

21世纪高等学校电子信息类教材  
上海市教育委员会高校重点教材建设项目

# 激光原理及应用

● 陈家璧 主编

21 世纪高等学校电子信息类教材  
上海市教育委员会高校重点教材建设项目

# 激光原理及应用

陈家璧 主编

顾铮尧 余重秀 张元芳 刘顺洪 彭润玲 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书分为两部分。第1~5章介绍激光的基本理论,从激光的物理学基础出发,着重阐明物理概念,以及激光输出特性与激光器的参数之间的关系,尽量避免过多的理论计算,以掌握激光器的选择和使用为主要目的;第6~10章介绍激光在计量、加工、医学、信息技术,以及现代科技前沿问题中的应用,重点是介绍各种应用的思路和方法。

本书可以作为高等学校有关光学和光学工程,以及大量应用激光技术的理工科各相关专业的教材,也可以供社会读者阅读与自学。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书本部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

激光原理及应用/陈家璧主编. —北京:电子工业出版社,2004.8

21世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-00136-5

I. 激... II. 陈... III. 激光理论—高等学校—教材 IV. TN241

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第070266号

责任编辑:韩同平

印 刷:涿州京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:448千字

印 次:2004年8月第1次印刷

印 数:5000册 定价:22.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 序

1960年发明激光到现在已经有44年了。44年来激光的理论与应用研究有了极大的发展,而且对人类社会产生了深刻的影响。作为光的受激辐射,激光是一种极好的光源,它首先在测量领域得到了广泛的应用。物理学中最基本的量值——米,改为激光在真空中的波长来定义,使有效数字提高到九位。激光用来测长、测距、测速、测角、测量各种可以转换为光的物理量,发展出一个专门的学科——激光测量学,还使光学测量方法走出实验室成为工程测量的常规手段。激光用于加工,始于激光打孔,很快就推广到切割、焊接、热处理、表面改性与强化,乃至激光快速成型、激光清洗和激光微加工,已经成为高科技产业不可缺少的加工方法。激光医学近30年来的发展和推广,给人类带来了福祉。而激光在信息产业中的大量应用更是信息时代到来的主要原动力之一。可以毫不夸张地说,现代社会的方方面面已经与激光的应用密不可分。

鉴于激光在现代科学技术中的如此重要作用,激光原理和它的各种应用技术已成为各行各业的技术人员教必须掌握的一门高新技术。我国的重点高等院校从20世纪70年代开设激光理论与应用的课程,并开办了若干以激光器制造和应用为培养目标的理工科专业。改革开放以来,推广到一般院校,目前国内高等院校不开设激光原理与应用课程的已很难找到。各重点高校编写的涉及激光原理、技术和应用的有关教材,林林总总不下数十种。但是其中多数激光原理的教材涉及过多的物理原理,超越了大学普通物理的内容,教材只针对重点高校的要求,并不适于培养工程应用型人才的—般院校。相对适用的流传较广的清华大学丁俊华先生的《激光原理及应用》是20世纪80年代初的讲稿,因为激光技术的快速发展,需要补充修订。本书编者在多年为普通高校本科生讲授这门课程的基础上,重新编写《激光原理及应用》,就是为满足一般高等院校学生掌握应用激光技术的教学需要。该书的特点在于着重阐明受激辐射的物理概念,以及激光输出特性与激光器的参数之间的关系,以掌握激光器的选择和使用为主要目的。书中激光应用有关章节都由长期从事该领域教学与科研的专家编写,介绍了近年来的新发展,重点讲各种应用的思路和方法;每章都有适当的思考练习题,可以帮助读者加深理解学到的理论并掌握应用方法,是一本很有特色的教材。相信本书的出版对于激光技术的推广与教学会起到很有益的促进作用。

中国工程院院士  
清华大学教授



## 前 言

激光是 20 世纪人类的重大科技发明之一,它对人类的社会生活产生了广泛而深刻的影响。作为高技术的研究成果,它不仅广泛应用于科学技术研究的各个前沿领域,而且已经在人类生产和生活的许多方面得到了大量的应用,与激光相关的产业已在全球形成了超过千亿美元的年产值。由于各行各业都应用激光进行技术改造和新技术的开发研究,除文科外的几乎所有理工农医类的高等院校都开设了激光技术和应用的课程。

激光技术在短短几十年内就推广应用到现代工业、农业、医学、通信、国防和科学技术的各个方面与它本身的特点是分不开的。激光是光的受激辐射,因而它与自发辐射的普通光源不同,具有极好的方向性、极高的光亮度和相干性。普通光源向四面八方辐射,光线分散到  $4\pi$  球面度的立体角内,而激光可以基本沿某一条直线传播,通常发散角限制在  $10^{-6}$  球面度量级的立体角内。尽管激光输出的能量有一定的限度,但它能够在比普通光源小得多的立体角内和很短的时间内将能量输出,所以它的亮度比普通光源要高上百万倍,甚至于几十亿倍。在激光发明以前最好的相干光源  $Kr^{86}$  理论上相干长度可以达到 780 mm,而目前用于长度计量的激光干涉仪的普通稳频氦氖激光器频率稳定度为  $10^{-9}$ ,相干长度就可以达到几十千米。作为长度基准的氦氖激光器的频率稳定度还可以提高 3~4 个数量级,其相干性是普通光源完全不能比拟的。激光的优越性使它在很多场合替代普通光源,而最新的研究进展表明,激光器的高效率有望在照明领域作为节能光源取代一般电光源。

激光的发展史应当追溯到 1917 年,爱因斯坦提出光的受激辐射的概念,预见到受激辐射光放大器诞生,也就是激光产生的可能性。20 世纪 50 年代美国科学家汤斯(Townes)及前苏联科学家普罗克霍洛夫(Prokhorov)等人分别独立发明了一种低噪声微波放大器,即一种在微波波段的受激辐射放大器(Microwave amplification by stimulated emission of radiation),并以其英文的第一个字母缩写命名为 Maser。1958 年美国科学家汤斯(Townes)和肖洛(Schawlow)提出在一定的条件下,可将这种微波受激辐射放大器的原理推广到光波段,制成受激辐射光放大器(Light amplification by stimulated emission of radiation,缩写为 Laser)。1960 年 7 月美国的梅曼(Maiman)宣布制成了第一台红宝石激光器(Ruby Laser)。1961 年我国科学家邓锡铭、王之江制成我国第一台红宝石激光器,在 1961 年 11 期《科学通报》上发表了相关论文,称其为“光学量子放大器”。其后在我国科学家钱学森的建议下,统一翻译为“激光”或“激光器”。

激光的发光原理是光的受激辐射,使处在激发态的原子受到外来光的激励作用而跃迁到低能级,同时发出一个与外来激励光子完全相同的光子,从而实现光的放大。但是在普通热辐射光源的情况下,受激辐射只占很小的比例,绝大部分的辐射是自发辐射,因此在宏观上并不能够产生光受激放大。欲使受激辐射成为主要的发光过程,需要使发光物质处于激发态的高能级上的粒子多于低能级上的粒子,同时还要使这样的介质中受激辐射占绝对优势。20 世纪上半叶的科学技术发展提供了这样的可能。电子技术的发展提供了激励能源,精密加工技术制造出谐振腔,材料科学的研究提供了各种激光工作介质,在近代高科技的发展支持下,各种激光器陆续诞生。

在激光发明以来的 40 多年间,继红宝石激光器为代表的固体激光器之后,气体激光器、化

学激光器、染料激光器、原子激光器、离子激光器、半导体激光器、X 射线激光器和光纤激光器相继问世。各种性能的激光器,如稳频激光器、稳功率激光器、保偏激光器、大功率激光器、稳方向激光器及超短脉冲激光器被研制出来,以满足不同的需求。许多领域应用了激光以后发展出各种不同新产品。例如激光干涉仪、激光测距仪、激光医疗设备、激光打孔机、激光打标机、激光热处理设备、激光防伪商标、激光通信系统、光盘存储器,以至于激光制导武器,等等。尤其是以半导体激光器作为光源的光通信系统的普及性发展表现出激光的强大生命力。

伴随着激光的广泛应用,激光技术也得到了很快的发展和推广。激光的稳频、选频,激光光束的变换,激光光学系统设计方法,激光的强度调制和相位调制,调 Q 技术和锁模技术等都在不断完善和成熟起来。激光原理和它的各种应用技术已成为各行各业的科学技术人员都必须掌握的一门高新技术。本书就是为理工科(包括农林医学)高等院校学生掌握应用激光技术而开设的激光原理及应用课程而编写的。

本书是在大学普通物理学的基础上编写的。书的前半部分介绍激光原理,从激光的物理学基础出发,着重阐明物理概念,以及激光输出特性与激光器的参数之间的关系,尽量避免过多的理论计算,以掌握激光器的选择和使用为主要目的;后半部分介绍了激光在计量、加工、医学、信息技术,以及现代科技前沿问题中的应用,重点是介绍各种应用的思路和方法。书中每章都配以思考练习题,以期读者通过这些练习能够加深理解学到的理论并掌握应用方法。

作为激光原理及应用课程的必读部分,前 5 章对学习过高等数学与普通物理学的理工科大学本科学生只需要讲授 24 学时,后 5 章可以根据学生的专业不同选择讲授,连同实验可以安排 36 学时或 48 学时。

本书是“上海市教育委员会高校重点教材建设项目”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材,由上海理工大学、北京邮电大学、复旦大学、华中科技大学等校教授依据多年的教学和科研经验,并参考国内、外优秀教材编写而成。

为帮助教师使用本教材,编者开发了这本书的电子课件及习题解答,并发布在电子工业出版社的华信教育资源网站上,其网址为 <http://www.hxedu.com.cn>,或直接联系 010-68152204 索取。

本书第 1、2、5 章由顾铮无编写,第 3、4、10 章由陈家璧编写,第 6 章由彭润玲编写,第 7 章由陈家璧和刘顺洪编写,第 8 章由张元芳编写,第 9 章由余重秀编写。全书由陈家璧统稿。中国工程院院士、清华大学金国藩教授审阅了全书并撰写了序。

特别要说明的是本书的许多论述方法取自清华大学丁俊华教授的教材《激光原理及应用》,本书的编者多年使用该教材更是受益匪浅,在此对丁俊华教授表示深切的敬意。在本书的编写过程中还得到华中科技大学刘建华教授的无私帮助。他的很多建议已反映在书中,在此表示衷心的感谢。此外,在本书的编写过程中,北京邮电大学的于志辉博士、陈卓博士、王星硕士、桑新柱博士,上海复旦大学附属华山医院的方杰博士,上海理工大学董祥美等同学帮助收集资料、撰写初稿、录入、修改、绘图,为本书的编写做了许多具体工作,在此一并表示感谢。

编者

# 目 录

第 1 章 辐射理论概要与激光产生的条件 .....	( 1 )
1.1 光的波粒二象性 .....	( 1 )
1.1.1 光波 .....	( 1 )
1.1.2 光子 .....	( 5 )
1.2 原子的能级和辐射跃迁 .....	( 5 )
1.2.1 原子能级和简并度 .....	( 5 )
1.2.2 原子状态的标记 .....	( 6 )
1.2.3 玻耳兹曼分布 .....	( 8 )
1.2.4 辐射跃迁和非辐射跃迁 .....	( 8 )
1.3 光的受激辐射 .....	( 9 )
1.3.1 黑体热辐射 .....	( 9 )
1.3.2 光和物质的作用 .....	( 10 )
1.3.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收之间的关系 .....	( 13 )
1.3.4 自发辐射光功率与受激辐射光功率 .....	( 14 )
1.4 光谱线增宽 .....	( 14 )
1.4.1 光谱线、线型和光谱线宽度 .....	( 14 )
1.4.2 自然增宽 .....	( 17 )
1.4.3 碰撞增宽 .....	( 20 )
1.4.4 多普勒增宽 .....	( 21 )
1.4.5 均匀增宽和非均匀增宽线型 .....	( 23 )
1.4.6 综合增宽 .....	( 24 )
1.5 激光形成的条件 .....	( 24 )
1.5.1 介质中光的受激辐射放大 .....	( 24 )
1.5.2 光学谐振腔和阈值条件 .....	( 27 )
思考练习题 1 .....	( 28 )
第 2 章 激光器的工作原理 .....	( 29 )
2.1 光学谐振腔结构与稳定性 .....	( 29 )
2.1.1 共轴球面谐振腔的稳定性条件 .....	( 29 )
2.1.2 共轴球面腔的稳定图及其分类 .....	( 30 )
2.1.3 稳定图的应用 .....	( 31 )
2.2 速率方程组与粒子数反转 .....	( 32 )
2.2.1 三能级系统和四能级系统 .....	( 32 )
2.2.2 速率方程组 .....	( 32 )
2.2.3 稳态工作时的粒子数密度反转分布 .....	( 33 )
2.2.4 小信号工作时的粒子数密度反转分布 .....	( 34 )
2.2.5 均匀增宽型介质的粒子数密度反转分布 .....	( 34 )
2.2.6 均匀增宽型介质粒子数密度反转分布的饱和效应 .....	( 35 )

2.3	均匀增宽介质的增益系数和增益饱和	(36)
2.3.1	均匀增宽介质的增益系数	(36)
2.3.2	均匀增宽介质的增益饱和	(37)
2.4	非均匀增宽介质的增益饱和	(39)
2.4.1	介质在小信号时的粒子数密度反转分布值	(39)
2.4.2	非均匀增宽型介质在小信号时的增益系数	(40)
2.4.3	非均匀增宽型介质稳态粒子数密度反转分布	(41)
2.4.4	非均匀增宽型介质稳态情况下的增益饱和	(42)
2.5	激光器的损耗与阈值条件	(43)
2.5.1	激光器的损耗	(44)
2.5.2	激光谐振腔内形成稳定光强的过程	(44)
2.5.3	阈值条件	(45)
2.5.4	对介质能级选取的讨论	(46)
	思考练习题 2	(48)
<b>第 3 章</b>	<b>激光器的输出特性</b>	(49)
3.1	光学谐振腔的衍射理论	(49)
3.1.1	菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	(49)
3.1.2	光学谐振腔的自再现模积分方程	(50)
3.1.3	激光谐振腔的谐振频率和激光纵模	(52)
3.2	对称共焦腔内外的光场分布	(53)
3.2.1	共焦腔镜面上的场分布	(53)
3.2.2	共焦腔中的行波场与腔内外的光场分布	(56)
3.3	高斯光束的传播特性	(56)
3.3.1	高斯光束的振幅和强度分布	(57)
3.3.2	高斯光束的相位分布	(58)
3.3.3	高斯光束的远场发散角	(59)
3.3.4	高斯光束的高亮度	(60)
3.4	稳定球面腔的光束传播特性	(61)
3.4.1	稳定球面腔的等价共焦腔	(61)
3.4.2	稳定球面腔的光束传播特性	(62)
3.5	激光器的输出功率	(63)
3.5.1	均匀增宽型介质激光器的输出功率	(63)
3.5.2	非均匀增宽型介质激光器的输出功率	(65)
3.6	激光器的线宽极限	(69)
	思考练习题 3	(70)
<b>第 4 章</b>	<b>激光的基本技术</b>	(72)
4.1	激光器输出的选模	(72)
4.1.1	激光单纵模的选取	(72)
4.1.2	激光单横模的选取	(75)
4.2	激光器的稳频	(77)
4.2.1	影响频率稳定的因素	(77)
4.2.2	稳频方法概述	(78)



4.2.3	兰姆凹陷法稳频	(79)
4.2.4	饱和吸收法稳频	(81)
4.3	激光束的变换	(82)
4.3.1	高斯光束通过薄透镜时的变换	(82)
4.3.2	高斯光束的聚焦	(84)
4.3.3	高斯光束的准直	(86)
4.3.4	激光的扩束	(87)
4.4	激光调制技术	(88)
4.4.1	激光调制的基本概念	(88)
4.4.2	电光强度调制	(88)
4.4.3	电光相位调制	(90)
4.5	激光偏转技术	(90)
4.5.1	机械偏转	(91)
4.5.2	电光偏转	(91)
4.5.3	声光偏转	(92)
4.6	激光调 $Q$ 技术	(92)
4.6.1	激光谐振腔的品质因数 $Q$	(93)
4.6.2	调 $Q$ 原理	(93)
4.6.3	电光调 $Q$	(94)
4.6.4	声光调 $Q$	(95)
4.6.5	染料调 $Q$	(95)
4.7	激光锁模技术	(96)
4.7.1	锁模原理	(96)
4.7.2	主动锁模	(97)
4.7.3	被动锁模	(98)
	思考练习题 4	(99)
<b>第 5 章</b>	<b>典型激光器介绍</b>	<b>(100)</b>
5.1	固体激光器	(100)
5.1.1	固体激光器的基本结构与工作物质	(100)
5.1.2	固体激光器的泵浦系统	(102)
5.1.3	固体激光器的输出特性	(103)
5.1.4	新型固体激光器	(103)
5.2	气体激光器	(105)
5.2.1	氦-氖(He-Ne)激光器	(105)
5.2.2	二氧化碳激光器	(107)
5.2.3	Ar <sup>+</sup> 离子激光器	(109)
5.3	染料激光器	(111)
5.3.1	染料激光器的激发机理	(111)
5.3.2	染料激光器的泵浦	(112)
5.3.3	染料激光器的调谐	(113)
5.4	半导体激光器	(115)
5.4.1	半导体的能带和产生受激辐射的条件	(115)
5.4.2	PN 结和粒子数反转	(117)

5.4.3 半导体激光器的工作原理和阈值条件	(118)
5.4.4 同质结和异质结半导体激光器	(119)
5.5 其他激光器	(121)
5.5.1 准分子激光器	(121)
5.5.2 自由电子激光器	(123)
5.5.3 化学激光器	(123)
思考练习题 5	(124)
<b>第 6 章 激光在精密测量中的应用</b>	(125)
6.1 激光干涉测长	(125)
6.1.1 干涉测长的基本原理	(125)
6.1.2 激光干涉测长系统的组成	(126)
6.1.3 激光外差干涉测长技术	(129)
6.1.4 激光干涉测长应用举例	(130)
6.2 激光衍射测量	(131)
6.2.1 激光衍射测量原理	(131)
6.2.2 激光衍射测量的方法	(133)
6.2.3 激光衍射测量的应用	(136)
6.3 激光测距	(138)
6.3.1 激光脉冲测距	(138)
6.3.2 激光相位测距	(140)
6.4 激光准直及多自由度测量	(143)
6.4.1 激光准直仪	(144)
6.4.2 激光衍射准直仪	(146)
6.4.3 激光多自由度测量	(147)
6.5 激光多普勒测速	(149)
6.5.1 运动微粒散射光的频率	(149)
6.5.2 差频法测速	(150)
6.5.3 激光多普勒测速技术的应用	(152)
6.6 环形激光测量角度和角加速度	(154)
6.6.1 环形激光精密测角	(154)
6.6.2 光纤陀螺	(155)
6.7 激光环境计量	(156)
思考练习题 6	(157)
<b>第 7 章 激光加工技术</b>	(158)
7.1 激光热加工原理	(158)
7.2 激光表面改性技术	(162)
7.2.1 激光淬火技术的原理与应用	(162)
7.2.2 激光表面熔凝技术	(165)
7.2.3 激光熔覆技术	(165)
7.3 激光去除材料技术	(166)
7.3.1 激光打孔	(167)
7.3.2 激光切割	(169)

7.4 激光焊接 .....	(171)
7.4.1 激光热导焊 .....	(172)
7.4.2 激光深熔焊 .....	(174)
7.4.3 激光焊的优点 .....	(176)
7.5 激光快速成型技术 .....	(176)
7.5.1 激光快速成型技术的原理及主要优点 .....	(176)
7.5.2 激光快速成型技术 .....	(177)
7.5.3 激光快速成型技术的重要应用 .....	(181)
7.6 其他激光加工技术 .....	(182)
7.6.1 激光清洗技术 .....	(182)
7.6.2 激光弯曲 .....	(182)
思考练习题 7 .....	(182)
<b>第 8 章 激光在医学中的应用</b> .....	(184)
8.1 激光与生物体的相互作用 .....	(184)
8.1.1 生物体的光学特性 .....	(184)
8.1.2 激光对生物体的作用 .....	(186)
8.1.3 激光对生物体应用的优点 .....	(187)
8.2 激光在临床治疗中的应用 .....	(187)
8.2.1 激光临床治疗的种类与现状 .....	(187)
8.2.2 激光在皮肤科及整形外科领域中的应用 .....	(188)
8.2.3 激光在眼科中的应用 .....	(189)
8.2.4 激光在泌尿外科中的应用 .....	(191)
8.2.5 激光在耳鼻喉科中的应用 .....	(192)
8.2.6 最新的技术——间质激光光凝术 .....	(192)
8.2.7 光动力学治疗 .....	(193)
8.3 激光在生物体检测及诊断中的应用 .....	(195)
8.3.1 利用激光的生物体光谱测量及诊断 .....	(195)
8.3.2 激光断层摄影 .....	(196)
8.3.3 激光显微镜 .....	(198)
8.4 医用激光设备 .....	(200)
8.4.1 医用激光光源 .....	(200)
8.4.2 医用激光传播用光纤 .....	(201)
8.5 激光应用于医学的未来 .....	(203)
8.5.1 医用激光新技术 .....	(203)
8.5.2 光动力学治疗的前景 .....	(204)
思考练习题 8 .....	(205)
<b>第 9 章 激光在信息技术中的应用</b> .....	(206)
9.1 光纤通信系统中的激光器和光放大器 .....	(206)
9.1.1 半导体激光器 .....	(206)
9.1.2 光纤激光器 .....	(209)
9.1.3 光放大器 .....	(212)
9.2 激光全息三维显示 .....	(216)

9.2.1 全息术的历史回顾	(217)
9.2.2 激光全息术的基本原理和分类	(217)
9.2.3 白光再现的全息三维显示	(218)
9.2.4 计算全息图	(222)
9.2.5 激光全息三维显示的优点	(223)
9.2.6 激光全息三维显示的应用	(223)
9.2.7 激光全息三维显示技术的展望	(227)
9.3 激光存储技术	(228)
9.3.1 激光存储的基本原理、分类及特点	(228)
9.3.2 激光光盘存储	(229)
9.3.3 激光体全息光存储	(231)
9.3.4 激光存储技术的新进展	(233)
9.4 激光扫描和激光打印机	(235)
9.4.1 激光扫描	(235)
9.4.2 激光打印机	(241)
思考练习题 9	(244)
<b>第 10 章 激光在科学技术前沿问题中的应用</b>	<b>(245)</b>
10.1 激光核聚变	(245)
10.1.1 受控核聚变	(245)
10.1.2 磁力约束和惯性约束控制方法	(246)
10.1.3 激光压缩点燃核聚变的原理	(247)
10.2 激光冷却	(248)
10.3 激光操纵微粒	(250)
10.3.1 光捕获	(250)
10.3.2 微粒操纵	(251)
10.4 激光诱导化学过程	(253)
10.4.1 激光波长和离解能的关系	(253)
10.4.2 激光切断分子	(253)
10.4.3 液体、固体的光化学反应	(255)
10.5 激光光谱学	(255)
10.5.1 拉曼光谱	(256)
10.5.2 空间高分辨的激光显微光谱	(257)
10.5.3 频率高分辨的双光子光谱	(259)
10.5.4 时间高分辨的激光闪光光谱	(259)
10.5.5 各种特殊效能的激光光谱技术	(260)
思考练习题 10	(261)
参考文献	(263)

# 第 1 章 辐射理论概要与激光产生的条件

激光技术是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新兴科学。激光的问世引起了现代光学技术的巨大变革。激光在现代工业、农业、医学、通信、国防、科学研究等各方面的应用迅速扩展。之所以在短期间获得如此大的发展是和它本身的特点分不开的。

激光与普通光源相比较有三个主要特点,即方向性好,相干性好和亮度高,其原因在于激光是光的受激辐射,而普通光源是光的自发辐射。研究激光原理就是要研究光的受激辐射是如何在激光器内产生并占据主导地位而抑制自发辐射的。本章首先从光的辐射原理讲起,讨论与激光的发明和激光技术的发展有关的物理基础及产生激光的条件。

光的辐射既是一种电磁波又是一种粒子流,激光是在人们认识到光有这两种相互对立而又相互联系性质后才发明的。因此本章从介绍光的波粒二象性开始研究原子的辐射跃迁。激光的产生又是光与物质的相互作用的结果,对光的平衡热辐射和光与物质的相互作用(光的自发辐射、受激辐射、受激吸收)的研究是发明激光的物理基础。光谱线的宽度,线型函数对于激光器的性能和激光技术的发展有重要影响。阐明上述这些基础后,本章最后讨论激光产生的条件。

## 1.1 光的波粒二象性

光的一个基本性质就是具有波粒二象性。人类对光的认识经历了牛顿的微粒说,惠更斯菲涅耳的波动说,到爱因斯坦的光子说的发展,最后才认识到波动性和粒子性是光的客观属性,波动性和粒子性总是同时存在的。一方面光是电磁波,具有波动的性质,有一定的频率和波长。另一方面光是光子流,光子是具有一定能量和动量的物质粒子。在一定条件下,可能某一方面的属性比较明显,而当条件改变后,另一方面的属性变得更为明显。例如,光在传播过程中所表现出来的干涉、衍射等现象中其波动性较为明显,这时往往可以把光看作是由一列一列的光波组成的;而当光和实物互相作用时(例如光的吸收、发射、光电效应等),其粒子性较为明显,这时往往又把光看作是由一个一个光子组成的光子流。

### 1.1.1 光波

光波是一种电磁波,即变化的电场和变化的磁场相互激发,形成变化的电磁场在空间的传播。光波既是电矢量  $\vec{E}$  的振动和传播,同时又是磁矢量  $\vec{B}$  的振动和传播。在均匀介质中,电矢量  $\vec{E}$  的振动方向与磁矢量  $\vec{B}$  的振动方向互相垂直,且  $\vec{E}$ 、 $\vec{B}$  均垂直于光的传播方向  $\vec{k}$ 。三者方向上的关系如图 1-1 所示。

实验证明,光对人的眼睛或感光仪器(如照相底板、热电偶)等起作用的主要是电矢量  $\vec{E}$ ,因此,以后着重讨论电矢量  $\vec{E}$  的振动及传播。习惯上常把电矢量叫作光

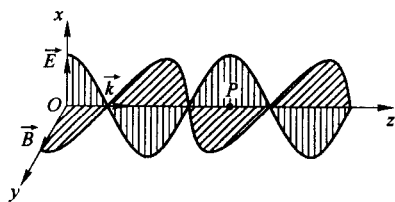


图 1-1 电磁波的传播

矢量。由图 1-1 可知,电矢量振动方向和传播方向垂直,因此光波是一种横波。

### 1. 线偏振光

设光波沿  $z$  轴方向传播,则光矢量的振动方向必在与  $z$  轴垂直的  $xOy$  平面内。但是,在  $xOy$  平面内,光矢量  $\vec{E}$  还可能有不同的振动状态。如果光矢量始终只沿一个固定方向振动,这样的光称为线偏振光(或面偏振光)。普通光源发出的光,包括许多彼此独立的线偏振成分,它们的电矢量振动方向都在  $xOy$  平面内,各取不同的方位,这样的光叫作自然光。

根据矢量分解原理,在  $xOy$  平面内电矢量  $\vec{E}$  的任一振动总可以分解成一个沿  $x$  方向的分振动和一个沿  $y$  方向的分振动。也就是说,一般的线偏振光总可以分解为沿  $x$  和  $y$  方向振动的相位相同或相反的两个线偏振光。显然这两种线偏振光的电矢量互相垂直且均垂直于传播方向。

### 2. 光速,频率和波长三者的关系

电磁波的波长范围非常宽,按其波长长短顺序,大体可分为无线电波、红外光、可见光、紫外光、X 射线及  $\gamma$  射线,具体波长划分见图 1-2 电磁波谱。图中表明各区域有所交错,可见光的波长范围只占整个电磁波谱的一个极小部分。目前通用激光器中常用电磁波在可见光或接近可见光范围,波长约为  $0.3 \sim 30 \mu\text{m}$ (红外),其相应频率为  $10^{15} \sim 10^{13} \text{Hz}$ 。

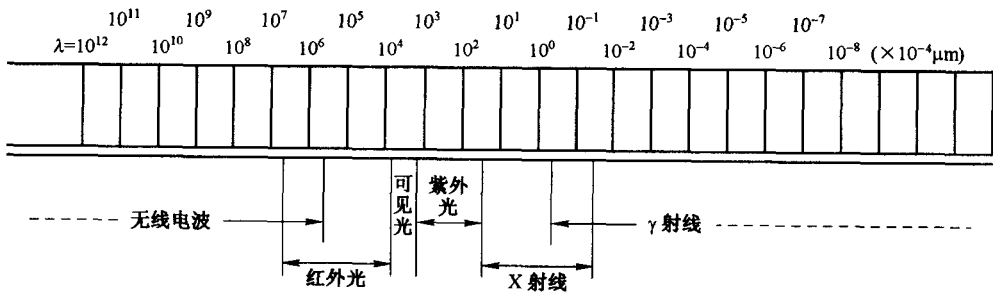


图 1-2 电磁波谱

光在真空中传播的速度  $c$  是一个重要的物理常数,实验测得的光速值为

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$$

光的频率就是光矢量每秒振动的次数,光振动的周期是完成一次振动所需的时间,频率  $\nu$  和周期  $T$  的关系互为倒数

$$\nu = 1/T \tag{1-1}$$

光的真空波长指振动状态经历一个周期在真空中向前传播的距离,用字母  $\lambda_0$  表示。所以,在真空中光速、频率和波长有如下的关系

$$c = \lambda_0 \nu \tag{1-2}$$

实验证明光在各种介质中传播时,保持其原有频率  $\nu$  不变;而介质中的光速为

$$v = c/\mu \tag{1-3}$$

式中,  $\mu$  为介质的折射率。即介质中的光速各不相同。

由于各种介质的折射率  $\mu$  总是大于 1,所以  $v$  总是小于  $c$ 。各种气体的折射率比 1 大得不多,可粗略地把各种气体的折射率当作 1 看待。由于不同介质的折射率不同,光速不同,所以同频率的光在不同介质中的波长  $\lambda$  也不同。可以证明光在折射率为  $\mu$  的介质中的波长  $\lambda$  是真空中波长  $\lambda_0$  的  $1/\mu$ 。介质中光速、频率和波长则有如下的关系

$$v = \lambda \nu \tag{1-4}$$

### 3. 单色平面波

#### (1) 平面波

在光波场中,光波相位相同的空间各点构成的面叫作波面,也叫作波阵面或等相位面。光波波面是平面的波叫作平面波。例如将一个点光源放置在一个凸透镜的焦点上,则通过透镜后的光波是平面波。离点光源很远处整个波面上的很小一部分也可近似看作平面波。例如太阳发出的光波到达地球表面时,波面的很小一部分可近似看作平面波。

平面波在均匀介质中传播的特点是:波面为彼此平行的平面,且在无吸收介质中传播时,波的振幅保持不变。

#### (2) 单色平面波

具有单一频率的平面波叫作单色平面波。实际上任何光波,包括激光在内,都不可能是完全单色的,总有一定的频率宽度。如果频率宽度  $\Delta\nu$  比光波本身频率  $\nu$  小很多,即  $\Delta\nu \ll \nu$  时,这种波叫准单色波。 $\Delta\nu$  越小,单色性越好。实际上的单色波都是准单色波。

下面介绍经过科学抽象的理想单色平面波——简谐波,它是最简单、最重要的一种波。由傅里叶分析可知,任何复杂的波都可以分解为一系列不同频率的简谐波,所以讨论它是有实际意义的。

设真空中的电磁波(见图 1-1)的电矢量  $\vec{E}$  在坐标原点  $O$  沿  $x$  方向作简谐振动,磁矢量  $\vec{B}$  在坐标原点  $O$  沿  $y$  方向作简谐振动,其频率均为  $\nu$ ,角频率  $\omega = 2\pi\nu$ ,起始时刻,即  $t = 0$  时,二者初相位均为零。则  $\vec{E}$ 、 $\vec{B}$  的振动方程分别为

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t = \vec{E}_0 \cos 2\pi\nu t \quad (1-5)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cos \omega t = \vec{B}_0 \cos 2\pi\nu t \quad (1-6)$$

式中,  $\vec{E}_0$ 、 $\vec{B}_0$  分别为电场矢量和磁场矢量的振幅矢量。由上两式可见,电矢量和磁矢量两者具有相同的频率、相位和相似的简谐振动方程。为简便起见,今后将此二式统一写成标量形式

$$U = U_0 \cos \omega t = U_0 \cos 2\pi\nu t \quad (1-7)$$

$U$  称作场矢量大小,它代表电矢量  $\vec{E}$  或磁矢量  $\vec{B}$  的大小;  $U_0$  为场矢量的振幅。设光波以速度  $c$  向  $z$  方向传播,在  $z$  轴上任选一点  $P$ (见图 1-1),当波源的振动传播到该点时,  $P$  点的振动状态比原点  $O$  的振动状态落后  $\tau = z/c$ ,因此  $P$  点的振动方程为

$$U = U_0 \cos \omega(t - \tau) = U_0 \cos \omega(t - z/c) \quad (1-8)$$

由于  $P$  点的位置是任意选取的,所以该方程代表了波场中任一点的振动状态,称作简谐波方程,又叫作行波方程,它是时间和空间的二元函数。从上式可知:如果固定空间某点  $P$ ,则上式代表场矢量在该点作时间上的周期振动。如果固定时间  $t$ ,则上式代表场矢量在该时刻随位置不同作空间上的周期变化。如果位置、时间都变化,则上式代表一个行波方程,可以给出不同时刻空间各点的振动状态,从而描绘出波的传播图像。行波方程(式(1-8))也可改写成如下的形式

$$U = U_0 \cos \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) = U_0 \cos \left( \frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \quad (1-9)$$

从上式可以看出,光波具有时间周期性和空间周期性。时间周期为  $T$ ,空间周期为  $\lambda$ ;时间频率为  $1/T$ ,空间频率为  $1/\lambda$ ;时间角频率为  $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$ ,空间角频率(或波矢的大小)

为  $k = |\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ , 波矢  $\vec{k}$  是一个矢量, 方向沿光线传播方向。

简谐波为具有单一频率  $\nu$  的单色波。要成为单色波, 从物理上讲必须是无限长的波列, 也就是说该波列在空间上是无头无尾、无限延伸的。由傅里叶分析可知, 有限长的一段波列不可能是单色的, 它必然有一定的频带宽度。波列越长, 频宽越窄, 越接近单色波。通常原子发光时间约为  $10^{-8}$  s, 形成的波列长度约等于 3 m。对于波长为  $0.5 \mu\text{m}$  的绿光来讲, 整个波列有  $6 \times 10^6$  个周期的波形。这是一个很大的量, 但它仍然是有限波列, 有一定的频带宽度。激光由于谐振腔的作用, 可使频宽做得很窄, 接近于单色光, 但仍然有一定的频宽。

### (3) 平面波的复数表示法、光强

为了运算方便, 常把平面波公式(式(1-9))写成复数形式。由数学中的欧拉公式

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha \quad (1-10)$$

$$\text{式(1-9)可改写为} \quad U = \text{Re}[U_0 e^{i(\omega t - kz)}] \quad (1-11)$$

式中,  $\text{Re}[\ ]$  表示取  $[\ ]$  中的实数部分。为简略起见, 在运算中只要记住最后结果取复数的实数部分, 也可以将“Re”省去, 直接写成

$$U = U_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (1-12a)$$

$$\text{或} \quad U = U_0 \exp[i(\omega t - kz)] \quad (1-12b)$$

上两式就是线偏振单色平面波的复数表示法。注意,  $e^{i(\omega t - kz)}$  中, 虚指数部分表示振动的相位。在很多光学问题中, 常将  $i(\omega t - kz)$  中的时间变量和空间变量分开考虑, 成为独立的因子。在讨论单色波场中各点扰动的空间分布时, 时间因子  $e^{i\omega t}$  总是相同的, 常略去不写, 剩下的空间分布因子

$$\tilde{U} = U_0 \exp(-ikz) \quad (1-13a)$$

称为复振幅。复振幅  $\tilde{U}$  由两部分组成, 其模  $U_0$  代表振幅在空间的分布, 其辐角  $(-kz)$  代表相位在空间的分布。复振幅将两个空间分布合成起来, 且和时间变量无关, 体现出很大的优越性。

引入复振幅后, 相应的行波方程(式(1-8))可改写成

$$U = \tilde{U} \exp(i\omega t) \quad (1-13b)$$

在光学中, 光强是一个重要的物理量。它定义为单位时间内通过垂直于光传播方向单位面积的光波能量, 用字母  $I$  代表, 它的单位是  $\text{W}/\text{m}^2$  或  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。光强与光矢量大小的平方成正比, 即  $I \propto U^2$ 。

由于光的频率很高( $10^{14}$  Hz 量级), 用通常的光探测器测量到的只是光强  $I$  的平均值  $\bar{I}$ , 即

$$\bar{I} \propto \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U^2 dt = \frac{1}{T} \int_{-1/T}^{1/T} U_0^2 \cos^2(\omega t - kz) dt = \frac{U_0^2}{2} \quad (1-14)$$

即平均光强  $\bar{I}$  与相应的光矢量振幅的平方成正比。由于实用中主要考虑光的相对强度, 所以上式经常写成:  $\bar{I} = U_0^2$ , 认为比例系数为 1。记住, 只要测得平均光强  $\bar{I}$ , 就可直接用  $I$  代替  $\bar{I}$ , 上式可改写成:  $I = U_0^2$ 。

### (4) 球面波及其复数表示法

光波波面为一系列同心球面的波叫作球面波。例如, 在均匀介质中点光源发出的光, 所形成的波面就是球面。可以证明球面波的振幅随波面半径  $r$  的增大成反比地减小。故球面简谐波的方程为



$$U = \frac{U_0}{r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{c} \right) \quad (1-15)$$

式中,  $r$  为光传播到达任一点  $P$  离波源的距离,  $U_0$  的值等于离波源单位距离处的振幅大小。

球面波的复数表示法为

$$U = \frac{U_0}{r} e^{i(\omega t - kr)} \quad (1-16)$$

## 1.1.2 光子

前面已经指出,当光和物质作用时,如果产生原子对光的发射和吸收的话,那么光的粒子性就表现得较为明显。这时往往把光当作一个一个以光速  $c$  运动的粒子流看待。光的量子学说(光子说)认为,光子和其他基本粒子一样,具有能量  $\epsilon$  和动量  $\vec{P}$ ,它们与光波的频率  $\nu$ 、真空中波长  $\lambda_0$  之间有如下关系

$$\epsilon = h\nu \quad (1-17)$$

$$\vec{P} = \frac{h\nu}{c} \vec{n}_0 = \frac{h}{\lambda_0} \vec{n}_0 = \frac{h}{2\pi\lambda_0} \vec{k} = \frac{h}{2\pi} \vec{k} \quad (1-18)$$

式中,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ , 称作普朗克常数。光子的动量  $\vec{P}$  是一个矢量,它的方向就是光子运动的方向,即光的传播方向  $\vec{n}_0$ 。 $\epsilon$  为每一个光子的能量,光的能量就是所有光子能量的总和。当光与物质(原子、分子)交换能量时,光子只能整个地被原子吸收或发射。

式(1-17)和式(1-18)把表征粒子性的能量  $\epsilon$  和动量  $\vec{P}$  与表征波动性的频率  $\nu$  和波长  $\lambda_0$  联系起来,体现了光的波粒二象性的内在联系。光的频率越高,光子的能量就越大。红外光与可见光相比,其频率较低,故它的光子能量就较小。可见光、紫外光、X射线、 $\gamma$ 射线的频率依次增高,相应的光子能量也逐渐增大。

上述两个基本关系式后来为康普顿(Compton)散射实验所证实(1923年),并在现代量子电动力学中得到理论解释。量子电动力学从理论上把光的电磁(波动)理论和光子(微粒)理论在电磁场的量子化描述的基础上统一起来,从而在理论上阐明了光的波粒二象性。

## 1.2 原子的能级和辐射跃迁

### 1.2.1 原子能级和简并度

物质是由原子、分子或离子组成的,而原子由带正电的原子核及绕核运动的电子组成。核外电子的负电量与原子核所带正电量相等。电子一方面绕核做轨道运动,一方面本身做自旋运动。由原子物理学知道,原子中电子的状态应该由下列四个量子数来确定:

① 主量子数  $n$ :  $n = 1, 2, 3, \dots$  主量子数大体上决定原子中电子的能量值。不同的主量子数表示电子在不同的壳层上运动。

② 辅量子数  $l$ :  $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ , 它表征电子有不同的轨道角动量。对于辅量子数  $l = 0, 1, 2, 3$  等的电子,依次用  $s, p, d, f$  字母表示,习惯上叫它们为  $s$  电子,  $p$  电子……

③ 磁量子数  $m$ :  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ 。磁量子数可以决定轨道角动量在外磁场方向上的分量。

④ 自旋磁量子数  $m_s$ :  $m_s = \pm 1/2$ , 它决定电子自旋角动量在外磁场方向上的分量。