

现代物理基础丛书

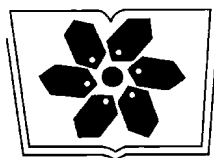
17

激光光散射谱学

张明生 著



科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

现代物理基础丛书 17

激光光散射谱学

张明生 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较全面地介绍了光散射(拉曼散射, 布里渊散射, 米散射, 瑞利散射, 动态光散射)的经典理论, 量子理论, 多声子散射理论和光散射选择定则. 详细介绍激光光散射的实验技术和方法, 包括非线性光散射和表面增强拉曼散射. 最后介绍激光光散射在许多学科领域的研究和应用, 包括氧化物, 介电, 铁电材料, 磁性材料, 半导体, 高温超导体, 聚合物, 液晶等块体、薄膜和纳米结构的光散射谱的研究.

本书将理论、系统装置、实验技术及其在当代科学研究方面的应用集为一体, 体现其系统性和科学先进性. 书中丰富的图表以及书后的习题思考题有助于读者直观深入的理解, 每章后面的参考文献和书后的翔实附录便于备查.

本书可以作为物理学、化学、材料科学的研究生教材, 也可以作为其他相关专业研究生的教材和教学参考书, 还可以作为从事相关领域研究的教师、科学工作者的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

激光光散射谱学/张明生著. —北京: 科学出版社, 2008
(现代物理基础丛书; 17)
ISBN 978-7-03-021868-1

I. 激… II. 张… III. 激光-光散射-光谱学 IV. 043
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 063475 号

责任编辑: 胡 凯 / 责任校对: 刘亚琦

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张: 41 1/2

印数: 1-3 000 字数: 783 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧	王鼎盛	朱邦芬	刘寄星
邹振隆	宋菲君	张元仲	张守著
张海澜	张焕乔	张维岩	侯建国
侯晓远	夏建白	黄 涛	解思深

前 言

19 世纪末, 20 世纪初英国科学家米和瑞利对空气中微粒受太阳光散射的研究打开了光散射研究的序幕, 他们发展了米散射和瑞利散射理论, 满意地解释天空的云朵为什么呈现白色以及晴朗的天空为什么呈现蓝色. 瑞利因研究与光散射有关的气体密度和发现稀有气体氩, 获得了 1904 年诺贝尔物理学奖. 20 世纪 20 年代, 法国科学家布里渊研究与声波有关的密度起伏的光散射, 发现光波使声波产生了多普勒频移, 在入射光两边得到了对称的散射边带(后来为实验所证实), 这就是布里渊散射. 20 世纪 20~30 年代, 印度科学家拉曼利用水银灯照射苯溶液等液体, 发现了在水银灯激发线的两边呈对称分布的新辐射谱线, 这一辐射称为拉曼散射. 拉曼因发现这一新的辐射和所取得的许多光散射研究成果而获得 1930 年诺贝尔物理学奖.

光散射研究的进展与光散射谱仪的改进和发展息息相关. 一个世纪以来光散射谱仪经历了相当重要的发展过程. 初期使用的光源汞灯后来由不同功能的激光器, 如离子激光器、半导体激光器、固体微型激光器、飞秒激光器等替代. 分光棱镜由兼具色散分光和抑制杂散光功能的全息光栅单色仪或陷波滤波器替代. 光散射谱的摄谱检测装置则由光电倍增管、电荷耦合器件(CCD)、电子数字检测装置替代. 由此光散射谱仪的整体水平得到了大大提高. 相继发展的多种具有先进水平的光散射谱仪不断地引进了实验室, 使得光散射谱学在众多学科领域研究方面发挥越来越重要的作用.

作者于 1983~1986 年期间访问了美国科罗拉多大学. 在著名的光散射专家吉·弗·斯科特(J. F. Scott)教授领导的凝聚态物理实验室从事铁电、介电和光电材料的拉曼散射、布里渊散射和动态光散射等研究工作. 回国后在从事科学研究的同时为南京大学理科(物理、化学、材料科学、电子科学、地球科学等)研究生开设了《激光光散射谱学》课程, 进行每年一学期的教学工作. 二十年来, 作者将光散射原理、实验技术及其应用系统地贯穿起来, 结合多年的研究工作和国际学科发展动向, 在教材中不断引入重要研究结果, 使课程内容日趋丰富和系统. 当前众多的实验室装备了光散射谱仪, 越来越多的研究者运用光散射谱仪开展研究工作. 作者深感有必要写一本系统、通俗、涵盖学科面较宽的光散射谱学书籍, 供学生学习和研究者参考之用.

本书共 14 章. 第 1~8 章叙述光散射的基本理论, 实验系统和测量方法技术. 第 9~14 章叙述光散射在科学研究和工程技术方面的应用.

第1章介绍光散射技术和研究的历史发展,分类简述瑞利散射、米散射和动态光散射、布里渊散射、拉曼散射、汤姆孙散射、康普顿散射以及光散射技术的应用.

第2章叙述光散射的经典理论、量子理论和多声子散射理论.

第3章全面叙述分子对称性和光散射的选择定则.列表介绍许多分子的所属点群,实例说明特定点群分子的正则振动模的求解,讨论一级、二级拉曼光谱和转动拉曼光谱的选择定则.

第4章介绍常规瑞利散射、米散射和动态光散射及其实验系统.分别介绍了共振瑞利散射、超瑞利散射、受激瑞利散射和时间分辨表面波米散射,并以典型的实例讨论其应用.

第5章全面介绍布里渊散射.分别讨论共振布里渊散射、受激布里渊散射、相干瑞利-布里渊散射.着重介绍多通串接布里渊谱仪和磁性膜时间-空间分辨布里渊光谱仪实验系统,讨论了布里渊散射基本参量及F-P镜的经验选择.

第6章全面叙述拉曼散射.阐述分子和晶格振动模,拉曼散射张量,一级拉曼和二级拉曼散射.分别介绍傅里叶变换拉曼散射、共振和瞬态共振拉曼散射、紫外和紫外共振拉曼散射、共焦成像拉曼和近场光学拉曼散射.讨论了极化声子拉曼散射,负折射率极化声子色散,单-双声子相互作用的费米共振和方诺效应.

第7章介绍光散射实验系统的激发光源、检测装置以及测量方法和技术.表列了光散射谱仪所用气体、液体、固体激光器以及特殊一类自由电子激光器、自旋反转拉曼激光器、色心激光器等激光光源及其重要参量.比较不同色散装置全息光栅和干涉滤波器以及不同光电转换装置单通道光电倍增管和多通道电荷耦合器件CCD等装置的各自特点.介绍光散射的测量组态、波矢依赖关系以及常规、压力、温度有关的光散射谱测量方法和技术.

第8章叙述超快过程和非线性拉曼散射.介绍超快过程的历史发展和各种非线性(相干)拉曼散射,包括纳秒皮秒飞秒时间分辨拉曼光谱、受激拉曼散射、超拉曼散射、四光子过程的相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)、CARS显微镜以及泵浦-相干反斯托克斯时间分辨拉曼显微镜(T-CARS).

第9章介绍光散射在研究相变和声子特性方面的应用.讨论了光散射研究位移型相变、有序-无序相变、混合型相变、准弹性散射和中心峰、振幅子和相位子有关的无公度相变等.也介绍了量子顺电相变的布里渊散射以及低原子序数材料压力相变的拉曼散射研究.

第10章介绍拉曼散射研究高温超导体的结构特性和声子特性.讨论声子频率和氧浓度压力关系、掺杂电荷再分布和相干峰载流子密度效应;超导能隙、声子自能和声子反常效应;电子拉曼散射和双磁振子拉曼散射.最后介绍新型不含铜超导体的结构和声子特性.

第 11 章介绍半导体的光散射. 讨论单晶硅、多晶硅、砷化镓、氮化镓、合金半导体的拉曼光谱和色散关系; 纳米结构半导体的光学声子限制效应、声学声子限制效应和自旋反转拉曼散射; 半导体-金属界面和异质结界面声子的拉曼光谱; 半导体微腔的拉曼和瑞利散射; 半导体超晶格和量子阱的拉曼散射.

第 12 章介绍表面增强拉曼光谱(SERS)的研究. 从 SERS 的发展讨论经典电磁增强和电荷转移化学增强两类机制; 表面增强拉曼散射的活性衬底和测量技术; 单分子表面巨增强拉曼散射及其巨增强理论. 最后介绍针尖增强近场拉曼光谱.

第 13 章介绍光散射在研究聚合物和液晶方面的应用. 讨论不同维度的聚合物的振动性质; 聚合物的静态和动态光散射; 聚合物薄膜纳米结构的布里渊散射和拉曼散射; 聚合物的玻璃相变和声子弛豫. 介绍液晶的光散射理论; 液晶取向序、相变和构象的拉曼光谱以及液晶聚合物在电场下的弹性光散射和拉曼散射.

第 14 章介绍小颗粒、薄膜和一维纳米结构材料的光散射研究. 讨论杂质、缺陷和包裹体的晶格振动; C_{60} 的晶格振动和拉曼光谱; 碳纳米管的结构和声子特性; 纳米晶的尺寸效应、应变效应和声子限制效应; 薄膜的尺寸效应、应力效应和电场效应(声子软化、硬化, 铁电性弱化); 磁性膜、多层膜和铁磁线阵列自旋波激发布里渊散射; 一维纳米线、纳米管和纳米棒的声子特性和光谱学特性.

本书具有如下一些特点: ①尽可能涵盖光散射众多的领域, 对光的弹性散射(瑞利散射, 米散射)与光的非弹性散射(拉曼散射和布里渊散射)作了全面系统的阐述和分类比较. ②将基础理论、测量方法技术及其应用融为一体, 并在书中融入学科前沿研究动态和重要结果, 体现其先进性和现代性. ③本书力求深入浅出, 浅显明了, 注重可读性和参考性. 书中提供大量有用的图表图谱, 每章后面附有参考文献, 书后精编了翔实的附录和习题思考题, 有助于理解, 便于备查.

光散射研究及其应用发展相当迅速, 涉及的领域和知识面广. 由于作者水平所限, 疏漏和不足之处欢迎指正.

感谢冯端院士在作者步入光散射研究领域时以及作者从事光散射的研究中给予的指点. 感谢斯科特(J. F. Scott)教授在作者访问美国科罗拉多大学期间给予的学术方面的指点和在活跃和谐氛围中进行的学术交流, 感谢他访问南京大学期间为本课程的教学提出的建议. 感谢尹真教授在本书写作过程中进行的讨论、给予的支持和帮助. 全国光散射学术界同行之间的学术交流, 尤其是全国光散射学术会议上同仁的聚会使作者受益匪浅. 还要感谢历届听课的博士、硕士研究生, 他们给本课程的教学提出了许多宝贵的意见和建议. 最后, 感谢中国科学院科学出版基金对本书的资助.

张明生

2007 年 2 月

主要符号表

$\mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2 \mathbf{a}_3$	晶格基矢	$\hbar$	$\hbar = h/(2\pi)$
a^+	电子产生算符	H_c	临界磁场
a	电子湮没算符	I	光强
a_q^+	声子产生算符	J	电流密度
a_q	声子湮没算符	k_B	玻尔兹曼常量
$\mathbf{A}$	矢量矢	K	温度
A	面积	K	劲度系数, 跃迁矩阵
a_u	玻尔半径	$\mathbf{k}$	光子波矢
$\mathbf{b}_1 \mathbf{b}_2 \mathbf{b}_3$	倒格子基矢	l, L	长度
$\mathbf{B}$	磁感应强度	m_0	静止质量
B	体弹性模量	m	质量, 电子质量
C	电容, 热容, 弹性常量	m^*	有效质量
C_n	n 度旋转轴	M	原子(离子)质量
	比热容, 真空中光速	$\mathbf{M}$	磁化强度
c	对比度, 刚度系数,	N	原子数
	晶格常量, 弹性常量	$\mathbf{n}$	单位矢量
D	扩散系数	n^+	粒子数产生算符
d	晶面间距, 颗粒线度	n	粒子数湮没算符, 杂质浓度,
e	电子电荷, 应变		电子浓度, 载流子浓度, 折射
$\mathbf{e}$	波偏振矢量		率, 玻色-爱因斯坦因子
$\mathbf{E}$	电场强度	N_0	阿伏伽德罗常量
E	能量	P	功率, 压力, 跃迁概率
f	力常数, 焦距	$\mathbf{P}$	电极化强度
$\mathbf{F}$	力	p	空穴浓度
F	自由能, 对称正规函数	$\mathbf{p}$	动量, 偶极矩
g	声子态密度	P_{mm}	跃迁矩阵元
$\mathbf{G}_n$	倒格矢	Q	正则坐标
h	普朗克常量	$\mathbf{Q}$	电子波矢, 中子波矢

G	吉布斯自由能, 增强因子	q	声子波矢
H	磁场强度	r	位矢
$\hat{H}$	哈密顿算符	r	距离
r_e	经典电子半径	ε	介电常量
R	反射率	ε_0	真空介电常量
S	熵, 散射算符	κ	消光系数
s	自旋	λ	波长
t	时间	μ_0	真空导磁率
T	温度	μ	导磁率, 折合质量
T_c	临界温度	μ_B	玻尔磁子
U	内能	ν	线频率
V	体积	θ	散射角, 倾角
u	位移	ξ	相干长度
V_u	原胞体积	ρ	退偏振度, 电荷密度
v	速度	σ	散射截面
W	分子能量	τ	弛豫时间
Y	杨氏模量	φ	波函数
Z	原子序数	Φ	磁通量子, 分子波函数
α	分子极化率, 吸收系数	ψ	原子波函数
α_{ij}	分子极化率张量	χ	电极化率
β	各向异性系数, 第一超极化率, 扩展系数	Ω	立体角, 声子角频率
γ	第二超极化率, 格林艾森 系数, 等压/等容(C_p/C_V)比值	ω	角频率
		ω_{LO}	纵向光学声子角频率
		ω_{TO}	横向光学声子角频率
		ω_{LA}	纵向声学声子角频率
Γ	线宽	ω_{TA}	横向声学声子角频率

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 光散射技术和研究的历史发展	1
1.2 光散射的分类	6
1.2.1 光散射公式	6
1.2.2 反射, 折射和散射	6
1.2.3 光散射的分类	7
1.3 瑞利散射, 米散射和动态光散射	8
1.3.1 瑞利散射	8
1.3.2 米散射	9
1.3.3 动态光散射	9
1.4 布里渊散射	9
1.5 拉曼散射	11
1.6 汤姆孙散射	12
1.7 康普顿散射	14
1.8 光散射技术的应用	15
参考文献	17
第 2 章 光散射理论	20
2.1 光散射截面	20
2.1.1 光散射截面	20
2.1.2 微分散射截面	21
2.1.3 原子散射截面	22
2.1.4 斯托克斯和反斯托克斯散射截面关系	25
2.1.5 原子散射截面与入射频率的关系	26
2.2 光散射频谱-斯托克斯和反斯托克斯频区	28
2.2.1 电磁辐射谱	28
2.2.2 光散射谱的分布	29
2.2.3 光散射频谱范围和能量单位的转换关系	29
2.2.4 斯托克斯和反斯托克斯频区	30

2.3	光散射谱研究的布里渊区范围和频谱间隙	31
2.3.1	光散射研究的布里渊区范围	31
2.3.2	光散射谱的频谱间隙	32
2.4	光散射谱的基本参量和偏振特性	33
2.4.1	光散射谱的基本参量	33
2.4.2	光散射谱的偏振特性和退偏度	34
2.5	光散射, 中子散射和 X 射线散射比较	36
2.6	光散射的经典理论	37
2.6.1	电子的极化	38
2.6.2	介质的极化	38
2.6.3	分子极化的经典光散射	40
2.7	光散射的量子理论	41
2.7.1	原子的辐射和吸收	42
2.7.2	原子和辐射场的相互作用	43
2.7.3	电子在辐射场中的相互作用—— A^2 和 $\mathbf{p} \cdot \mathbf{A}$ 项对光散射的贡献	44
2.7.4	单电子原子跃迁概率	46
2.7.5	感应辐射跃迁和多电子跃迁	48
2.7.6	电磁场的量子化和矢量势 $\mathbf{A}$ 的驻波、行波表示	50
2.7.7	散射算符(散射矩阵)	55
2.7.8	瑞利散射的跃迁概率和散射图形规则	56
2.7.9	拉曼散射的量子理论和图形规则	60
2.8	多声子光散射理论	64
2.8.1	纳米晶中的光学声子	65
2.8.2	纳米晶多声子拉曼散射理论	68
2.8.3	CdSe, PbS 纳米晶多声子拉曼光谱	70
	参考文献	73
第 3 章	分子对称性和光散射选择定则	75
3.1	点群和空间群	75
3.1.1	群的基本概念	75
3.1.2	点群的对称操作	76
3.1.3	对称操作之间的关系	78
3.1.4	空间群	80
3.2	点群的分类和所属点群分子	80
3.2.1	C_1 , C_s 和 C_i 非轴向群	80
3.2.2	C_n , C_{nh} , C_{nv} 群	81

3.2.3	D_n , D_{nh} , D_{nd} 群	82
3.2.4	$C_{\infty v}$ 和 $D_{\infty h}$ 线性群	83
3.2.5	S_n 群	83
3.2.6	T , T_d 和 T_h 群	84
3.2.7	O_h 和 O 群	85
3.2.8	I 和 I_h 群	85
3.2.9	所属点群的分子表列	86
3.3	点群符号表示和对称操作矩阵表示	88
3.3.1	点群符号的熊夫利表示和国际表示	88
3.3.2	点群对称操作作用在分子局部原子上的矩阵表示	89
3.3.3	点群对称操作作用在分子所有原子上的矩阵表示	91
3.4	群的可约不可约表示和直积表示	95
3.4.1	群对称类型的表示法(贝特和马利肯表示法)	95
3.4.2	马利肯-贝特表示之间的对应关系	95
3.4.3	群对称类型(一维至多维)不可约表示和正则振动模	96
3.4.4	不可约表示正则振动模的振动组态实例	97
3.4.5	群的可约和不可约表示的矩阵形式	99
3.4.6	群不可约表示的基本性质和方法	100
3.4.7	群的特征标和四个区域的含义	102
3.4.8	群的直积表示和操作	104
3.5	简正振动及其正则模的求解	106
3.5.1	简正振动方程	106
3.5.2	简正振动正则模的求解	107
3.5.3	正则模的求解实例	108
3.6	光散射的选择定则	113
3.6.1	单电子原子的跃迁	113
3.6.2	拉曼光谱和红外光谱的选择定则	115
3.6.3	一级振动拉曼光谱的选择定则	116
3.6.4	二级和高级振动拉曼光谱的选择定则	116
3.6.5	分子转动拉曼光谱的选择定则	117
	参考文献	118
第 4 章	瑞利散射, 米散射和动态米散射	120
4.1	瑞利散射截面	120
4.1.1	球形粒子的瑞利散射截面	120
4.1.2	单个分子的瑞利散射截面	122

4.1.3 双原子分子的瑞利散射	123
4.2 共振瑞利散射	126
4.3 超瑞利散射	127
4.3.1 超瑞利散射分类	127
4.3.2 时间分辨飞秒超瑞利散射	129
4.3.3 玻色-爱因斯坦凝聚的超辐射瑞利散射	130
4.4 受激瑞利散射	132
4.5 米散射理论	134
4.5.1 单粒子的米散射	134
4.5.2 任意形状粒子的米散射	137
4.5.3 球形粒子分布系综米散射光学性质	139
4.6 时间分辨表面波米散射	141
4.7 瑞利散射和米散射的应用实例	144
4.7.1 超声风洞气体团簇的瑞利散射	144
4.7.2 瑞利散射平面多普勒速度仪	145
4.7.3 多波长瑞利-米散射椭圆仪	145
4.8 动态光散射	147
4.8.1 自相关函数	147
4.8.2 光子相关谱仪	149
4.8.3 粒子扩散系数和粒径测定	150
4.8.4 电泳光散射	152
4.8.5 动态光散射应用	152
参考文献	152
第5章 布里渊散射	155
5.1 布里渊散射理论	155
5.2 液体和固体的布里渊散射	158
5.2.1 液体介质的布里渊散射	158
5.2.2 几类材料布里渊散射的附加极化	161
5.3 弹性性质和弛豫过程	162
5.3.1 弹性常量和声速	162
5.3.2 弛豫过程的布里渊光谱	164
5.3.3 薄膜的散射几何和体模表面模的波矢速度关系	165
5.4 布里渊散射实验系统	166
5.4.1 单通布里渊散射实验系统	166
5.4.2 法布里-珀罗干涉仪工作原理	167

5.4.3 布里渊散射基本参量(自由谱范围, 对比度, 锐度)和 F-P 镜经验选择	170
5.5 多通和串接布里渊谱仪	172
5.5.1 布里渊光谱仪分类	172
5.5.2 多通串接布里渊谱仪	172
5.5.3 磁性膜时间-空间分辨布里渊光谱仪系统	174
5.6 共振布里渊散射	176
5.7 受激布里渊散射	177
5.7.1 受激布里渊散射压力波	177
5.7.2 液体受激布里渊散射	178
5.7.3 几类材料的受激布里渊散射性质	179
5.7.4 光纤受激布里渊散射	180
5.7.5 受激布里渊散射的应用	181
5.8 相干瑞利-布里渊散射	184
参考文献	188
第 6 章 拉曼散射	190
6.1 原子分子基团振动模和晶格振动模	190
6.1.1 碳氢原子分子振动模	190
6.1.2 基团振动模	191
6.1.3 气体的拉曼频率	192
6.1.4 有机化合物拉曼振动模	193
6.1.5 晶格振动模	194
6.1.6 拉曼光谱和红外光谱的比较	195
6.2 拉曼张量	196
6.2.1 拉曼张量表示	196
6.2.2 拉曼模张量表示和多晶粉末材料积分拉曼强度计算	199
6.2.3 七个晶系的拉曼张量和二级极化率	201
6.2.4 如何运用拉曼张量确定晶体正则振动模	203
6.3 一级和二级拉曼散射	205
6.3.1 一级拉曼散射图形规则	205
6.3.2 二级拉曼散射线型谱和连续谱	206
6.3.3 二级拉曼谱的色散关系和态密度	208
6.3.4 如何区分一级和二级拉曼谱	209
6.4 自发拉曼散射	210
6.5 傅里叶变换拉曼散射	211
6.5.1 傅里叶变换基本原理	211

6.5.2	干涉仪及其工作原理	212
6.5.3	单通傅里叶变换拉曼光谱仪	214
6.5.4	多通道傅里叶变换拉曼光谱仪	215
6.6	共振拉曼散射和紫外共振拉曼散射	216
6.6.1	共振拉曼散射原理	216
6.6.2	共振拉曼和瞬态共振拉曼光谱	218
6.6.3	紫外和紫外共振拉曼光谱	219
6.7	共焦拉曼成像和近场光学拉曼光谱	221
6.7.1	共焦成像拉曼光谱	221
6.7.2	近场光学拉曼光谱——工作模式和应用	222
6.8	黄昆方程和 LST 关系	225
6.9	极化声子拉曼散射和负折射率极化声子色散	227
6.9.1	不同晶系的极化声子色散特性	228
6.9.2	GaP 和 ZnO 的极化声子散射	228
6.9.3	SrTiO ₃ 同位素替代的极化声子谱	229
6.9.4	负折射率极化声子色散	230
6.10	声子相互作用的方诺效应和费米共振	230
6.10.1	AlPO ₄ 声子的费米共振	231
6.10.2	BaTiO ₃ , SrTiO ₃ 声子的方诺效应	231
6.10.3	压力下同位素替代的声子费米共振	231
6.10.4	库仑修正的方诺共振	232
	参考文献	233
第 7 章	光散射光源、检测装置和测量技术	237
7.1	激光器谐振腔几何和场模组态	237
7.1.1	受激辐射关系	237
7.1.2	谱线宽度	239
7.1.3	场模组态	241
7.1.4	谐振腔几何组态	243
7.2	气体、液体和固体激光器	244
7.2.1	气体离子和金属蒸气激光器	244
7.2.2	固体激光器	250
7.2.3	液体激光器——染料激光器和染料	253
7.3	特殊激光器	255
7.3.1	自由电子激光器	255
7.3.2	自旋反转拉曼激光器	257

7.3.3 色心(F 心)激光器	258
7.4 光栅和陷波滤波器	259
7.4.1 光栅单色仪	259
7.4.2 陷波滤波器	260
7.5 单通道光电倍增管和多通道光电转换器件	262
7.5.1 光电倍增管	262
7.5.2 多通道光电转换器件(SIT, PDA, CID, CCD)	262
7.6 光散射组态和压力温度下散射谱测量	266
7.6.1 光散射的组态和波矢关系	266
7.6.2 压力下光散射谱的测量	267
7.6.3 高低温下光散射谱测量	268
参考文献	269
第 8 章 超快过程和非线性拉曼散射	272
8.1 激光脉冲超快过程	272
8.1.1 超快过程的历史发展	272
8.1.2 超快过程的重要技术——脉冲调 Q 锁模和压缩	274
8.1.3 超快过程的应用	276
8.2 非线性(相干)拉曼散射	277
8.2.1 光学非线性过程	277
8.2.2 非线性(相干)拉曼散射过程和分类	278
8.3 纳秒, 皮秒时间分辨拉曼光谱	279
8.3.1 纳秒时间分辨拉曼光谱	280
8.3.2 皮秒时间分辨拉曼光谱	281
8.4 飞秒时域泵浦-探测光谱学	283
8.4.1 掺钛蓝宝石飞秒激发光源	283
8.4.2 泵浦-探测瞬态光谱	284
8.4.3 时间分辨瞬态光栅光谱	285
8.4.4 泵浦-相干反斯托克斯时间分辨拉曼光谱	287
8.5 受激拉曼散射	289
8.5.1 受激拉曼散射基本理论	289
8.5.2 受激拉曼散射(SRS)的贝塞尔束泵浦	290
8.5.3 受激拉曼效应的拉曼介质	294
8.5.4 受激拉曼增益光谱和受激拉曼损失光谱	296
8.5.5 飞秒受激拉曼增益	297
8.5.6 光声拉曼光谱	299

8.6	超拉曼散射	300
8.6.1	超拉曼散射的原理	300
8.6.2	三光子激发超拉曼散射	302
8.7	相干反斯托克斯拉曼散射	303
8.7.1	相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)	304
8.7.2	相干反斯托克斯椭圆偏(CARE)	306
8.7.3	ASTERISK 相干拉曼技术	307
8.7.4	拉曼感应克尔效应光谱(RIKES)	308
8.7.5	光学外差拉曼感应克尔效应光谱(OHD-RIKES)	309
8.8	相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)显微镜	310
8.8.1	CARS 显微镜的模式	311
8.8.2	CARS 显微镜的基本理论	312
8.8.3	CARS 显微镜的工作原理	313
8.8.4	时间分辨 CARS 显微镜(T-CARS)	314
	参考文献	317
第 9 章	相变和声子特性	322
9.1	相变研究的历史和分类	322
9.2	相变的级数和序参量	325
9.2.1	一级相变	325
9.2.2	二级相变	326
9.2.3	高级相变	326
9.2.4	相变序参量	326
9.3	热释电, 压电, 铁电, 反铁电, 铁畸, 反铁畸, 本征和非本征铁电	327
9.3.1	热释电	327
9.3.2	压电	328
9.3.3	铁电和反铁电	328
9.3.4	铁畸和反铁畸	330
9.3.5	本征和非本征铁电	330
9.4	朗道相变理论	330
9.4.1	相变和对称性	330
9.4.2	相变序参量	330
9.4.3	朗道二级相变理论	331
9.5	位移型相变	332
9.5.1	软模相变宏观理论	332
9.5.2	软模相变微观理论	335