

杨国权 编著

激光原理

中央民族学院出版社

73.7
661

激 光 原 理

杨国权 编著

中央民族学院出版社

一九八九年·北京

D038/04

激 光 原 理

杨国权 编著

中央民族学院出版社出版

(北京白石桥路二十七号)

新华书店北京发行所发行

北京飞达印刷厂印刷

850×1168毫米32开本17.125张印500千字

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印 数 01—2000册

ISBN 7-81001-126-X/G·53 定价：4.10元

前 言

本书是编著者在多年教学和科研工作的基础上写成的。编写中，充分注意到激光技术的最新发展和广泛的实际应用。

全书共分五章。第一章是全书的预备知识，内容分两部分：前一部分复习本书将要用到的原子物理学和光学等基础课的知识；后部一分介绍激光的若干基本概念及主要特性。第二至四章分别介绍抽运系统、光学谐振腔、激光工作物质等激光器主要组成部分各自的基本原理。把粒子数反转机制作为第二章，放在三部分内容之首，是为了使读者一开始就深刻认识到激光器与经典光源在发光机制上的本质差别。通过这一章的学习，读者不仅可以掌握激光振荡的必要条件，而且还可以对各种激光器的概貌有个大体上的了解。第三章是全书内容最多的一章，读者通过这章的学习，可以了解激光器与普通光源在结构上的基本差别，以及形成激光诸多特性的主要根源。第四章以经典理论为主，阐明辐射与物质的相互作用。在这三章的基础上，第五章学习激光器整体的基本原理，对连续及脉冲两种振荡方式都做了讨论。每章后面还有少量习题，以供练习之用。

编者期望本书能成为包括民族院校在内的各高等院校理工科激光原理选修课的教学用书^①，这是编写本书的主要目的；同时还期望它能成为相应水平读者的自学用书。当然，它也可以作为激光专业学生、教师及工作人员的参考书。

本书在作为讲义编写、使用和修改的过程中，编者曾与中

^①如果学时不够，可删掉5.8-5.12，3.10-3.13，2.6及2.10-2.11等节，1.1、1.2和1.6节亦可不讲，都不会影响教学的连贯性及知识体系的相对完整性。3.5节可只讲3.5.7-3.5.9节。如果学时更少，选前三章，甚至只选第二章都是行得通的，都可收到相应的教学效果。

中国科学院物理研究所的同行和中央民族学院物理系的同事们进行过多次有益探讨，其中几位还分别审阅过书稿的某些内容，并提出了宝贵意见。特别是物理所研究员张志三先生和叶佩弦先生，多次给予悉心指导，并于百忙中审阅了1986年的手稿，热切推荐本书出版。科学出版社的姚平录同志，承受日常繁忙工作的压力，专门应邀编辑本书，花费了许多心血。科学普及出版社的赵丽英同志在盛夏酷暑期间，为本书绘制了全部附图。在本书出版之际，特向他们致以诚挚的谢意。

由于学识有限，经验不足，时间仓促，缺点甚至错误可能都是存在的，恳切希望读者批评指正。

编者著

目 录

前言

绪论	1
第一章 基础知识概述	5
1.1 激活中心	5
1.2 光的波-粒二象性	13
1.3 自发发射、受激发射和吸收	37
1.4 激光概念简介	44
1.5 激光的特性	50
1.6 关于单位制问题的说明	56
习题一	58
第二章 激活媒质中的粒子数反转	63
2.1 能级模型和激光效率	63
2.2 能级布居和退布居机理	67
2.3 激光器的种类	72
2.4 光抽运与固体激光器	78
2.5 相干光抽运与染料激光器	97
2.6 宽带光抽运的气体激光器	104
2.7 稀薄气体中的自持放电抽运	106
2.8 电离激光器	123
2.9 气动激光器(热抽运)	127
2.10 化学激光器	132
2.11 等离子体激光器(复合抽运)	138
习题二	148
第三章 光学谐振腔中形成的辐射场	149
3.1 一般性讨论	149
3.2 光学谐振腔的损耗	159
3.3 透镜波导	167

3.4	光学谐振腔及其稳定性分析	118
3.5	积分方程的迭代解法	193
3.6	谐振腔中的热效应	218
3.7	高斯光束	228
3.8	高斯光束的变换和匹配	252
3.9	稳定腔中的高斯光束	265
3.10	不稳定腔	282
3.11	波导谐振腔	296
3.12	薄膜波导中的光频辐射 分布反馈	301
3.13	谐振腔反射镜的设计理论	314
	习题三	320
第四章	辐射与物质相互作用	324
4.1	爱因斯坦关系 激发态的寿命	326
4.2	电偶极子辐射——原子跃迁的电子-振子模型	332
4.3	原子跃迁动力学	338
4.4	自然加宽和洛伦兹线型函数	346
4.5	谱线加宽的各种机理	357
4.6	电极化率的意义	381
4.7	速率方程	393
	习题四	411
第五章	激光振荡器理论	414
5.1	增益系数	414
5.2	激光振荡频率及频率牵引	423
5.3	频率选择	434
5.4	激光器在阈区域的稳态行为	443
5.5	大信号增益系数 空间烧孔	453
5.6	激光器的输出功率及最佳输出耦合	465
5.7	饱和行为及烧孔效应	475
5.8	巨脉冲激光过程动力学	485
5.9	自由振荡	495
5.10	主动Q开关	502

5.11 被动Q开关.....	517
5.12 锁模.....	524
习题五.....	535
物理常数.....	537
主要参考书.....	538

绪 论

早在1917年,物理学家爱因斯坦就预言,“受激发射”过程必然存在,从而最先从理论上指出了发明激光器的可能性。他指出,处在激发态的原子,可能通过两种不同途径发射出光子跃迁到较低的能态。一种途径是自发地发射出光子;另一种途径是在适当频率电磁波的感应下发射出光子,称后一个过程为受激发射。受激发射概念奠定了激光理论的基础。可是,在本世纪20年代到40年代,物理学界正紧张地致力于量子力学、原子核物理及粒子物理等领域的新发现,激光器运转的可能性,在很大程度上处于休眠状态。

随着科学技术的发展及生产上的需要,人们想要得到现在称之为激光器的愿望越来越强烈。许多从事实际工作的人们,从应用的角度都渴望得到一种装置,希望它能产生方向性好、颜色纯和亮度高的光束。尤其是从事电信工程的人们,要求更为迫切。诚然,无线电天线发射的电磁波具有很好的方向性和相干性,经过调制,可以把信息传送到遥远的地方。电磁波在通讯方面的应用确实功勋卓著。然而,在无线电通讯中也遇到了很大困难,譬如传播的信息量越来越不能满足人们日益增长的实际需要。有什么办法克服这个困难呢?众所周知,只要提高载波频率,就可以增加传送的信息量。就是出于这种动机,经过许多科学工作者长期努力,终于在1954年研制出一种十分引人注目的新器件,即微波激射器,从而打开了发明激光技术的大门。在我国,微波激射器初期最流行的名字是Maser的音译——脉塞,Maser是“Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation”各词取第一个字母拼写而成,意思是通过辐射的受激发射进行微波放大。

在微波激光器技术确立之后，许多科学工作者，特别是微波领域的一些科学家，紧接着就转入把微波激光器技术扩展到光频段的探讨。1958年，汤斯（C. H. Townes）和肖洛（A. L. Schawlow）发表了一篇重要文章，讨论并概括了这方面的主要问题和困难，还预言了实现这一设想所必须满足的物理条件。这篇文章标志着发现激光材料和激发过程等竞争性研究时代的开端。人们在第二次世界大战期间发展起来的雷达技术中获得了丰富的经验，再加上微波激光器技术的启示，科学家们对激光器运转条件的探索进展得异常迅速。世界上第一台激光器，终于在1960年成功地运转了。它是由休斯研究室的梅曼（T.H. Maiman）发明的。所谓激光器，就是能够产生或放大电磁波谱中红外、可见、紫外或更短频段的相干辐射的器件。

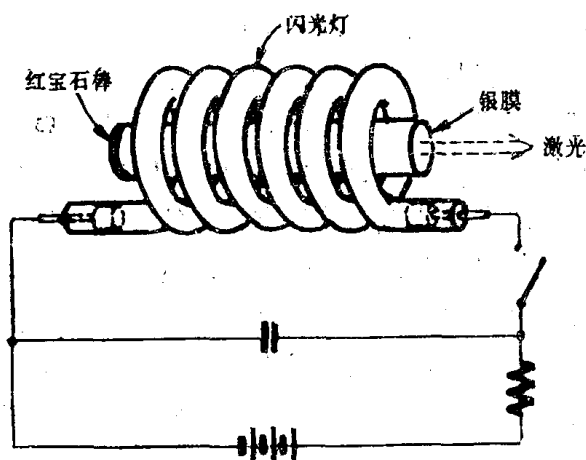


图0.1

梅曼的激光器如图0.1所示，由一根插在螺旋形气体放电闪光灯中的红宝石棒构成，红宝石棒的直径为1厘米，长1厘米，是粉红色的圆柱形晶体。棒的两个端面镀银，作为反射镜。梅曼的激光器发射的激光是脉冲输出，峰值功率为10千瓦，波长为6943埃。

这种光的辐射机理与天然光源及以往的人工光源在本质上是不同的：普通光源的辐射是自发射占优势的辐射，激光辐射是受激发射占优势的辐射，它是通过辐射的受激发射进行光的放大，所以叫做激光。“激光”一词译自英语“Laser”，Laser是把构成缩写词Maser中的Microwave换成了Light拼成的。

第一台激光器问世后，激光技术获得了突飞猛进的发展。在60年代初期，几乎每个月激光研究都有重大发展和新的成就。

就各类器件而言，第一台激光器（固体）发明半年后，连续氮-氩气体激光器就运转了（1961年）。此后相继出现的有砷化镓半导体激光器（1962年），液体激光器（1963年）和化学激光器（1964年）。

作为一种光，激光与普通光波并无本质区别。但是，如前所述，就发光机理而言，两者迥然不同。因此激光具有普通光波所无法比拟的许多优点，即高度的方向性、单色性、相干性、高亮度、超短脉冲及可调谐性等。所以人们称激光为一种奇妙的光。

激光之所以具有这么多奇异的特性，是和它的独特发光机制及激光器的具体结构密切相关的。当然，名目繁多的激光器（目前已经运转的不同激光系统有上千种，不同分立的振荡波长有 10^5 - 10^6 ），结构也千差万别。然而做为原理性的共同特点，一般都包括三个部分，如图0.2所示。图中A叫做工作物质（就是激光

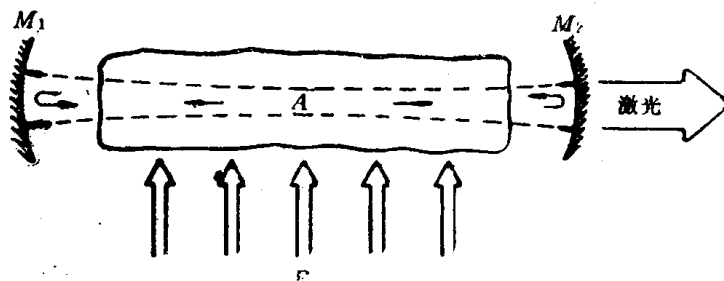


图0.2

材料，或激光媒质)，激光就是由它辐射的，如梅曼激光器中的红宝石；P叫做抽运系统（亦称泵浦系统或激励系统），是激励工作物质A的能源，如梅曼激光器中的螺旋形闪光灯； M_1 与 M_2 构成激光器的光学谐振腔，如梅曼激光器中红宝石棒两个端面上镀的银膜。通常 M_1 与 M_2 是两块光学反射镜，一般 M_1 是全反射镜， M_2 是部分反射镜。激光由腔镜 M_2 输出。激光器有谐振腔，是它在结构上与普通光源最基本的区别。

激光是在有理论准备和生产实践迫切需要的背景下应运而生的，它一问世，就获得了异乎寻常的飞快发展。因为它有着上述那些普通光源所无法比拟的特点，所以获得了极其广泛的应用。实验室的研制成果，只经过两三年甚至更短的时间就变成了普通商品。这些成功的应用，反过来又成为它进一步发展的强大动力。到目前为止，其应用范围不仅覆盖了物理学、化学、生物学、电子学和技术科学各个学科领域，而且遍及工业、通讯、军事、医疗卫生及农业等国民经济乃至日常社会生活的各个方面。这些应用中的大部分，就其实质而言，只有用激光才能实现；小部分是使用激光要比使用普通光源或其它手段所获得的效果好得多。在不计其数的应用中，从物理学的观点来看，它们或者利用了激光的某一特性，或者同时利用它的几个特性。

激光技术的诞生还具有重大的科学意义。它不仅使某些原有学科焕发出新的生命力，而且使一批新兴学科相继诞生。

激光的发展即将走完它的第三个10年，现在它早已从应用研究中的发明进入了本世纪后半叶最重要的技术成就之一。它不仅使古老的光学科学和光学技术获得了新生，而且导致整个一门新兴工业的出现。激光的发展方兴未艾。几乎从任何可能的前景来看，激光器都是非常值得重视的器件。激光器的首次成功运转，不仅是光学发展史上的伟大里程碑，而且是整个科学史上的一个伟大里程碑。激光技术在现代社会中正在发挥越来越大的作用。

第一章 基础知识概述

本章作为全书的预备知识，分六节讨论。前两节，简短回顾本课将要用到的原子物理学和光学知识。接下去的两节，介绍最基本的激光概念及专业用语。1.5节概述激光的主要特性。作为一门原理性的课程，要分门别类地逐一阐述激光器各部分的原理。然而，激光器是由其各个部分组成的紧密联系在一起的统一整体，在讨论任何一部分时，都要或多或少地牵涉到其他部分。所以，在分别讨论每一部分之前，先把必要的概念及特性做一简要介绍，显然是适宜的。

最后一节，将对单位制问题做些简要说明。

1.1 激活中心

在激光器中，发射激光的粒子可能是原子，也可能是分子或离子等粒子。本书统称发射激光的粒子为激活中心。而把激光工作物质中，与激活中心混在一起的不发射激光的粒子，叫做辅助粒子。本节对原子体系的讨论，如果没有特殊声明，原则上，对其它激活中心也同样适用。

1.1.1 原子体系

众所周知，一切物质都由分子或原子组成，许多晶体则由点阵中的离子组成。每个原子体系都可能处于某一稳定状态，每个稳定状态都对应能量的一个确定值。原子体系的这些稳定状态用量子数表征。每个确定的能量值都称为原子体系的一个能级。孤立原子的状态由闭合电子壳层外边的电子的轨道量子数和自旋量

子数描写。分子的状态，除了用电子的量子数描写而外，还要用到与分子振动、转动相联系的量子数。

在量子理论中，原子在时刻 t 的量子态完全由波函数 $\Psi(r, t)$ 确定，其中 r 为空间位置。这个波函数在空间和时间中的演变，受薛定谔方程支配。对给定的初始条件和外信号，解薛定谔方程，原则上可以求出 $\Psi(r, t)$ ，从而得知那个原子的一切情况。

任何孤立的量子体系，例如一个原子，都有一组由波函数 $\psi_i(r)$ 描写的特定的能量本征态，或“定态”。这些波函数 $\psi_i(r)$ 是在外信号不存在的情况下，与时间无关的薛定谔方程的解。每个本征态对应着原子的一个能级，具有相应的能量本征值 E_i 。这些本征态提供了一组基矢，或一组简正模，原子在任何时刻的量子态都可以向它们作展开。原子的波函数一般应写成

$$\Psi(r, t) = a_1(t)e^{-iE_1t/\hbar}\psi_1(r) + a_2(t)e^{-iE_2t/\hbar}\psi_2(r) + \dots \quad (1.1.1)$$

其中 E_1 、 E_2 等是能量本征值。在外信号或其它任何外界扰动都不存在的情况下，上式中的复值系数 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 等都是与时间无关的常数^①。

由不同量子数完备组表征的两个或两个以上的态有相同能量时，称该能级是简并的。具有相同能量的态的数目称为该能级的简并度。通常说“态”，就是指能级，具有相同能量的态都被看做是相同的。通过辐射的方式，伴随着能量的发射或吸收，会发生两个稳定状态之间的跃迁。跃迁过程中，体系发射或吸收辐射的频率 ν 由普朗克定律

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1.1.2)$$

给定，其中 E_1 与 E_2 是发生跃迁的两个态的能量， h 是普朗克常数， $h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦·秒。

体系具有最低能量的能级称为基态能级，其他所有的能级都称为激发态能级。通常就简单说“基态”，“激发态”。处在基

^① 为了书写简便，本书中的复参量均不标“~”号。

态的原子只能吸收辐射。为了使能级的顺序与能量的大小对应，从基态开始，我们按照能量增加的顺序依次给能级编号，能量低的，号码小，称为低能级或下能级；能量高的，编号大，称为高能级或上能级。

原子跃迁除了发射电磁辐射而外，也可能是别的内能损耗机理所致。例如：晶体中的原子可以把它的能量供给晶格的热振动，液体中激活中心与溶解它的媒质分子间的能量交换，气体原子之间及与器壁的非弹性碰撞等等，都会使粒子发生能级跃迁。但是这些过程并不伴随电磁辐射，故称非辐射跃迁。这里必须指出，“非辐射”这一用语只是意味着原子自发地发射出声学声子，和自发地发射光子同属自发发射过程。辐射过程和非辐射过程是自发发射的两种不同形式，并且有极为相似的量子力学解释。辐射的自发发射，即电磁的自发发射，是发射光子，很容易观测；非辐射的自发发射，即声学的自发发射，是发射声子，很不容易探测。

1.1.2 光谱学术语

在原子体系中，原子从某一较低能级跃迁到任一较高能级，就意味着原子体系能量的增加；反之，若原子从某高能级跃迁到任一低能级，就意味着原子体系能量的减少。原子体系中，从低能级到高能级跃迁所吸收辐射能的总和就形成吸收光谱，而从高能级到低能级跃迁所发射辐射的总和形成发射光谱。元素周期表中的每个原子，以及每个分子和离子，都有表示自己特征的量子能级组，及相应的代表自己特征的荧光发射光谱。

由于光的发射和吸收，伴随着原子体系中的电子的重新排列，所以每条发射或吸收光谱线都对应着原子的两个特定稳定状态之间的跃迁。

作为一种简化的看法（在多数情况下是容许的），人们可以分别考虑原子中的各个电子，而光谱线的发射或吸收是由于单电子组态相对于原子座重新排列的结果。

原子中的电子，用三个轨道量子数 n ， l ， m 和自旋量子数 S 的分量 m_s 表征，轨道量子数取整数， m_s 取 $\pm 1/2$ 。量子数 n 支配波函数的径向分布，它对应玻尔理论的主量子数，对结构简单的原子，电子的能量主要由 n 决定。对给定的 n ，量子数 l 可以取 0 到 $n-1$ 的所有整数，它决定轨道角动量，称为角量子数。量子数 m 描述角动量矢量相对于外场的方向，称为磁量子数。对一个给定的 l 值， m 可取 $-l$ 到 $+l$ 的任何整数，故 m 的可能取值有 $2l+1$ 个。角动量的最大分量为 $l\hbar$ ，而在量子力学中这个矢量的大小为 $\sqrt{l(l+1)}\hbar$ 。不同的量子数对应不同的电子态，与不同的波函数相联系。当几个态有相同的能量时，能级称为简并的。外加电磁场、同一原子中其他诸电子的场及相邻原子的场等等可以消除能级的简并。

当原子包含很多电子时，作为一种简化的看法，形成闭合壳层的内电子可不予考虑，与原子跃迁相联系的能量差的计算，只需考虑闭合壳层外的价电子。因此，对碱金属只需考虑一个电子，对碱土金属只需考虑两个电子等等。

角量子数 $l=0, 1, 2$ 或 3 的电子，分别称为 s 、 p 、 d 、 f 电子。对比 3 大的 l 值，按自然数顺序依次用英文字母表中 f 以后的小写字母表示。电子的状态用符号 nl 表示，如符号 $3p$ 表示一个电子的 $n=3$ ， $l=1$ ，其他依此类推。

在描写多电子原子的状态时，要记住两点：(1)属于一个原子中的诸电子是可交换的；(2)不能同时有两个或两个以上的电子具有完全相同的量子数（包括自旋量子数 m_s ）。原子的状态用电子组态符号表示。如金属元素Li的基态用 $1s^2 2s$ 描写，意思是两个电子处在 $1s$ 态（自旋相反），一个电子在 $2s$ 态。这些电子的轨道角动量之和为 0 ，自旋角动量之和为 $1/2$ ，总角动量（轨道与自旋角动量之和）为 $1/2$ 。所有这些角动量都以 $\hbar = h/2\pi$ 为单位。

上述各角动量之值是怎样算出来的呢？我们感兴趣的大多数

原子和离子，其总角动量可以分别通过先求各个电子轨道角动量的矢量和 L ，及自旋角动量的矢量和 S ，然后再求这两个和矢量的矢量和，就得到了总角动量 J 。原子体系的总轨道角动量 L 的大小取整数值。对偶数个电子，总自旋的大小取整数，对奇数个电子，它取半整数。这种方法适用于矢量 L 和 S 是运动常数（即不随时间而变）的情形，我们称上述求角动量的方法为 L - S 耦合。

量子理论已经证明，对每个固定的总自旋角动量 S 值，存在 $2S+1$ 个不同的自旋可能组态。 $S=0$ 的组态称为单重态。 $S=1/2$ 的组态称为双重态等等。有两个电子的原子或离子， S 的值为0或1，因此这种原子或离子将有单重态和三重态。具有共同 J 、 L 、 S 值的态的集合称为（光谱）项。一般说来，（光谱）项包含角动量（矢量）方向不同的许多态，（光谱）项的重数（或简并度）为 $2J+1$ 。

（光谱）项用符号

$$^{2S+1}X_J$$

表征，其中字母 X 代表 S 、 P 、 D 、 F 、 G 等等，表示总轨道角动量 L 的取值，这些字母所对应的 L 值分别为0、1、2、3、4等等（注意，这里的 S 表示 $L=0$ ，不要与自旋量子数混淆）。左上角标 $2S+1$ 由总自旋量子数 S 决定，表明是单重态、双重态、或三重态等等。多重线的不同成份由总角动量 J 的值标明，它作为下标写在整个符号的右下角。当需要时，价电子的组态也要给出，并写在上述（光谱）项符号的前面。如 Li 的基态符号为 $2s^2S_{1/2}$ ，而 $3s^2S_{1/2}$ 、 $2p^2P_{1/2}$ 、 $2p^2P_{3/2}$ 等是它的几个激发态的符号，后两个态的区别是受激的 $2p$ 电子的自旋方向恰好相反。总角动量 J 的取值从 $|L-S|$ 开始，依次增加1，直到 $|L+S|$ 。因此，当 $L \neq 0$ ， $S=1$ 时， J 取 $L-1$ ， L 和 $L+1$ 三个值，对 $L=0$ ， J 只取一个值，即 $J=S$ 。如上例中的四个态，前两个态 $L=0$ ， $S=1/2$ ，所以 J 只能取 $1/2$ ，后两个态， $L=1$ ， $S=1/2$ ，所以 J 可以取 $1/2$