

[日] 霜田光一 著

激光物理导论

朱大勇 叶乃群 译 卢亚雄 校

电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括量子电子学和激光器的基本原理。书中详细地介绍了二能级原子的光发射和吸收,原子的相干性和非线性效应,并且用密度矩阵和速率方程对激光动力学、相干瞬态及激光感应等有关现象进行了综合分析。每章均有若干习题,书后附有题解和答案。

本书可作为高等院校有关专业的教科书,也可供从事激光研究的科技人员和高等院校教师参考。

INTRODUCTION to LASER PHYSICS

(日) 菊田光一 著

激光物理导论

朱大勇 叶乃群 译

卢亚雄 校

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都市建设北路二段四号)

成都市七号信箱印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 880×1168 1/32 印张 8.626 字数 218千字

版次 1990年10月第一版 印次 1990年10月第一次印刷

印数 1—1600册

中国标准书号 ISBN 7-81016-264-0/TN·77

(10462·121) 定价: 3.90元

译 者 序

本书是国际著名的Springer出版社1986年出版的“光学科学丛书”第44卷第2版，作者是著名学者霜田光一教授。

本书内容涉及到量子电子学和激光器的基本原理，书中详细地介绍了二能级原子的光发射和吸收，原子的相干性和非线性效应，并用密度矩阵和速率方程对激光动力学、相干瞬变和激光感应现象进行了综合分析。

全书物理概念清晰，结构严谨，条理分明。为适应教学需要，每章均附有习题，书后有题解和答案，它不仅加深了读者对书中内容的理解，而且对正文也是一个很好的补充。

本书可作为高等院校有关专业的教科书和参考书，也可供激光领域的科技人员和高等院校教师参考。

本书由朱大勇翻译序言、第一至七章、题解和答案，叶乃群翻译第八、九章，卢亚雄负责全书的校订。

第二版序言

第二版新增加了讲述光学谐振腔的3.8节和附在书后的“**解和答案**”部分，同时删去了第一版中的简短答案。第二版4.6节后面补充了克雷默斯-克朗林 (Kramers-Kronig) 关系式 和几道新习题。一些错误和刊误已修正。

霍田光一
1986年4月

第一版序言

激光开创了科学技术的新领域并得到迅速发展。各类激光器不仅在工业生产中广泛使用,而且也促进了半导体和其它材料微细结构的激光加工,原子或分子的能级选择,单原子的探测和捕获,飞秒测量,相位共轭等的革新。

因此,从事激光工程的人员需要懂得和应用激光物理的原理,对于研究激光光谱学和量子光学的科学家更是如此。

本书是为具备电磁场理论基础、基础量子力学和一定计算能力的学生,提供的一本易懂的激光物理入门课本。本书将使读者有效地理解激光器的基本概念,原理和理论分析以及激光感生效应。激光物理仍在不断发展,远未达到建立成熟体系的阶段。作者从激光问世到现在一直从事激光的基本研究,研究内容也包括在本书之中。

书中大多数的数学处理和超过基本程度的物理概念都作了详细解释。完全用物理描述的问题主要提供给那些具有扎实激光物理基础的读者。本书着重讨论物理量和实际参量的数量级,而不追求理论计算的精确值。

本书内容包括:综述典型激光器的技术性能,描述与激光有关的现代光学,讨论光的发射和吸收过程,描述激光的原理和粒子数反转的概念,使用速率方程近似推导激光器的输出特性。本书详细描述原子干涉性和非线性极化,为激光半经典理论、非线性光学和激光光谱学提供理论基础。最后简要地概述了全量子理论。每章均有习题和提示,大多数习题不仅仅是数值计算,而且对读者具有启发性。

霜田光一

1984年4月

目 录

译者序

第二版序言

第一版序言

第一章 激光 一种新奇的光源 (1)

§1.1 激光的特性 (1)

1.1.1 方向性 (1)

1.1.2 单色性 (2)

1.1.3 能量密度和亮度 (3)

1.1.4 超短脉冲 (4)

§1.2 固体激光器 (5)

§1.3 气体激光器 (8)

1.3.1 原子气体激光器 (8)

1.3.2 分子激光器 (11)

§1.4 染料激光器 (15)

§1.5 半导体激光器 (17)

§1.6 其它激光器和激光物理 (21)

习题 (22)

第二章 光的相干性 (24)

§2.1 杨氏实验 (24)

§2.2 迈克尔逊干涉仪 (26)

§2.3 时间相干性和空间相干性 (28)

§2.4 光场的复表示 (31)

§2.5 相干函数 (34)

习题 (37)

第三章 光的电磁理论	(39)
§3.1 麦克斯韦方程组.....	(39)
§3.2 光的反射和折射.....	(43)
§3.3 全反射.....	(47)
§3.4 法布里-珀罗谐振腔.....	(52)
§3.5 法布里-珀罗干涉仪.....	(54)
§3.6 平板波导.....	(59)
§3.7 高斯光束.....	(66)
§3.8 光学谐振腔.....	(71)
3.8.1 球面镜谐振腔的光斑尺寸和稳定性.....	(71)
3.8.2 球面镜谐振腔的谐振频率.....	(75)
3.8.3 其它类型的光学谐振腔.....	(77)
习题.....	(78)
第四章 光的发射和吸收	(80)
§4.1 电磁波的模密度.....	(80)
§4.2 热辐射的普朗克定律.....	(83)
§4.3 自发发射和受激发射.....	(86)
§4.4 电偶极子辐射和自发发射几率.....	(90)
§4.5 光的吸收.....	(94)
§4.6 复极化率和折射率.....	(97)
习题.....	(102)
第五章 激光原理	(104)
§5.1 粒子数反转.....	(104)
§5.2 三能级激光器的粒子数反转.....	(106)
§5.3 四能级激光器的粒子数反转.....	(109)
§5.4 激光放大.....	(111)
§5.5 激光振荡的条件.....	(113)
§5.6 激光振荡的频率.....	(119)

习题	(122)
第六章 激光器的输出特性	(125)
§6.1 激光器的速率方程	(125)
§6.2 稳态输出	(127)
§6.3 振荡的建立	(131)
§6.4 弛豫振荡	(134)
§6.5 Q开关	(137)
习题	(142)
第七章 相干相互作用	(144)
§7.1 二能级原子和相干场之间的相互作用	(144)
§7.2 感应电偶极矩和感应发射系数	(149)
§7.3 密度矩阵	(152)
§7.4 密度矩阵的运动方程	(155)
§7.5 光学布洛赫方程	(159)
7.5.1 抽象空间的变换	(160)
7.5.2 旋转参考系的表示	(162)
7.5.3 纵向弛豫和横向弛豫	(165)
习题	(166)
第八章 非线性相干效应	(168)
§8.1 饱和效应	(168)
§8.2 饱和吸收引起的粒子数变化	(173)
§8.3 非线性复极化率	(177)
§8.4 非均匀加宽	(179)
8.4.1 多普勒加宽	(179)
8.4.2 具有多普勒加宽的非线性极化率	(182)
§8.5 烧孔效应	(185)
§8.6 瞬态相干现象	(189)
8.6.1 光学牵动	(193)

8.6.2	自由感应衰减	(194)
8.6.3	光子回波	(196)
8.6.4	自感应透明	(198)
	习题	(201)
第九章	激光振荡理论	(203)
§9.1	半经典理论的基本方程	(204)
§9.2	单模振荡	(208)
9.2.1	稳态振荡	(210)
9.2.2	范德波尔 (Van der Pol) 方程	(212)
§9.3	多模振荡	(215)
9.3.1	两个振荡模之间的竞争	(215)
9.3.2	组合频率	(219)
§9.4	锁模	(221)
§9.5	气体激光器理论	(226)
9.5.1	驻波场中气体分子的密度矩阵	(227)
9.5.2	迭代近似解	(229)
9.5.3	三阶近似下的输出特性(兰姆凹陷)	(233)
§9.6	激光的全量子理论	(236)
	习题	(238)
	题解和答案	(240)
	参考文献	(261)

第一章 激光——一种新奇的光源

激光是英文“光受激辐射放大”的缩写。激光原理与1954年发明的微波激射(微波受激辐射放大)原理相同。1960年激光发明前后,激光称为光学脉塞或红外脉塞。大约1965年以后,激光这个词才得到普遍承认。

激光导致了光学技术和光谱学的革命,并对科学技术的各个领域产生了深远的影响。在生物学、医学,甚至在核聚变中,很多研究课题都使用了激光。此外,通过使用激光才能发现象光自聚焦、光学双稳态这样一些自然现象。

在讨论激光原理及研究其特性前,本章将简要地介绍一些激光辐射知识和不同类型的激光器。

§1.1 激光的特性

激光器可以看成是一个光波振荡器或光波放大器。一些激光器可以产生可见光,另外一些激光器则产生不可见的红外或紫外射线。虽然可见光的波长范围大约从 $0.37\mu\text{m}$ ~ $0.75\mu\text{m}$,但是已知的激光器波长却在 $0.1\mu\text{m}$ (真空紫外)到 1mm (微波范围)之间。实际所用的激光器,其波长覆盖范围从 $0.2\mu\text{m}$ ~ $500\mu\text{m}$ (0.5mm)。各种类型激光器的大小是不同的,若按尺寸来划分,半导体激光器可小于 1mm ,而用于核聚变试验的激光器则大到 100m ,但这些激光器的基本特性却多少相同。

1.1.1 方向性

通过观察可见激光,可以立即看出它是一束窄光束,除非被

反射或折射，它几乎沿直线传播。激光辐射线并不是理想的平行光束，光束通过较长距离后，由于衍射而逐渐加宽，这种加宽可以用波动光学或电磁理论来解释。光束的方向性可以用加宽角 $\delta\theta$ 来表示，它与激光器输出端的光束直径 d 和波长 λ 有关，用等式表示为

$$\delta\theta \approx \frac{\lambda}{d} \quad (1.1)$$

激光束横截面内的场强分布和远距离角分布，可用衍射理论中熟悉的傅里叶变换将它们联系起来。对于相对平滑的强度分布，式(1.1)是方向角的近似表示式(3.7节)。由此可知，直径2mm、波长 $0.6\mu\text{m}$ 的红色激光束，其加宽角 $\delta\theta$ 约为 $3 \times 10^{-4} \text{rad}$ 。例如在100m远处激光束的直径仅加宽到3cm左右。

激光辐射的方向性之所以如此之高，原因是激光束横截面上各点光波的相位几乎不变。这种相位的一致性通常称为相干性。简而言之，激光器的主要特性就是产生相干光，激光不仅在空间上是相干的，而且在时间上也是相干的，所以它几乎是完全的单色光。我们将在第二章详细地讨论相干性。

1.1.2 单色性

通常认为普通放电管或光谱灯产生的单根谱线是单色的，但是若用一台高分辨率的光谱仪来观察，就会看到它是具有一定宽度的光谱线。激光谱线的宽度相当窄，即使用最好的光谱仪都不可能检测其宽度。如果把波长几乎相同的两束激光平行入射到探测器上，就会观察到相应于两束激光频率之差的拍频，因此可以从拍频起伏来测定激光频率的起伏。虽然已知一台稳定的气体激光器的光谱宽度可低于1Hz，而大多数激光器的光谱宽度却在1MHz到1GHz之间。即使一台可见光激光器的光谱宽度为1GHz，它也不过是激光频率的两百万分之一，只相当于 1pm ($0.01\text{\AA}$)的波长宽度。一台稳定激光器的1Hz光谱宽度相当于

10^{-15} 的频率起伏。

激光振荡不象普通光源那样发射不规则的光波脉冲序列，而几乎是一列持续时间相当长的纯正弦波，这点可由下面实验得到证明。把一束激光分成两束后再合起来，众所周知叠加后的光束会显示出清晰的干涉条纹(第二章)。激光频率起伏的理论极限由自发发射确定(4.3节)；如果 P 表示激活介质受激发射的光功率， ν 表示频率，则由参考文献(1.1)得到的频率起伏 $\delta\nu$ 为

$$\delta\nu = \frac{2\pi h\nu(\Delta\nu)^2}{P} \quad (1.2)$$

式中普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ， $\Delta\nu$ 是谐振强度为最大值的一半时激光谐振腔频率的半宽度。

在实际的激光器中，由于各种原因谐振腔的谐振频率会受到干扰。此外，激活介质的激励条件不稳定也会引起谐振频率的起伏。因此为了稳定激光频率，必须使谐振腔免受外部振动，防止温度变化引起尺寸的改变以及避免压强起伏和电磁场的影响。

1.1.3 能量密度和亮度

激光器的效率并不高，一台普通激光器的输出功率低于输入功率的0.1%，效率最高的激光器也不超过40%。通常用于光学实验和计量的小型He-Ne激光器，其输出功率约1mW，比一个小灯泡的光还要微弱。即使大功率Ar离子激光器或YAG激光器，也只有10~100W(分别见1.2节和1.3节)，与荧光灯相差不多。由于激光的方向性好，可以用一个短焦距的透镜把它聚焦到直径只有波长的几倍大小，因此可在焦点处达到很高的功率密度。例如，即使1mW的小输出功率，若聚焦在 $10\mu\text{m}^2$ 面积上，其功率密度将达到 $10\text{kW}/\text{cm}^2 = 100\text{MW}/\text{m}^2$ 。采用这种聚焦激光功率的方法，可以产生直流或低频交流电路中得不到的强电场。若把100W的激光束聚焦到 $10\mu\text{m}^2$ 的面积上，其电场计算值约为

$6 \times 10^7 \text{V/m}$ ，而聚焦峰值功率为100MW的脉冲激光器，则能得 $6 \times 10^{10} \text{V/m}$ ，即60GV/m的极强电场。

高功率密度的激光能得到高密度的光子数。例如聚焦波长为 $0.6 \mu\text{m}$ 或光子能量为 $3.3 \times 10^{-19} \text{J}$ 的1mW的激光功率，能得到 10kW/cm^2 的功率密度，相当于每秒 3×10^{21} 光子数/ cm^2 的通量。因为光速 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，这意味着光子密度为 10^{12} 光子数/ cm^3 。如果功率密度是 1GW/cm^2 ，那么我们将获得很高的光子密度，其值为 10^{17} 光子数/ cm^3 。因此，若把激光聚焦到物体上，经常是几个光子同时与一个单原子起作用。

由于激光的单色性很好，光的能量聚集在很窄的光谱线宽内，即使激光功率的绝对值不大，其亮度却很高。若用 P 表示激光功率， $\delta\nu$ 表示它的频谱宽度，则等效亮度温度 T_B 为

$$T_B = \frac{P}{k_B \delta\nu}$$

式中玻尔兹曼常数 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。例如，设 $P = 1 \text{mW}$ ， $\delta\nu = 1 \text{Hz}$ ，我们将得到极高的亮度温度，其值约 10^{20}K 。即使光谱线宽 $\delta\nu = 1 \text{MHz}$ ，用 $P = 10 \text{W}$ 的较大功率，亮度温度也高达 10^{17}K 。总之，与太阳或白炽灯（约 10^4K ）的亮度温度相比较，上例中的亮度温度要高出它们好多个数量级。

1.1.4 超短脉冲

激光器可以产生振幅和相位几乎是恒定的光输出，也能以很高的速率对激光进行调制。在大多数情况下，AM(振幅调制)和FM(频率调制)的调制频率可以达到微波频率，这意味着可得到较1ns更短的脉冲。当调制器放置在激光器外部时，外调制器的带宽确定了短脉冲宽度的极限，当调制器放入激光谐振腔内时，则主要是激活介质的增益带宽决定了脉宽的极限^[1,2]。

1ns在普通电子学中差不多是脉冲宽度或响应时间的极限，

然而比它短1000倍的激光脉冲，也就是1ps(1ps = 10^{-12} s)的激光脉冲已能得到，最近已获得了0.1~1ps的亚皮秒和10~100fs(1fs = 10^{-15} s)的脉冲，它能够测量0.1ps或更短的时间。因为光速

$$c = 299792458\text{m/s} \approx 3 \times 10^8\text{m/s}$$

1ps激光脉冲仅长0.3mm，因此，与其说在传送光线，还不如说在传送光薄膜。

脉冲激光器的峰值功率比连续波(cw)激光器的输出功率高得多。即使一台小型脉冲激光器的峰值功率也可达到1MW或更高，而一台大型脉冲激光器可达1GW或更高。若使用激光放大器，能得到高达1TW的峰值功率。因此，聚焦上述高功率激光脉冲时，在空间和时间上都将得到极高的能量密度。

光能量在时间上越集中，其光谱加宽就越大。包络为高斯线型的光脉冲具有围绕中心频率的高斯线型光谱分布。用 τ_r 表示高斯脉冲的半最大值全宽度，而用 $\delta\nu_r$ 表示光谱的半最大值全宽度，则得到关系式

$$\tau_r \delta\nu_r = (2/\pi) \ln 2 = 0.44$$

于是1ps激光脉冲的宽度是440GHz，相当于亚毫米波频率。

§1.2 固体激光器

固体激光器是指激光材料由晶体或玻璃构成的一种激光器，具有窄的荧光谱线。在强光的激励下，在荧光波长上它可作为振荡器或放大器使用。虽然半导体激光器和塑料激光器也是固体材料，但通常不包括在固体激光器内^[1·8]。

1960年6月问世的第一台固体激光器是红宝石激光器。固体激光器材料是透明、热稳定性好且坚硬的晶体或玻璃，其中含有

作为激活离子的过渡金属或稀土元素。红宝石晶体由 Al_2O_3 (刚玉石)中掺有 $0.01\% \sim 0.1\%$ 的 Cr^{3+} 离子构成,它用来产生和放大694nm波长的激光。

目前适用于材料处理或加工的固体激光器是YAG激光器,它是由含有 $0.1\% \sim 1\%$ 的 Nd^{3+} 离子的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (钕铝石榴石)晶体构成,发射 $1.06\mu\text{m}$ 激光,也可发射 $1.32\mu\text{m}$ 激光。还有一些含有 Nd^{3+} , Pr^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} 和 U^{3+} 等三价离子的晶体,例如 CaWO_4 和 CaF_2 ,其中大约有30种不同类型的晶体可作为激光材料。此外,还有少数含有 Sm^{2+} , Dy^{2+} 二价离子的晶体,例如 CaF_2 和 SrF_2 也可作为激光材料。这些激光器的波长在近红外($1.0 \sim 2.6\mu\text{m}$)区域,最近还研制出一种称做YLF(YLiF_4 , 钇锂氟化物)的可用于从紫外到红外某些波长的激光晶体。掺 Ce^{3+} 能得到325nm和309nm谱线,掺 Tm^{3+} 得到453nm谱线,而掺 Tb^{3+} 可得到545nm谱线。掺 Pr^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Er^{3+} 、 Nd^{3+} 的YLF晶体还可以产生其它一些新谱线,其中掺 Ho^{3+} 可得到 $3.9\mu\text{m}$ 的最长波长^[1-4]。

固体激光器的典型装置如图1.1所示。把激光材料(如上述那些晶体)加工成圆棒,并把棒的两端研磨、抛光成平行平面,称它为激光棒。将棒放置在两块面对面的镜面之间,当围绕着一个或几个闪光灯发出很强的闪光,使棒受到强烈照射时,便可发射出一个激光脉冲。典型的激光棒尺寸是长6cm,直径6mm,但有时也使用短于1cm或长于30cm的棒。

有几种激光器,例如YAG激光器,若用连续辐射光源激励,则能产生连续波振荡。通常YAG激光器能产生 $10 \sim 100\text{W}$ 的连续功率。对于 $10\text{ns} \sim 1\text{ms}$ 的脉冲宽度,在重复频率为 $100 \sim 1\text{Hz}$ 时,可以得到每个脉冲为 $50\text{mJ} \sim 10\text{J}$ 的输出能量。红宝石激光器不宜

(1)通常表示晶体中含有 $0.01\% \sim 0.1\%$ 的 Cr_2O_3 重量。

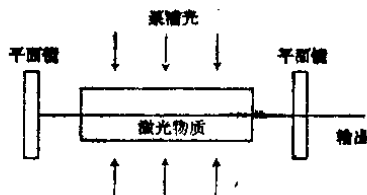


图1.1 光泵浦固体激光器

用来产生连续波，因为连续波输出的功率仅约1mW，然而它却能得到峰值功率为1~100MW的脉冲输出，该峰值功率的大小取决于脉宽(10ns~1ms)和红宝石棒的质量。

用含有1%~5%Nd³⁺的硅酸盐玻璃、磷酸盐或氟化物玻璃所构成的玻璃激光器，其激光波长为1.05~1.06μm。要生长大根的红宝石或YAG晶体棒极为困难，然而用玻璃就比较容易制作出大根均匀的激光材料。基于这个原因，玻璃激光器常用来作为高输出功率的激光放大器，例如在惯性约束核聚变中作能量驱动器。由于玻璃的热传导性差，因而脉冲重复率相当低。

最近已研究出一种用于高重复频率或连续运转的小型固体激光器，所用的Nd³⁺不再作为低浓度杂质，而是作为一种主要的成分。把NPP(五磷酸钕, NdP₅O₁₄)和LNP(磷酸锂钕, LiNdP₄O₁₃)晶体做成小于1mm的薄片，并用氩离子激光器激励，可得到约1.05μm波长的激光输出。

虽然大多数激光器的波长只能在1%之内改变，但最近已研究出宽调谐的固体激光器，用BeAl₂O₄晶体掺Cr³⁺构成的金绿宝石激光器，其输出功率和效率可以和YAG激光器相比，调谐范围却达到0.70~0.82μm。已经发现，在直到超过200℃的温度范围内，输出功率都随温度的增高而上升。在近红外区，已研制出用掺Ni²⁺或Co²⁺的MgF₂晶体，其调谐范围分别是1.6~2.0μm

和 $1.6\sim 2.3\mu\text{m}$ 。此外,用碱-卤化物晶体制成的几种色心激光器,可以覆盖 $0.9\sim 3.3\mu\text{m}$ 的波长范围。产品化的色心激光器已用于光谱学研究之中。

§1.3 气体激光器

1960年12月,用射频放电激励He、Ne混合气体,从而研制出了产生连续波输出的第一台激光器,即 $1.15\mu\text{m}$ 的He-Ne激光器。之后,从真空紫外100nm到红外,甚至到毫米波的宽阔波长范围内,已研制出多种气体激光器。已知的激光谱线总数超过5000条^[1~5]。在大多数情况下,气体要么用放电激发,要么用光泵激发,这涉及许多方法和激发机理。

若以介质分类,气体激光器可分为中性原子激光器,离子激光器,分子激光器,准分子激光器等。而按激发方法分类有放电激光器,化学激光器,光泵激光器,电子束泵浦激光器等。放电激发还可以进一步分为直流感电,高频放电,脉冲放电和空心阴极放电激发。关于激发的机理,很多过程人们已熟知,例如电子碰撞,与激发原子碰撞的能量转移,分子的离解,离子和电子的复合,共振吸收以及共振辐射的收集等。

1.3.1 原子气体激光器

最典型的中性原子气体激光器是He-Ne激光器,图1.2简要地示出了它的能级。当一个He原子用放电激发到亚稳态 2^1S 或 2^3S 上,并与基态的一个Ne原子碰撞时,He原子的激发能转移给Ne原子,其结果是 2s 和 3s 能级上分布的Ne原子数增加。这些能级上的Ne原子再跃迁到较低的能级,便发射 $1.152\mu\text{m}$ 、 $0.633\mu\text{m}$ 、 $3.391\mu\text{m}$ 以及邻近的其它几条谱线的激光。He-Ne激光器的典型特性列在表1.1中。尽管短波长 633nm He-Ne激光器的输出功率不高,但它是可见(红)光激光器中最便宜和最轻便的,因此在光