武汉大学齐丕智主审，参加审稿工作的还有赵志刚、吕家骝、康昌鹤、孙良彦、方培生和陈德源。此外，在编写过程中吉林大学孙良彦提供了部分资料。在此一并表示诚挚的谢意。

由于编著者水平所限，书中错误与不当之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编著者

1987年4月

目 录

第一章 光电池的物理基础	1
1.1 光与半导体的相互作用	1
1.2 半导体中的光吸收	5
1.3 半导体中的复合过程	13
1.4 半导体中电流的传输	22
1.5 半导体器件物理的基本方程	26
1.6 太阳常数和大气质量	29
第二章 光电池的结构与材料	36
2.1 光生伏特效应	36
2.2 半导体界面及其类型	46
2.3 用于光电池的半导体界面组态	62
2.4 半导体光电池材料的选择	68
第三章 同质结光电池的基本原理和特性	73
3.1 概述	73
3.2 同质结光电池的工作原理	76
3.3 光照下 p-n 同质结光电池的特性	82
3.4 光电池的输出特性	96
3.5 光电池的转换效率	102
3.6 光电池的光谱响应和温度效应	106
3.7 光电池的辐照效应	108
第四章 同质结光电池的设计	113
4.1 光生载流子的收集几率	113
4.2 基体材料和电池的厚度	117
4.3 背电场	126
4.4 顶层	130

4.5	发射区金属接触电极	137
4.6	减反射膜	140
4.7	同质结光电池设计举例	146
第五章	同质结光电池的制造	151
5.1	单晶硅光电池的制造	151
5.2	单晶硅光电池的改进	166
5.3	多晶硅光电池	178
5.4	砷化镓薄膜光电池	182
第六章	异质结光电池	184
6.1	概述	184
6.2	异质结光电池的基本特性	185
6.3	突变反型异质结光电池的特性	196
6.4	异质结光电池实例	210
第七章	表面势垒光电池	226
7.1	概述	226
7.2	表面势垒光电池的基本特性	228
7.3	MS 结构光电池的特性	236
7.4	MIS 结构光电池的特性	244
7.5	MS 和 MIS 光电池实例	252
7.6	MINP 结构的光电池	255
第八章	非晶硅光电池	264
8.1	非晶硅的基本性质	265
8.2	氢化非晶硅的制备及其光电池的制造	282
8.3	非晶硅光电池的基本结构与工作原理	292
8.4	非晶硅光电池的退化机理	323
8.5	非晶硅光电池的未来	334
第九章	光电池的应用	336
9.1	概述	336
9.2	太阳电池电源系统	338
9.3	太阳电池的空间应用	340
9.4	通讯设备用的太阳电池电源系统	344

9.5	太阳能电池电源系统在阴极保护中的应用	350
9.6	太阳能电池电源水泵系统	353
9.7	光电池在光电检测和自动控制方面的应用	358
第十章	光电池地面发电系统及其设计	367
10.1	太阳能电池发电站	367
10.2	村庄和家庭使用的太阳能电池电源系统	371
10.3	硅太阳能电池电流、电压与温度和光强的关系	376
10.4	硅太阳能电池组件的电流、电压与光强和温度的关系 ...	381
10.5	硅太阳能电池方阵/蓄电池电源系统的设计方法	382
10.6	太阳能电池方阵/蓄电池电源系统的检测	388
10.7	太阳能电池方阵/蓄电池电源系统设计实例	390
10.8	太阳能电池方阵/蓄电池电源系统的使用与维护	394
10.9	讨论	399
	参考文献	402
	主要参数符号表	413
	附录	416
1	太阳辐射光谱分布数据	416
2	常用电光源的特性	432
3	一些重要半导体光电池材料的特性	438

第一章 光电池的物理基础

本章简要叙述光电池的物理基础，主要介绍光与半导体的相互作用、半导体中非平衡载流子的产生与复合、载流子的漂移与扩散，以及光电池物理的基本方程组。光电池中最为人们所重视的是太阳电池，太阳电池是直接将太阳能转换为电能的光伏器件，因此本章将简要介绍太阳常数和大气质量。书末附录 2 中将给出常用的其它光源的主要特性。

1.1 光与半导体的相互作用

如图 1.1 所示，当一束单色光垂直入射到半导体表面上时，一部分入射光将被界面反射，反射光强度与入射光强度之比称为反射系数 ρ 。其余部分将透射进入半导体内，透射光

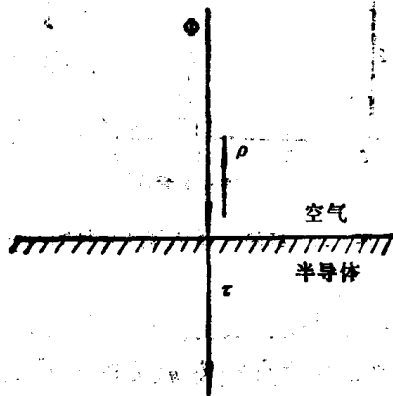


图 1.1 垂直入射到半导体表面上的单色光，部分反射部分透射

强度与人射光强度之比称为透射系数 τ 。根据能量守恒定律，界面上反射系数与透射系数满足下式：

$$\tau = 1 - \rho \quad (1.1)$$

透射光在半导体中能被吸收，这种吸收是由于光子激发了占据较低能态的电子，使它跃迁到较高能态所致。因为半导体价带中有大量的被电子占据的能态，导带中有大量空着的能态，所以当入射光子的能量大于禁带宽度时，入射的光子将大部分被吸收。

光吸收材料的折射率 n_c 是一个复数，可以写成

$$n_c = n - ik \quad (1.2)$$

式中， k 称为消光系数， n 是普通的折射率。图 1.2 给出了硅材料的 n 、 k 与人射光子能量的关系。

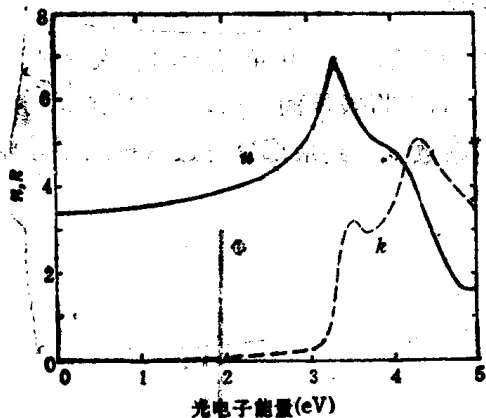


图 1.2 硅的 n 、 k 与光子能量的关系

根据光的电磁理论，通过计算可以得到，光自真空垂直入射到折射率和消光系数分别为 n 、 k 的介质上时，反射系数与折射率和消光系数的关系为

$$\rho = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1.3)$$

由于吸收作用，透射的光在半导体内传播时光强度随传播的距离呈指数性衰减。设 Φ_0 为单位时间内垂直入射到单位面积上的波长为 λ 的光子数（即 Φ_0 表示以光子数计量的光强度），则透入到半导体内并传播到距受光表面为 x 的距离后，光强度为

$$\Phi(x) = \Phi_0(1 - \rho)e^{-\alpha x} \quad (1.4)$$

如将上式乘以光子能量 $h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ ，则可得到与式 (1.4) 相类似的以能量计量的光强度关系式。式 (1.4) 中， α 是吸收系数，与波长有关，是波长 λ 的函数。在设计光电池时，这个参数很重要，它决定了对于一个给定波长的光，透射入光电池后距电池的受光面有多远时光能被吸收。

吸收系数 α 与消光系数 k 有如下的关系。频率为 ν 的沿 x 方向传播的平面光波，其电场强度 \mathcal{E} 与传播速度 ν 的关系为

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 e^{i2\pi\nu(t - \frac{x}{\nu})} \quad (1.5)$$

由于半导体中的光速 ν 与真空中的光速 c 的关系为

$$\nu = \frac{c}{n} \quad (1.6)$$

因此，

$$\frac{1}{\nu} = \frac{n}{c} - j \frac{k}{c} \quad (1.7)$$

代入式 (1.5)，得

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 e^{i2\pi\nu t} e^{-\frac{i2\pi n x}{c}} e^{-\frac{2\pi k x}{c}} \quad (1.8)$$

式中，最后一项 $e^{-(2\pi k x/c)}$ 为衰减因子。能流密度与电场强度的平方有关，比较式 (1.4) 和式 (1.8) 的平方，可得到 α 与 k 的关系：

$$\alpha = \frac{4\pi\nu k}{c} \quad (1.9)$$

式(1.9)表明, 消光系数 k 反映了光在传播过程中的衰减特性. 如果光在传播过程中没有衰减, 则 $\rho = (n-1)^2/(n+1)^2$. 对大多数半导体材料来说, n 值较大, 用这个公式估算弱吸收区反射系数的值, 可参考图 1.2, 对硅来说, 在光电池所感兴趣的所有波长范围内, 其反射系数均大于 30%. 从制造高效率光电池的角度来说, 希望反射系数越小越好. 因而, 在制造光电池时, 常使用减反射膜技术或其它技术(如绒面技术)来尽可能地减少反射光的比例.

最后要指出的是, 对硅而言, 当光不是垂直入射时, 其反射率也近似为 0.30. 图 1.3 给出硅的反射系数与入射角的关系

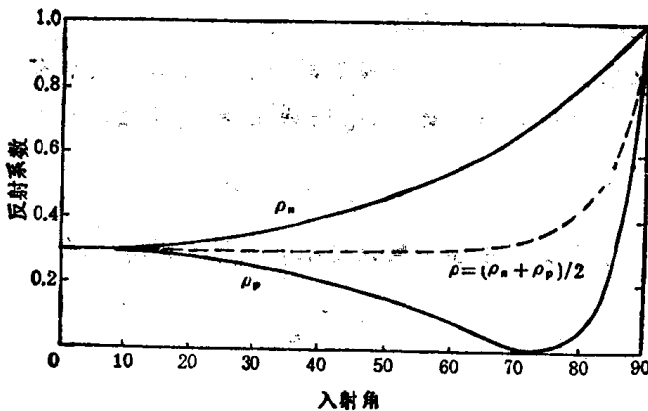


图 1.3 硅的反射系数与入射角的关系

系. 图中 ρ_p 是表示平行于入射面振动的光分量的反射系数, ρ_s 是垂直于入射面振动的光分量的反射系数. 由图 1.3 可见, 只要入射角小于布鲁斯特 (Brewster) 角 73 度, 反射系数 $\rho = \frac{1}{2}(\rho_p + \rho_s)$ 均接近于 0.30. 从图 1.3 还可看到, 当

入射角等于 73° 时, $\rho_p = 0$, 反射光为偏振光, 此时只有垂直于入射面振动的分量, 所以该入射角也称作起偏角。

非偏振光入射到空气与半导体的界面时, 透射系数为

$$\tau = 1 - \frac{1}{2}(\rho_p + \rho_s) \quad (1.10)$$

如图 1.3 所示, 这个值在入射角小于 73° 前是一常数。

1.2 半导体中的光吸收

1.2.1 直接带隙半导体

半导体中的本征吸收是光电池中的一种重要的光吸收过程, 它是指价带中的电子受光子激发跃迁到导带, 在价带中产生一个空穴, 同时光子湮没的过程。要发生本征吸收, 光子的能量必须等于或大于半导体材料的禁带宽度 E_g , 因而对每一种半导体材料, 均有一个本征吸收的长波限:

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{E_g} (\mu\text{m}) \quad (1.11)$$

式中, E_g 取 eV 为单位。在这个跃迁过程中, 能量和动量必须守恒。由于半导体能带结构不同, 所以表现出有两种不同形式的本征吸收——直接跃迁和间接跃迁。对应于这两种跃迁的半导体材料, 分别称为直接带隙半导体和间接带隙半导体。

图 1.4 为直接带隙半导体的能带示意图, 其导带和价带的极值对应于相同的波矢 k 。因为一般半导体所吸收的光子的动量远小于能带中电子的准动量 $\hbar k$, 所以, 在跃迁过程中电子的准动量基本上是守恒的, 即跃迁前后电子的波矢 k 保持不变。由于能量守恒, 末态和初态电子的能量差等于被吸收的光子能量, 即

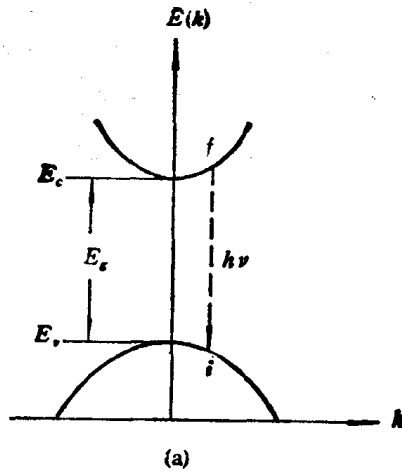


图 1.4 直接带隙半导体能带示意图

$$E_f - E_i = h\nu \tag{1.12}$$

对球形等能面近似的半导体材料,有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} E_f - E_c &= \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^*} \\ E_v - E_i &= \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p^*} \end{aligned} \right\} \tag{1.13}$$

式中, m_n^* 、 m_p^* 分别为电子和空穴的有效质量。因此,在跃迁过程中,光子能量与波矢 k 的关系为

$$h\nu = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*} \right) \tag{1.14}$$

由式(1.14)可见,随着入射光子能量的增大,吸收光子发生跃迁的电子的准动量值也增大,因而,跃迁前后价带和导带中电子的能量离开价带顶和导带底的距离也增大。

理论分析可得直接跃迁的吸收系数与光子能量的关系为^[1]

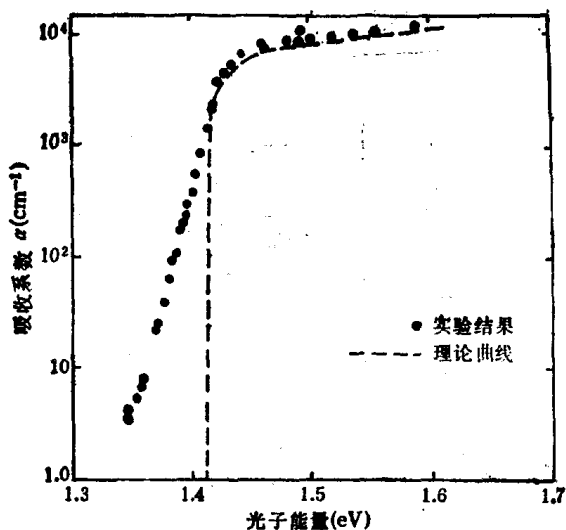


图 1.5 GaAs 的吸收系数与光子能量的关系

$$\left. \begin{aligned} \alpha(h\nu) &\approx A(h\nu - E_g)^{1/2}, & h\nu > E_g \\ \alpha &= 0, & h\nu \leq E_g \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

式中, A 基本为一常数. 图 1.5 给出了直接带隙半导体 GaAs 的吸收系数与光子能量 $h\nu$ 的关系的实验结果与理论曲线的比较.

1.2.2 间接带隙半导体

图 1.6 为间接带隙半导体的能带示意图, 它们的导带和价带的极值并不对应于相同的波矢, 例如 Ge、Si 一类半导体, 价带顶位于 k 空间原点, 导带底则不在 k 空间原点. 这种半导体中的电子在吸收光子发生跃迁时, 还伴随有声子的吸收或发射. 当价带中波矢为 k 的电子吸收光子后跃迁到导带中波矢为 k' 的能态时还将吸收或发射一个准动量为 $hk' - hk$ 的声子. 跃迁前后电子的能量差 ΔE 满足关系下式:

: 7 :