



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材

激光原理及应用

(第2版)

Principles and Applications of Laser

Second Edition

© 陈鹤鸣 赵新彦 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业精品教材

激光原理及应用

(第2版)

陈鹤鸣 赵新彦 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本教材是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材和江苏省高等学校立项建设的精品教材。主要内容包括:激光发展简史及激光的特性,激光产生的基本原理,光学谐振腔与激光模式,高斯光束,激光工作物质的增益特性,激光器的工作特性,激光特性的控制与改善,典型激光器,半导体激光器,光通信系统中的激光器和放大器,激光全息技术,激光与物质的相互作用,以及激光在其他领域的应用。

本书可作为高等院校电子科学与技术、光信息科学与技术、光电信息工程和应用物理等专业本科生的教材,也可供高校相关专业的师生及从事光电子技术和光通信技术的科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

激光原理及应用/陈鹤鸣,赵新彦编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2013.9

电子信息科学与工程类专业精品教材

ISBN 978-7-121-21091-4

I. ①激… II. ①陈… ②赵… III. ①激光理论—高等学校—教材②激光应用—高等学校—教材
IV. ①TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 172615 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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

开 本:787×1092 1/16 印张:24.5 字数:640 千字

印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价:46.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第二版序

1917年爱因斯坦提出了受激辐射理论,即光可以激发分子使其放出能量。随着量子力学和微波光谱学的发展,汤斯和肖洛于1958年发表了关于激光产生方法的论文,提出根据受激辐射,处于高能级的分子将跃回低能级并将能量传给光,从而得到放大的光,即激光。1960年,美国工程师梅曼制造出了世界上第一台激光器。

激光发明以来,光学的应用领域发生了巨大变化,出现了许多传统光学无法实现的新应用和新技术。激光可作为高强度的光源,如上吉瓦特的激光,可持续百万分之一秒,而且可以聚焦在一微米大小的尺度上,形成极大的能量聚集。因此激光可以切割最硬的东西,如钻石,还可以用于汽车制造等。激光可以是非常短的脉冲,可以短到飞秒(10^{-15} s)甚至阿秒(10^{-18} s)级别。这些非常短的脉冲可以蒸发掉物体或人体上的一小块面积而不影响其他部位,这在工业和医学界都非常重要。在医学领域,激光可被用作外科手术刀,用于切割和缝合血管,以及做视网膜手术等。在科学研究方面激光是非常好的工具,激光可以测量极短的时间,可用于观察分子的反应过程,并在极短的时间内对其进行测量。德国的物理学家海因茨利用激光光谱学测量了氢原子的频率,精确度可以达到千兆分之一。激光器也可以产生出非常微弱的受控光,它可以聚集在一个细胞上,把这个细胞完整地取出来放在另外一个地方,这就是激光镊子。在天文学中可用激光测量星体的大小。从汤斯第一个因激光研究获诺贝尔奖以来,目前为止,已有12个诺贝尔奖授予了把微波激射器和激光器用作科学工具的科学家。

把光学和电子学结合在一起,光学和电子学的用途都会大大拓展。通信便是光学和电子学结合的最重要的用途之一,以激光器为光源、光波为信息载体的光通信技术,开创了通信领域的新时代,已成为有线信道最重要的通信方式。激光在记录和读取信息方面也非常重要,理论上,我们可以把全世界所有的电视、电话和无线电信息放在一束激光中。激光存储和激光全息技术的相关产品,已成为现代信息社会中重要的信息载体。光通信和光信息技术必将在21世纪信息化时代得到蓬勃发展并发挥更加重要的作用。

当前,激光的应用还处在发展阶段,不断拓展新的应用领域,发明新的激光光源,提高和改善激光的性能,是光学、电子学和信息领域的学者和科研人员面临的新课题。激光原理已成为

光通信、光信息和光电信息工程等专业学生的重要专业基础课程。本教材针对通信和信息类专业的学生和专业技术人员,在深入浅出地阐明基本原理和物理概念的基础上,较详细地介绍激光在光通信和信息领域的新技术、新知识及应用实例,既保证激光原理的系统性、完整性,又兼顾可读性和实用性。目的在于使通信、信息类专业的学生掌握激光的基本原理、主要技术,以及激光在通信、信息和其他领域的最新应用。

本教材的第一版完稿于2008年,内容反映了当时激光领域最新的技术和应用。在过去的5年里,随着材料、信息和通信等领域的迅速发展,新的激光光源不断涌现,激光在各领域的应用不断拓展,因此有必要对教材进行修订,从而能够及时追踪和反映激光科学的前沿内容。作为“十一五”国家级规划教材,本教材的第一版在出版之后被许多高校选用为激光原理相关课程的教材和参考书,得到了广泛认可。此次修订之后的教材被列为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,希望通过本教材能够更好地向读者介绍当前激光理论、技术和应用领域的前沿知识。

中国科学院院士、天津大学教授

姚建铨

2013年6月

第二版前言

本教材是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是在2009年出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《激光原理及应用》的基础上修订而成的。

本教材编写时参考了《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范(征求意见稿)》和《普通高等学校光电信息科学与工程本科指导性专业规范(征求意见稿)》中激光原理和光电电子技术知识领域的要求。力求深入浅出地阐明激光的基本理论,侧重于激光在光通信和光电信息领域的技术与应用,同时注重对科学前沿内容的引入。教材内容力图保证相关理论知识的系统性和完整性,又兼顾可读性和实用性。

本课程的参考学时为64课时,教材主要内容包括:激光发展简史及激光特性;激光产生的基本原理;光学谐振腔;高斯光束;激光工作物质的增益特性;激光器的工作特性;激光特性的控制与改善;典型激光器;半导体激光器;光通信系统中的激光器和放大器;激光全息技术的基本原理和分类;激光与物质的相互作用;激光在其他领域的应用。其中第1章是激光基本知识的介绍。第2~6章是激光理论基础。第7章是激光技术。第8章介绍典型激光器的原理和特性;第9、10章重点介绍用于光通信的激光器和光通信系统。第11、12、13章主要介绍激光在光电信息、工业、生物医学、国防科技以及科学前沿问题中的应用。

为更好地阐释理论体系,本书在第一版的基础上对高斯光束的传输与变换、激光工作物质的增益特性,以及光与物质的相互作用等章节的部分内容进行了修订。根据近年来激光器和激光应用的最新发展,本书增加和修订了新型激光器,如声子激光器、光子晶体激光器和量子阱激光器等原理和应用,扩充了激光在科学前沿问题中的应用。同时,为使内容更加简练并突出前沿新颖性,删除了激光应用领域某些常规应用中的技术性内容。本书配有电子课件,需要的读者可在华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册后免费下载。作者可提供部分习题答案,需要的读者可与作者联系。

本书第1~8章、第12、13章由赵新彦编写,第9~11章由陈鹤鸣编写。全书由陈鹤鸣负责修改和定稿。天津大学姚建铨院士提出了许多宝贵意见并为本书作序。南京邮电大学光电学院的研究生孙会、吕苏娜、戈晓恒、徐丹峰、邹江涛、邹雅琴、周弋、卫晓颖、刘佳、季珂、叶嘉琦、吴唯冉等同学在本书编写过程中为文献查找和资料收集提供了帮助。本书的编写过程得到了南京邮电大学光电工程学院的大力支持,还得到了南京邮电大学教务处的关心和帮助。在此一并谨向他们表示诚挚的感谢。鉴于当前光通信、光电信息以及激光技术和应用的飞速发展,要全面、系统地介绍激光应用的最新知识实属不易,由于编者学识与水平所限,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

2013年6月于金陵

第一版前言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和江苏省高等学校立项建设的精品教材。本书可作为高等院校电子科学与技术、光信息科学与技术、光电信息工程和应用物理等专业本科生的教材,也可供高校相关专业的师生及从事光电子技术和光通信技术的科技人员参考。

本教材编写时参考了《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范(讨论稿)》和《普通高等学校光电信息科学与工程本科指导性专业规范(讨论稿)》中激光原理和光电子技术知识领域的要求,由作者根据在光通信和光电信息领域多年的科研和教学实践经验,并充分吸收国内外激光应用领域最新发展的基础上编著。本教材力求深入浅出地阐明激光的基本原理和应用技术,并侧重介绍激光在光通信和光电信息领域的最新应用与发展。教材内容力图保证相关理论知识的系统性和完整性,又兼顾可读性和实用性。

“激光原理”课程是电子科学与技术、光信息科学技术和光电信息工程等专业的必修专业基础课。本课程的参考学时为 64 课时,教材主要内容包括:激光发展简史及激光的特性;激光产生的基本原理;光学谐振腔与激光模式;高斯光束;激光工作物质的增益特性;激光器的工作特性;激光特性的控制与改善;典型激光器;半导体激光器;光通信系统中的激光器和放大器;激光全息技术;激光与物质的相互作用;激光在其他领域的应用。

本书第 1 章是激光基本知识;第 2~6 章是激光理论;第 7 章是激光技术;第 8 章介绍典型激光器的原理和特性;第 9、10 章重点介绍用于光通信的激光器和光通信系统;第 11~13 章主要介绍激光在光电信息、工业、生物医学、国防科技以及科学前沿问题中的应用。

本书第 1~8 章、第 12、13 章由赵新彦编写,第 9~11 章由陈鹤鸣编写。全书由陈鹤鸣负责修改和定稿。天津大学姚建铨院士提出了许多宝贵意见并为本书作序。在本书的编写过程中得到了南京邮电大学光通信研究所的大力支持,还得到了南京邮电大学教务处的关心和帮助,在此一并谨向他们表示诚挚的感谢。由于当前光通信、光电信息以及激光技术和应用的飞速发展,要全面、系统地介绍激光应用的最新知识实属不易。由于编者学识与水平所限,书中难免有一些缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者
2008 年 7 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 激光发展简史	1
1.2 激光的特性	3
1.2.1 高方向性	3
1.2.2 单色性	4
1.2.3 相干性	5
1.2.4 高亮度	7
1.3 激光应用简介	8
习题与思考题一	12
第 2 章 激光产生的基本原理	13
2.1 原子发光的机理	13
2.1.1 原子的结构	13
2.1.2 原子的能级	13
2.1.3 原子发光的机理	14
2.2 自发辐射、受激辐射和受激吸收	15
2.2.1 自发辐射	15
2.2.2 受激辐射	16
2.2.3 受激吸收	17
2.2.4 三个爱因斯坦系数之间的关系	17
2.3 激光产生的条件	19
2.3.1 受激辐射光放大	19
2.3.2 集居数反转	19
2.3.3 激活粒子的能级系统	20
2.3.4 光的自激振荡	22
2.4 激光器的基本组成与分类	24
2.4.1 激光器的基本组成	24
2.4.2 激光工作物质	24
2.4.3 泵浦源	24
2.4.4 光学谐振腔	25
2.4.5 激光器的分类	26
习题与思考题二	28
第 3 章 光学谐振腔与激光模式	30
3.1 光学谐振腔的构成和分类	31
3.1.1 光学谐振腔的构成和分类	31
3.1.2 典型开放式光学谐振腔	32

3.2	激光模式	33
3.2.1	驻波与谐振频率	34
3.2.2	纵模	35
3.2.3	横模	36
3.3	光学谐振腔的损耗	37
3.3.1	光腔的损耗	37
3.3.2	光子在腔内的平均寿命	40
3.3.3	无源腔的品质因数—— Q 值	41
3.4	光学谐振腔的稳定性条件	42
3.4.1	腔内光线往返传播的矩阵表示	42
3.4.2	共轴球面腔的稳定性条件	46
3.4.3	临界腔	49
3.5	光学谐振腔的衍射理论基础	50
3.5.1	自再现模	50
3.5.2	菲涅耳—基尔霍夫衍射积分	52
3.5.3	自再现模积分方程	53
3.5.4	自再现模积分方程解的物理意义	54
3.6	平行平面腔的自再现模	55
3.6.1	平行平面镜腔的自再现模积分方程	56
3.6.2	平行平面腔模的数值迭代解法	57
3.6.3	单程衍射损耗、单程相移与谐振频率	58
3.7	对称共焦腔的自再现模	60
3.7.1	方形镜对称共焦腔	60
3.7.2	圆形镜共焦腔	69
3.8	一般稳定球面腔的模式理论	71
3.8.1	一般稳定球面腔与共焦腔的等价性	72
3.8.2	一般稳定球面腔的模式特征	73
3.9	非稳定谐振腔	75
3.9.1	非稳腔的基本结构	75
3.9.2	非稳腔的几何自再现波型	77
3.9.3	非稳腔的几何放大率	78
3.9.4	非稳腔的能量损耗	79
3.9.5	非稳腔的输出耦合方式	80
3.9.6	非稳腔的主要特点	81
	习题与思考题三	82
第4章	高斯光束	84
4.1	高斯光束的基本性质	84
4.1.1	高斯光束	84
4.1.2	高斯光束的基本性质	86
4.1.3	高斯光束的特征参数	88

4.2	高斯光束的传输与变换规律	89
4.2.1	高斯光束的传输与变换规律	90
4.2.2	实例分析	92
4.3	高斯光束的聚焦和准直	94
4.3.1	高斯光束的聚焦	94
4.3.2	高斯光束的准直	96
4.4	高斯光束的自再现变换	98
4.4.1	利用薄透镜实现自再现变换	99
4.4.2	球面反射镜对高斯光束的自再现变换	99
4.5	高斯光束的匹配	100
4.6	激光束质量因子	102
	习题与思考题四	103
第5章	激光工作物质的增益特性	106
5.1	谱线加宽与线型函数	106
5.1.1	谱线加宽概述	106
5.1.2	光谱线加宽的机理	107
5.1.3	均匀加宽、非均匀加宽和综合加宽	114
5.2	速率方程	116
5.2.1	对自发辐射、受激辐射、受激吸收概率的修正	116
5.2.2	单模振荡速率方程	119
5.2.3	多模振荡速率方程	121
5.3	均匀加宽激光工作物质对光的增益	122
5.3.1	增益系数	122
5.3.2	反转集居数饱和	124
5.3.3	增益饱和	126
5.4	非均匀加宽激光工作物质对光的增益	128
5.4.1	增益饱和	129
5.4.2	烧孔效应	130
	习题与思考题五	132
第6章	激光器的工作特性	135
6.1	连续与脉冲工作方式	135
6.1.1	短脉冲运转	136
6.1.2	长脉冲和连续运转	137
6.2	激光器的振荡阈值	137
6.2.1	阈值增益系数	137
6.2.2	阈值反转集居数密度	138
6.2.3	阈值泵浦功率和能量	139
6.3	激光器的振荡模式	141
6.3.1	起振纵模数	141
6.3.2	均匀加宽激光器的输出模式	142

6.3.3	非均匀加宽激光器的输出模式	144
6.4	连续激光器的输出功率	145
6.4.1	均匀加宽单模激光器的输出功率	145
6.4.2	非均匀加宽单模激光器的输出功率	147
6.4.3	多模激光器	148
6.5	脉冲激光器的工作特性	149
6.5.1	短脉冲激光器的输出能量	149
6.5.2	弛豫振荡	149
	习题与思考题六	151
第7章	激光特性的控制与改善	153
7.1	模式选择	153
7.1.1	横模选择	153
7.1.2	纵模选择	156
7.2	稳频技术	159
7.2.1	频率的稳定性	159
7.2.2	稳频方法	160
7.3	调Q技术	165
7.3.1	调Q激光器工作原理	166
7.3.2	Q调制方法	168
7.3.3	调Q激光器基本理论	172
7.4	超短脉冲技术	176
7.4.1	锁模原理	176
7.4.2	锁模方法	179
7.4.3	均匀加宽激光器主动锁模自治理论	184
7.4.4	阿秒激光的产生与测量	186
7.5	激光调制技术	188
7.5.1	激光调制的基本概念	188
7.5.2	电光调制、声光调制和磁光调制	192
7.5.3	直接调制	195
7.6	激光偏转技术	196
7.6.1	机械偏转	197
7.6.2	电光偏转	197
7.6.3	声光偏转	198
7.7	光电器件设计及参数选用原则	199
7.7.1	电光调制器的设计	199
7.7.2	电光调Q激光器的设计	199
7.7.3	声光调制器的设计	201
	习题与思考题七	202
第8章	典型激光器	204
8.1	固体激光器	204

8.1.1	固体激光器的基本结构和泵浦方式	204
8.1.2	红宝石激光器	206
8.1.3	钕激光器	207
8.1.4	掺钛蓝宝石激光器	209
8.2	气体激光器	210
8.2.1	气体激光器的泵浦方式	211
8.2.2	氦氖激光器	211
8.2.3	二氧化碳激光器	213
8.2.4	氩离子激光器	215
8.3	染料激光器	216
8.3.1	染料激光器的泵浦方式与基本结构	217
8.3.2	染料激光器的工作原理	218
8.4	新型激光器	219
8.4.1	准分子激光器	219
8.4.2	自由电子激光器	221
8.4.3	化学激光器	222
8.4.4	声子激光器	224
	习题与思考题八	226
第9章 半导体激光器		227
9.1	半导体激光器物理基础	228
9.1.1	半导体的能带结构和电子状态	228
9.1.2	半导体中载流子的分布与复合发光	230
9.1.3	PN结	234
9.1.4	半导体激光材料	235
9.2	半导体激光器的工作原理	235
9.2.1	半导体激光器受激发光条件	236
9.2.2	半导体激光器有源介质的增益系数	237
9.2.3	阈值条件	238
9.2.4	半导体激光器的速率方程及其稳态解	239
9.3	半导体激光器有源区对载流子和光子的限制	240
9.3.1	异质结半导体激光器	240
9.3.2	量子阱激光器	243
9.3.3	光约束因子	245
9.4	半导体激光器的谐振腔结构	246
9.4.1	FP腔半导体激光器	246
9.4.2	分布反馈式半导体激光器与布喇格反射式半导体激光器	247
9.4.3	垂直腔表面发射半导体激光器	251
9.5	半导体激光器的特性	253
9.5.1	阈值特性	253
9.5.2	半导体激光器的效率与输出功率	254

605	9.5.3	半导体激光器的输出模式	255
608	9.5.4	动态特性	258
609		习题与思考题九	261
第 10 章 光通信系统中的激光器和放大器			262
612	10.1	半导体激光器在光纤通信中的应用	262
612	10.1.1	作为光纤通信光源的半导体激光器	262
612	10.1.2	半导体激光器在光纤通信中的应用与发展	264
618	10.2	光放大器	265
618	10.2.1	半导体光放大器	265
619	10.2.2	光纤放大器	267
619	10.2.3	半导体光放大器和光纤放大器的比较	271
619	10.3	光纤激光器	272
619	10.3.1	掺杂光纤激光器	273
619	10.3.2	其他类型的光纤激光器	276
620	10.4	光子晶体激光器	278
620	10.4.1	光子晶体	278
620	10.4.2	光子晶体激光器	279
620	10.4.3	光子晶体激光器的应用前景	282
622	10.5	用于无线激光通信的激光器	282
622	10.5.1	无线激光通信	283
623	10.5.2	用于无线激光通信的激光器	284
623	10.6	光通信系统设计与实例	285
623	10.6.1	光纤通信系统的设计	285
623	10.6.2	空间光通信系统设计实例	290
623		习题与思考题十	292
第 11 章 激光全息技术			293
623	11.1	激光全息技术的原理和分类	293
623	11.1.1	激光全息的原理	293
623	11.1.2	全息照相的特点	296
623	11.1.3	激光全息技术的分类	296
623	11.2	白光再现的全息技术	297
623	11.2.1	白光反射全息	297
623	11.2.2	像面全息	298
623	11.2.3	彩虹全息	299
623	11.2.4	真彩色全息	300
623	11.3	几种特殊的全息技术	301
623	11.3.1	计算全息	301
623	11.3.2	数字全息	301
623	11.3.3	合成全息	302
623	11.3.4	激光超声全息	305

11.3.5	瞬态全息	306
11.4	激光全息技术的应用	306
11.4.1	全息显示和全息电影	306
11.4.2	全息干涉计量	307
11.4.3	全息显微技术	309
11.4.4	全息光学元件	310
11.4.5	全息技术的其他应用	312
	习题与思考题十一	313
第 12 章	激光与物质的相互作用	314
12.1	激光在物质中的传播	314
12.1.1	激光在物质中的传播和吸收	314
12.1.2	激光的散射	315
12.2	激光在晶体中的非线性光学现象	316
12.2.1	倍频光的产生	317
12.2.2	相位匹配	317
12.3	激光对物质的加热与蒸发	318
12.3.1	激光热蒸发	318
12.3.2	光化学效应激光蒸发	319
12.4	激光诱导化学过程	320
12.4.1	激光切断分子	320
12.4.2	激光引起的多光子吸收	321
12.4.3	液体、固体的光化学反应	321
	习题与思考题十二	322
第 13 章	激光在其他领域的应用	323
13.1	激光在信息领域的应用	323
13.1.1	激光存储	323
13.1.2	激光计算机	329
13.1.3	激光扫描	333
13.1.4	激光打印机	334
13.2	激光在工业领域的应用	334
13.2.1	激光在精密计量中的应用	335
13.2.2	激光在材料加工中的应用	341
13.3	激光在生物医学领域的应用	346
13.3.1	激光与生物体的相互作用	346
13.3.2	激光在生物体检测及诊断中的应用	348
13.3.3	激光医疗	351
13.3.4	医用激光光源	355
13.4	激光在国防科技领域的应用	356
13.4.1	激光测距	356
13.4.2	激光雷达	357

13.4.3	激光制导	358
13.4.4	激光陀螺	359
13.4.5	激光武器	360
13.5	激光在科学技术前沿中的应用	362
13.5.1	激光光谱学	362
13.5.2	激光核聚变	365
13.5.3	超短脉冲激光技术	369
13.5.4	激光冷却与原子捕陷	370
13.5.5	利用激光操纵微粒	373
	习题与思考题十三	374
附录 A	典型气体激光器基本实验数据	375
附录 B	典型固体激光工作物质参数	376
	参考文献	377

第 1 章 概 述

我们生活的这个世界充满了光,光是人类赖以生存的基本条件之一。人类最初懂得利用的光是自然界的太阳光。激光是 20 世纪最重要的发明之一,激光的出现为人类带来了地球上从未见过的高质量光源,从而开拓了新的研究领域,开创了光应用的新途径,使许多过去不能实现的事情不断地成为现实。激光技术是一门既属于光学又属于电子学的光电子技术。激光技术最显著的特征是它对其他技术具有广泛的渗透性。激光技术的飞速发展必将在通信、信息处理、计量、工业加工、土木建筑、能源、生物、医疗等广阔领域带来革命性的变革。

本章首先回顾激光产生与发展的历程,并简要介绍激光不同于普通光源的显著特性和激光在现代社会中的广泛应用。

1.1 激光发展简史

1. 爱因斯坦的理论贡献

世界上第一台激光器出现于 1960 年,然而导致激光发明的理论基础可以追溯到 1917 年,爱因斯坦(Albert Einstein)在研究光辐射与原子相互作用时,提出光的受激辐射的概念,从理论上预见了激光产生的可能性。20 世纪 30 年代,理论物理学家又证明受激辐射产生的光子的振动频率、偏振方向和传播方向都和引发产生受激辐射的激励光子完全相同。

如果光源的发光主要是受激辐射,就可以实现光放大效应,也就是说能够得到激光。但是,普通光源产生的光辐射以自发辐射为主,受激辐射的成分非常少,没有实际应用的价值,因此,爱因斯坦当初提出的受激辐射概念并没有受到重视。

2. 激光的发明与发展

20 世纪 50 年代,电子学、微波技术的应用提出了将无线电技术从微波(波长为厘米量级)推向光波(波长为微米量级)的需求。这就需要一种能像微波振荡器一样地产生可以被控制的光波的振荡器,这就是当时光学技术迫切需要的强相干光源,即激光器。当时利用微波振荡器产生微波的方法,是在一个尺度与波长可比拟的封闭的谐振腔中,利用自由电子与电磁场的相互作用实现电磁波的放大和振荡。由于光波波长极短,很难用这种方法实现光波振荡。美国科学家汤斯(Charles H. Townes)、前苏联的科学家巴索夫(Nikolai G. Basov)和普罗克霍洛夫(Aleksander M. Prokhorov)创造性地继承和发展爱因斯坦的理论,提出利用原子、分子的受激辐射来放大电磁波的新方法,并于 1954 年发明了氨分子微波振荡器——一种在微波波段的受激辐射放大器(Microwave amplification by stimulated emission of radiation, Maser)。

Maser 的成功,证明了受激辐射原理技术应用的可能性。由此,许多科学家设想把微波振荡器的原理推广到波长更短的光波波段,从而制成受激辐射光放大器(Light amplification by stimulated emission of radiation, Laser)。汤斯和贝尔实验室(Bell Laboratory)的肖洛(Arthur L. Schawlow)在合作研究的基础上,于 1958 年在《物理评论》(Phys. Rev. 1958, vol. 112, 1940)杂志上发表了题为《红外和光学激光器》(Infrared and Optical Maser)的论文,讨论并概括了

光波段受激辐射放大器的主要问题和困难,给出了实现光受激辐射放大需要满足的必要条件,提出了利用尺度远大于波长的开放式光学谐振腔(借用传统光学中F-P干涉仪的概念)实现激光器的新思想。这篇文章标志着激光时代的开端,从此,激光研究领域翻开了新的篇章,全世界许多研究小组纷纷提出各种实验方案,竞相投入研制第一台激光器的竞赛中。

1960年5月,美国休斯公司(Hughes)实验室从事红宝石荧光研究的年轻人梅曼(Theodore H. Maiman)经过两年时间的努力,制成了世界上第一台红宝石固体激光器(波长694.3nm)。梅曼的方案是利用掺铬的红宝石晶体做发光材料,用发光强度很高的脉冲氙灯做激发光源,如图1-1所示。同年7月,休斯公司召开新闻发布会,隆重宣布激光器的诞生,从此开创了激光技术的历史。

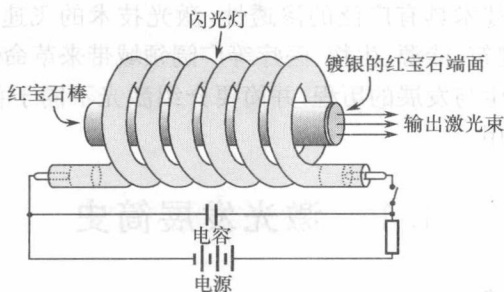


图 1-1 世界上第一台红宝石激光器的结构

随后,各种类型的激光器层出不穷,激光技术迅速发展。1960年12月,贝尔实验室的贾范(Javan)、海利特(Herriot)、贝纳特(Bennett)等人利用高频放电激励氦氖(He-Ne)气体,制成世界上第一台氦氖激光器,可输出波长1150nm上下几种波长的连续光,在其影响下产生了一系列气体激光器。1962年出现了半导体激光器;1964年帕特尔(C. Patel)发明了第一台二氧化碳(CO₂)激光器;1965年发明了第一台钕铝石榴石(YAG)激光器;1967年第一台X射线激光器研制成功;1968年开始发展高功率CO₂激光器;1971年出现了第一台商用1kW CO₂激光器,高功率激光器的研制成功,推动了激光应用技术的迅速发展;1997年,美国麻省理工学院的研究人员研制出第一台原子激光器。

与此同时,选频、稳频、调制、调Q、锁模等各种激光技术也相继出现。各种科学和技术领域纷纷应用激光并形成了一系列新的交叉学科和应用技术领域。

现在已在几千种工作物质中实现了光放大或制成了激光器,如气体激光器、液体激光器、固体激光器、化学激光器、准分子激光器和半导体激光器等。激光的应用遍及通信、信息处理、工业、农业、医学、军事、科学研究等许多领域。

3. 中国激光技术的发展

在国际上热烈开展激光研究的同时,我国也在积极开展这项研究。我国第一台激光器于1961年8月研制成功,是中国科学院长春光学精密机械研究所王之江领导设计并和邓锡铭、汤星里、杜继禄等共同实验研制的,所以中国光学界尊称王之江为“中国激光之父”。他研制的激光器也是红宝石激光器,但在结构上与梅曼的有所不同,最明显的地方是,泵浦灯不是螺旋氙灯,而是直管式氙灯,灯和红宝石棒并排地放在球形聚光器的附近,如图1-2所示。这是因为经过王之江的计算,这样会比螺旋氙灯获得更好的效果。实践证明,这种设想和计算是正确的,如今世界上的固体激光器大都是采用这种方式。

此后短短几年内,激光技术迅速发展,各种类型的固体、气体、半导体和化学激光器相继研