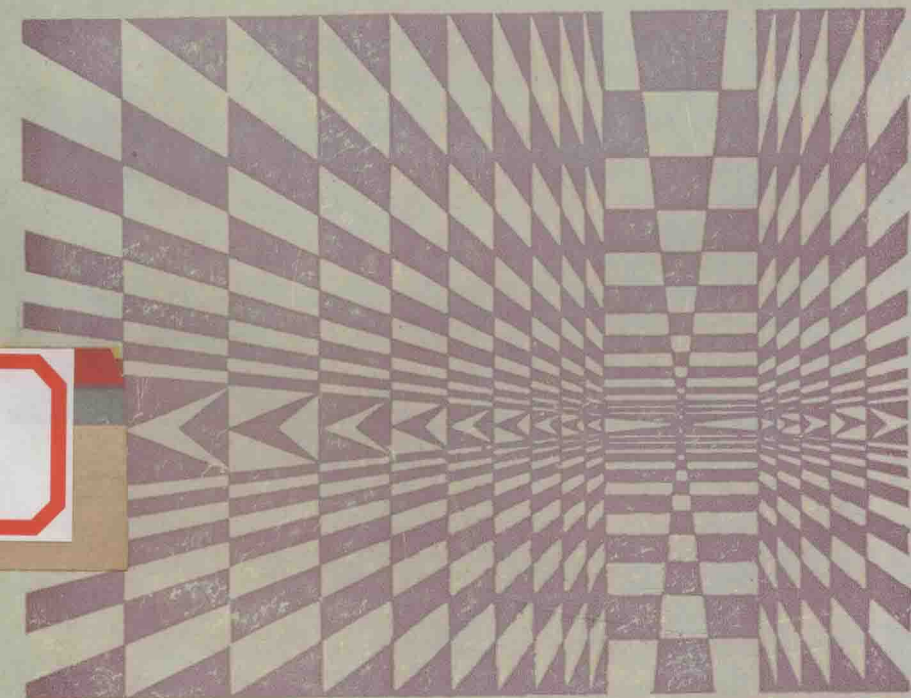


FUNDAMENTALS IN LASER THEORY

激光理论基础

熊经天 编 谢楠注 审



广东科技出版社

Jiguang Lilun Jichu

激光理论基础

熊钰庆 编

谢楠柱 审

广东科技出版社

内 容 提 要

本书主要采用速率方程理论来论述激光基本原理,着重阐述激光的物理机理。内容包括经典、半经典辐射理论基础,激光形成的基本条件,粒子数反转和光在增益介质中的增益,光学谐振腔,连续激光器和脉冲激光器工作原理等。

本书可供激光专业的教师和科技人员参考,也可作激光专业基础课或选修课教材或参考书。

激光理论基础

熊钰庆 编

谢楠柱 审



广东科技出版社出版发行

韶关新华印刷厂印刷

787×1092毫米32开本 9.25印张 200,000字

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数1—3,000册

书号13182·154 定价1.75元

前 言

本书主要采用速率方程理论来论述激光基本原理，着重阐述激光的物理机理。全书共分六章。第一章概述光辐射的经典理论和半经典理论，讨论爱因斯坦系数及光谱线的线型和宽度；第二章讨论激光形成的基本条件和激光束的基本特性；第三章论述粒子数反转分布和光在激活介质中的增益作用；第四章介绍光学谐振腔及其纵模和横模，讨论高斯光束的特性；第五章和第六章分别分析连续激光器和脉冲激光器的工作原理和工作特性，并介绍激光调Q和锁模原理。

本书承蒙广州医学院医学物理教研室主任谢楠柱教授审校，在定稿过程中，还得到华南师范大学现代光学研究室主任周簨声副教授的许多帮助。谢教授和周副教授从美国引进了不少较新的激光方面的书籍和资料，使本书定稿时能吸收较新的材料。广州医学院医学物理教研室黄大同同志负责全书编辑工作，黄大同、万维、唐智、黄民忠、吴东生、张启芳等同志参加抄稿和校对工作，华南师范大学周金美同志为本书绘制插图。对上述同志的大力支持和帮助，在此表示深切的谢忱。

编者

1986年5月

目 录

绪论	1
第一章 经典和半经典的光辐射理论基础	6
§ 1-1 光辐射理论发展简史	6
§ 1-2 经典辐射理论	9
§ 1-3 黑体辐射	16
§ 1-4 光子学说	22
§ 1-5 跃迁几率和爱因斯坦系数	31
§ 1-6 光谱线的线型和宽度	44
§ 1-7 光的相干性	69
第二章 产生激光的基本条件	80
§ 2-1 激光的形成	80
§ 2-2 激光束的基本特性	92
第三章 激活介质中光的增益	100
§ 3-1 粒子数的正常分布	100
§ 3-2 粒子布居数反转	102
§ 3-3 可实现粒子数反转的几种量子系统	104
§ 3-4 光在增益介质中的增益	121
§ 3-5 反转粒子数的饱和效应	126

§ 3-6	均匀加宽工作物质的增益饱和	135
§ 3-7	非均匀加宽工作物质的增益饱和	139
第四章	光学谐振腔	145
§ 4-1	光学谐振腔的分类及其稳定条件	145
§ 4-2	光腔中的驻波和纵模	157
§ 4-3	激光的横模	169
§ 4-4	共焦腔中的高斯光束	176
§ 4-5	一般稳定球面腔与共焦腔的等价性	193
§ 4-6	光腔的损耗	199
第五章	连续激光器工作原理	207
§ 5-1	激光振荡的阈值条件	207
§ 5-2	连续激光器中稳定状态的建立和工作特性	211
§ 5-3	连续激光器的输出功率和最佳透过率	220
§ 5-4	单模激光器的线宽极限	224
§ 5-5	频率牵引效应	229
第六章	脉冲激光器工作原理	234
§ 6-1	多模振荡的速率方程	235
§ 6-2	脉冲激光器的工作特性	242
§ 6-3	Q 调制激光器的工作特性	261
§ 6-4	锁模激光器原理	277

绪 论

一、激光技术是一门新兴的科学技术

激光器是六十年代初出现的一种新光源。激光技术从此发展成为一门新兴的科学技术，迄今已有二十多年的历史。它不但引起了现代应用光学技术的巨大变革，为应用光学开辟了新道路，而且促进了物理学和其他有关学科的新发展。近年来，激光技术的应用已遍及工业、农业、交通、医疗卫生、通信、科学研究和国防等各个领域。同半导体、集成电路和计算机等技术一样，激光技术对科学技术和国民经济的发展具有重要的作用。

目前世界各国的激光工业正在形成，激光产品的种类、数量和销售额逐年增加。激光在工业的应用很广泛，例如，微加工、切割、打孔、焊接、表面热处理、激光导向、精密定位和检测等，其中如用激光对钟表钻石轴承打孔，可提高工效近一百倍，产品合格率达98.9%。光纤通讯现正进入大量推广应用阶段，1983年全世界已敷设光纤通讯线路27万公里，预计到本世纪末将由亿万台激光器通过光纤线路把世界联系起来，形成一个巨大的信息网络。光盘(一种高密度、大容量存贮器)、激光传真、印刷和制版在国外已广泛应用。激光在军事上已获广泛应用，激光制导、激光测距、激光雷达等大大提高武器的作战能力和命中率。激光在医学

上的应用范围宽广，几乎遍及各个医学分科。激光分离铀同位素，激光核聚变和激光武器等重大课题已取得可喜的进展。激光已成为物理学、化学、生物学等基础学科的重要研究手段，并相互渗透派生出非线性光学、激光光谱学、激光化学和激光生物学等分支学科。

我国从六十年代初开始发展激光以来，已形成一支可观的专业队伍，开展了范围宽广的从基础到应用的各项研究，取得了大量研究成果，并且广泛应用于各个领域。

激光钟表宝石轴承打孔、激光切削、焊接、热处理、激光准直、导直、计量、全息检测等工业应用在国内已较成熟。光纤通讯已进入实用研究阶段。激光传真机、照排机、分色机已试制成功。光盘处于从实验室走向图书馆和数据库的试制阶段。激光测距仪已应用于军事上。激光医学在我国已获广泛应用。

激光技术当前的发展趋向是：(1)激光工业及其产品市场日益扩大，激光的质量、寿命和可靠性不断提高，专用激光产品不断增加。(2)竞相扩展激光技术在各个领域的应用，近年来工业技术发达的国家纷纷建立激光应用研究所。(3)激光与半导体、计算机、微电子学、信息科学、生命科学和医学等的联系日益密切，在新技术革命中的作用日益明显。(4)加强激光的应用基础研究，发展新型激光器，深入研究激光与物质的相互作用，开拓新的边缘学科领域和新兴产业。

二、激光器的物理机制的研究方法

激光器的物理基础是光频电磁场与物质的相互作用，对于绝大多数激光器来说，是指光与组成物质的原子(或离子、分子)内的电子之间的共振相互作用。对于近年来出现的自

由电子激光器，则应考虑光与自由电子的相互作用。我们只讨论前者。此外，光与物质的非共振相互作用是激光技术的另一类效应，例如非线性光学效应的物理基础，也不在我们的讨论范围之内。

激光器的特性和它所包含的物理现象十分丰富，从宏观的激光强度、频率特性直到微观场的量子起伏(相干性和噪声)特性。为了揭示这些现象的物理本质和掌握激光器的工作特性，须要在光与物质相互作用理论的基础上建立激光器的理论。激光器的严格理论是建立在量子电动力学基础上的量子理论，它在原则上可以描述激光器的全部特性。但是，这并不意味着在描述激光器的任何特性时都一定要采用这种理论的全部观点和方法，这样做往往是不方便的和不必要的。正确的做法是，根据所要讨论的各种激光物理现象的不同属性和特点，采用不同的理论处理方法。

光辐射与物质相互作用的理论可分为如下四类。

经典理论

这是量子力学建立以前人们对场与原子相互作用的处理方法，也称为经典原子发光模型。它的出发点是将原子系统和电磁场都作经典处理，即用经典电动力学的麦克斯韦(Maxwell)方程组描述电磁场，将原子中的运动电子视为服从经典力学的电偶极振子。从现代量子理论观点看来，这种原子模型显然是粗糙的，但是在原子物理学发展的历史进程中，它曾成功地解释了物质对光的吸收和色散现象，定性地说明了原子的自发发射及其谱线宽度，等等。在激光器理论中，经典电磁场理论是讨论有关光学谐振腔和激光传输问题的理论基础之一。在描述光与物质的非共振相互作用(例如

非线性光学效应等)时也起一定的作用。特别是对于自由电子激光器,可以完全采用运动电子电磁辐射的经典理论来描述。

半经典理论

它是属于量子力学范围内的理论处理方法,与量子力学中关于跃迁和光的发射、吸收问题的处理方法相似。它的出发点是,采用经典麦克斯韦方程描述光频电磁场,而组成物质的原子体系则用量子力学描述。采用这种方法建立完整的激光器理论的工作是由兰姆(W·E·Lamb)在1964年开始的,故称为**激光器的Lamb理论**。半经典理论能较好地揭示激光器中大部分物理现象的规律性,如强度特性(反转粒子数烧孔效应与振荡光强的兰姆凹陷)、增益饱和效应、多模耦合竞争效应、模的位相锁定效应、激光振荡的频率牵引与频率排斥效应等。但是,这种理论也掩盖了与场的量子化特性有关的物理现象,例如自发发射以及由它引起的激光振荡的线宽极限,振荡过程的量子起伏效应等。半经典理论的另一缺点是数学处理比较繁杂。因此,在只需要了解激光器的一些宏观特性的情况下,宁愿采用简明的速率方程理论。

量子理论

这是量子电动力学的处理方法。它对光频电磁场和组成物质的原子体系都作量子化描述,并将两者作为一个统一的物理体系加以处理。激光器的全量子理论只是需要严格地确定激光的相干性和噪声以及线宽极限这些特性时才是必要的。这也超出了本书的范围。

速率方程理论

可以认为,它是量子理论的一种简化形式,是在忽略了

量子化辐射场的位相特性和光子数起伏特性的前提下，为描述激光光子群与原子体系的相互作用而派生的方法。这种理论具有特别简单的形式。但严格说来，它只能给出激光的强度特性，而不能揭示出色散(频率牵引)效应，也不能给出与激光场量子起伏有关的特性。对于烧孔效应、兰姆凹陷、多模竞争等，则只能给出粗略的近似描述。

本书不涉及激光的Lamb理论和全量子理论，主要采用速率方程理论来处理问题。

本书介绍激光基本原理。第一章简要复习光辐射的经典理论和半经典理论，爱因斯坦(Einstein)系数及光谱线的线型和宽度。第二章概述激光形成的基本条件和激光束的基本特性。第三章讨论粒子数反转分布和光在激活媒质中的增益作用。第四章介绍光学谐振腔及其纵模和横模，讨论高斯(Gauss)光束的特性。第五章和第六章分别分析连续激光器和脉冲激光器的工作原理和工作特性，并介绍激光调Q和锁模原理。

第一章 经典和半经典的 光辐射理论基础

§ 1-1 光辐射理论发展简史

光的发射、传播以及它同物质的相互作用，是自然界中最常见和最普遍的现象之一。早在十七世纪，已形成了对光的本性解释的两种原始性理论。一种认为光在本质上是一种以一定方式沿空间传播着的波动过程；而另一种则认为光在本质上是由一些以经典方式运动着的微小粒子所组成。当时提出的这两种原始理论都是极为粗浅的，它们只能分别对个别的光学现象给出不同的并且是具有很大大片面性的解释。到了十九世纪初，关于光的波动本性的理论有了进一步的发展。在对光是一种波动过程的物理图象提出一些新的假设的基础上，这种理论已能成功地解释一系列重要的光学现象。因此，光的波动学说开始普遍为人们所接受。但是在当时和以后的一段时间里，光的波动学说的物理基础仍然存在严重的问题。因为当时的理论认为，光在本质上是一种通过臆想的介质（固态弹性“以太”）而传播的力学式的横向振动波，而每当从这一基础假设出发试图对光学过程的实质给予纯力学式的解释时，总会遇到一些带根本性的困难。

只有到了十九世纪下半叶，在当时工业和电学技术发展

的推动下，确立了表征电磁现象规律性的麦克斯韦方程组，并且在实验上证实了以光速传播的电磁波的存在以后，光的波动理论才获得更加可靠的物理基础。从这时起，人们开始把光理解为以光频振荡的电磁波，并且确认，光学现象应该遵循由麦克斯韦方程组所决定的基本规律。应用光的电磁波理论，基本上能比较完满地解释光的反射、折射、干涉、衍射、偏振、双折射等与光的传播特性有关的一系列重要现象。

尽管光的电磁理论在其发展初期取得了许多成就，但到十九世纪末和二十世纪初，当人们试图进一步解释涉及到光与物质相互作用现象(如黑体辐射、原子的线状光谱、光电效应等)的规律性时，光的经典电磁理论又遇到了新的本质上的困难。为了克服这些困难，人们不得不进一步改变对光的本性的理解。1900年，普朗克(Planck)提出电磁辐射源体系能量量子化的创新假设，并在此基础上导出与实验规律相符的黑体辐射定律。1905年，爱因斯坦发展了普朗克的量子假设，在一种全新的物理意义上提出了光子学说。按照这一学说，光在本质上是由一些具有确定能量和动量的物质微粒——光量子或光子所组成，而光子的能量和动量的数值，与一定的光的频率或波长相对应，即

$$E = h\nu \quad (1-1)$$

$$p = \frac{h\nu}{c} \quad (1-2)$$

从光子学说出发，可以解释黑体辐射、光电效应、康普顿(Compton)效应和光化学效应等一系列涉及光与物质相互作用中能量和动量交换特性的规律性。

因此，人们不得不承认，光在本质上表现出双重的特性：一方面，光在其传播特性有关的现象方面表现出连续的

波动的本性；另一方面，光在其与物质相互作用的能量和动量交换特性方面又表现出分立的粒子式的本性。光在本质上具有波动与粒子双重特性的事实，构成了后来产生量子力学的物理基础之一。在量子力学原理确立之前，关于光的本性理解的两种不同理论（经典电磁理论和光子学说）并未能得到很好的统一。在量子力学原理确立之后，人们把这一原理推广到电磁辐射场及其与物质体系相互作用过程的描述，从而建立了量子电动力学理论。只有在此之后，关于光的双重特性的物理解释才得到了合理的统一。按照量子电动力学的观点，在对电磁辐射采用量子化描述之后，将自然地导致场的光子特性的理论结果。应用量子电动力学理论，在原则上既可以解释光与物质相互作用现象的规律性，又可以解释与光的传播行为有关现象的规律性。

在本世纪三十年代前后得到确立的量子电动力学理论的重要成果之一，是它能正确地描述电磁辐射场与原子体系相互作用时可能发生的三种过程——**自发发射**，**受激发射**和**受激吸收**，并能给出这三种过程之间的定量关系。按照这种理论，当原子体系按能级的分布服从（或近似服从）玻尔兹曼（Boltzmann）热平衡规律时，或者换句话说，当所考虑的原子体系的高能级上的粒子数少于低能级上的粒子数时，原子体系对辐射场所表现出的总效果是自发发射或者受激吸收；反之，如果以某种方式破坏原子体系按能级的正常分布而实现粒子数分布的反转状态（亦即使特定的高能级上的粒子数多于低能级上的粒子数），则原子体系在入射场作用下的受激发射效应可能占优势，从而有可能对入射光产生由受激发射效应所导致的放大作用。

在本世纪五十年代末，由理论所预见的粒子数反转体系

对入射电磁场产生受激放大作用的可能性，首先在无线电电子学的微波技术领域内得以实现，其标志是制成了**微波量子放大器**（**微波激射器** Microwave Amplification by stimulated Emission of Radiation——简写成maser），并开拓了**量子电子学**这一崭新的学科领域。

微波量子放大技术的出现和进展，自然促使人们努力探索在光频段实现粒子数反转和产生光的受激发射放大作用。在本世纪六十年代初，第一批**光激射器**（**激光器**，Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation——简写成laser）先后获得成功运转，从而标志着一项崭新的科学技术——激光技术的诞生。激光技术的出现，不但引起了整个光学应用技术的革命，而且极大地促进了光辐射理论的发展，形成了**激光物理学**。

§ 1-2 经典辐射理论

经典的辐射理论引用**偶极振子**的概念，反映了光的发射和吸收过程的某些规律性。在这个理论中，偶极振子的强迫振动的释放能量与吸收能量过程，可近似地解释受激发射和受激吸收，而阻尼振动过程则可近似地说明自发发射现象。

一、简谐振子模型

经典辐射理论之所以一直把按简谐振动或阻尼振动规律运动的偶极子作为光辐射源的模型，不单是分析方法简便，也确实可以说明一系列的辐射现象。经典偶极振子的模型认为，原子的电子和离子之间的相互作用是以弹性力来维持

的。离子的质量比起电子质量是如此之大，以致可以认为离子是不动的，并且电子绕此平衡位置而振动，其实就是振荡的偶极子。偶极子的电学特征是电偶极矩矢量

$$\mathbf{p} = e\mathbf{r} \quad (1-3)$$

其分量表示式为

$$p_x = ex, \quad p_y = ey, \quad p_z = ez \quad (1-4)$$

设电子在弹性力作用下沿 x 方向作简谐运动，其运动方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -m\omega_0^2 x \quad (1-5)$$

式中 m 为电子质量， ω_0 为共振频率， $-m\omega_0^2 x$ 为恢复力。

由上式可求得电子在 x 轴上的位置随时间变化规律为

$$x = a \sin \omega_0 t \quad (1-6)$$

式中 a 为电子最大位移。由此得到电偶极矩为

$$p = ex = e a \sin \omega_0 t = p_0 \sin \omega_0 t \quad (1-7)$$

式中 $p_0 = ea$ 为电偶极矩的振幅。

二、电偶极辐射

按式(1-7)振动着的电偶极子辐射电磁波，可用麦克斯韦方程组计算。一般电动力学教科书都有这种计算，其结果是

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{H}| = \frac{\ddot{p} \left(t - \frac{R}{c} \right)}{c^2 R} \sin \theta \quad (1-8)$$

上式是所谓辐射波区的电磁场，其方向关系如图1-1所示，式中 c 是真空中光速， R 为观察点 M 与原点间的距离， θ 是振动方向与原点至观察点的矢径间的夹角， $\ddot{p} \left(t - \frac{R}{c} \right)$

表示偶极矩对时间的二阶导数，但不是取时刻 t 而是取较前时刻 $(t - \frac{R}{c})$ 的数值。它出现在式(1-8)中表明电磁场传播的有限速率，即振动着的电极子辐射的电磁波以速率 c 移动。

在辐射波区， $E = H$ ， $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ 。电磁场的辐射强度(即能流密度)根据坡印亭(Poynting)定理为

$$S = \frac{c}{4\pi} E^2 = \frac{\ddot{p}^2}{4\pi c^3 R^2} \sin^2 \theta$$

$$= \frac{e^2 \ddot{r}^2}{4\pi c^3 R^2} \sin^2 \theta \quad (1-9)$$

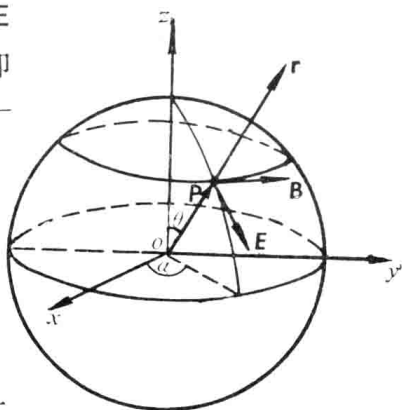


图1-1 电偶极子的辐射

能流方向与波的传播方向一致，如图1-1所示。

单位时间内振子所辐射的全部能量，即能量辐射率，等于流过以原点为球心、半径为 R 的球面上的总能流

$$I = \ddot{p}^2 \int S d\sigma = \int S R^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$= \frac{\ddot{p}^2}{4\pi c^3} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta$$

$$= \frac{2 \ddot{p}^2}{3c^3} = \frac{2e^2 \ddot{r}^2}{3c^3} \quad (1-10)$$

辐射能量的周期平均值为

$$\bar{I} = \frac{2 \overline{\ddot{p}^2}}{3c^3} = \frac{1}{T} \int_0^T I dt$$