

李方正 主编

# 激光原理 与技术基础

河南大学出版社

# 激光原理与技术基础

主 编 李方正

副主编 毛海涛 王庆国 董兴法

河南大学出版社

## 激光原理与技术基础

主 编 李方正

责任编辑 姜伟林

---

河南大学出版社出版

(开封市明伦街 85 号)

河南省新华书店发行

中国科学院开封印刷厂印刷

---

开本:850×1168 毫米 1/32 印张 9.625 字数:242 千字

1996 年 10 月第 1 版 1996 年 10 月第 1 次印刷

印数:1-1000 定价:12.00 元

---

ISBN7-81041-366-X/O·103

## 前 言

本书是根据作者多年在河南大学物理系的授课讲义编写的。全书共九章。前三章采用“半经典”方法阐述激光原理的基本内容。“半经典”是指激活粒子用量子力学来描述，而光辐射场则用经典电磁理论来描述。因此，具备电动力学和量子力学基础的读者，阅读完前三章就会对激光器的基本原理有一个清晰的了解。第四章至第七章介绍激光器件，主要是已获得广泛应用的固体、气体、液体激光器和半导体激光器。第八章介绍一些常用的激光束控制技术。第九章是基本的激光实验。前八章的每章后附有一定数量的习题。

本书可作为高等学校物理教育专业及其他有关专业的教材，也可供与激光专业有关的教师、科研人员和工程技术人员参考。

参加本书编写的有李方正、毛海涛、王庆国、董兴法、段清洁等，其中绪论、第一章和第六章由李方正执笔，第二章和第三章由毛海涛执笔，第四章和第八章由王庆国执笔，第五章和第九章由董兴法执笔，第七章由段清洁执笔。全书由李方正统稿。

由于编者学识有限，书中难免出现错误和缺点，恳请读者批评指正。

编 者

1996年7月

# 目 录

绪论 .....	( 1 )
第一章 光和物质的相互作用 .....	( 7 )
§ 1.1 光和物质相互作用的基本过程 激光的形成 .....	( 7 )
1.1.1 光和物质相互作用的基本过程 .....	( 7 )
1.1.2 $A_{21}, B_{21}$ 和 $B_{12}$ 之间的关系 .....	( 10 )
1.1.3 受激辐射与自发辐射强度之比 .....	( 12 )
1.1.4 光通过受激跃迁的吸收和放大 .....	( 13 )
1.1.5 激光形成的条件 .....	( 14 )
§ 1.2 光子集合的统计描述 .....	( 15 )
1.2.1 光子的基本属性 .....	( 15 )
1.2.2 态密度 .....	( 16 )
1.2.3 光子简并度 .....	( 17 )
§ 1.3 激光器的基本结构 .....	( 18 )
1.3.1 激光工作物质 .....	( 18 )
1.3.2 激励系统 .....	( 20 )
1.3.3 光学谐振腔 .....	( 21 )
§ 1.4 激光的特性及其意义 .....	( 22 )
1.4.1 方向性 .....	( 22 )
1.4.2 亮度 .....	( 23 )
1.4.3 单色性 .....	( 24 )
1.4.4 相干性 .....	( 24 )
§ 1.5 光谱线的加宽 .....	( 31 )
1.5.1 谱线、谱线线型和谱线宽度 .....	( 31 )
1.5.2 考虑到线型后的跃迁概率 .....	( 33 )
1.5.3 谱线的加宽机制和类型 .....	( 34 )

§ 1.6 激光器速率方程理论 .....	( 43 )
1.6.1 影响激光上、下能级粒子数密度的因素 .....	( 45 )
1.6.2 速率方程及其稳态解 .....	( 46 )
习题 .....	( 48 )
<b>第二章 光学谐振腔中形成的辐射场 .....</b>	<b>( 51 )</b>
§ 2.1 腔与模 .....	( 51 )
2.1.1 光学谐振腔的配置 .....	( 51 )
2.1.2 光学谐振腔的纵模与横模 .....	( 53 )
§ 2.2 光学谐振腔的稳定性 .....	( 60 )
2.2.1 一般球面腔内光线多次往返坐标转换的矩阵表示 .....	( 60 )
2.2.2 谐振腔稳定性的一般条件 .....	( 63 )
2.2.3 谐振腔的分类和稳定性图 .....	( 64 )
2.2.4 非稳谐振腔 .....	( 66 )
§ 2.3 光学谐振腔的衍射理论 .....	( 68 )
2.3.1 谐振腔衍射理论的基本出发点 .....	( 69 )
2.3.2 共焦球面腔 .....	( 76 )
2.3.3 一般稳定球面腔 .....	( 86 )
§ 2.4 高斯光束的传输 .....	( 91 )
2.4.1 高斯光束经光学系统的变换 .....	( 91 )
2.4.2 高斯光束的聚焦 .....	( 94 )
2.4.3 高斯光束的准直与扩束 .....	( 97 )
附录 厄米多项式 .....	( 99 )
习题 .....	( 101 )
<b>第三章 激光器工作原理 .....</b>	<b>( 103 )</b>
§ 3.1 光在介质中的增益与激光振荡的阈值条件 .....	( 103 )
3.1.1 介质的增益系数 .....	( 103 )
3.1.2 激光形成的阈值条件 阈值离子数反转 .....	( 106 )
3.1.3 介质中的增益饱和效应 .....	( 108 )
§ 3.2 连续运转激光器的稳态工作特性 .....	( 111 )
3.2.1 稳态的建立 .....	( 111 )

3.2.2	均匀加宽谱线激光器工作特性 ——模竞争与空间竞争 .....	(112)
3.2.3	非均匀加宽谱线激光器工作特性 ——烧孔、双烧孔与拉姆凹陷 .....	(114)
§ 3.3	脉冲激光器的工作特性 .....	(117)
§ 3.4	激光器的频率特性 .....	(119)
3.4.1	无源腔的损耗与品质因数 .....	(119)
3.4.2	单纵模激光器的线宽极限 .....	(120)
	习题 .....	(123)
第四章	固体激光器 .....	(125)
§ 4.1	固体激光器的工作物质 .....	(126)
4.1.1	物理特性 .....	(126)
4.1.2	光学质量 .....	(129)
4.1.3	加工要求 .....	(130)
§ 4.2	泵浦光源、聚光器和冷却系统 .....	(130)
4.2.1	泵浦光源 .....	(130)
4.2.2	聚光器 .....	(135)
4.2.3	冷却和滤光系统 .....	(137)
§ 4.3	红宝石激光器 .....	(138)
4.3.1	红宝石中铬离子的能级结构 .....	(138)
4.3.2	红宝石激光器输出特性 .....	(139)
§ 4.4	钕玻璃激光器 .....	(141)
4.4.1	钕玻璃激光工作物质的优点 .....	(141)
4.4.2	钕玻璃的光谱特性 .....	(141)
4.4.3	钕玻璃激光器概述 .....	(142)
§ 4.5	掺钕钇铝石榴石激光器 .....	(143)
4.5.1	掺钕钇铝石榴石晶体性质 .....	(143)
4.5.2	YAG: Nd <sup>3+</sup> 激光器的基本组成 .....	(144)
	习题 .....	(145)
第五章	气体激光器 .....	(147)

§ 5.1	气体激光器的放电激励 .....	(148)
§ 5.2	氮氛激光器 .....	(150)
5.2.1	激光机理 .....	(150)
5.2.2	基本结构 .....	(153)
5.2.3	放电条件的选择 .....	(158)
5.2.4	氮氛激光器中的谱线竞争 .....	(161)
§ 5.3	二氧化碳激光器 .....	(163)
5.3.1	二氧化碳分子的结构和振转能级 .....	(163)
5.3.2	激发过程 .....	(166)
5.3.3	弛豫时间 .....	(167)
5.3.4	转动能级竞争效应 .....	(169)
5.3.5	封离式 CO <sub>2</sub> 激光器的结构及设计 .....	(170)
§ 5.4	氮分子激光器 .....	(172)
5.4.1	能级及能级间的跃迁 .....	(172)
5.4.2	粒子数反转的条件 .....	(174)
5.4.3	器件结构 .....	(175)
§ 5.5	氩离子激光器 .....	(177)
5.5.1	激发机理 .....	(177)
5.5.2	结构 .....	(179)
5.5.3	工作特性 .....	(180)
	习题 .....	(182)
第六章	半导体激光器 .....	(184)
§ 6.1	半导体的能带结构及载流子的统计分布 .....	(185)
6.1.1	半导体的能带结构 .....	(185)
6.1.2	$i, p, n$ 型半导体 .....	(186)
6.1.3	载流子的统计分布 .....	(188)
6.1.4	载流子的漂移、复合与寿命 .....	(189)
§ 6.2	注入式半导体激光器原理 .....	(190)
6.2.1	$p-n$ 结的形成及其能带 .....	(190)
6.2.2	$p-n$ 结的场致发光 .....	(191)
6.2.3	半导体受激辐射光产生的条件 .....	(194)

§ 6.3 半导体激光器的特性 .....	(198)
6.3.1 阈值电流 .....	(198)
6.3.2 输出功率与转换效率 .....	(198)
6.3.3 光谱性质 .....	(201)
6.3.4 光束的空间分布 .....	(201)
习题 .....	(202)
<b>第七章 有机染料液体激光器 .....</b>	<b>(203)</b>
§ 7.1 染料激光机理 .....	(204)
7.1.1 染料分子的能级图 .....	(204)
7.1.2 光的吸收和发射 .....	(206)
7.1.3 三重态猝灭 .....	(206)
§ 7.2 泵浦方式 .....	(207)
§ 7.3 波长调谐 .....	(210)
7.3.1 包含空间波长分离装置的谐振腔 .....	(211)
7.3.2 包含利用干涉现象将波长分离的谐振腔 .....	(212)
习题 .....	(214)
<b>第八章 激光技术 .....</b>	<b>(215)</b>
§ 8.1 模式选择技术 .....	(215)
8.1.1 横模选择 .....	(215)
8.1.2 纵模选择 .....	(217)
§ 8.2 调Q技术 .....	(224)
8.2.1 调Q原理 .....	(224)
8.2.2 调Q激光器的速率方程 .....	(225)
8.2.3 机械转镜调Q .....	(230)
8.2.4 染料调Q .....	(232)
8.2.5 电光晶体调Q .....	(237)
§ 8.3 锁模技术 .....	(243)
8.3.1 多纵模激光器的输出特性 锁模的意义 .....	(243)
8.3.2 锁模特性的形成 .....	(244)
8.3.3 锁模方法 .....	(246)

§ 8.4 倍频技术 .....	(248)
8.4.1 非线性极化 .....	(249)
8.4.2 相位匹配条件 .....	(252)
8.4.3 匹配角 $\theta_m$ 的计算 .....	(255)
8.4.4 光孔效应 .....	(257)
§ 8.5 稳频技术 .....	(258)
8.5.1 影响激光频率稳定的因素 .....	(258)
8.5.2 频率的稳定度和再现性 .....	(260)
8.5.3 拉姆凹陷稳频 .....	(261)
8.5.4 饱和吸收稳频 .....	(264)
习题 .....	(265)
第九章 激光实验 .....	(267)
实验一 红宝石激光晶体吸收光谱的测量 .....	(267)
实验二 红宝石荧光光谱和激光光谱的观测 .....	(270)
实验三 YAG:Nd <sup>3+</sup> 脉冲激光器的输出特性测量 .....	(273)
实验四 外腔式 He-Ne 激光器的调整及输出特性测量 .....	(279)
实验五 He-Ne 激光器增益和损耗的测量 .....	(283)
实验六 光导纤维衰减系数的测量 .....	(287)
实验七 染料调 Q 技术 .....	(291)

# 绪 论

## 1. 激光的产生和由来

1960年,梅曼(T. H. Maiman)制成第一台红宝石激光器,标志了激光的诞生.但是,激光的由来应追溯到20世纪初.1905年,爱因斯坦提出了光子学说.1917年,他又提出了受激辐射.爱因斯坦指出,处于激发态的原子可以通过两个途径跃迁到低能态:一个是自发辐射;另一个是在适当频率的电磁波感应下发射光子,叫受激辐射.爱因斯坦的受激辐射理论为激光的发现奠定了理论基础.但在当时的条件下,激光器的运转还无法实现.原因是,当时的物理学界正致力于量子力学的完成,对光的本性也还处于逐步认识的过程中.另外,要产生激光,就要使受激辐射大于自发辐射,即

$$\delta = \frac{\rho(\nu)}{\frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu} > 1.$$

在光波段,热平衡条件下的 $\delta$ 是非常小的.要观察到受激辐射( $\delta > 1$ ),在当时是相当困难的.

社会生产的需要和科学技术的发展推动了激光的产生.第二次世界大战期间,战争使得微波通讯和雷达技术有了很大进步.1950年,研制成功了第一台 $\text{NH}_3$ 分子微波量子放大器.人们发现,可以通过原子或分子的受激辐射获得单色的相干电磁波,这就是脉塞(Maser,它是英文Microwave Amplification for Stimulated Emission of Radiation的缩写).后来,由于生产的需要,人们希望微波量子放大器技术扩展到光频.微波在通讯上用途很大,但传输的信息量还不能满足人们不断增长的需要.一条线路可以传输

许多路电话或电视信号,每一个信号占有一定的频率宽度,电话占几千赫兹,电视占几百万赫兹.显然,载波频率越高,容纳的电话、电视信号数目才越多.1958年,肖洛(Schawlow)和汤斯(Townes)提出了把微波量子放大器原理推广到光频波段的具体建议,普罗霍洛夫(Prokhorov)也提出了类似的建议.为实现光的受激辐射,设想用F-P(Fabry-Perot)腔作光学谐振腔,来提高腔内的辐射能量密度,从而提高光子简并度.由于上述理论准备和社会发展的推动,1960年,梅曼制成第一台红宝石激光器.红宝石激光器的研制成功标志了激光的诞生.从此,激光技术进入了突飞猛进的时代.每年,甚至每月都有理论、器件和技术上的新进展.1961年,出现了钕激光器和调Q红宝石激光器.1962年,出现了砷化镓半导体激光器和632.8nm的He-Ne激光器.1963年,利用激光拍出了全息图.1964年,出现了Ar<sup>+</sup>和CO<sub>2</sub>激光器等等.与此同时,激光在工业、农业、医学、军事以及科学研究等领域也获得了广泛的应用.

激光这个中文名称的确定,是根据钱学森1964年的建议,它的原名是莱塞(Laser,它是Light Amplification for Stimulated Emission of Radiation的缩写).

## 2. 激光在光学中的地位及影响

激光器的发光机理完全不同于任何普通光源,因而,激光辐射具有一系列从根本上区别于普通光源的特点.这些特点用直观的术语来描述,激光具有高方向性、高单色性、高相干性;用光度学术语描述,激光具有高亮度;用光子统计学术语描述,激光具有高光子简并度.因为有了这些特点,激光在现代科学技术中扮演了重要的角色.可以说,激光开创了光学的新时代,对光学以及其他学科产生了深刻的影响.

激光的诞生标志着人类对光辐射产生手段、控制能力以及对光与物质相互作用规律的认识,达到了一个新的水平.

激光出现之前,所有人造光源发光机制都是自发辐射,而激光

器则是利用受激辐射机制产生光。人类利用这种机制,对光的方向性、单色性、亮度以及对光脉冲宽度,都有了很强的控制能力。强激光与物质相互作用,产生了一系列非线性光学效应,这在普通光学中是观察不到的,

就方向性而言,普通光源的发光,基本上是向  $4\pi$  立体角发射,虽然,利用定向聚光反射镜也可以获得方向性较好的光束,但是,一方面,能量转换为平行光的部分非常小,另一方面,平面发散角也只能压缩到  $10\text{mrad}$  左右。这意味着光束传到  $1\text{km}$  外后,发射口径  $1\text{m}$  左右的光束,其光斑直径已扩大到  $10\text{m}$ 。单横模激光器发出的光束,其平面发散角可以达到衍射极限所决定的水平,即  $10^{-3}\text{mrad}$ 。如果这种激光束经光学系统变换后,光束口径也是  $1\text{m}$ ,光束传到  $1000\text{km}$  外后,光斑直径才扩大到几米。激光的高方向性意味着人们控制光束在空间上集中的能力有了很大提高,从而使激光在远距离通讯、测距、雷达、导航和指向等方面获得了广泛应用。根据几何光学理论,一束高平行度的光意味着它能够集中到空间一个非常小的点。因此,利用高方向性的激光可以加工微米级甚至更小的孔。

再说光的单色性。普通光源中单色性最好的是  $\text{Kr}^{86}$  灯,它的单色性  $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-6}$ 。利用它进行光学测长的最大可测长度不超过  $1\text{m}$ 。一台稳频  $\text{He-Ne}$  激光器的单色性  $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-10} \sim 10^{-13}$ ,利用这种激光器进行光学测长的最大测量长度可扩展到  $1\text{km}$  至  $1000\text{km}$ 。

光的亮度定义为,光源的单位发光表面向空间单位立体角发射的光功率。太阳的发光亮度为  $10^{-1}\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$  量级,普通自由振荡激光器的发光亮度为  $10^1 - 10^6\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$  量级,一台调  $Q$  脉冲固体激光器的发光亮度可达  $10^{10} - 10^{13}\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$  量级,可见,它比太阳的亮度大几千亿倍!这意味着,人类能够控制激光能量在空间上和时间上高度集中。不难想象,利用激光高亮度的特

点,可以把它作为一种动力用来打孔、焊接、切割及表面处理,也可以用作激光武器摧毁高空目标,例如飞机、导弹、人造卫星等.而且,用激光作“炮弹”打击飞行目标无须计算提前量,因为光速是  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ .

最后,关于光和物质的相互作用,激光与普通光也有很大区别.在普通光学中,为了解释介质折射率、散射和双折射等现象,引进了介质极化强度矢量  $P = \chi E$ .它与入射光强度成线性关系.根据这种线性光学理论,某一频率的光入射到透明介质时,出射频率不发生变化(拉曼散射除外),不同频率光同时入射时,不发生相互耦合,不产生新频率.普通光学的实验证实了这些结论.与普通光不同的是,如果让一束波长为  $694.3 \text{nm}$  的红宝石激光通过石英晶体,在出射光中,除原来的红色激光外,还观察到  $347.2 \text{nm}$  的蓝色光,它恰是红宝石激光波长的一半.这种现象叫倍频.两束不同频率的激光入射到某种介质时,还观察到和频和差频.平行度很好的强激光通过某些介质时,还会发生自聚焦或自散焦等现象.为了解释光和物质相互作用出现的这些新现象,必须假定介质的极化强度不再与入射光强成线性关系,而是

$$P = \chi_1 E + \chi_2 EE + \chi_3 EEE + \dots$$

即呈现非线性关系,称为非线性光学.

为什么强激光与物质相互作用会出现上述非线性效应?原因是激光在亮度上比普通光提高了几个甚至十几个数量级.普通光的光波场强与物质原子内部场强相比是很小的量.所以,上式中除第一项外其余各项( $\chi_2, \chi_3, \dots$ )都可以忽略.激光的光波场强可与原子内部的场强相比拟,上式中的非线性项便不可忽略.因此出现了一系列非线性效应.非线性效应不仅提供了产生强相干光辐射的新手段,扩展了现有的激光波段,而且提供了一批新技术、新方法.例如非线性饱和吸收用于染料调Q,光学击穿用于快速火花隙开关,双光子吸收用于测量超短脉冲等.强激光造就的极端物理条

件(超高压、超高温、超高电磁场强、超高光子密度等)有可能出现新的物理现象和物理效应,这是推动基础科学发展的一种动力。此外,激光与其他学科交叉,出现了许多边缘学科,如激光光谱学、激光化学、激光等离子体物理学、激光医学、激光生物学等。激光技术如同计算机技术、航天技术、核能技术、生物工程技术一样,将在工农业生产、国防建设、医疗卫生和科学研究等领域发挥越来越大的作用。

### 3. 我国激光发展简况和发展战略

1960年,世界上第一台红宝石激光器出现后,1961年,中国就研制出了自己的第一台红宝石激光器(长春光学精密机械研究所,王之江等)。在以后的几年间,又相继研制出了 He-Ne 激光器、钕玻璃激光器、半导体激光器、CO<sub>2</sub> 激光器、Ar<sup>+</sup>激光器、YAG 激光器等,成立了许多从事激光研究的专业研究所,取得数以千计的科研成果。其中,在激光核聚变、激光人造卫星测距、导弹靶场跟踪、激光波长标准系列以及激光晶体材料等方面都已达到了国际先进水平,有的还处于国际领先地位。中国是世界上激光应用于工业、农业、医学最广泛的国家之一。但是,同发达国家相比,我们在发展速度、规模以及经济效益等方面,都存在较大差距。为适应新的发展形势,促使激光技术更好地为我国建设事业服务,1986年,国家科委委托上海光学精密机械研究所和上海激光技术研究所进行了“我国激光发展战略研究”。根据这项研究,我国激光发展战略分为“三个层次和一个注重”。第一个层次,加速激光科研成果商品化,建立广泛的激光工业。重点实现以下激光产品的工业化:光通讯,激光印刷,中小型激光器件、材料及元件,激光加工,军用激光系统,医用激光系统,光盘,激光电视、唱机,激光计量检测系统等。第二个层次,激光技术的新突破。激光发展历史表明,任何一项新技术的突破,跟着就会有广泛的应用。对 90 年代末和下世纪初可能形成工业的如下项目开展研究:相干光通讯,以原子法为主的激

光分离同位素, 重型 CO<sub>2</sub> 激光加工机和千瓦级固体激光加工机, 光传感技术, 激光医学和激光生物学, 激光化学, 包括超短脉冲的高功率激光器, 长寿命半导体激光器, 多元列阵激光器, 新型短波激光器及新型激光材料等. 第三个层次, 重大激光项目跟踪, 为 21 世纪科技创新作技术储备. 主要是激光核聚变, 激光战略武器和光计算机等. 一个注重, 注重基础研究. 激光研究的现象包括, 从不相干到相干, 从线性到非线性(从弱场到强场), 从稳态到非稳态, 从有序到混沌, 从纯态到压缩态, 从连续到脉冲. 这些都是当前十分活跃的基础研究领域, 有些已显露出重大的应用前景.

# 第一章 光和物质的相互作用

物体发射光或吸收光的现象,追根溯源,是光和物质之间的相互作用.以原子为例,它由原子核和电子组成.原子的能量由在周围轨道上运动的电子的动能和势能之和表示,它只能取某些特定的分立的值——能级.光的发射和吸收的量子模型给出,处于高能级的原子向低能级跃迁时,可以发射光子.这里有两种不同的发射:自发辐射和受激辐射.处于低能级的原子吸收光子跃迁到高能级,称为受激吸收.下面我们首先来讨论光和物质相互作用的这三个基本过程.

为讨论方便,假设工作物质由大量的同类粒子组成,粒子系统只有两个能级: $E_2$ 和 $E_1$ ,且 $E_2$ 大于 $E_1$ .这两个能级满足辐射跃迁的选择定则.

## § 1.1 光和物质相互作用的基本过程 激光的形成

### 1.1.1 光和物质相互作用的基本过程

#### 1. 自发辐射

处于高能级的粒子,即使没有任何外界激励,也总是自发地跃迁到低能级,并发射一个频率为 $\nu$ ,能量为

$$h\nu = E_2 - E_1$$

的光子,称为自发辐射.大量的处于高能级的粒子,各自独立地自发地发射一个个能量相同,但彼此无关的光子,这相当于它们各自独立地发射一列列频率相同的光波,各列光波之间没有固定的相