



# 固体光学

● 莫党

高等教育出版社



# 固体光学

莫 党

高等教育出版社

(京)112号

图书在版编目 (CIP) 数据

固体光学/莫党编著. —北京: 高等教育出版社, 1996  
ISBN 7-04-005579-1

I. 固… I. 莫… III. 固体-光学性质 IV. 0482.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 01161 号

\*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码: 100009 传真: 64014048 电话: 64054588

新华书店总店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 5.75 字数 140 000

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数 0001—1 121

定价 5.60 元

凡购买高等教育出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等  
质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换

版权所有, 不得翻印

97-1500  
33

## 内 容 简 介

本书讲述固体的光学性质和各种光跃迁过程的光谱, 主要内容包括固体光学性质的宏观描述、经典模型、量子描述及各向异性固体光学性质、杂质缺陷光谱、带间跃迁光谱、带内自由电子光谱、激子光谱、晶格吸收光谱、一些特殊光谱和新型固体材料(量子阱、超晶格以及低维聚合物)光谱, 对作者参与发展的椭偏光谱和分数微分谱, 也给予独特的介绍。

本书叙述简明扼要, 由浅入深, 取材新颖, 突出物理内涵, 舍去复杂的数学推导, 是一本有特色、有创意的教材。

本书适合理工科高等学校凝聚态物理、光学和其它有关专业的研究生和大学本科使用, 也可供科技人员参考。

## 序 言

1983年我在中山大学讲授一门新课——固体光学，这是为凝聚态物理专业研究生开设的，一些光学专业的研究生也选修了该课。当时编写了一本简明的讲义，主要内容包括固体光学性质的宏观描述、经典模型和量子描述，以及固体中各种跃迁过程的光谱。此后的十年当中，这门课曾多次向研究生和高年级大学生开设。1987年曾对原讲义作了修改和补充，增加了新内容。后来“固体光学”被列入国家教委固体物理教材“八五”编写规划，于是我在讲义的基础上，经过整理补充，写成了本书。

与本书题材相近的教材或教学参考书并不多见。本书的章节组织、内容选取和写作风格，主要根据笔者本人的见解，也受到笔者的专长和科学研究经历的影响。在编写过程中曾经参考一些有关书籍和文章，也参考了美国斯坦福大学 Spicer 教授开设的“固体光学性质”讲座的内容。1982年我在斯坦福大学当访问学者时曾旁听过该讲座。在本书整理定稿期间，南开大学张光寅、蓝国祥教授编著的《晶格振动光谱学》和中国科学院上海技术物理研究所沈学础教授著的《半导体光学性质》先后出版了，也给笔者以帮助和启示。

本书是按照简明教材的模式去写的，所用篇幅较少，可使学生和读者留出时间去消化内容和阅读其他书籍文献。在大部分章节中，只讲述基本概念和基础知识，并不去详细地介绍各专题的大量研究成果以及新近发展情况，数学公式推导方面也尽量简略而略去复杂的具体运算。笔者注重鲜明的物理图象，也注意物理概念的严谨性。在章节组织方面，希望能有助于使读者建立整体概念，同时注意使本书具有特色和有新意，还注意各章节的联系，通过对比等方式加深读者对本书内容的了解。本书还介绍了笔者

及其合作者和学生的一些研究成果，笔者希望通过这些实例，使本书的内容更生动更形象。总之，本书编写目的是让读者通过阅读和学习本书打下有关固体光学的业务基础知识，所以读者（特别是研究生）学习本书时最好能参阅一些有关的书籍和文章。本书每章后附有参考文献，全书后面还给出习题。

本书编写过程中，得到许多同行的支持和帮助。复旦大学陆栋教授审阅了全书并提出了宝贵的意见，南京大学李正中教授积极支持和帮助本书的编写工作。张光寅教授、沈学础教授和 Spicer 教授为本书编写提供了参考资料。笔者的许多学生多年来提出过许多有益的意见，博士生黄秀清和朱德瑞协助绘图和编制索引。高等教育出版社钟金城为本书的出版做了许多工作。在这里，笔者向他们表示深深的谢意。

莫 党

1994年10月

# 目 录

绪论 .....	1
参考文献 .....	3
<b>第一章 光学性质的宏观描述 .....</b>	<b>5</b>
§ 1-1 波动方程和光学常数 .....	5
§ 1-2 介电常数和电导率 .....	9
§ 1-3 克拉末-克朗尼格关系 .....	11
§ 1-4 固体光学常数数据 .....	12
参考文献 .....	14
<b>第二章 各向异性固体的光学性质 .....</b>	<b>15</b>
§ 2-1 晶体的各向异性和张量 .....	15
§ 2-2 介电常数椭球和折射率椭球 .....	17
§ 2-3 单轴晶体 .....	21
§ 2-4 晶体光学应用实例 .....	26
§ 2-5 电光系数 .....	28
§ 2-6 非线性光学性质 .....	31
§ 2-7 光折变性质 .....	33
参考文献 .....	37
<b>第三章 固体光学性质的经典模型 .....</b>	<b>38</b>
§ 3-1 电介质的洛伦兹模型 .....	38
§ 3-2 金属的特鲁德模型 .....	42
§ 3-3 模型与实际的比较 .....	44
§ 3-4 振子模型的应用 .....	46
参考文献 .....	48
<b>第四章 光跃迁的量子描述 .....</b>	<b>50</b>
§ 4-1 含时间的微扰理论 .....	50
§ 4-2 跃迁概率 .....	52
§ 4-3 跃迁矩阵元与守恒律 .....	55

§ 4-4 光学常数量子表达式 .....	56
参考文献 .....	59
<b>第五章 杂质和缺陷的光谱</b> .....	60
§ 5-1 类氢能级谱 .....	61
§ 5-2 紧束缚态能级 .....	65
§ 5-3 色心 .....	66
参考文献 .....	70
<b>第六章 带间跃迁光谱</b> .....	72
§ 6-1 直接跃迁的吸收边 .....	73
§ 6-2 间接跃迁的吸收边 .....	76
§ 6-3 能带中临界点附近的介电函数谱 .....	81
§ 6-4 微分谱和分数微分谱 .....	87
参考文献 .....	92
<b>第七章 带内自由电子光谱</b> .....	93
§ 7-1 金属的光谱 .....	93
§ 7-2 半导体的自由载流子光谱及带内亚结构跃迁 .....	97
§ 7-3 等离子振荡与等离激元 .....	101
参考文献 .....	105
<b>第八章 激子光谱</b> .....	106
§ 8-1 弱束缚激子 .....	107
§ 8-2 紧束缚激子 .....	112
参考文献 .....	114
<b>第九章 晶格吸收光谱</b> .....	115
§ 9-1 光子与声子互作用的守恒律 .....	116
§ 9-2 振子模型对晶格振动谱的应用 .....	119
§ 9-3 声子-光子耦合与极化激元 .....	122
§ 9-4 拉曼光谱 .....	127
§ 9-5 各种光跃迁小结 .....	131
参考文献 .....	133
<b>第十章 椭偏光谱</b> .....	135
§ 10-1 椭偏法 .....	136



§ 10-2 椭圆光谱原理 .....	140
§ 10-3 椭圆光谱的应用 .....	141
参考文献 .....	147
<b>第十一章 一些特殊光谱和新型固体材料光谱介绍 .....</b>	<b>149</b>
§ 11-1 外作用下的光谱和调制光谱 .....	149
§ 11-2 量子阱和超晶格光谱 .....	155
§ 11-3 低维聚合物的元激发和光谱 .....	160
参考文献 .....	165
<b>习题 .....</b>	<b>167</b>
<b>索引 .....</b>	<b>170</b>

## 绪 论

人们对固体的光学性质以及在固体中发生的光学现象的研究和应用,已经有很长的历史了.在经典光学发展时期,固体介质对光的折射、反射和吸收,以及利用固体的色散来进行分光、利用固体的双折射来产生和检测偏振光等,都是固体光学的重要内容.麦克斯韦电磁理论的建立,为光即电磁波这一经典理论奠定了基础.不同的固体有不同的光学性质,可用一些光学常数来加以定量描述.

20世纪开始前后,对固体由原子和电子组成的认识逐步加深,随着固体电子论的发展,提出了一些模型把固体(包括电介质和金属)的宏观光性与微观结构联系起来.但是在量子理论建立之前,这些模型本质上仍是经典模型.

量子力学建立后,随着固体能带论和格波理论的发展,人们对固体的认识,特别是对固体微观结构的认识有了新的飞跃,逐步建立起了近代的固体物理学.同样,也发展了固体光学性质和光学过程的量子理论,使各种类型的光跃迁得到研究.

能带论把固体分成导体(金属)、半导体和绝缘体(电介质),它们常常表现出不同的光学性质,但有些场合下又显示出相似的性质.

光学研究,特别是各种光谱研究,在固体物理发展中起过重要的作用.历史上,原子光谱和分子光谱对了解原子和分子的结构很有帮助,这些光谱常常由一系列尖锐的谱线组成,通过谱线的测定、鉴别和分析,可得到原子和分子的结构知识和有关参数数据.固体由大量原子、离子或分子组成,固体光谱常常比较复杂,有时由具有一定线宽的谱线组成,有时呈现出很宽的吸收带.

分子晶体光谱与相应的分子光谱比较相似,因为分子组成晶

体后其它分子对单分子的分子光谱的影响较小。分子晶体光谱的解释和分析,相对来说比较容易,对它们的研究也开展得较早。由于分子晶体光谱与近代固体物理学主流的关系较远,本书不准备介绍这方面的内容。

离子晶体的光谱研究也开展得较早。30年代提出了激子的概念。对离子晶体中的色心的研究在本世纪上半叶也开展了不少工作。

在半导体科学技术大发展后,共价晶体光谱的研究也随之有重要的进展。50~60年代曾有细致的工作对半导体的带间跃迁光谱和杂质光谱等进行研究,这对半导体的复杂能带结构和杂质态结构的了解作出重要贡献。

光谱方法和技术也在不断发展。微分谱和调制谱,各种外界作用下(如压力、电场、磁场等)的光谱等等的应用,使光学手段保持其在固体物理研究中的重要地位。

固体除电子能谱外还有声子谱,晶格振动吸收的测量和研究也是有丰富内容的。研究过程中,提出了一些新的元激发的概念,极化激元就是其中一个。

固体光学还向多方向发展。一个重要的扩展是非线性光学,现在非线性光学已发展成一门独立的学科,也有相应的课程,故本书不把它作为主要内容,只用一节篇幅来简介非线性光学系数。

还有一个重要的发展是用光谱研究固体中随时间变化的过程,这是时间分辨光谱。随着激光技术的发展,有可能测定和研究愈来愈快的过程,现在的超快光谱已可测量飞秒级的过程。本书也不讲述瞬态光谱,但稳态光谱的基本知识对了解瞬态光谱是必需的基础。

许多实际固体是各向异性的,具体的细致研究中常常要考虑光学性质的各向异性。群论、能带论以及统计理论等知识在许多具体研究工作中都会用到。本书作为基础教材,不以各向异性为重点,大部分选用固体各向同性条件下的光学性质为对象加以介

绍,这样数学表达较为简单,有助于较易地掌握物理概念.但是,本书仍用一章的篇幅简单地介绍各向异性光学性质,并着重于各向异性产生的一些特殊性.

研究固体的光学性质和光谱,不仅对基础研究有用,而且还有应用意义.固体材料在光通讯技术、光电子技术、激光技术、光信息处理技术、显示技术等方面有愈来愈多的应用.

本书第一章讲述固体光学性质的宏观描述,给出固体各种光学常数之间的关系,介绍固体光学常数数据的文献索引;第二章讲述各向异性固体的光学性质,介绍介电常数椭球和折射率椭球及一些双折射应用例子,还介绍电光系数、非线性光学系数和光折变性质;第三章讲述固体光学性质的经典模型,即电介质的洛伦兹模型和金属的特鲁德模型,介绍模型的一些应用;第四章讲述光跃迁的量子描述,从含时间的微扰理论出发,讨论跃迁概率、跃迁矩阵元和守恒律,给出光学常数的量子表达式;第五章讲述固体中杂质和缺陷的光谱,对三类定域态光谱(类氢能级谱、紧束缚态谱和色心光谱)加以介绍;第六章讲述带间跃迁光谱,包括直接跃迁吸收边、间接跃迁吸收边和临界点附近的谱,还介绍微分谱和分数微分谱;第七章讲述带内自由电子光谱,包括金属光谱和半导体自由载流子吸收谱,还介绍了等离子振荡与等离激元;第八章讲述激子光谱,激子分为弱束缚激子与紧束缚激子两种;第九章讲述晶格吸收光谱,讨论光子与声子相互作用,介绍振子模型的应用,讨论声子与光子的耦合,介绍极化激元,还简单介绍拉曼光谱,最后给出各种光跃迁的小结;第十章讲述椭圆偏振光谱的原理和应用;第十一章介绍几种特殊光谱以及低维聚合物和超晶格的光谱.

绪论后的参考文献列出了关于固体光学性质和固体光谱的一些书籍和文集.

### 参 考 文 献

- [1] Moss T. S., Optical Properties of Semiconductors, Butterworths,

1959

- [ 2 ] Pines D. ,Elementary Excitation in Solids, Benjamin, 1964
- [ 3 ] Tauc J. , ed. , Optical Properties of Solids. Academic, 1966
- [ 4 ] Greenaway D. L. , Harbeke G. , Optical Properties and Band Structure of Semiconductors, Pergamon, 1968
- [ 5 ] Cardona M. , Modulation Spectroscopy, Academic, 1969
- [ 6 ] Hodgson J. N. , Optical Absorption and Dispersion in Solids, Chapman and Hall, 1970
- [ 7 ] Pankove J. I. , Optical Processes in Semiconductors, Prentice-Hall, 1971
- [ 8 ] Wooten F. , Optical Property of Solids, Academic, 1972
- [ 9 ] Abeles F. , ed. , Optical Properties of Solids, North-Holland, 1972
- [10] Bassani F. , Parravicini G. , Pastori Electronic States and Optical Transitions in Solids, Pergamon, 1975
- [11] Seraphin B. O. , ed. , Optical Properties of Solids - New Developments, North-Holland, 1976
- [12] Balkanski M. , ed. , Optical Properties of Semiconductors, North-Holland, 1980
- [13] Palik E. D. , ed. , Handbook of Optical Constants of Solids. Academic, 1985
- [14] 张光寅, 蓝国祥, 《晶格振动光谱学》, 高等教育出版社, 1991
- [15] 沈学础, 《半导体光学性质》, 科学出版社, 1992

# 第一章 光学性质的宏观描述

固体的基本光学性质可用一些称作光学常数的物理量来加以描述。不同的固体具有不同的光学性质。例如，无色玻璃对于可见光是透明的，而金属对可见光既反射又吸收。光从空气射入不同的固体，常常发生不同程度的折射，这时用折射率来描述折射程度的强弱。那么，描述固体的基本宏观光学性质有哪些物理量呢？这些物理量之间常常是有关系的，并不是完全独立的，各种光学常数（例如折射率与光频介电常数）之间有怎样的换算关系？也是本章的重要内容。

如绪论中所指出那样，本书所讲的固体光学性质，主要是指在稳态的、线性的和各向同性的条件下的性质。本章所讨论的问题主要是针对上述条件的限定范围而言的；但本章内容也是了解非稳态（瞬态）、非线性和各向异性的光学性质和现象的必要基础。

许多固体光学现象可用宏观的电磁理论来加以描述和分析，麦克斯韦方程组以及电磁波动方程是该理论的基础。电动力学对麦克斯韦方程组及电磁波动方程有系统的讲述，我们在这一章中，结合本课程的需要，简要地从电磁波动方程讲起。

## § 1-1 波动方程和光学常数

从麦克斯韦方程组出发，很易得到电磁波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-2)$$

这里  $E$  和  $H$  分别为电场强度矢量和磁场强度矢量,  $\sigma$  为介质的电导率 (conductivity),  $\epsilon$  和  $\mu$  分别为介电常数 (dielectric constant) 和磁导率 (permeability). 也有人称  $\epsilon$  为介电函数\* (dielectric function).

波动方程的解可表达成简谐平面波之和, 即用傅里叶变换, 可将任意波用正弦波的叠加来表达. 简谐平面波的形式为

$$E = x_0 E_0 e^{i\omega(t - \frac{Nz}{c})} \quad (1-3)$$

$$H = y_0 H_0 e^{i\omega(t - \frac{Nz}{c})} \quad (1-4)$$

其中  $x_0$  与  $y_0$  分别是在  $x$  方向与在  $y$  方向上的单位矢量,  $\omega$  为波的圆频率,  $c$  是光速,  $N$  称为复折射率,

$$N = n - ik \quad (1-5)$$

实部  $n$  叫做折射率 (refractive index), 虚部  $k$  叫做消光系数 (extinction coefficient). 不过请注意, 有些文献中  $k$  被叫作吸收系数<sup>[1]</sup>. 亦有文献采用如下定义,

$$N = n(1 - iK) \quad (1-6)$$

这里  $K$  被叫作消光系数<sup>[1]</sup>或衰减系数<sup>[2]</sup>.

还要注意, 有些文献采用与式 (1-5) 略有不同的式子,

$$N = n + ik \quad (1-7)$$

这时所对应的简谐平面波形式则为

$$E = x_0 E_0 e^{i\omega(t - \frac{Nz}{c} - i)} \quad (1-8)$$

虽然折射率和消光系数被称作光学常数, 用来标志物质的基

\* 由于介电常数与介电函数在不同领域的文献中均使用普遍, 故本书在不同章节中分别使用两者.

本光学特性。实际上它们是波长的函数，所以我们按习惯称它们为光学常数时，不要错以为它们是真正的、一成不变的常数。

$n$  和  $k$  可取些什么值呢？真空的  $n$  值为 1,  $k$  值为 0。在可见光范围中，普通玻璃的  $n$  值大约在 1.5~1.7 范围内，半导体硅单晶的  $n$  值约为 4。读者可能有一个错觉，以为  $n$  只能  $\geq 1$ ，不然光在该介质中的速度就大于真空中的光速  $c$  了。事实上，有些固体在一定的波长范围内  $n < 1$ ，甚至接近于零。请注意  $c/n$  所代表的是波的相速，而不是群速，所以超过  $c$  值并不违反基本物理原理。在后面第三章中，可以看到  $n < 1$  的实例。至于  $k$ ，它可取正值或等于零。读者可考虑一下，若令  $k$  取负值，将会发生什么现象。

除  $n$  和  $k$  外，还有另外一些描述光学性质的物理量，如吸收系数 (absorption coefficient) 和反射比 (reflectance)。

把式 (1-5) 代入式 (1-3)，得

$$\begin{aligned} E &= x_0 E_0 \exp\left[i\omega\left(t - \frac{nz}{c}\right)\right] \cdot \exp\left(-\frac{\omega kz}{c}\right) \\ &= x_0 E_0 \exp\left[i\omega\left(t - \frac{nz}{c}\right)\right] \cdot \exp\left(-\frac{2\pi kz}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (1-9)$$

这里  $\lambda$  是光在自由空间 (即真空) 中的波长。吸收系数  $\alpha$  定义为波传播单位距离后能流通量的变化率，即

$$\alpha = -\frac{1}{|S|} \cdot \frac{d|S|}{dz} \quad (1-10)$$

其中坡印亭矢量

$$S = E \times H \quad (1-11)$$

所以由式 (1-10)、式 (1-11)、式 (1-9) 及关于  $H$  的相应表达式，得

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1-12)$$



$\alpha$ 一般叫做吸收系数，亦有人称之为吸收常数<sup>[3]</sup>。

当光入射到两种介质的交界面时，出现光的反射现象。若光是从真空（或空气）正入射至固体的表面，反射比  $R$  满足下式，

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1-13)$$

它是反射通量（或功率）与入射通量（或功率）之比。

在日常生活中人们所看到的金属光泽，就是反射比随波长变化的反映。金属的复折射率一般同时具有实部和虚部，即是有可观的  $k$  值。根据式(1-13)，在可见光范围金属具有高的反射比。但是不同金属的光性也不同，图 1-1 给出在正入射条件下几种蒸镀金属膜在不同波长下的反射比  $R$ （引自文献[4]）。金和铜在绿色区和蓝色区的反射比较低；银在整个可见区都是高反射的，但在紫外区约 3160 Å 处变为透明；铝在图中的可见及紫外区均有较高的反射。图 1-1 的曲线正好说明了金和铜的赤黄光泽。

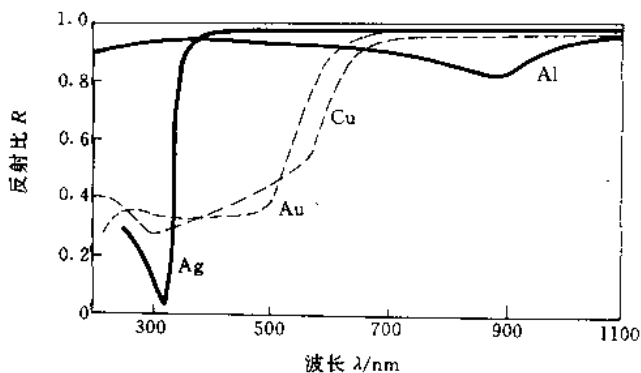


图 1-1 银、金、铜和铝的反射比与波长的关系

从式(1-3)至式(1-5)可看出，光波的解的表达式中只包含两个物性参量  $n$  和  $k$ 。即是说，描述固体的光学参量可以有許多