

激光物理

國防工業出版社

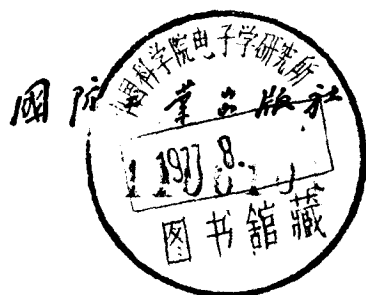
73.7711
198

激 光 物 理

朱如曾

编译

谈镐生 审校



内 容 简 介

本书较全面系统地阐述了激光器（着重于气体放电激光器）的有关物理问题。

全书共分十一章：第一章，激光器的一般概念；第二、三章，辐射及其与物质相互作用的经典和半经典理论；第四～七章，光学共振腔的有关理论及光腔之间的匹配问题；第八章，激光器的增益特性；第九章，激光器的拉姆理论；第十章，相干性问题；第十一章，与光腔工程和光束特性控制有关的问题。书末有附录。

本书可供从事激光工作的研究人员、技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

0026/04

激 光 物 理

朱如曾 编译
谈鎔生 审校

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张 $13\frac{5}{8}$ 388 千字

1975年2月第一版 1977年5月第二次印刷 印数：15,501—22,300册

统一书号：15034·1283 定价：1.90元

序 言

本书采用“半经典”的处理方法，较全面系统地阐述了激光器的基本原理。“半经典”是指：激活介质的原子用量子力学来描写，而光辐射场则用经典麦克斯韦方程组来描写。具备高等数学、经典电动力学和量子力学基础的读者读完本书后，就能接触采用“半经典”处理方法的激光器方面的文献。

本书内容侧重于气体放电激光器，着重一般原理而不涉及各种现有激光器的详细性能。在叙述方法上，除去极少数例外，本书大都是从最基本的原理出发，给出有关概念和理论推导的，其中给出了具有物理重要性的所有细节，仅仅略去简单的数学运算。附录中除去给出正文中的若干公式和结论的详细推导外，还给出阅读正文所必备的主要数学和物理基础知识。

全书所采用的单位制，是按照所讨论的不同问题中的通常习惯而变化的。

本书是在〔英〕A. Maitland 和 M. H. Dunn 的《Laser Physics》〔1969〕的基础上经过全面修订加工而成的，其中包括修正许多错误和不妥之处以及改写和增删不少章节。

在编译过程中，我们得到领导和同志们以及上海光学精密机械研究所等单位的热情关怀和帮助，特别是谈镐生同志在病中为我们审稿，王贻仁、孙祉伟和戴世强同志提出过不少宝贵意见，在此一并致谢。

由于编译者水平所限，加之时间仓促，错误和欠妥之处一定不少，切望批评指正！

目 录

第一章 激光器概述	13
§ 1. 引言	13
§ 2. 普通线谱光源	13
2.1. 影响线形的因素	13
2.2. 影响相干性的因素	17
§ 3. 光学共振腔 (光腔)	19
§ 4. 受激发射	25
§ 5. 均匀加宽激光跃迁	27
§ 6. 激光振荡器的频谱宽度	29
§ 7. 模牵引效应	30
§ 8. 非均匀加宽激光跃迁	31
§ 9. 增益饱和	33
参考文献	34
第二章 辐射理论概要	35
§ 1. 引言	35
§ 2. 真空中的辐射	35
2.1. 辐射强度	35
2.2. 辐射通量	36
2.3. 辐射的能量密度	37
2.4. 辐射压强	40
2.5. 辐射应力张量	42
§ 3. 空腔内的辐射	43
3.1. 封闭型腔中的振荡模	43
3.2. 入射到单一横模的黑体辐射	46
3.3. 黑体发射到一个量子态的光子数	47
§ 4. 辐射与物质	48
4.1. 质量吸收系数	48
4.2. 原子吸收系数	49

4.3.	每秒内吸收过程的数目	49
4.4.	经典辐射理论	50
4.5.	原子与电磁辐射相互作用的经典理论	51
4.6.	微分爱因斯坦系数	55
4.7.	爱因斯坦系数	58
4.8.	吸收系数与爱因斯坦系数之间的关系以及光激发截面	61
4.9.	受激态的寿命	62
4.10.	色散关系	62
	参考文献	67
第三章 辐射与原子系统		68
§ 1.	引言	68
§ 2.	量子力学的基本原理	69
2.1.	波函数、可观测量和薛定谔方程	70
2.2.	定态及其迭加态	73
2.3.	表象变换	76
2.4.	可观测量的平均值随时间的变化	79
2.5.	测量	80
2.6.	测不准关系	82
2.7.	量子牛顿方程	84
§ 3.	原子与辐射相互作用的半经典理论	85
3.1.	二能级原子系统	86
3.2.	电磁场的扰动项	88
3.3.	在电磁场作用下二能级原子系统偶极矩的运动方程	91
3.4.	半经典理论中的能量守恒与转换定律	95
3.5.	宽带辐射引起的电磁跃迁	98
3.6.	有阻尼的电磁跃迁	103
3.7.	拉比 (Rabi) 强信号理论	106
§ 4.	开式量子力学系统	112
4.1.	密度矩阵	112
4.2.	开式量子力学系统与辐射的相互作用	121
	参考文献	131
第四章 光学共振腔 (简论)		132
§ 1.	模的概念	132
§ 2.	共振腔	132
§ 3.	费涅尔数与衍射损耗	138
§ 4.	光腔性质的光子表述	140

§ 5. 光腔的 Q 值	140
5.1. Q 值的定义	140
5.2. 激光振荡器的带宽	141
5.3. 损耗对 Q 值的影响	143
5.4. 非激活腔的时间常数	144
§ 6. 观察到的模图样	146
参考文献	147
第五章 光学共振腔 (几何光学理论)	148
§ 1. 引言	148
§ 2. 平面镜腔	148
§ 3. 全反射棱镜腔	151
3.1. 全反射棱镜腔的几何损耗	151
3.2. 屋脊型腔中的驻波	153
§ 4. 球面镜腔	156
4.1. 球面镜的反射矩阵	156
4.2. 平面镜和球面镜的组合	157
4.3. 两个球面镜的组合	159
4.4. 稳定性的一般条件	160
§ 5. 把光腔考虑为透镜序列	163
5.1. 透镜序列的稳定条件	163
5.2. 球面镜腔的稳定条件	164
5.3. 薄透镜序列的矩阵处理	165
§ 6. 稳定性图	166
§ 7. 非稳定腔的几何损耗	168
参考文献	172
第六章 光学共振腔 (波动光学理论)	173
§ 1. 共焦多模共振腔	173
§ 2. 共焦共振腔的场	183
§ 3. 非共焦凹面镜共振腔	186
3.1. 利用等效共焦腔来考虑	186
3.2. 模间间隔和简并	187
§ 4. 柱对称共振腔	187
4.1. 圆形球面反射镜腔	187
4.2. 圆环球面反射镜腔	192
参考文献	195

第七章 高斯光束	196
§ 1. 引言	196
§ 2. 在自由空间中的传播	197
§ 3. 高阶模	201
§ 4. 光学系统对高斯光束的变换	202
4.1. 透镜对高斯光束的变换	202
4.2. 光学系统的光线变换矩阵	204
4.3. 光学系统对高斯光束的变换	205
§ 5. 光腔中的高斯模	205
§ 6. 腔之间的匹配	209
6.1. 匹配问题的处理方法	209
6.2. 腔失配的影响	211
§ 7. 图解法	216
参考文献	219
第八章 增益和饱和效应	220
§ 1. 引言	220
§ 2. 增益饱和	220
2.1. 谱线加宽	226
2.2. 增益系数的推导	221
§ 3. 增益变窄	225
§ 4. 激光放大器的增益 (均匀加宽情况)	229
§ 5. 高增益激光器中的饱和与功率最佳化 (均匀加宽情况)	230
5.1. 里格罗迪(Rigrod)的处理	230
5.2. 梅尼利(Meneely)的处理	236
§ 6. 一般情况下的功率输出	238
6.1. 处理方法	238
6.2. 对单模运转的应用	239
§ 7. 激活介质对模的影响	241
§ 8. 烧孔效应	243
8.1. 烧孔的概念	243
8.2. 孔的宽度	244
8.3. 模简并对气体激光器输出的影响	246
8.4. 烧孔和拉姆 (Lamb) 下陷	249
§ 9. 具有烧孔和交叉松弛的放大器中的增益饱和	250
§ 10. 模牵引	256

参考文献	259
第九章 激光器的拉姆理论	261
§ 1. 引言	261
§ 2. 激活腔内场的表示	263
§ 3. 宏观极化强度	268
§ 4. 静止原子的理论	269
4.1. 有激发时密度矩阵的运动方程	269
4.2. 一阶理论 (静止原子)	272
4.3. 非线性理论 (静止原子)	276
§ 5. 运动原子的理论	280
5.1. 原子有运动时的密度矩阵和宏观极化强度	280
5.2. 描述辐射场与激活介质的方程汇总	282
5.3. 拉姆方程的迭代解	283
§ 6. 一阶理论	285
§ 7. 非线性理论	293
7.1. 三阶理论	293
7.2. 单模运转	294
7.3. 原子数项	299
7.4. 拉姆下陷和烧孔现象	299
§ 8. 多模运转	301
参考文献	305
第十章 相干性	306
§ 1. 引言	306
§ 2. 相干性的基本概念	306
§ 3. 实多色场的复表示	314
§ 4. 经典辐射场的随机描述	321
§ 5. 二阶相干性	323
5.1. 互相干函数	323
5.2. 相干时间和相干面积的较严格推导	331
§ 6. 暂态相干	335
§ 7. 互相干函数的传播	336
7.1. 互相干函数传播方程的推导	337
7.2. 互相干函数的积分解	338
7.3. 有限平表面的辐射	341
7.4. 互相干函数的近似传播规律	345

§ 8. 完全相干光	347
8.1. 完全相干光的条件	347
8.2. 完全相干光的传播	349
§ 9. 激光腔内空间相干性的发展	351
§ 10. 热辐射的高阶相干效应	354
§ 11. 激光器的噪声	357
§ 12. 只存在位相涨落时激光辐射的统计学	362
§ 13. 存在振幅涨落时激光辐射的统计学	364
参考文献	367
第十一章 光腔工程	368
§ 1. 引言	368
§ 2. 激光器窗	368
2.1. 布儒斯特角窗	368
2.2. 垂直端面窗	370
§ 3. 色散激光腔	371
§ 4. 角心立方反射镜和屋脊反射镜所构成的腔	373
4.1. 行波模	373
4.2. 驻波模	375
§ 5. 模体积和校准容限	376
5.1. 模体积	376
5.2. 气体激光管的轴向校准容限	378
§ 6. 反射镜的校准容限	378
§ 7. 频率效应和模畸变	380
7.1. 引起频率变化的原因	380
7.2. 激活介质对模的形成的影响	382
7.3. 模之间的拍频	383
§ 8. 选模	385
8.1. 引言	385
8.2. 选模方法	385
8.3. 长激光器中的选模	387
8.4. 棱镜选模	390
§ 9. 单模激光器的频率稳定方法	392
§ 10. 多层膜	393
参考文献	403

附录	404
A. 色散关系及有关问题	404
关于复变函数积分的一些定理	404
色散关系	404
希尔伯特变换	407
约当引理	409
色散关系和因果关系	410
B. 一些广义函数	412
C. 自发发射衰减规律和碰撞衰减规律的量子力学考虑	416
D. 电磁场的矢势、标势和规范变换	421
E. 电磁场中带电粒子的哈密顿量	424
F. 薛定谔方程的电磁不变性	426
G. 矩阵理论	427
矩阵理论基础	427
矩阵多项式	432
H. 直角棱镜的反射矩阵	439
I. 赫姆霍兹方程第一类边值问题的解法	442
闭区域的问题	443
无穷区域的问题	444
费涅尔-基尔霍夫衍射公式	446
J. 积分方程	452
K. 正交函数	454
正交函数的基本性质	455
正交化	460
母函数	463
递推关系	464
厄米多项式	464
车贝雪夫多项式	465
许瓦茨不等式	468
帕塞瓦尔等式	469
L. 前几阶厄米多项式	470
M. 贝塞尔函数的积分表示	470
复变函数的展开	470
贝塞尔函数的积分表示	471
N. 多普勒加宽和自然加宽	471

多普勒加宽	471
自然加宽	473
O. 关于电磁波的一些理论	475
P. 等离子体色散函数	476
Q. 关于实信号和解析信号的补充知识	477
R. 激光振幅涨落的频谱密度	479
S. 双变数高斯分布	480
T. 电磁波向介质表面的斜入射	482
U. 完全相干光场的条件的证明	484
参考文献	489

第一章 激光器概述

§1. 引言

在本章中，我们将介绍与下述问题有关的一些物理概念，这些问题是：激光器的运转，激光辐射的特点，以及激光器的那些与波谱光频区中其它辐射源所不同的特征。在叙述中，我们要提到本书的其它章节，在那里，较严格而详尽地讨论了上述各个方面。本章这样做的目的之一是，提供一个虽简略然而却是全面的轮廓，从而统观全书其它章节，并给出它们之间的必要联系。

书中全部采用“半经典理论”来处理。“半经典”是指：光辐射场用经典麦克斯韦方程组来描写，而激活介质的原子则用量子力学来描写。在这种处理中，特别是在描写辐射场与激活介质的原子间的耦合问题时，要采用各种程度的近似。在第三章中，我们将较充分地讨论“半经典”处理方法，而本章只给出与半经典概念相一致的尽可能简单的图象。不过，为了便于阐述激光器运转的基本概念，我们还将首先概述波谱可见光区中普通线谱光源的一些性质。

§2. 普通线谱光源

2.1. 影响线形的因素

我们考虑气体（或蒸汽）光源，因此，近似看来，光源中相邻的原子之间没有相互作用，并且可赋予单个原子以特征能态。为了把原子激发到高于基态的能态上，就必须供给系统以能量，比如说，以电流通过气体。用这种方法来激发原子，实际所达到的能态以复杂的方式依赖于放电参数（气体的压力和温度、容器的尺寸、电流强度和电场强度等）和原子能态的参数（由电子、

离子或别的原子把该原子激发到不同能态的激发截面, 以及所考虑的能态的松弛速率等)。概括地讲, 为了以不同受激能态中的原子数[●]来描述一个系统, 就要确定放电中的电子、原子和离子的动能分布及其和放电参数之间的依赖关系, 然后用它们和原子参数(表示为所涉及的粒子动能的函数的激发截面, 以及由辐射衰减所引起的松弛速率等)一起来确定不同能态上的原子数。当然对于某些能态, 也可能发生特殊的效应(如共振效应), 这会使实际的原子数显著地偏离由这种简单处理所预期的结果。

当一个处于受激能态的原子自发衰变到低能态时, 它就发出辐射, 其频率与能量差的关系为

$$E_{mn} = (E_m - E_n) = h\nu_{mn} \quad (1.1)$$

以这种频率发射的辐射, 其强度与自发跃迁速率 A_{mn} 成正比。 A_{mn} 是处于受激态 (m) 的原子在单位时间内自发衰变到低能态 (n) 的几率。一对特定态之间的跃迁速率可以用量子力学方法, 由描述该两态的波函数推导出来。因为一个特定态可能通过自发发射而衰变到几个低能态, 所以总的辐射衰减速率是这些不同自发跃迁速率之和:

$$\gamma_m = \sum_p A_{mp} \quad (1.2)$$

这个衰减速率决定了受激态自发发射衰减的“寿命”:

$$\tau_m = \gamma_m^{-1} \quad (1.3)$$

当我们关心与不同高能态相联系的跃迁所发射的辐射分量之间的相对强度时, 就需要考虑这些不同能态的原子数。一个特定跃迁所发射的辐射强度是

$$I_{mn} = KN_m A_{mn} h\nu_{mn} \quad (1.4)$$

其中, K 是某一几何因子。

从以上的讨论可以看到, 光源所发射的辐射由不连续的频率

● 以后尽量采用“原子数”和“反转原子数”这样的名称, 虽然实际上讨论的问题可能也适用于分子或离子。

分量组成, 其频率通过 (1.1) 与发射辐射的原子能态相联系, 其强度则既依赖于原子参数 (通过 A_{mn}), 又依赖于放电参数 (通过 N_n), 而由 (1.4) 给定。

对于一给定跃迁, 由于高能态的辐射衰减过程会使原子处于这个高能态的几率随时间而减少, 因此与这个跃迁相联系的波列要衰减, 所以我们可认为这个波列的振幅具有如下形式:

$$\exp(-\gamma t/2) \sin(2\pi \nu_{mn} t). \quad (1.5)$$

为了求得这个波列的频谱, 我们对 (1.5) 进行福里叶变换, 这样就得到如下描述线形强度分布的 (归一化的) 洛伦兹函数 (附录 N):

$$g(\nu, \nu_{mn}) = \gamma \{4\pi^2(\nu - \nu_{mn})^2 + (\gamma/2)^2\}^{-1}. \quad (1.6)$$

在自发发射情况下, 不同的原子彼此独立地发射, 因此, 光源中处于和辐射有关的受激态上的全部原子所产生的辐射, 其强度分布是各个原子的强度分布 [即 (1.6)] 之和。显然, 用分光计对光源整体所观察到的强度分布就是 (1.6)。

现在我们来解释 (1.6) 中的衰减常数 γ 的意义。初看起来, 可能觉得, 这个衰减常数正好就是跃迁高能态的衰减常数因而由 (1.2) 给出; 然而, 细致的量子力学处理证明 (第三章 4.2), 低能态的衰减常数对它也有影响, 并且实际上有

$$\gamma = (\gamma_m + \gamma_n). \quad (1.7)$$

因此, 低能态的寿命短可以增加跃迁的线宽。以上所讨论的加宽类型称为均匀加宽, 这是因为, 处于跃迁高能态的每个原子都以整个线形发射, 不能把线形上的某一特定频率分量同光源中的某些特定原子联系起来。以上, 我们一直认为均匀线宽是由和跃迁有关的能态的辐射衰减速率所确定的 (自然加宽); 在某些情况下 (取决于原子周围的环境), 碰撞消激发能以比辐射消激发更快的速率毁灭这些能态。为了把这种情况考虑在内, 必须修正 (1.7) 中的衰减速率。因此, 跃迁的均匀线宽可能成为放电参数的函数, 而不是象上面所考虑的纯辐射衰减情况那样只依赖于原子参数。

从 (1.6) 很容易求出均匀线宽(定义为半最大强度点之间的全宽度, 或简称“半最大全宽度”)为

$$\Delta\nu_H = \gamma/2\pi. \quad (1.8)$$

若与跃迁有关的两个能态, 其寿命的数量级均为 10^{-8} 秒, 则均匀线宽的数量级为 30 兆赫。

值得指出的是, 通过测不准原理的有关论证, 也可以得到线宽的表示式 (1.8)。由于辐射衰减, 振子只存在一段时间 $\tau (= \gamma^{-1})$, 根据测不准原理, 振子的能量必定有一个不确定量 [见 (3.66)]:

$$\Delta E \sim \hbar\gamma. \quad (1.9)$$

由于辐射的频率是由 (1.1) 给定的, 因此, 观测所发射的辐射, 就构成对振子能量的测量, 所以发射辐射的频率应有 (1.8) 所给定的不确定量。

在所考虑的气体放电中, 辐射原子并非如上面所假定的那样是静止的, 而是有动能的。在许多情况下, 原子的动能分布相应于热平衡的情况, 因而由麦克斯韦-玻耳兹曼分布 (附录 N) 所表示。由于多普勒效应, 在实验室坐标系中所观察到的运动原子所发出的辐射, 是有频率移动的。如果原子速度在朝向观察者方向的分量是 v , 则与未移动的频率分量 ν_0 相对应的辐射频率是

$$\nu = \nu_0(1 + v/c) \quad (1.10)$$

(此处已假定 $v \ll c$)。发光原子有一个相应于其温度的速度分布, 由于多普勒效应, 在实验室坐标系中所观察到的谱线宽度会增加。

因此, 为了得到谱线的形状, 我们就要对处于跃迁高能态的发光原子按其向着观察者方向的速度分量 (v) 来分组。假定速度分量在 v 到 $(v + \delta v)$ 范围内的原子数是 $\delta N_m(v)$, 那末这一组原子就以 (1.7) 所给定的均匀线宽发射辐射, 但是现在, 中心频率 ν_{mn} (与静止原子相关联的共振频率) 由 (1.10) 所给定的新频率 $\nu'_{mn}(v)$ 来取代, 因而这一组原子的辐射强度是

$$\delta I(v, \nu'_{mn}) = \text{常数} \cdot \delta N_m(v) A_{mn} \hbar \nu_{mn} g(v, \nu'_{mn}). \quad (1.11)$$

为了求出线形, 必须把 (1.11) 对所有的 $\delta N_m(v)$ 求和。根据