北京大学现代光学丛书

激光物理学

邹英华　孙骝亨　编著

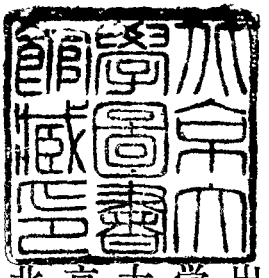
北京大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

北京大学现代光学教程

激 光 物 理 学

邹英华　孙骝亨



北京大学出版社

内 容 简 介

本书是作者根据多年在北京大学物理系授课的讲义修改补充而成的，书中介绍了激光振荡理论、激光与物质相互作用时出现的瞬态相干光学现象和非线性光学效应，还介绍了电磁波与物质相互作用的各种理论处理方法，以及激光在光学谐振腔内外的行为。本书着重阐述基本理论，选材时考虑了不同层次读者的需要。

本书可作为大学物理专业本科生、研究生的教材，也可供有关光学专业本科生、研究生和从事激光应用工作的人员参考。

激光物理学

邹英华 孙骏享

责任编辑：周月梅

北京大学出版社出版

（北京大学校内）

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

850×1168毫米 32开本 14印张 363千字

1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷

印数：00001—4,000册

ISBN 7-301-01472-4/O·243

定价：8.20元

前　言

本书介绍激光振荡理论，并研究激光与物质相互作用时出现的瞬态相干光学现象和非线性光学效应。作为讨论的基础，还介绍了电磁波与物质相互作用的各种理论处理方法，以及激光在光学谐振腔内外的行为。

大体上，前五章重点介绍激光振荡的理论；后五章则侧重于瞬态相干光学现象和非线性光学效应的讨论。由于内容上紧密相关，并且都是建立在电磁波与物质相互作用的理论基础上，因而这种区分并不是绝对的。例如，第六章介绍的密度矩阵及其运动方程，虽然主要用于讨论瞬态相干光学现象和非线性光学效应，但作为其应用的实例也用来概括地介绍激光振荡的半经典理论。同样，在讨论非线性光学效应时，用到了第二章介绍的高斯光束理论。而在第四章介绍的电磁波与物质相互作用的全量子理论，被用来分析参量荧光和受激拉曼散射等非线性光学效应。

全书着重基本原理的论述。有关各种具体的激光器和调 Q、锁模技术只在第一章作了很简单的介绍。在瞬态相干光学现象和非线性光学效应的讨论中，也只牵涉到我们认为是很基本的那些现象和效应，以及基于这些现象和效应的激光光谱的若干典型例子。我们在每一章后都引用了一些重要的原始文献和专著。读者如果对这一内容非常丰富的领域中的某些部分有兴趣而希望作更深入的了解，不妨去阅读这些参考资料。

全书采用国际单位制（SI），并且尽可能地做到前后符号统一。（尽管有时存在困难，例如当用 n 表示横模序数时不得不用 η 表示介质的折射率。）然而，我们还必须提醒读者，在近代书刊和文献中许多作者常常采用其它单位制。例如，在有关非线性

光学的文献中，包括某些重要专著中仍大量采用 CGSE 单位制。

本书适合不同层次的读者的需要。对于大学物理专业本科生，前五章可以作为“激光原理”课程的教材。后五章可以作为物理专业研究生学习“近代光学”课程的参考。当然，对于那些在大学本科期间未修过“激光原理”课程的研究生，前五章也应是必读的内容。我们还希望理科其它专业和工科中有关光学方面的专业的研究生也能从阅读本书中得到好处。此外，对于多年从事激光应用的实际工作者，本书若对他们有些帮助，我们也将十分高兴。

本书的内容和框架是作者十多年来在北京大学物理系给本科高年级大学生和研究生开设的相应课程的讲稿和讲义基础上逐步形成的。书中第一、五、六和第七章由孙骥亨执笔，其余六章由邹英华执笔。

书中的大部分插图都是引自公开发表的文献和专著。我们在这里对原作者致谢。

在本书编写和出版过程中，我们得到了许多同行的帮助，特别是北京大学出版社周月梅同志付出了辛勤的劳动，我们在此表示衷心的感谢。

我们衷心希望本书的读者提出宝贵的意见和建议。

邹英华　孙骥亨

需要全本请访问 www.ertongbook.com

符 号 汇 总

本书牵涉内容广泛，使用了大量符号。我们尽可能地采用普遍使用的符号，这就不可避免地造成某些符号在不同章节里具有不同的含义。在个别情形下，同一物理量也可能在不同章节里使用不同符号，以防止在同一问题中符号的重叠。

A	爱因斯坦 A 系数　电场振幅　面积
$\boldsymbol{A}$	矢势
a	概率振幅　谐振腔腔镜线度
a^+	光子产生算符
a	光子湮没算符
a_0	玻尔半径
B	爱因斯坦 B 系数
$\boldsymbol{B}$	磁感应强度　布洛赫矢量
b	概率振幅　高斯光束共焦参数
B_b	电磁波单色定向亮度
b_l	谐振腔腔镜线度
c	电磁波在真空中的相速度
C	密度矩阵表达式中表示某种共振增强因子
$\boldsymbol{D}$	电位移矢量
$d_{i,l}$	晶体的二级非线性极化率
$\mathscr{D}$	电偶极矩
E	能量
$\boldsymbol{E}$	电场矢量
$\hat{\boldsymbol{e}}$	表示偏振的单位矢量

e	电子电荷
$\mathscr{E}$	电场
f	透镜焦距　作用于单位体积介质的电致伸缩力
G	介质的增益系数
g	简并度　增益　谐振腔 g 参数
$g(\nu)$	谱线的线型函数
$\|g\rangle$	粒子的基态波函数
$H_m(X)$, $H_n(Y)$	厄米多项式
$\boldsymbol{H}$	磁场矢量
h	普朗克常数
$\hbar$	$\hbar = h/2\pi$
$\mathscr{H}$	哈密顿量
I	光强
i	$\sqrt{-1}$
$\boldsymbol{i}$	笛卡儿坐标的单位矢量
$\boldsymbol{j}$	电流密度
$\boldsymbol{j}$	笛卡儿坐标的单位矢量
K	电磁波的复数波矢
κ	电磁波的波矢　玻耳兹曼常数
$\boldsymbol{k}$	笛卡儿坐标的单位矢量
L	介质的长度　相干长度　轨道量子数
l	谐振腔腔长　电磁波传播距离
$\boldsymbol{l}$	笛卡儿坐标的单位矢量
$\boldsymbol{M}$	磁极化强度矢量
m	磁量子数　质量　模序数
N	菲涅尔数　粒子或光子密度
n_p	粒子或光子总数
$\|n\rangle$	粒子激发态波函数
n	介质折射率　模序数

P	功率
$\boldsymbol{P}$	电极化强度矢量
p	动量　广义动量　压力　压强
Q	谐振腔的品质因素
q	高斯光束的 q 参数　广义坐标　模序数
R_c	曲率半径
r	距离　谐振腔腔镜反射率
R	粒子的激发速率
S	面积
$\boldsymbol{S}$	电磁波能流密度
s	物距　像距
T	温度
t	时间　谐振腔腔镜透过率
t_c	谐振腔中光子平均寿命
t_{sp}	自发发射寿命
T_1, T_2	纵向和横向弛豫时间
u	本征波函数　最可几速率
U	相互作用能量密度
$U(x,y)$	电场振幅分布
u	布洛赫矢量的分量
V	体积
$V(r)$	势能函数
v	速度
v	布洛赫矢量的分量
W_t	储能
W_{mk}	由 $m \to k$ 的跃迁概率
W	能量密度
w	光束的光斑半径
w_0	高斯光束的腰粗

w 布洛赫矢量的分量

x 笛卡儿坐标

y 笛卡儿坐标

z 笛卡儿坐标

z_R 高斯光束的瑞利范围

α 吸收系数 损耗系数 粒子极化率

$\boldsymbol{\beta}$ 布洛赫有效场

Γ 阻尼系数

γ 弛豫跃迁概率 能量衰减因子

$\delta_{单次}, \delta_{往返}$ 表示单次行进或往返一次的相对损耗

ε 介电常数

η 效率 折射率（当与模序数同时出现时，用 η 代替 n 表示折射率）

θ 角度 相移

λ 电磁波波长

μ 介质的导磁率

ν 电磁波的频率

$\Delta\nu$ 谱线的线宽

ρ 电荷密度 密度矩阵 衍射场积分方程中表示距离

ρ_ν 辐射场的能量密度

σ 介质的电导率 本征值

τ 时间常数 寿命 本征值

κ 耦合常数 本征值

Φ 稳态本征波函数

φ 相角 标势

ϕ_n 模中的总光子数

χ 介质极化率

Ψ 与时间有关的波函数

ψ 与时间无关的波函数 相移 规范函数

$\psi(x\ y\ z)$　　场分布

Ω　　立体角　拉比频率

ω　　角频率

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第一章　激光概述 …… (1)
§1.1　激光的产生和由来 …… (1)
§1.2　激光的特性 …… (4)
§1.3　激光器的种类 …… (11)
参考文献 …… (24)
第二章　高斯光束 …… (26)
§2.1　高斯光束（基模）电场表达式的推导 …… (26)
§2.2　高斯光束的高阶模 …… (33)
§2.3　高斯光束（基模）的基本特性 …… (35)
§2.4　高斯光束的变换和传播 …… (38)
§2.5　高斯光束的聚焦、准直和模式匹配 …… (43)
§2.6　高斯光束变换的 $ABCD$ 律 …… (50)
参考文献 …… (55)
第三章　光学谐振腔 …… (56)
§3.1　谐振腔。模的概念 …… (57)
§3.2　谐振腔内衍射场自洽积分方程和它的解 …… (64)
§3.3　多元光学谐振腔和它的高斯模 …… (76)
§3.4　球面镜光学谐振腔 …… (81)
§3.5　谐振腔的稳定条件（几何光学理论）和非稳腔 …… (92)
§3.6　光学谐振腔的损耗 …… (101)
参考文献 …… (105)
第四章　电磁波的吸收和发射 …… (107)
§4.1　与时间有关的微扰理论 …… (108)
§4.2　原子与电磁波的电偶极相互作用。爱因斯坦 A,B 系数表达式 …… (116)
§4.3　电磁场的量子化 …… (122)

§4.4 自发发射、受激发射和受激吸收过程的全量子力学处理……(134)
§4.5 二能级物质系统与电磁波的相互作用。拉比严格解……(139)
§4.6 谱线的线型和线宽……(148)
参考文献……(164)
第五章 激光振荡的速率方程理论……(165)
§5.1 增益和增益的饱和……(166)
§5.2 激光形成的阈值……(181)
§5.3 连续波激光器的输出功率和最佳透过率……(190)
§5.4 激光的瞬态特性……(194)
参考文献……(208)
第六章 电磁波与物质相互作用的半经典理论……(209)
§6.1 经典电磁场及其在介质中的传播……(210)
§6.2 粒子系综的量子力学描述……(220)
§6.3 激光振荡的半经典理论……(234)
参考文献……(249)
第七章 瞬态相干光学现象……(250)
§7.1 基本方程和实验方法……(251)
§7.2 光学章动和自由感应衰变……(259)
§7.3 光子回波和光学旋转回波……(267)
§7.4 自感应透明……(276)
参考文献……(285)
第八章 电磁波在非线性介质中的传播……(287)
§8.1 多能级物质系统的刘维方程及其微扰解法……(288)
§8.2 非线性极化率……(293)
§8.3 有关非线性极化率的知识……(304)
§8.4 电磁波在非线性介质中的传播……(312)
§8.5 非线性介质中电磁波的能量关系……(316)
§8.6 各种非线性光学效应……(320)
参考文献……(324)

第九章　非线性光学效应……(325)
§9.1　二次谐波……(325)
§9.2　参量振荡和参量荧光……(341)
§9.3　气态介质中的非线性参量过程……(353)
§9.4　受激拉曼散射……(366)
§9.5　受激布里渊散射……(374)
§9.6　自作用效应……(379)
参考文献……(387)
第十章　非线性激光光谱……(388)
§10.1　饱和吸收光谱……(388)
§10.2　偏振光谱……(400)
§10.3　双光子吸收光谱……(403)
§10.4　四波混频光谱……(417)
§10.5　电磁波与缀饰原子的相互作用……(425)
参考文献……(433)

第一章　激光概述

本章的目的是向读者概括地介绍激光的基本概念，其中包括激光和激光器的发展由来，激光光束的特性，激光器的种类和特点等，以此为全课程的学习搭一座“桥”。

§1.1　激光的产生和由来

在无线电和微波波段，通过经典发射源（运动电荷）可以获得单色的相干电磁波。在过去的一个多世纪中，人们利用这种相干的电磁波发展起了整个电子工业，它在工业化和科学技术中所占的重要地位，是人所共知的。可是，在激光问世以前，人们还没有办法获得光频波段的强相干光。当50年代第一台 NH_3 分子微波量子放大器研制成功时，[1 1,1 2] 人们发现，可以通过原子或分子中的受激发射来获得单色的相干电磁波，这就是Maser原理，Maser是英文Microwave Amplification for Stimulated Emission of Radiation的缩写。1958年物理学家肖洛(Schawlow)和汤斯(Townes)首次提出，[1 3] 可以把Maser原理用到光频波段，并在理论上作了计算和证明，几乎与此同时，普罗霍洛夫 [1 4] (Prokhorov)也相继提出了各种研制光频波段Maser的建议。世界上第一台在光频波段运转的Maser是梅曼(Mamain)在1960年研制成功的，[1 5] 这就是第一台红宝石激光器。激光是Laser的译名，而Laser则是Light Amplification for Stimulated Emission of Radiation的缩写，即光频波段的Maser。

Maser包括两个主要的部分：增益介质和谐振腔。增益介质通常是一些分子，原子或固体材料，这些介质中某些能级具有这

样的性质：在外界的激励下，某一对允许跃迁的能级的上能级的粒子数可以大于下能级的粒子数，如果考虑到有简并态的情况，可以表示为

$$\frac{N_2}{g_2}>\frac{N_1}{g_1}, \tag{1.1}$$

式中 N 和 g 表示相应能级的粒子数和能级简并度。满足上式的能级，我们就说它们实现了“粒子数反转”，具有粒子数反转的介质称为增益介质（或激活介质）。当共振电磁波通过这种介质时，由于受激发射大于受激吸收，入射波被放大，反转粒子数越多，增益越高。一般的光源通常是处在热平衡状态，其粒子数遵从玻耳兹曼分布

$$\frac{N_2}{g_2}=\frac{N_1}{g_1}e^{-(E_2-E_1)/kT}, \tag{1.2}$$

式中 E_2 和 E_1 分别是上下能级的能量，T 是温度，k 是玻耳兹曼常数。所以，处于热平衡状态的介质是没有增益作用的。

谐振腔起限制波型和提供反馈的作用。和无线电及微波波段中的振荡器一样，只有当某些频率的波型有反馈时才能形成稳定的振荡。在微波波段，通常采用封闭腔来达到这个目的。假定边长为 l 的立方体腔，腔壁由理想导体构成，腔壁有很高的反射率，那么腔内允许存在的电磁波将是那些满足波动方程又满足边界条件的一系列驻波波型。腔内电磁波的波矢可表为

$$k\boldsymbol{n}=i\boldsymbol{k}\cos\alpha+\boldsymbol{j}\cos\beta+\boldsymbol{k}\cos\gamma, \tag{1.3}$$

式中 $\boldsymbol{i},\boldsymbol{j}$ 和 $\boldsymbol{k}$ 分别是谐振腔三个棱的方向的单位矢量。$\cos\alpha$，$\cos\beta$ 和 $\cos\gamma$ 是波矢方向单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 的方向余弦，显然，波矢在 $\boldsymbol{i}$ 方向的分量为 $k_x=k\cos\alpha=(2\pi/\lambda)\cdot\cos\alpha$，电磁波在该方向的空间周期为 $\lambda/\cos\alpha$，同样，在 $\boldsymbol{j}$ 方向和在 $\boldsymbol{k}$ 方向的空间周期为 $\lambda/\cos\beta$ 和 $\lambda/\cos\gamma$，腔中形成驻波的条件是

需要全本请访问 www.ertongbook.com