

半导体光电性质

沈颀华 朱文章 编著

厦门大学出版社

408359

半导体光电性质

沈颢华 朱文章 编著



204083598



厦门大学出版社

[闽]新登字 09 号

本书承福建省自然科学著作基金资助出版

半 导 体 光 电 性 质

沈颢华 朱文章 编著

*

厦门大学出版社出版发行

闽北日报社印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 16.75 印张 418 千字

1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册

ISBN 7-5615-1095-0/O·64

定价:15.00 元

半导体器件物理 内容简介

本书系统地讨论半导体光电性质的理论及其应用,详细介绍了光伏效应的原理及其在太阳能电池和光电探测器方面的应用。全书共五章,主要内容有:1、半导体的光吸收;2、半导体的光伏效应;3、半导体的光电导;4、半导体的电致发光和激光;5、半导体其它的光电效应。

本书可供从事半导体器件、半导体光电技术研究和开发应用的科研工作者、工程技术人员参考,也可供固体电子领域、光电器件、光电技术专业的高年级学生和研究生作教学参考书。

本书出版人白更

前 言

随着科学技术的发展,半导体光电器件在遥感、遥控、自动控制、光通讯、太阳能利用、计算技术等方面得到广泛的应用,是现代电子仪器和通讯设备必不可少的重要器件。半导体光电性质是半导体物理性质的重要部分,是半导体光电器件研制和应用的基础和依据。半导体光电性质的研究还可以提供有关半导体能带结构、声子结构、载流子输运、杂质态行为等物理性质、物理参数的信息,已成为研究、检测半导体材料、半导体器件物理性质的最主要的手段之一。因此,半导体光电是目前普遍关注的研究领域,其发展极为迅速。

本书旨在系统地讨论半导体光电性质的理论以及部分主要的半导体光电器件的物理性质。全书共分五章,内容安排如下:第一章阐述光和半导体相互作用的一般规律,讨论半导体的光学常数及其相互关系以及半导体中的光跃迁;第二章阐述半导体光伏效应的原理,介绍光伏效应的应用,并讨论太阳能电池和光伏型光电探测器的物理性质;第三章阐述半导体光电导效应的原理,并讨论光电导器件的物理性质;第四章阐述电致发光和半导体激光的原理,并介绍有关器件的特性;第五章阐述光磁效应、电调制光谱效应、光子曳引、光电发射等效应的原理。

本书是在沈颀华副教授编写的讲义的基础上,经过近十年的讲授和科研工作的积累而成的。此次出版进行了全面的修改和补充,沈颀华副教授负责编写第二、四、五章,朱文章副教授(博士)负责编写第一、三章。本书的出版,得到厦门大学、厦门大学物理系有关领导的大力支持和校、系的资助;本书的编写,得益于刘士毅教

授和吴伯偕教授长期谆谆的教导。陈金富教授、黄美纯教授、郑健生教授和陈传鸿教授对本工作给予指导并提出宝贵意见；吴孙桃副教授热情承担本书的特约编辑工作，详细审核了书稿全文；本工作还得到厦门大学物理系半导体物理与器件物理教研室全体同仁的支持和帮助。在此一并表示衷心的感谢。

由于半导体光电涉及面广，而编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者给予批评指正。

编著者

1994年12月

目 录

前言

第一章 半导体中的光吸收..... (1)

1.1 半导体的光学性质 (1)

1.1.1 半导体的折射率和吸收系数(1)

1.1.2 反射系数和透射系数(6)

1.1.3 半导体光学常数间的色散关系(10)

1.2 半导体中的光跃迁 (14)

1.2.1 半导体的带间光跃迁(15)

一、直接跃迁(16)

二、间接跃迁(24)

三、乌尔巴赫(Urbach)定律(37)

1.2.2 激子吸收(40)

一、瓦尼尔—莫特(Wannier—Mott)激子(42)

二、束缚激子(46)

1.2.3 带内跃迁和自由载流子吸收(48)

一、带内亚结构间的光跃迁(49)

二、自由载流子吸收(50)

三、等离子体反射(53)

1.2.4 晶格振动光吸收和色散关系(54)

1.2.5 杂质吸收(57)

附录一 克喇末—克朗尼格(Kramer—Kronig)关系(67)

第二章 半导体光伏效应 (72)

2.1 描述内光电效应最重要的基本方程 (73)

2.2 半导体表面光伏效应 (75)

2.2.1 T. S. Moss 计算原理(76)

2.2.2 金属—半导体接触模型(刘士毅教授等计算原理)(80)

一、单晶材料的光生少子浓度分布(80)

二、单晶材料的表面光电压和丹倍电压计算(86)

三、外延材料的表面光电压的理论分析和计算(88)

四、多层结构的光伏效应(93)

2.2.3 超晶格和量子阱的光伏效应(99)

(1) 一、 AlAs/GaAs 超晶格光伏效应(99)

(1) 二、 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层超晶格光伏效应(104)

2.2.4 表面光伏效应的应用(108)

一、等光强校对(108)

二、用表面光电压法测定半导体少子扩散长度的三种方法(109)

(1) 三、用表面光电压法近似计算少子扩散长度(116)

四、由表面光伏谱进行拟合计算出有关参数(118)

五、利用表面光电压的极性判断半导体的导电类型(128)

六、用表面光电压法测定半导体光跃迁类型和带隙参数(128)

七、用表面光电压法测定 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的组分(135)

2.3 半导体 PN 结光伏效应 (137)

2.3.1 半导体结光生电压的光电转换机理(137)

2.3.2 光照射 PN 结开路电压的表达式(139)

2.3.3 光照时 PN 结的少子分布规律和 J_{sc} 计算公式(140)

一、均匀掺杂(140)

二、非均匀掺杂(143)

2.3.4 光照下理想 PN 结方程和特性曲线(144)

2.4 太阳电池 (146)

2.4.1 太阳电池的结构和光谱响应(146)

一、太阳电池的结构(146)

- 二、太阳光的光谱分布和大气质量(148) 康洪南 康中强 康静 康景 3.0.2
- 三、太阳电池的光谱响应(151) (148) 康景 康中强 康静 康景 3.0.2
- 2.4.2 太阳电池的电气特性(157) (157) 康中强 康静 康景 康景 3.0.2
- (157) 一、太阳电池的等效电路,负载上的电流、电压、功率表达式(157) 景 3.0.2
- 二、短路电流及其影响因素(159) (159) 康中强 康静 康景 康景 3.0.2
- 三、太阳电池的开路电压及其影响因素(168) 康中强 康静 康景 康景 3.0.2
- 四、太阳电池的暗电流(177) (177) 康中强 康静 康景 康景 3.0.2
- (177) 五、太阳电池的填充因子 FF(179)..... 康中强 康静 康景 康景 3.0.2
- 六、串联电阻、旁路电阻对电池 I—V 特性的影响(181) 康静 康景 康景 3.0.2
- 2.4.3 太阳电池的转换效率(185) (185) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- (185) 一、理想 PN 结的光电转换效率(185) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 二、影响光电转换效率的主要因素(188) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 2.4.4 太阳电池的辐照效应(193) (193) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 一、辐照对太阳电池性能的影响(194) (194) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 二、抗辐照的太阳电池(195) (195) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 2.4.5 高效太阳电池(197) (197) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 一、提高太阳电池性能的主要措施(197) (197) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 二、高效太阳电池:绒面电池、背电场电池、紫电池(201) 康静 康景 康景 3.0.2
- 2.5 肖特基结太阳电池 康静 康景 康景 康景 3.0.2 (209)
- 2.5.1 金属—半导体接触势垒(209) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- (2.5.2) 肖特基势垒的正反向特性(214) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- (2.5.3) 实际的肖特基势垒(215) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- (2.5.4) 肖特基结太阳电池的结构和工作原理(219) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 2.5.5 光电流、光电压和光电转换效率(220) (220) 康静 康景 康景 3.0.2
- 2.5.6 MOS 或 MIS 太阳电池(223) (223) 康静 康景 康景 3.0.2
- 2.6 异质结太阳电池 康静 康景 康景 康景 3.0.2 (226)
- 2.6.1 异质结的构成及其能带图(226) (226) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 2.6.2 突变异质结的电特性(231) (231) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- (2.6.3) 异质结太阳电池的结构及工作原理(240) 康静 康景 康景 康景 3.0.2
- 2.6.4 异质结太阳电池的光电流(242) (242) 康静 康景 康景 康景 3.0.2

2.6.5 异质结太阳电池的光电压(245)	
2.6.6 异质结太阳电池的效率(246)	
2.6.7 硫化亚铜—硫化镉太阳电池(248)	
2.7 异质面太阳电池	(254)
2.7.1 砷化镓太阳电池(254)	
2.7.2 砷化镓异质面太阳电池(256)	
2.7.3 碲化镉异质面太阳电池(264)	
2.8 非晶态硅太阳电池	(267)
2.8.1 非晶态导电机理(268)	
2.8.2 非晶硅太阳电池的结构及特性(270)	
2.9 半导体光伏型光电探测器	(275)
2.9.1 光电探测器的一般参数(275)	
2.9.2 半导体光敏二极管(279)	
一、光敏二极管的工作原理(279)	
二、光敏二极管的电性能(280)	
三、光敏二极管的探测性能(285)	
四、光敏二极管的分类(290)	
2.9.3 半导体光敏三极管(300)	
2.9.4 半导体光敏场效应晶体管(304)	
2.9.5 半导体光控可控硅的结构与工作原理(307)	
第三章 半导体的光电导	(318)
3.1 光电导效应及其测量	(318)
3.2 光电导现象的类型	(320)
3.2.1 带间激发(321)	
3.2.2 非本征激发(322)	
3.2.3 通过局域激发态的光激发(323)	
3.2.4 带内光激发载流子(323)	
3.2.5 激子吸收光电导(324)	
3.3 本征光电导的动力学过程	(325)
3.3.1 带间直接跃迁辐射复合(326)	

3.3.2 带间俄歇复合	(328)
3.3.3 通过复合中心的复合过程	(329)
3.3.4 陷阱能级对光电导的影响	(334)
3.3.5 两种复合中心理论	(336)
3.4 杂质光电导	(340)
3.5 光电导的光谱分布	(345)
3.5.1 本征光电导的光谱分布	(346)
3.5.2 杂质光电导的光谱分布	(348)
3.6 光电导器件的基本特性	(350)
3.6.1 灵敏度	(350)
3.6.2 光照特性	(352)
3.6.3 伏—安特性	(354)
3.6.4 光谱响应	(355)
3.6.5 温度特性	(357)
3.6.6 频率特性	(359)
第四章 半导体的激发光发射	(367)
4.1 半导体发光过程的激发与复合	(369)
4.1.1 发光过程中的激发	(369)
一、注入式发光	(369)
二、雪崩击穿发光	(373)
三、隧道效应式发光	(374)
四、移动高场畴的发光	(375)
4.1.2 发光过程中的复合几率和辐射效率	(377)
一、发光波长与材料禁带间的关系	(377)
二、辐射复合几率与辐射寿命	(377)
4.2 辐射复合	(380)
4.2.1 带间复合	(381)
4.2.2 浅施主(或受主)与价(或导)带的复合	(382)
4.2.3 施主与受主间的辐射复合(D—A 对复合)	(383)
4.2.4 通过深能级的复合	(392)

- 4.2.5 等电子陷阱复合(393) (888) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.2.6 激子辐射复合(397) (888) 激子复合辐射中心复合辐射 2.2.2
- 一、自由激子的复合发光(397)(888) 激子辐射复合辐射同带 2.2.2
- 二、束缚激子辐射复合发光(407) (888) 激子复合辐射同带 2.2.2
- 4.3 无辐射复合 复合辐射(415)
- (843.1 多声子复合(416) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.3.2 俄歇(Auger)复合(416) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.3.3 表面复合(418) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.4 发光二极管的材料和结构 半导体材料(418)
- 4.5 发光二极管的参数 (843) 复合辐射(424)
- 4.5.1 伏安特性(424) (843) 复合辐射 2.2.2
- 4.5.2 量子效率(424) (843) 复合辐射 2.2.2
- 4.5.3 光谱分布(429) (843) 复合辐射 2.2.2
- 4.5.4 亮度(432) (843) 复合辐射 2.2.2
- 4.6 异质结的电致发光 (843) 复合辐射(435)
- 4.7 红外上转换发光 复合辐射同带 2.2.2
- 4.8 半导体激光 复合辐射同带 2.2.2
- 4.8.1 自发辐射和受激辐射(442) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.8.2 半导体受激光发射条件(443) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 一、粒子数的分布反转(444) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 二、光学谐振腔(446) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 三、阈值条件(447) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.8.3 半导体激光器的结构(454) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.8.4 半导体激光器的主要特性(456) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 一、输出功率和转换效率(456) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- (088) 二、光谱分布(460) 复合辐射 2.2.2
- 三、温度对阈值电流密度和激射谱线的影响(463) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 4.8.5 半导体异质结激光器(465) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 一、单异质结激光器(467) (843) 复合辐射同带 2.2.2
- 二、双异质结激光器(470) (843) 复合辐射同带 2.2.2

三、分别限制光子和载流子异质结激光器(479)

4.8.6 半导体激光器的模式(481)

4.8.7 激光器的发展现状(487)

第五章 光作用下半导体的其他效应..... (502)

5.1 光磁效应和朗道能级 (502)

5.1.1 光磁效应(502)

5.1.2 朗道能级(502)

5.2 Franz—keldysh 效应(电调制光吸收效应) (509)

5.3 光电发射 (513)

5.4 光子曳引效应 (519)

第一章 半导体中的光吸收

本章讨论光和半导体相互作用的一般规律。利用经典电磁理论研究光在半导体中的传播规律及由此得到的有关材料的光学性质和光学常数。根据光电磁波与晶体中电子、原子的相互作用研究半导体中的各种光吸收效应,包括本征吸收、激子吸收、自由载流子吸收、晶格振动吸收和杂质吸收,并用量子力学理论来处理半导体的光吸收过程。研究半导体中光的传播和光吸收,可以提供有关半导体能带结构、声子结构、束缚和自由载流子行为,以及杂质能态等最基本物理性质、物理参数的信息。

1.1 半导体的光学常数

1.1.1 半导体的折射率和吸收系数

半导体的宏观光学性质通常用折射率、消光系数和吸收系数来表征。这些光学参数与半导体电学参数之间的关系,可以由经典电磁理论导出。

本书所讨论的光波是从红外到紫外波段,不包括 X 射线那样的超短波,在光波长数量级范围内包含有几千个甚至几万个原子,因此,半导体材料可以看作是连续介质,宏观和微观麦克斯韦(Maxwell)方程有相同的形式,当光波即电磁波在不带电的各向

同性的导电介质(包括半导体)中传播时,服从麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.4)$$

对光学各向同性的均匀的介质,有

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$$

式中 ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空电容率和介质的相对电容率, μ_0 和 μ_r 分别为真空磁导率和介质的相对磁导率, σ 为介质的电导率。

对光学波长,除了近来发展起来的半磁半导体外,可假定 $\mu_r = 1$, 因此麦克斯韦方程可写为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.8)$$

由式(1.5)和(1.6)得

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = -\mu_0 \left(\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \right)$$

根据矢量运算,有 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}$ 所以得

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \sigma \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.9a)$$

同理可得

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \sigma \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.9b)$$

式(1.9)就是一组关于介质中电磁波传播的二阶微分方程。

考虑沿 x 方向传播的角频率为 ω 的单色平面电磁波, 取 E 沿 y 方向, 则电场分量可写作 k, E, H 三者互相垂直, H 沿 z 方向。

$$E_y = E_0 \exp[i(\omega t - k \cdot x)] = E_0 \exp[i\omega(t - \tilde{N}x/c)] \quad (1.10)$$

式中 E_0 是 $x=0$ 处电矢量的振幅, k 是介质中电磁波的波矢, c 是真空中光速, $\tilde{N}$ 是复数折射率, 将式(1.9)代入(1.10)得

$$\tilde{N}^2 = c^2 \left(\epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mu_0 \epsilon_0 \quad (1.11)$$

真空中, $\tilde{N}=1, \epsilon_r=1, \sigma=0$, 由上式得

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

所以式(1.11)可以简化为

$$\tilde{N}^2 = \epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (1.12)$$

对于导体和 σ 不可忽略的半导体, 复数折射率 $\tilde{N}$ 可以表示为

$$\tilde{N} = N - iK \quad (1.13)$$

将式(1.13)代入式(1.10)得

$$E_y = E_0 \exp\left(-\frac{\omega K x}{c}\right) \exp[i\omega\left(t - \frac{N x}{c}\right)] \quad (1.14a)$$

对于 H_z , 可得到类似的表达式

$$H_z = H_0 \exp\left(-\frac{\omega K x}{c}\right) \exp[i\omega\left(t - \frac{N x}{c}\right)] \quad (1.14b)$$

从式(1.14)得知, $\sigma \neq 0$ 时, 光波以 c/N 的速度沿 x 方向传播, 其振幅按 $\exp\left(-\frac{\omega K x}{c}\right)$ 的形式衰减。 N 称为折射率, K 则是表征光能衰减的参量, 称为消光系数。由于光波的电矢量和磁矢量都按指数式 $\exp\left(-\frac{\omega K x}{c}\right)$ 衰减, 而能流密度正比于电矢量和磁矢量振幅的乘积, 其实数部分应该是光强 I 随传播距离 x 的变化关系。因此, 光强度按 $\exp\left(-\frac{2\omega K x}{c}\right)$ 衰减, 即

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2\omega Kx}{c}\right) \quad (1.15)$$

实验上,人们常用透射法测定光强随传播距离的衰减,如图 1.1 所示。实验发现,介质中光的衰减与光强成正比,引入比例系数 α 得

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1.16)$$

式中 α 是和光强无关的比例系数,

称为介质的吸收系数,从式(1.16)可知, α 的物理意义是光在介质中传播 $1/\alpha$ 距离时,能量减弱为原来的 $1/e$,因此 $1/\alpha$ 也称为吸收长度($l=1/\alpha$)。比较式(1.15)和(1.16),可以得到吸收系数和消光系数的关系,

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi K}{\lambda_0} \quad (1.17)$$

式中 λ_0 是真空中光的波长。

现在讨论光学常数 N 和 K 与电学常数的关系。把式(1.13)代入(1.12),比较它们的实部和虚部得

$$\left. \begin{aligned} N^2 - K^2 &= \epsilon_r \\ 2NK &= \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

由式(1-18)可解得

$$N^2 = \frac{1}{2} \epsilon_r \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \quad (1.19)$$

$$K^2 = \frac{1}{2} \epsilon_r \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (1.20)$$

式中 N 、 K 、 σ 和 ϵ_r 都是频率的函数。

讨论:

(1) 对于绝缘体, $\sigma=0$, 所以 $N = \sqrt{\epsilon_r}$, $K=0$, $\alpha=0$, 这说明绝

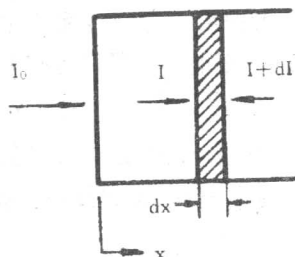


图 1.1 光在介质中的吸收