

高等学校教材

光电导物理及其应用

应 根 裕 编 著

电子工业出版社

光电导物理及其应用

应根裕 编著

電子工業出版社

内 容 简 介

本书系统而全面地阐述半导体、半绝缘体和非晶半导体薄膜中光生载流子的各种物理现象, 以及利用这些物理现象的各种实际应用。全书共六章, 包括以经典半导体理论为基础的晶态半导体的光电导理论; 以非晶态理论为基础的非晶半导体薄膜的光电导理论; 光电导体在摄像、光能转换和复印技术中的三大应用; 光电导体在显示、传真、开关和光电子学中的应用。本书理论与实际并重。

本书除可作物理电子技术以及有关专业高年级学生和研究生教材外, 也可供广大科技工作者参考。

光电导物理及其应用

应根裕 编著

责任编辑: 连潮东

*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京密云华都印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18.75 字数: 492千字

1990 年 2 月第一版 1990 年 2 月第一次印刷

印数: 1—1200 册 定价: 3.90 元

ISBN7-5053-0707-X/TN·257

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由电子物理与器件教材编审委员会电子物理与器件编审小组组织征稿、评选、推荐出版的。

本教材由清华大学应根裕编著,成都电讯工程学院唐传尧担任主审。

本课程的参考学时数为 72 学时,其主要内容为晶态与非晶态光电导物理原理以及它们的主要应用。

全书共分六章。第一章在半导体物理基础上详细叙述有关光电导的基本概念以及与光电导现象有关的各种物理过程,如光的吸收,光生载流子的产生、输运和复合,并对各种类型光电导过程既作半定量的物理说明,又作普遍的数学处理;第二章介绍非晶半导体理论,并着重指出非晶光电导薄膜与晶态光电导体之间的差异。这两章是光电导过程的物理基础。第三章讲述摄像管靶面物理,除了对两类靶面(注入型与阻挡型)分别作较深入的理论分析外,还结合实例,对目前使用最广泛的几种靶面(如 Sb_2S_3 , SeAsTe , PbO) 作了介绍;第四章讨论薄膜太阳电池的物理过程,特别着重介绍了 $\alpha\text{-Si:H}$ 太阳电池的各个方面及其发展动态;第五章叙述复印技术中光敏体的物理过程以及复印技术对光电导体的各种特殊要求和实施措施;第六章扼要地介绍光电导现象的其他重要应用(平面显示,非晶 CCD、记忆、开关、光盘、超晶格器件等)。

使用本教材应注意学生的基础,如学生的半导体物理不够扎实,则在讲述第一、第二章时,应作必要的补充与复习。讲述时应着重基本物理概念和基本处理方法,一些较长的数学推导可留给同学自学。后面四章属应用篇,可视对象不同作适当选择。

在编著过程中得到清华大学电子物理与器件教研组同志们的许多帮助,孙伯尧同志对本书提出过宝贵的建议和意见,阎幼清与缪兆心同志抄写了全部书稿,在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

序 言

光电导就是物质吸收了辐射所引起的电导率的提高。在恒定的光照下,当光生载流子的产生率被各种复合过程所平衡时,光电流就达到一个稳态值,因此光的吸收,光生载流子的产生、复合和输运过程彼此间有着密切的关系。在发展固体物理学的过程中,物质的光电导现象起着重要的作用。另一方面,在对光电导现象进行基础研究的同时,各种光电导体的制造工艺以及利用光电导现象的各种器件也获得了重大的发展,为了提高器件的性能,觅找性能更佳的光电导材料,也要对光电导现象作深入的研究。

在1940~1950年期间,主要研究共价键晶体的光电导现象,这一阶段的成果分别反映在“Photoconductivity in Solids”(R. H. Bube 1960)和“Photoconductivity and Allied Problems”(A. Rose, 1963)两本书中。

六十年代起对分子固体、液体和非晶态物质中的光电导现象作了详尽与深入的研究。由于分子固体与液体中分子间的作用力大大弱于共价键晶体中的作用力,因此,基于共价键晶体所得出的许多有关光电导的传统概念只能有判别地使用。

近年来很大注意力集中在非晶物质,特别是 α -Si:H薄膜的光电导现象上。因为非晶物质的光电导现象得到了广泛而重要的应用(如太阳电池、复印光敏鼓、摄象器件等),而在研究非晶光电导薄膜时,许多晶体半导体中经常使用的概念要进行修正,必须引入一系列新的概念和处理方法。

虽然对光电导现象的研究与应用已有一段历史,并且目前国内外还在蓬勃发展着,但国内至今尚未有一本全面系统地讲述光电导物理及其应用的书,本教材希望能在这个领域中起一个抛砖引玉的作用。

目 录

第一章 光电导物理	1
§ 1.1 光的吸收	1
1.1.1 半导体的光学常数	1
1.1.2 光的吸收	4
1.1.3 本征吸收	6
1.1.4 杂质吸收	9
1.1.5 激子吸收	10
1.1.6 自由载流子吸收	11
1.1.7 晶格吸收	12
1.1.8 晶格振动时对电子跃迁的影响	12
1.1.9 带隙的确定	13
§ 1.2 有关光电导的基本概念	15
1.2.1 寿命	16
1.2.2 寿命的种类	16
1.2.3 光电灵敏度	17
1.2.4 捕获截面	17
1.2.5 不存在陷阱时的简单复合动力学	18
1.2.6 准费米能级	20
1.2.7 陷阱能级与复合能级的分界线	22
§ 1.3 绝缘光电导体的几种简单复合过程	25
1.3.1 单组复合中心(低光照)	25
1.3.2 单组复合中心(强光照)	26
1.3.3 单组复合中心与陷阱(低光照)	27
1.3.4 单组复合中心与陷阱(强光照)	28
1.3.5 过渡情况	28
1.3.6 电子掺杂	29
§ 1.4 若干光电特性的解释	29
1.4.1 $\tau = \text{常数}$, $\tau_0 \propto f^{-1}$	30
1.4.2 $I_p \propto f^\alpha$ ($0.5 < \alpha < 1$)	31
1.4.3 敏化	33
1.4.4 超线性	34
1.4.5 红外与温度淬灭	35
§ 1.5 复合机理	36
1.5.1 辐射复合	36
1.5.2 非辐射复合	37
1.5.3 俄歇复合	38
§ 1.6 复合动力学	39

1.6.1 普遍的数学公式	39
1.6.2 各种复合下的寿命公式	42
1.6.3 普遍公式应用举例	48
1.6.4 光电导的上升与衰减曲线	53
§ 1.7 空间电荷限制流	56
1.7.1 无陷阱情况下的空间电荷限制流	56
1.7.2 存在陷阱情况下的空间电荷限制流	58
1.7.3 瞬变效应	60
§ 1.8 增益-带宽积	61
§ 1.9 噪声	65
1.9.1 一般公式	65
1.9.2 光电导噪声(无陷阱情况)	66
1.9.3 光电导噪声(有陷阱情况)	67
§ 1.10 电极效应	69
1.10.1 中性接触	69
1.10.2 阻挡接触	70
1.10.3 欧姆接触	71
1.10.4 氧化锡透明导电层	73
§ 1.11 一面为悬浮电位的光电导体的特性分析	76
1.11.1 应用例子	76
1.11.2 “记录”时的电流增益	76
1.11.3 视象管靶面的阅读与恢复	78
参考文献	82
第二章 非晶半导体的物理基础	83
§ 2.1 非晶半导体的特点和分类	83
2.1.1 非晶半导体的特点	83
2.1.2 非晶半导体的分类	87
§ 2.2 非晶半导体的物质结构	88
2.2.1 非晶半导体的物质结构	88
2.2.2 非晶半导体的结构模型	90
2.2.3 关于无序的一些概念	91
§ 2.3 非晶半导体的化学键结构	92
2.3.1 共价结合的化学键理论	92
2.3.2 杂化轨道	93
2.3.3 由化学键了解非晶半导体的能带结构	94
§ 2.4 渗流理论	95
2.4.1 渗流过程和渗流阈	95
2.4.2 拓扑无序体系的渗流和连续体的渗流	98
§ 2.5 非晶态物质的电子论	98
2.5.1 固体能带论回顾	98
2.5.2 定域态——Anderson 理论	102
2.5.3 迁移率边	104
2.5.4 态密度分布	105
2.5.5 Mott-CFO 能带模型	107

§ 2.6 非晶半导体中的缺陷及掺杂	108
2.6.1 缺陷的形成	109
2.6.2 缺陷定域态	110
2.6.3 非晶半导体中的费米能级	112
2.6.4 非晶半导体中的掺杂	113
§ 2.7 非晶半导体的电特性	114
2.7.1 电导率 $\sigma(\omega)$ 的普遍公式——Kubo-Greenwood 公式	114
2.7.2 定域态的电导——跳跃式导电	116
2.7.3 态隙中定域态电子的导电	117
2.7.4 非晶半导体的直流电导率	118
2.7.5 交流电导率	121
2.7.6 迁移率	123
2.7.7 温差电动势率	125
2.7.8 接触与表面	127
§ 2.8 非晶半导体的光学性质	130
2.8.1 非晶半导体光吸收的一般特性	130
2.8.2 吸收边	131
2.8.3 光致发光	133
§ 2.9 非晶半导体的光电特性	134
2.9.1 一般特点	134
2.9.2 光电导方程	136
2.9.3 光电导方程举例	138
2.9.4 S. W 效应	142
§ 2.10 非晶光电导薄膜物理参量的测量	143
2.10.1 场效应法测量非晶薄膜的隙态密度分布	143
2.10.2 漂移迁移率的测量	149
2.10.3 非晶薄膜的红外光谱	153
参考文献	154
第三章 光电导型摄像管	156
§ 3.1 光电导型摄像管的发展史	156
§ 3.2 光电导型摄像管的工作原理	157
§ 3.3 摄像管的主要参量	158
§ 3.4 光电导摄像管靶面的一般工作原理	161
3.4.1 靶表面电位的变化	161
3.4.2 灵敏度与靶面时间常数的关系	163
§ 3.5 注入型靶面	164
3.5.1 摄像管对注入型靶面材料的要求	164
3.5.2 Sb_2S_3 光电导摄像管	167
§ 3.6 阻挡型靶面理论	170
3.6.1 阻挡型靶面的种类	170
3.6.2 阻挡层降低光电导惰性的分析	174
3.6.3 MIS 靶面的伏安特性	176
3.6.4 阻挡型靶面的最佳厚度	179
§ 3.7 阻挡型靶面视觉管	181

3.7.1 硒砷碲靶面视象管(Saticon)	181
3.7.2 氧化铅靶面视象管(Plumbicon)	185
3.7.3 硅靶视象管	187
3.7.4 碲化铋视象管(Newvicon)	188
3.7.5 硒化镉视象管(Chalnicon)	189
3.7.6 非晶态氢硅(α -Si:H) 靶面摄象管	190
参考文献	191
第四章 薄膜太阳电池	192
§ 4.1 太阳电池发展史	192
§ 4.2 太阳电池的一般介绍	193
4.2.1 理想太阳电池的效率	194
4.2.2 影响实际太阳电池效率的因素	198
4.2.3 按使用目的对太阳电池的分类	199
§ 4.3 氢化非晶硅太阳电池	202
4.3.1 在非晶硅太阳电池中提高效率的条件	203
4.3.2 氢化的作用	204
4.3.3 氢化非晶硅的沉积	205
4.3.4 等离子淀积的化学反应及 α -Si:H 的生长机理	206
4.3.5 α -Si:H 膜的光学特性与电学特性	208
4.3.6 α -Si:H 太阳电池的结构	212
4.3.7 α -Si:H 太阳电池的光伏特性	215
4.3.8 α -Si:H 太阳电池制作中的几个基本问题	218
§ 4.4 太阳电池的新进展	220
参考文献	222
第五章 静电复印	223
§ 5.1 静电复印的基本过程	223
5.1.1 感光片的敏化(或充电)	224
5.1.2 曝光	225
5.1.3 显影	226
5.1.4 复印机内部构造	226
§ 5.2 复印用光电导材料	227
5.2.1 对复印用光电导材料的要求	228
5.2.2 非晶硒	228
5.2.3 非晶硅	231
5.2.4 光电导体粘结层	232
§ 5.3 光电导绝缘体中的电荷传输	234
5.3.1 暗衰减	234
5.3.2 光电导放电	236
§ 5.4 色调复现曲线与最优化	242
5.4.1 关键子系统的传递函数	243
5.4.2 复印过程中工作参数的最优选择	244
参考文献	245
第六章 非晶半导体的其它应用	246

§ 6.1 薄膜晶体管(TFT)及其在平面显示器中的应用	246
6.1.1 α -Si:H 薄膜晶体管	246
6.1.2 α -Si:H TFT 特性曲线与结构	249
6.1.3 非晶硅静电感应晶体管	251
6.1.4 利用 TFT 选址的液晶显示	253
§ 6.2 非晶硅锗硼三元合金及其在低损耗高速二极管中的应用	255
6.2.1 Si-Ge-B 三元合金	256
6.2.2 α -Si-Ge-B 合金的应用	257
6.2.3 非晶态-晶态结(a - c 结)的接触理论	259
§ 6.3 非晶半导体在传真、摄像中的应用	263
6.3.1 大尺寸非晶半导体光敏元件阵列	264
6.3.2 非晶硅电荷耦合器件(α -Si:H CCD)	265
6.3.3 叠层型 CCD	274
§ 6.4 非晶半导体在开关和记忆元件中的应用	275
6.4.1 阈值开关	275
6.4.2 记忆开关	276
6.4.3 开关机理	277
6.4.4 皮秒光电开关	278
§ 6.5 利用非晶半导体材料结构变化的各种应用	283
6.5.1 光盘记忆系统	283
6.5.2 光调制器和 IC 元件	284
§ 6.6 非晶半导体的超晶格结构	287
参考文献	289

第一章 光电导物理

§1.1 光的吸收

1.1.1 半导体的光学常数

1. 光学常数与电学常数的关系

当电磁波在均匀各向同性媒介中传播时,服从麦克斯韦方程

$$\nabla \times \mathcal{E} = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{取 } \mu_r = 1) \quad (1.1-1)$$

$$\nabla \times H = \sigma \mathcal{E} + \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} \quad (1.1-2)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (1.1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{E} = 0 \quad (1.1-4)$$

由(1.1-1)和(1.1-2)两式可得

$$\nabla \times \nabla \times \mathcal{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times H$$

而

$$\nabla \times \nabla \times \mathcal{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathcal{E}) - \nabla^2 \mathcal{E} = -\nabla^2 \mathcal{E}$$

由此可推导出波动方程

$$\nabla^2 \mathcal{E} - \sigma \mu_0 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1-5)$$

$$\nabla^2 H - \sigma \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1-6)$$

我们这儿接触的光都可考虑为平面电磁波(见图 1.1-1), 设为

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 j \exp \left[i \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] j \quad (1.1-7)$$

式中, $\mathcal{E}_0$ 是振幅, ω 是角频率, v 是沿 x 方向传播的速度。将式(1.1-7)代入式(1.1-5)得

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r - \frac{i \sigma \mu_0}{\omega} \quad (1.1-8)$$

按折射率的定义可知

$$\frac{c}{v} = N \quad (N \text{ 为媒介的折射率}) \quad (1.1-9)$$

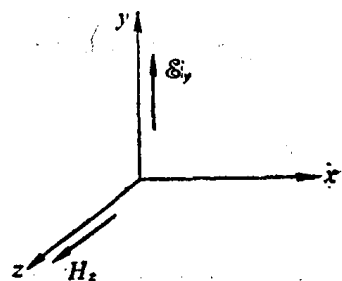


图 1.1-1 平面电磁波

代入式(1.1-8)得

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

而

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

所以

$$N^2 = \epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (1.1-10)$$

可见当 $\sigma=0$ 时, $N=\sqrt{\epsilon_r}$ (即折射率等于介电常数的平方根); $\sigma \neq 0$ 时, N 是复数。设

$$N = n - ik \quad (1.1-11)$$

式中, k 为消光系数, n 为普通的折射率。

因此有

$$t - \frac{x}{v} = t - \frac{Nx}{c} = t - \frac{n-ik}{c}x$$

代入式(1.1-7)得

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_x &= \mathcal{E}_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{n}{c}x + i\frac{k}{c}x \right) \right] \\ &= \mathcal{E}_0 \exp \left(-\frac{\omega k}{c}x \right) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{nx}{c} \right) \right] \end{aligned} \quad (1.1-12)$$

仿之得

$$H_z = H_0 \exp \left(-\frac{\omega k x}{c} \right) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{nx}{c} \right) \right] \quad (1.1-13)$$

而能流密度(即坡印廷矢量) $E \times H$ 的模正比于电矢量与磁矢量振幅的乘积, 其实数部分应是光强度 I 随传播距离 x 变化的关系, 即

$$I = I_0 \exp(-2\omega k x / c)$$

而用透射法测定光的衰减时, 可得

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

所以吸收系数 α 与消光系数 k 间的关系为

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1.1-14)$$

式中 λ 为自由空间中光波长。

现在讨论光学常数 n, k 与电学常数 $\sigma, \epsilon_0, \epsilon_r$ 的关系。由式(1.1-10), (1.1-11)得

$$n^2 - k^2 - 2ink = \epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

所以

$$n^2 - k^2 = \epsilon_r$$

$$2nk = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

解得

$$n^2 = \frac{1}{2} \epsilon_r \left[1 + \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \right)^{1/2} \right] \quad (1.1-15)$$

$$k^2 = \frac{1}{2} \epsilon_r \left[1 - \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \right)^{1/2} \right] \quad (1.1-16)$$

可见当 $\sigma=0$ 时,

$$k=0, \quad n=\sqrt{\epsilon_r} \quad (1.1-17)$$

但要注意, 上面两式中 n, k, σ 和 ϵ_r 都应取同一频率下之值。一般物理书中给出的 ϵ_r 的值是静场或低频场下的测定值, 在频率不是很高时, ϵ_r 几乎不变。但当频率增加到光波这样高的值时, ϵ_r 就明显地与频率有关, 这就是色散现象, 所以若将静场下测得之 ϵ_r 与在光波频率下测得之 n 代入式(1.1-17)中就会发现明显的不符。如大家熟知的水

$$n=1.3, \text{ 而 } \epsilon_r=81$$

显然不符合上述公式。

2. 反射系数与透射系数

先求 H_0 与 $\mathcal{E}_0$ 间的关系, 将(1.1-12)、(1.1-13)两式代入式(1.1-1)中, 有

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathcal{E} &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{E}_0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{\partial \mathcal{E}_0}{\partial x} k = \mathcal{E}_0 \left(-\frac{\omega}{c} \right) (k + in) \exp \left(-\frac{\omega k}{c} x \right) \\ &\quad \cdot \exp \left[i\omega \left(t - \frac{nx}{c} \right) \right] k = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} k \\ &= -\mu_0 H_0 (i\omega) \exp \left(-\frac{\omega k x}{c} \right) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{nx}{c} \right) \right] k \end{aligned}$$

所以

$$H_0 = \frac{k + in}{i\mu_0 c} \mathcal{E}_0 = \frac{n - ik}{\mu_0 c} \mathcal{E}_0 = \frac{N}{\mu_0 c} \mathcal{E}_0$$

而能流密度

$$S = \frac{1}{2} \mathcal{E}_0 H_0 = \frac{N}{2\mu_0 c} |\mathcal{E}_0|^2 \quad (1.1-18)$$

即能流密度正比于电矢量振幅的平方。

定义反射系数(见图 1.1-2)

$$R = \frac{\text{反射能流}}{\text{入射能流}} = \frac{|\mathcal{E}'_0|^2}{|\mathcal{E}_0|^2}$$

对于从空气垂直入射到折射率为 $N = n - ik$ 的介质表面时, 利用 $\mathcal{E}, H$ 场向和法向分量的边界条件可以推得

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1.1-19)$$

所以对于低吸收系数(即低 k 值)

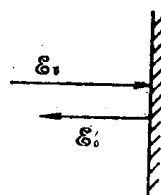


图 1.1-2 定义反射系数

$$R \approx \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$$

当 n 大时, R 变大, 如对于真空蒸发的 Sb_2S_3 层在 $0.6\mu\text{m}$ 波长处 $\alpha \approx 4 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$, 可算得

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} = 0.2$$

将 $n=3, k$ 值代入式(1.1-19)得

$$R = \frac{(3-1)^2 + 0.2^2}{(3+1)^2 + 0.2^2} \approx 25\%$$

而对于玻璃, 因 $\sigma=0, n=1.5 \sim 1.6$, 所以

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{0.25}{6.25} = 4\%$$

由式(1.1-18)可以解出

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\left(\frac{1+R}{1-R}\right)^2 - (1+k^2)} \quad (1.1-20)$$

图 1.1-3 光的反射与透射

所以可利用测 R 求出材料之折射率。

根据能量守恒定理可知, 透射系数 T 与 R 的关系 (T = 透射光流/入射光流)

$$T + R = 1, \text{ 即 } T = 1 - R$$

设有 I_0 光流垂直入射厚为 d 之膜上(图 1.1-3), 进入第 I 层为 $(1-R)I_0$, 到达第 II 层为 $(1-R) \times I_0 \cdot \exp(-\alpha d)$, 出第 II 层为 $(1-R)^2 I_0 \cdot \exp(-\alpha d)$, 即

$$T = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (1.1-21)$$

这是光波透过厚度为 d 样品时 R 与 T 的关系。

1.1.2 光的吸收

当光通过任何介质时, 或多或少地要被介质所吸收。吸收通常带有选择性, 也就是不同波长的光被吸收的程度不同, 而波长决定光的颜色, 所以不同的物体就呈现不同的颜色。

透明无色物体对可见光波长范围的光吸收很少, 例如厚 1cm 的玻璃片对于通过它的可见光线只吸收约 1%, 而它对红外或紫外线则强烈地吸收。

有色透明体, 例如红玻璃, 对红色及橙黄色光吸收微弱, 而对蓝、绿、紫光则显著地吸收, 故呈红色。

因为光是电磁波, 光波通过物质时引起物质中电子的强迫振动, 这些振动能与原子相互作用就转化为不规则的分子运动的能量, 即使物体变热。所以可以从能量的观点对光的吸收作大概的描述, 而先不描述具体作用的物理过程。

设有平行光通过均匀物质而传播, 在此物质中分出一无限薄的厚度为 dx 的薄层(图 1.1-4), 这薄层介于垂直于光入射方向的两个平行平面之间。当光线通过此薄层时, 能流密度 I 的改变量为 $-dI$ 。很自然可假定此减少量 $-dI$ 与该层内的能流密度及该层的厚度 dx 成正比, 即

$$-dI = \alpha I dx$$

系数 α 为吸收物质特性所决定, 叫吸收系数, 单位为 cm^{-1} 。

若 $x=0$ 处 $I=I_0$, 则解得

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

α 越大, 光被吸收得越强烈。当 $x=1/\alpha$ 时,

$$I = I_0/e \approx I_0/2.72$$

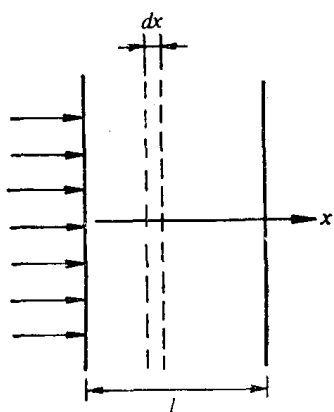


图 1.1-4 吸收公式的推导

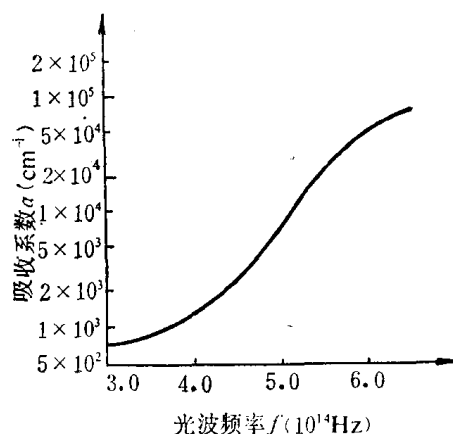


图 1.1-5 Sb_2S_3 的吸收曲线

各种物质的吸收系数变化很大, 在可见光范围内:

一个大气压的空气	$\sim 10^{-5} \text{cm}^{-1}$	金属	$\sim 10^4 \text{cm}^{-1}$
玻璃	$\sim 10^{-2} \text{cm}^{-1}$	半导体和介质本征吸收	$\sim 10^6 \text{cm}^{-1}$

Sb_2S_3 的吸收见图 1.1-5。

设在 $z=0$ 与 $z=d$ 无限薄的片层中入射光为 Q_i 量子数/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, 则在入射能流密度 I 与 Q_i 间的关系为

$$Q_i = \frac{I}{h\nu} = \frac{\lambda I}{hc} = 5.035 \times 10^{12} \lambda I \quad (\text{指对单位面积的样品})$$

式中 λ 用 μm , I 用 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 作单位。

若设每吸收一个光量子产生一个电子-空穴对(对于本征吸收) 或一个载流子(对于杂质吸收), 并且忽略 $z=d$ 处的反射, 在表面下任一层中体激发率

$$f = -\frac{dQ}{dz} = (1-R)\alpha Q_i \exp(-\alpha z) \quad (R \text{ 为反射系数})$$

现在讨论两种极限情况:

(1) α 很大, 光在表面全被吸收, 则只要等效扩散长度比 d (样品厚度) 大, 则激发可认为是均匀的:

$$f = (1-R) \frac{Q_i}{d} \quad (1.1-22)$$

(2) $\alpha d \ll 1$ (如杂质吸收), 则要考虑两层间的来回反射 (图 1.1-6), 总的吸收光子量子数为

$$\begin{aligned} & (1-R)Q_i[1-\exp(-\alpha d)] + (1-R)Q_i\exp(-\alpha d) \cdot R[1-\exp(-\alpha d) + \dots] \\ &= (1-R)Q_i[1-\exp(-\alpha d)][1 + R\exp(-\alpha d) + R^2\exp(-2\alpha d) + \dots] \end{aligned}$$

而 $[1 - R\exp(-\alpha d)]^{-1} = 1 + R\exp(-\alpha d) + R^2\exp(-2\alpha d) + \dots$

所以 上式 $= (1-R)Q_i[1-\exp(-\alpha d)][1 - R\exp(-\alpha d)]^{-1}$

因 $\alpha d \ll 1$, 所以

$$1 - \exp(-\alpha d) \approx \alpha d, [1 - R\exp(-\alpha d)] \approx 1 - R$$

代入得, 上式 $= Q_i \alpha d$

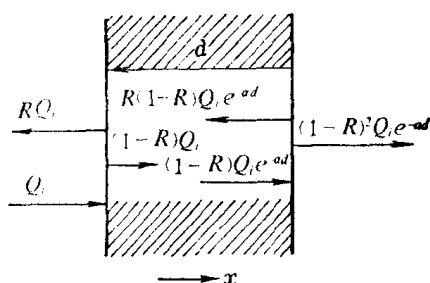


图 1.1-6 $\alpha d \ll 1$ 时的吸收

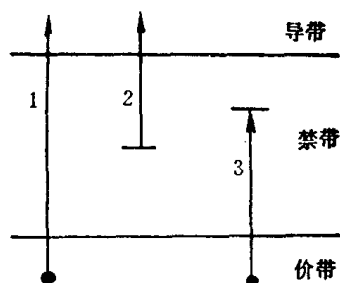


图 1.1-7 光吸收引起的光电导跃迁

所以

$$f \approx \frac{Q_i \alpha d}{d} = \alpha Q_i \quad (1.1-23)$$

从能带论角度来看光吸收引起产生光电导的跃迁有下列几种 (图 1.1-7):

- (1) 电子从价带跃迁到导带, 每吸收一个光子, 产生一个自由电子与一个自由空穴;
- (2) 电子从禁带中杂质能级吸收光子后跃迁到导带, 产生一个自由电子与一个束缚空穴;
- (3) 价带中电子吸收光子跃迁到未被占领的杂质能级上 (也可说空穴由杂质能级向下跃迁到价带), 产生一个自由空穴与一个束缚电子。

还有几种不形成光电导的跃迁:

- (1) 激子吸收: 吸收光子形成激子, 在长波限外形成吸收线;
- (2) 自由载流子吸收;
- (3) 晶格吸收。

1.1.3 本征吸收

1. 垂直跃迁 (或直接跃迁)

光照下能带中电子的跃迁必须符合选择定则: 满足能量守恒与动量守恒;