



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

本书第1版2010年获评为北京市高等教育精品教材

光学工程

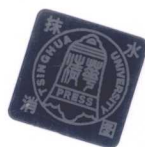
**P** rinciples of Lasers (Second Edition)

# 激光原理

(第2版)

盛新志 娄淑琴 编著

Sheng Xinzhi Lou Shuqin



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会  
高等学校电子信息类专业系列教材

---

Principles of Lasers (Second Edition)

# 激光原理

(第2版)

---

盛新志 娄淑琴 编著

Sheng Xinzhi Lou Shuqin

清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要阐述激光器基本工作原理和相关现象的理论。内容主要包括光和物质作用经典理论、光学谐振腔理论、激光器速率方程理论,以及对连续激光器工作特性的分析理论。

本书配有完整的电子教案和学习指导书。本书可作为高校激光原理课程的教材,也可作为从事激光工作的研究人员、技术人员以及高校有关专业的研究生的学习参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

激光原理/盛新志,娄淑琴编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2015

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-38769-5

I. ①激… II. ①盛… ②娄… III. ①激光理论—高等学校—教材 IV. ①TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 286424 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.5 字 数:332千字

版 次:2010年6月第1版 2015年11月第2版 印 次:2015年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:34.00元

---

产品编号:054640-01

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

## 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

# 序

## FOREWORD

---

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 第2版前言

FOREWORD

---

2010年,本教材第1版由清华大学出版社正式出版后,被评为北京市高等教育精品教材,但在北京交通大学光信息科学与技术专业本科学生的教学过程中,以及兄弟院校老师的批评反馈中,发现了不少需要进一步完善的地方。因此,作者在听取各方意见的基础上,对本教材进行了全面的改编和完善。

与本教材相配套的学习指导书,也历经了十多年的磨砺,将由清华大学出版社同期出版。另外,作者教学使用十多年、随教材编写不断完善的课程电子教案,也会随本教材免费赠送。

与第1版本相比,尽管本教材主体知识结构没有发生明显的改变(仍保持5章结构),但是在教材内容中增加了半导体及光纤等激光器发展前沿技术原理部分。在编著思路,更加突出对研究性学习的要求,力求教学内容重点突出、繁简得当。教师可以配合课程学习指导书的使用,营造出更加浓郁的研究性课堂学习氛围。

本教材第1章、第3章、第4章及附录由盛新志执笔编写,第2章和第5章由娄淑琴执笔编写。

感谢您的使用,欢迎提出批评意见。E-mail: xzhsheng@bjtu.edu.cn。

作 者

2015年7月于北京

# 第1版前言

FOREWORD

本书是在北京交通大学十五年激光原理课程授课的基础上编写而成的,配有完整的电子教案。在列入清华大学出版社光信息科学与技术本科专业系列教材出版计划后,本书经过北京交通大学光信息科学与技术专业三届本科学生的试用和授课教师的修改。

使用本书讲授激光原理与应用的参考学时为48学时,不包括研究性教学研讨部分,实验课程单独开设。本书共分5章。第1章激光绪论,介绍激光的由来及产生激光的基本条件,重点在于阐明激光光子简并度高的特性。第2章光和物质的近共振相互作用,介绍基于电子谐振子模型的经典理论,并结合激光器中常见的谱线加宽介绍均匀、非均匀及综合加宽的形成机制。第3章速率方程理论,首先结合典型激光器的具体工作能级,抽象出激光三、四能级系统,进而建立速率方程组,然后结合速率方程组的稳态解,对均匀、非均匀加宽介质的增益饱和特性进行了分析,并讨论激光放大器的工作特性。第4章光学谐振腔理论,首先根据光线传输矩阵导出光学谐振腔稳定性判据,然后介绍光学谐振腔的损耗描述和自再现模式思想,并基于光衍射理论导出光学谐振腔衍射积分本征方程,进而介绍衍射积分本征方程的平行平面腔迭代数值解法和对称共焦腔解析解法。在对称共焦腔解析解的基础上,本章还讨论谐振腔内高斯光束特性、球面镜稳定腔的等价对称共焦腔,以及薄透镜对高斯光束的变换和高斯光束变换的应用技术。第5章连续激光器的工作特性,在建立激光器速率方程组的基础上,通过方程组的稳态解,分析均匀加宽介质激光器的纵模振荡和竞争、非均匀加宽介质激光器的多纵模振荡和兰姆凹陷现象,分析激光器振荡阈值、激光极限线宽、最佳输出耦合和激光器输出功率。第1章、第3章、第4章及附录由盛新志执笔编写,第2章和第5章由娄淑琴执笔编写。

在激光原理这样一个稍显经典实则日新月异的领域,编新教材是一件很吃力的事。工科院校多开设有该课程,已经有太多杰作树立了一个又一个不可超越标杆。为适应光信息科学与技术新专业的建设,激光原理作为专业主干课程,不可能完全照搬其他专业的教材,要求结合专业知识结构特点编写。首先感谢北京交通大学光信息科学与技术专业04~06级三届学生的试用,尤其是刘晓东、尹国路、付星星、张松、郝健、王颖、鹿文亮、陈宝琴、邢雨辰等同学的认真纠错;感谢邓振波、吴重庆等老师提出的中肯批评意见;还要感谢导师马祖光院士,正是您将作者引入激光这一灿烂的研究领域。最后,将最真诚的谢意送给现在的读者您,感谢您的使用,欢迎提出批评意见。

编者

2009年11月于北京



# 目录

## CONTENTS

---

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 激光诞生的历史 .....	1
1.2 激光的本质特征 .....	3
1.2.1 相干性波动分析 .....	3
1.2.2 相干性光子分析 .....	5
1.2.3 光波模式 .....	7
1.3 光子简并度 .....	8
1.3.1 光波模式数 .....	8
1.3.2 光子简并度 .....	10
1.3.3 光源亮度 .....	10
1.4 激光产生的基本条件 .....	11
思考和练习题 .....	12
<b>第 2 章 光和物质的近共振相互作用</b> .....	13
2.1 电磁波吸收和发射的经典解释 .....	13
2.1.1 电介质极化 .....	13
2.1.2 电偶极振子模型 .....	16
2.1.3 吸收对介质的影响 .....	17
2.2 电磁波吸收和发射的唯象理论 .....	24
2.2.1 自发辐射 .....	24
2.2.2 受激吸收 .....	26
2.2.3 受激辐射 .....	26
2.2.4 实现光放大的问题 .....	27
2.3 光谱线加宽 .....	28
2.3.1 吸收和发射光谱技术 .....	28
2.3.2 谱线加宽和线型函数 .....	30
2.3.3 谱线加宽对跃迁速率的影响 .....	33
2.4 激光器中常见的谱线加宽 .....	36
2.4.1 光谱线加宽的类型 .....	36
2.4.2 均匀加宽的典型机制 .....	38
2.4.3 非均匀加宽的典型机制 .....	43
2.4.4 激光介质中的实际加宽 .....	47
2.5 光和物质相互作用的近代理论 .....	51
2.5.1 量子理论 .....	51

2.5.2	半经典理论 .....	51
2.5.3	速率方程理论 .....	52
	思考和练习题 .....	52
<b>第3章</b>	<b>速率方程理论 .....</b>	<b>54</b>
3.1	典型激光器的工作能级 .....	54
3.1.1	红宝石激光器工作介质 .....	54
3.1.2	掺钕光纤激光放大器工作介质 .....	56
3.1.3	氩离子激光器工作介质 .....	57
3.1.4	$N_2$ 分子激光器 .....	58
3.1.5	He-Ne激光器工作介质 .....	59
3.1.6	掺 $Nd^{+3}$ 激光器工作介质 .....	60
3.1.7	掺钛蓝宝石激光器工作介质 .....	61
3.1.8	$CO_2$ 激光器工作介质 .....	62
3.1.9	半导体激光器工作介质 .....	63
3.2	三能级系统速率方程组 .....	65
3.2.1	激光三能级系统 .....	65
3.2.2	速率方程组 .....	66
3.3	四能级系统速率方程组 .....	68
3.3.1	激光四能级系统 .....	69
3.3.2	速率方程组 .....	69
3.4	小信号光的介质增益 .....	71
3.4.1	反转粒子数与小信号增益系数 .....	71
3.4.2	四能级系统的小信号增益系数 .....	72
3.4.3	三能级系统的小信号增益系数 .....	73
3.5	均匀加宽介质的增益饱和 .....	74
3.5.1	大信号的反转粒子数 .....	75
3.5.2	大信号增益系数 .....	77
3.5.3	增益曲线的均匀饱和 .....	77
3.5.4	增益介质的色散 .....	79
3.6	非均匀加宽介质的增益饱和 .....	81
3.6.1	大信号增益系数 .....	81
3.6.2	增益曲线的烧孔现象 .....	83
3.6.3	气体激光器中的烧孔现象 .....	85
3.6.4	综合加宽工作物质的增益系数 .....	86
3.7	光放大 .....	86
3.7.1	自发辐射放大 .....	87
3.7.2	超辐射的强度和方向性 .....	88
3.7.3	ASE线宽 .....	90
3.7.4	激光放大器 .....	92
	思考与练习题 .....	96
<b>第4章</b>	<b>光学谐振腔理论 .....</b>	<b>99</b>
4.1	光学谐振腔的稳定性 .....	99
4.1.1	光学谐振腔的结构、分类和作用 .....	100

4.1.2	光线传输矩阵和 ABCD 律	103
4.1.3	谐振腔稳定性的光线传输矩阵分析	107
4.1.4	不同种类谐振腔的稳定性	110
4.2	光学谐振腔的模式	112
4.2.1	谐振腔的损耗	112
4.2.2	谐振腔的模式简介	117
4.2.3	DFB 激光器模式简介	119
4.3	光学谐振腔的衍射积分理论	121
4.3.1	惠更斯-菲涅尔原理和基尔霍夫衍射积分	122
4.3.2	谐振腔自在现模积分本征方程	123
4.3.3	本征值 $\gamma$ 的物理意义	124
4.4	平行平面腔 Fox-Li 数值迭代法	125
4.4.1	平行平面镜对称谐振腔积分本征方程	126
4.4.2	Fox-Li 数值迭代法	127
4.4.3	Fox-Li 数值迭代法的重要意义	130
4.5	球面镜对称共焦腔解析解	130
4.5.1	方形球面镜对称共焦腔的模式	130
4.5.2	方形球面镜对称共焦腔的行波场	136
4.5.3	圆形球面镜对称共焦腔	141
4.6	球面镜稳定腔的等价对称共焦腔	142
4.6.1	对称共焦腔的等价腔	142
4.6.2	球面镜稳定腔的等价对称共焦腔	143
4.7	高斯光束变换	145
4.7.1	高斯光束的基本特性	145
4.7.2	高斯光束的复参数 $q$ 表示	145
4.7.3	复参数 $q$ 的变换规律	146
4.7.4	高斯光束薄透镜的变换规律	148
4.7.5	光束远场发散角的检测	149
4.7.6	高斯光束的模式匹配	150
4.7.7	高斯光束的聚焦	151
4.7.8	高斯光束的准直	155
	思考与练习题	157
<b>第 5 章</b>	<b>连续激光器的工作特性</b>	<b>162</b>
5.1	均匀加宽介质激光器速率方程	162
5.1.1	激光器单模运转速率方程	162
5.1.2	激光器多模运转速率方程	163
5.2	激光振荡阈值	165
5.2.1	振荡阈值条件	165
5.2.2	四能级系统的阈值泵浦功率密度	166
5.2.3	三能级系统的阈值泵浦功率密度	167
5.3	均匀加宽介质激光器中的纵模振荡和竞争	168
5.3.1	纵模数目	169
5.3.2	均匀加宽介质激光器中的单模振荡	170

5.3.3	振荡频率牵引	172
5.3.4	空间烧孔	174
5.4	非均匀加宽介质激光器的多纵模振荡	176
5.4.1	多模振荡	176
5.4.2	兰姆凹陷	177
5.4.3	非均匀加宽介质的模竞争	181
5.5	连续激光器输出特性	181
5.5.1	单模激光器的线宽极限	181
5.5.2	均匀加宽单模稳态运转的输出功率	184
5.5.3	输出耦合率的优化	188
5.5.4	非均匀加宽单模稳态运转的输出功率	190
	思考及练习题	192
<b>附录 A</b>	<b>常用物理常数表</b>	194
<b>附录 B</b>	<b>激光领域大事记</b>	195
	<b>参考文献</b>	200

早在 1917 年,爱因斯坦就预言了受激辐射现象的存在,那是他在研究黑体辐射时的副产品。一些研究者注意到这一预言的潜在价值,开始寻求它的实际应用,首先在微波段实现了受激辐射放大。紧接着,将受激辐射放大移植到光波段的研究,形成了科技界声势浩大的一场世界竞赛。随着红宝石激光器的研制成功,各种新型激光器接二连三地出现。无论在结构上还是在输出性质上,它们具有很多共同特征,这使得激光器工作原理研究成为一个专门的领域。

## 1.1 激光诞生的历史

距离爱因斯坦发表受激辐射概念 40 年后的 1957 年,是一个不平常的年份。那一年,苏联发射世界上第一颗人造地球卫星。也是在那一年的一个秋日,在美国贝尔实验室附近的一个餐馆里,两个人正在探讨如何实现光波段的受激辐射放大。

这两个人,一个是美国哥伦比亚大学教授、贝尔实验室顾问汤斯(C. Townes),他因研究微波受激辐射放大而闻名于世;另一个是贝尔实验室作超导研究的博士后肖洛(A. Schawlow)。两个人既有亲戚关系又曾有师生之谊,这也是他们这时坐在一起吃饭的原因。

汤斯正在考虑如何把受激辐射放大由微波波长压缩到红外光波长,肖洛说他也正考虑这一问题。汤斯的设想是:使用一个玻璃盒,在盒中充满铯蒸气,铯灯在盒外照射铯蒸气激励铯原子发光;像金属波导对微波一样,玻璃盒壁可以对铯原子发出的光波起反射作用,进而可能引起受激励铯蒸气的受激辐射放大。肖洛认为使用钾蒸气效果会更好一些。另外,他还认为没必要去照搬微波放大器的结构。光传播的方向性要比微波强得多,是不是只用两块相对放置的反射镜就可以了?在他们的设想里,已经揭示出激光器所必备的三个组成部分:工作物质、激励源和光学谐振腔。激励源对工作物质进行激励,将能量沉积其中,工作物质的发光为光学谐振腔所选择、约束、正反馈,最终,形成激光输出。激光器的三个基本组成部分如图 1.1.1 所示。

他们可能没有想到,他们这一席对话对当今世界的面貌产生了多么大的影响。

缺乏伯乐眼光的当权者往往并不少见,在科技企业界也难得例外。对于光辐射放大器的专利申请报告,贝尔实验室领导的意见是:“光波从没有对通信有过重大作用,该项发明对贝尔系统的利益几乎没有意义”,不支持他们去申请专利。最后,只是由于汤斯的坚持,才在 1960 年 3 月获得专利权。当然,这一专利权也让他们在激光广泛应用后发了大财。

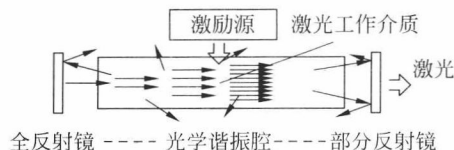


图 1.1.1 激光器的三个基本组成部分

1958年,肖洛和汤斯的构想发表在 *Physics Review* 杂志 1958年12月期上。尽管第一台激光器的工作物质既不是汤斯所说的铷,也不是肖洛所说的钾,但是他们所提出的实现激光器的基本方案被公认为在激光领域具有划时代意义。公正地说,其他国家的科学家在促使激光出现方面也做出了卓越的贡献。差不多同时,苏联的巴索夫(Nikolai Basov)和普罗霍罗夫(Alexander Prokhorov)也提出了几乎相同的光受激辐射放大方案。1964年,与激光相关的第一个诺贝尔奖被授予苏联的巴索夫、普罗霍罗夫和美国的汤斯。当然,这是第一个,但不是最后一个。实际上,截止到2009年,已有近十个诺贝尔奖被授予了与激光直接相关的研究。

光受激辐射放大理论和实现基本结构的公开发表,在科技界引起轰动,众多研究小组争相开展这一研究,形成了一场世界范围的竞赛,看谁能研制出第一台激光器。

制成第一台激光器的荣誉属于梅曼(T. H. Maiman),当时他在美国休斯顿实验室开展这一工作。汤斯在哥伦比亚大学使用钾和铯进行实验研究,肖洛在贝尔实验室也开展了实验研究,不幸的是他们自己的理论并没有引导他们在实验中取得成功。梅曼红宝石激光器实验装置如图 1.1.2 所示。

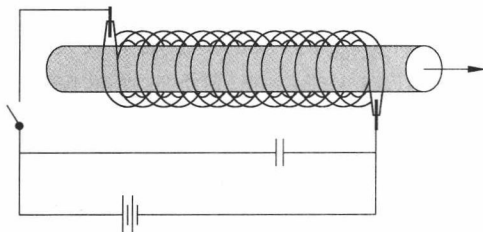


图 1.1.2 梅曼红宝石激光器实验装置

梅曼对红宝石很熟悉,在读到肖洛和汤斯的文章后,他并不同意肖洛对红宝石的分析,而是认为红宝石应能产生激光。他把两端镀上反射镜的红宝石棒插入一个螺旋形氙气航空摄影闪光灯,为让氙灯的光能集中在红宝石棒上,又在外面上加一个内表面镀反射膜的圆筒。1960年5月16日,经过9个月的探索和改进,梅曼第一个观察到激光现象,赢得了研制成功第一台激光器的荣誉。

自此以后,激光的发展非常迅速,现在已有半导体(GaAs, InP等)激光器,固体(Nd:YAG, Nd:YLF等)激光器,气体原子(He-Ne等)激光器,气体离子( $\text{Ar}^+$ 等)激光器,气体 $\text{CO}_2$ 分子激光器,气体准分子(XeCl, KrF等)激光器,金属蒸汽(Cu等)激光器,可调谐染料及钛宝石激光器,激光二极管泵浦激光器,光纤激光器,光学参量振荡与放大器,超短脉冲激光器,自由电子激光器及紫外及X射线激光器,等等。

在研制出如此琳琅满目、品种繁多的激光器后,人们惊奇地发现,激光并不是人类的发

明,在自然界中早已存在。1965年,美国国家航空航天局(NASA)戈达德实验室的迈克尔·穆马(Michael Mumma)已经完全可以确认,火星 $\text{CO}_2$ 大气反射的太阳红外光会稍微获得一些放大,也就是说激光在自然界中早已存在。尽管如此,人们还是把激光作为20世纪的一项划时代成就。这是因为自从人们研制出激光器,它给予我们的惊喜不断,应用领域不断扩展。

早在1969年人类第一次登月的时候,阿姆斯特朗在月球上安置了一个朝向地球的小型发射器阵列。一束红宝石激光直刺长天,当光束旅行38.6万千米照射到宇航员们设置的发射器时直径也只有910米宽,为地月距离提供了误差小于2.54厘米的测量精度。后来,宇宙飞船在月球上架设了摄像机,摄像图像清晰地显示出那只有1瓦强度的红宝石激光,而功率到达千兆瓦的洛杉矶盆地灯光却了无踪迹。

测量地月间距只是激光应用展现优异品质的一个例证,今天,除日常生活中常见的激光打印、排版、印刷,以及激光光盘等之外,激光应用已深入到各个领域。在通信的应用中,有光纤通信、大气光通信、卫星激光通信、水下激光通信等;在基础科学研究中,有激光荧光光谱、激光冷却原子、激光光化学反应、激光分离同位素、激光飞秒光学、激光测定年代、重力波天线激光干涉仪等;在军事技术的应用中,有激光测距、雷达、激光制导、激光导航、激光武器、战术模拟、光电对抗等;在生物及医学的应用中,有断层摄影、生物体检测、生物体光谱诊断、共焦点显微镜、激光美容等应用,有眼科、皮肤科及整形外科诊断、治疗及理疗的应用;在材料加工领域中,有激光打孔、切割、焊接,有激光3D扫描及快速成型和纳米粉材料制备等应用;在测量技术领域中,有激光干涉计量、激光陀螺计量、激光全息照相计量、激光衍射计量、激光准直及多自由度测量等应用;在能源、环境领域中的应用,有核聚变、大气检测、激光引雷、激光驱雾等;在建筑领域中,有激光表面处理及剥离,激光切断及解体,以及激光挖掘等应用。

随着激光器性价比的提高,使用费用的降低,激光应用将会进一步扩展。掌握激光器工作原理和其输出特性质质的产生机制,将是一个新时代科技人员基本素养的重要组成部分。

## 1.2 激光的本质特征

无线电振荡器、微波电子管等相干电磁波源的出现,大大推动了无线电技术的发展。在激光出现之前,光全息技术、相干光学计量技术和无线电技术等科学技术的发展对强相干光源提出了迫切的要求。例如,光全息技术原理早在1948年就被提出,在激光出现之前因为没有强相干光源一直没有获得实际应用。自发辐射光实质上是一种光频“噪声”。一个好的相干光源,应具有尽可能高的相干光强、足够大的相干面积和足够长的相干时间。同时增大相干面积、相干时间和相干光强对普通热光源来说是相互矛盾的要求。只有激光器才克服了矛盾,实现了相干面积、相干时间和相干光强的同步提高。对于激光本质特征的严格分析,需要使用量子电动力学,下面仅以著名的杨氏双缝干涉实验进行举例说明。

### 1.2.1 相干性波动分析

对相干的要求,光波与机械波一样,也是要求同频、同振动方向,以及稳定的相位差,也就是要求同波长、同偏振方向,以及相位差稳定。阻碍机械波相干的通常是第一二项要求,

阻碍光波的却常常是不满足第三项要求。普通热光源是原子、分子或者离子自发辐射发光,同种发光粒子发光的波长可以相同,发光的偏振方向也可以通过技术手段保证相同,但是,发光粒子自发辐射光初始相位和发光时间等方面相互之间没有相关性,造成相位差不稳定,直接进行干涉不能形成稳定的相干图样。

揭示光波动性的著名实验——杨氏双缝干涉实验,当初就是使用的普通热光源。托马斯·杨之所以能够使用普通热光源形成稳定的相干,是他巧妙地使用了三个狭缝,以系统结构保证相位差稳定的结果。

在杨氏双缝干涉实验中,如图 1.2.1 所示,第一个狭缝 S 位于下两狭缝  $S_1$  和  $S_2$  的对称线上;来自第一个狭缝的光会等光程的到达下两狭缝,来自两狭缝的光束到达观测屏上一点的光程差完全决定于两路径的光程差。只要来自第一个狭缝的光的相相位同,观测屏上一点处的相位差完全决定于  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝到达观测屏上这一点的的光程差  $\delta$ 。尽管普通光源中自发辐射光的初始相相位之间没有相关性,同一个发光粒子自发辐射光的初始相位还是相同的。一个发光粒子的自发辐射光经过第一个狭缝被  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝分束后打到观测屏上一点时干涉是相长还是相消完全决定于两路径的光程差  $\delta$ ,同样,另一个发光粒子自发辐射光在观测屏上同一点的干涉效果也是相同的,于是,因不同点对应两狭缝分束路径光程差  $\delta$  的不同,在观测屏上呈现出稳定的杨氏双缝干涉图样。

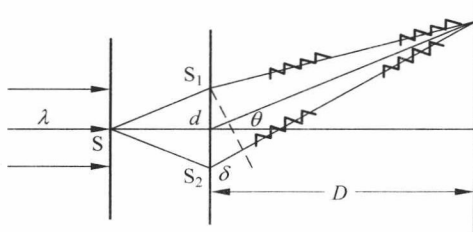


图 1.2.1 杨氏双缝干涉实验

在观测屏上,双缝干涉图样并不是在任意点都是清晰可辨的,随着对  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝对称线的偏离,偏转角  $\theta$  的增大,干涉图样逐渐模糊,不再是干涉图样,逐渐成为非相干光的叠加。之所以如此,是因为普通光源发光粒子自发辐射时间有限,所发出的光波列长度较短,不同光波列的初始相相位之间没有相关性,不能形成稳定的相位差。因此,在观测屏上一点,同一个发光粒子发出的不同光波列相遇时干涉是相长还是相消会快速变化,不能形成稳定的干涉图样,更像是非相干光的叠加。

杨氏双缝干涉实验干涉图样的逐渐模糊,也提供了光源相干长度的直接测量手段。从杨氏双缝干涉实验原理示意图中可见,一个发光粒子发出的同一个光波列在  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝分束后,只有两路径光程差  $\delta$  等于光波列长度所对应的偏转角处两光波列才能完全搭不上,才能是非相干光的叠加。所以,如图 1.2.1 所示,清晰干涉图样所对应最大偏转角对应的两路径光程差  $\delta$  即为光源相干长度:

$$L_c = \delta_{\max} = d \sin \theta_{\max} \quad (1.2.1)$$

也是光波列长度。

间歇发光的普通光源,按照傅里叶分析的观点,发出的并不是无限长的谐振波列,不能看作单色光,可以看作是在一窄小频率范围内多个无限长谐振波叠加形成的波包,这一窄小



频率范围即为普通光源的线宽  $\Delta\nu$ 。按照傅里叶分析,光波列长度或光源相干长度:

$$L_c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1.2.2)$$

由光源线宽  $\Delta\nu$  决定。

现在,物理实验室的杨氏双缝干涉实验通常是取消了第一个狭缝的双缝干涉实验。之所以能够如此,是因为光源使用的是激光器,不再是普通自发辐射光源;由于激光相干长度长、亮度高,不单实验装置容易调节,干涉图样清晰,观测屏边缘的干涉图样的模糊现象往往也不再出现了。可悲的是,取消第一个狭缝,既不利于对光波相干长度的感性认识,也不利于对空间相干概念的掌握。

如图 1.2.2 所示,若杨氏双缝干涉实验的第一个狭缝不是非常细,而是有相当的宽度  $l$ ,来自第一个狭缝的光就不会等光程的到达下两狭缝,使得来自  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝的光束到达观测屏上一点的光程差不再完全决定于两路径的光程差,结果,来自第一个狭缝不同位置的同一光波列在观测屏上产生的干涉图样清晰度下降,来自第一个狭缝不同位置的不同一光波列在观测屏上产生的干涉图样相互错位,也导致清晰度下降。理论和实验都证明,对于  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝相对于第一个狭缝张角  $\Delta\theta$  的情形,只有满足

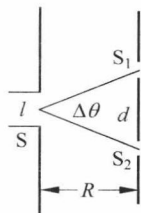


图 1.2.2 第一个狭缝的作用

$$l \leq \frac{R}{d} \lambda \approx \frac{\lambda}{\Delta\theta} \quad (1.2.3)$$

观测屏上才具有明显的干涉图样。

如果以一个光源代替杨氏双缝干涉实验的第一个狭缝,上述相干要求就是对光源空间相干性的要求。光源空间相干性是指光源横截面上多大面积内的光是相干的,通常使用相干面积描述。那么,对于距  $S_1$  和  $S_2$  两狭缝  $R$  处的光源,相干面积可表示为

$$A_c = l^2 \leq \left(\frac{\lambda}{\Delta\theta}\right)^2 \quad (1.2.4)$$

张角  $\Delta\theta$  之内的光波相干,要求光源面积须小于相干面积。

根据相干体积定义,可得光源的相干体积为

$$V_{cs} = L_c A_c = \left(\frac{\lambda}{\Delta\theta}\right)^2 \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{c^3}{\nu^2 \Delta\nu (\Delta\theta)^2} \quad (1.2.5)$$

即线宽  $\Delta\nu$  光源在相干体积内发出的张角  $\Delta\theta$  之内的光波相干。超出这一体积(或者张角超过  $\Delta\theta$ )的光不相干。

尽管相干体积的结论是由杨氏双狭缝实验分析得来的,但是具有普遍意义。对于普通光源来说,为了增大相干体积,可以采用光学滤波方法减小  $\Delta\nu$ 、加光阑缩小光源线度或远离光源等办法,但这一切都将导致光强的减小。这正是普通光源无法成为好相干光源的原因。

## 1.2.2 相干性光子分析

光量子学说认为,光是一种以光速运动的光子流,光子是自旋量子数为整数的玻色子,具有两种可能的独立偏振状态,处于同一状态的光子数目是没有限制,和其他基本粒子一样,光子具有能量  $h\nu$ 、动量  $\hbar k$  和质量  $\frac{h\nu}{c^2}$ ,它的粒子属性和波动属性密切相关。可以证明,同