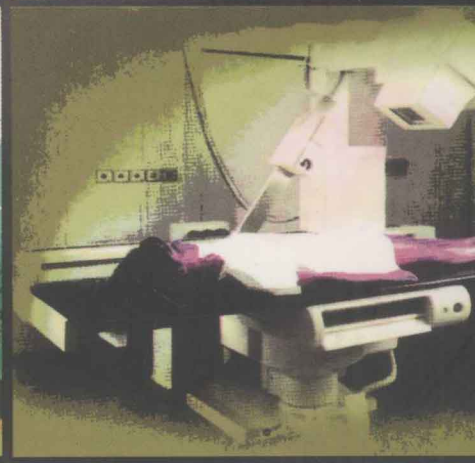
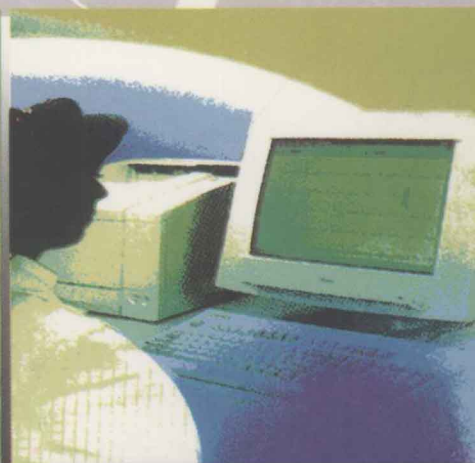


医学计量

Yixue Jiliang (下册)

郭勇 主编



中国计量出版社

医学计量

(下册)

郭 勇 主编

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

医学计量 / 郭勇主编. —北京: 中国计量出版社, 2001. 12

ISBN 7-5026-1577-6

I. 医… II. 郭… III. 医学—计量—技术培训—教材 IV. R311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 082131 号

内 容 提 要

本书为医学计量检定人员的培训教材。全书共分 3 大部分 12 章。第一部分是计量基础知识; 第二部分是医学计量专业知识; 第三部分是法律法规及管理。医学计量专业知识包括了医用热学计量、生物力学计量、医用电磁学计量、医用超声学计量、医用光学计量、医用生物化学计量、医用激光学计量、医用声学计量、医用放射学计量、大型医疗设备应用质量的检测与评审等 10 个专业, 其内容有专业基础知识, 工作计量器具原理与结构, 计量检定方法等。本书分为上、下两册, 上册包括第 1~7 章, 下册包括第 8~12 章。

本书可供医学计量检定人员、监督管理人员, 医疗设备采购、维修、管理人员及医务工作者使用, 也可作为医学院校及广大医务工作者的参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787mm×1092mm 16 开本 印张 63 字数 1461 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—4 000 定价 (上、下册) 120.00 元

《医学计量》编审委员会

主 任	李建华				
委 员	袁天锡	任国荃	闫宇华	李 谊	尹永祥
	叶晓炜	潘 伟	纪春雷		

编审者名单

主 编	郭 勇				
副主编	何铁春	任国荃	闫宇华	潘 伟	纪春雷
编 委	孙志辉	李咏雪	江玉柱	贾建革	黄继伟
	李祖江	熊陆平	杨再富	于黎明	骆亿生
	刘晓军	高 慧	曹德森	王汝星	庞庆范
	宋立为	李国庆	洪德明	吴建刚	李 毅
	孙喜文				
主 审	叶德培	闫宇华	孙志辉		
审稿人	叶德培	何铁春	张世真	宋贵芳	罗二平
	王玉平	高光煌	李兴启	郭 勇	林意群
	闫宇华	潘玉兰	杜和诗	杨彦琴	任国荃
	潘 伟	纪春雷	孙志辉		

前言

科技要发展,计量须先行。计量科技水平是一个国家科学技术实力的重要标志,是国家综合实力的具体体现。在现代医学和医学工程中,计量工作的重要性就更加明显,在诊断中使用的血压计、心电图机、脑电图机、X线机、超声波诊断仪和X-CT等,在治疗中使用的激光治疗仪、紫外线治疗仪、高压氧舱和用于放疗的直线加速器、 γ 刀、中子刀等等,如果不按要求提供准确可靠的量值,精度失准或误差过大,则很难保证医疗诊断和临床的质量。医学计量是医药卫生建设的重要技术基础,是促进医疗卫生事业发展的一项重要工作,是现代医学管理的重要内容。

医学计量的主要任务是,通过先进的计量测试技术手段,对在医学诊断、治疗、卫生防疫、生化分析、制剂和科研中使用的医疗卫生装备进行校准/检定,使其在研制、生产和使用的全过程中各项性能参数准确和统一。

自1985年《中华人民共和国计量法》颁布以来,国家又明确规定了55项,111种强制检定项目,其中与医疗卫生、安全防护等人体安全密切相关的“医学计量项目”占总数的2/3。与其他行业的计量工作相比,我国的医学计量工作起步较晚,与此相对应的科研与培训也较落后,至今尚无一本完整的医学计量培训教材。随着高新技术的发展,各种新型医疗设备不断出现并应用于临床,诊断、治疗的定量规范化已成为现代医学科学的发展方向,医疗设备质量控制与保障对医学计量工作提出了新的课题。基于上述原因,全军医学计量测试研究中心组织编写了本书,力图填补空白,促进医学计量学科发展。

参加本书编写的人员均为从事医学计量工作多年,经验丰富的专家。他们在编写过程中,根据国家有关法律法规、检定规程、标准、规范,查阅了大量技术资料文献,以近10年来的医学计量培训讲义为基础,结合计量工作开展的实际情况,辅以亲身工作经验体会、科研成果,使本书的内容具有较强的规范性、科学性和实用性。本书共分3大部分12章。第一部分是计量基础知识;第二部分是医学计量专业知识;第三部分是法律法规及管理。第二部分包括各个专业基础知识,工作计量器具原理与结构,计量检定方法与注意事项等。

由于本书包含内容多,专业涉及面广,各章节分别由12个人执笔撰写。其中,第一章由孙志辉编写,第二章由李咏雪编写,第三章由江玉柱编写,第四章由贾建革编写,第五章由黄继伟、宋立为编写,第六章由李祖江编写,第七章由熊陆平编写,第八章由杨再富编写,第九章由黎明编写,第十章由骆亿生编写,第十一章由刘晓军、李国庆、洪德明编写,第十二章由高慧编写。

本书可供医学计量检定人员、监督管理人员,医疗设备采购、维修、管理人员及医务工作者使用,也可作为医学院校及广大医务工作者的参考书。

本书编写过程中,得到了中国人民解放军总装备部技术基础局,总装技术基础管理中心,总后勤部卫生部药品器材局有关领导以及中国计量出版社马纯良社长、朱和平主任、李素琴编辑的大力支持和具体指导,在此一并表示衷心的感谢!

由于时间紧迫，限于编写者的水平，书中难免有疏漏之处，诚请广大读者和同行批评指正，以便再版时修改和完善。

编 者

2001 年 11 月

目 录

(下册)

第八章 医用激光计量	(1)
第一节 激光器基础与医学应用.....	(1)
一、激光基本原理与特性.....	(1)
二、几种典型的激光器.....	(5)
三、激光医学应用概述.....	(26)
第二节 医用激光辐射参数与测量仪器.....	(28)
一、医用激光辐射参数.....	(28)
二、光辐射测量仪器原理.....	(31)
三、测量仪器的性能.....	(40)
四、几种典型的测量仪器.....	(43)
五、光辐射测量仪器的使用.....	(49)
第三节 医用激光计量检定.....	(52)
一、激光功率计检定.....	(52)
二、激光能量计检定.....	(59)
三、医用激光源检定.....	(63)
第九章 医用声学计量	(71)
第一节 声学基础知识.....	(71)
一、声音的产生与传播.....	(71)
二、声学测量与分析.....	(82)
三、常用声音信号.....	(87)
四、噪声.....	(90)
第二节 医用声学计量及临床听力设备.....	(91)
一、医用声学计量设备.....	(91)
二、临床听力设备.....	(101)
第三节 听力计量设备的计量检定与校准/ 测试.....	(111)
一、纯音听力计气导检定.....	(111)
二、纯音听力计骨导检定.....	(115)
三、纯音听力计插入式耳机听力零级校准与测试.....	(117)
四、纯音听力计高频耳机听力零级校准与测试.....	(118)
五、声导抗仪校准与测试.....	(118)
六、听诱发电位仪校准与测试.....	(119)
七、耳声发射仪校准与测试.....	(119)

八、隔声室测试·····	(120)
九、声场测试·····	(122)
十、护听器测试方法·····	(123)
第十章 医用放射学计量·····	(125)
第一节 专业基础知识·····	(125)
一、医用放射学计量的范围·····	(125)
二、放射学基础知识·····	(125)
三、辐射剂量学中的物理量和单位·····	(130)
四、辐射量测量方法·····	(135)
第二节 放射装置及测量仪器工作原理·····	(138)
一、放射治疗装置·····	(138)
二、放射诊断装置·····	(144)
三、医用放射性核素·····	(151)
四、辐射加工级装置·····	(153)
五、剂量测量仪器·····	(155)
六、医用诊断和防护测量仪器·····	(179)
第三节 检定校正方法·····	(183)
一、放射治疗装置·····	(183)
二、医用诊断装置·····	(202)
三、医用放射源·····	(210)
四、辐射加工级装置·····	(210)
五、治疗水平剂量计·····	(213)
六、医用诊断和防护测量仪器·····	(218)
七、检定证书和检定结果通知书·····	(228)
第十一章 大型医疗设备应用质量的检测与评审·····	(230)
第一节 X射线计算机断层摄影装置(X-CT)	
应用质量检测与评审·····	(230)
一、X-CT的发展和基本原理·····	(230)
二、CT质量保证概述·····	(235)
三、CT机的主要性能参数及影响因素·····	(238)
四、CT机主要性能参数的检测方法·····	(242)
五、Radcal 剂量体模检测方法·····	(248)
六、CATPHAN 性能体模检测方法·····	(248)
七、Victoreen 性能体模检测方法·····	(251)
第二节 磁共振成像装置(MRI)应用质量检测与评审·····	(253)
一、MRI的发展简史·····	(253)
二、MRI的基本原理·····	(253)
三、核磁共振成像方法·····	(254)

四、MRI 成像系统·····	(255)
五、MRI 质量保证工作的现状和难点·····	(257)
六、MRI 图像质量参数的检测原理和方法·····	(257)
七、Magphan 性能体模检测方法·····	(266)
八、Victoreen 性能体模检测方法·····	(268)
第三节 直线加速器的原理及应用质量检测·····	(269)
一、直线加速器的原理·····	(269)
二、直线加速器的计量检定方法及规程·····	(286)
第四节 单光子发射计算机断层扫描装置(SPECT)原理 及应用质量检测·····	(291)
一、简介·····	(291)
二、SPECT 的组成及原理·····	(291)
三、SPECT 设备的应用质量检测·····	(303)
四、SPECT 应用质量性能检测基本术语·····	(345)
第十二章 计量法律、法规与管理·····	(350)
第一节 国家有关法律、法规·····	(350)
一、计量法律、法规概述·····	(350)
二、法定计量单位·····	(354)
三、计量器具与管理·····	(354)
四、计量检定管理·····	(365)
五、计量检定印、证的管理·····	(369)
六、计量监督·····	(371)
七、计量法律责任·····	(379)
第二节 军事医学计量与管理·····	(382)
一、军事医学计量管理机构·····	(382)
二、军事医学计量技术机构·····	(382)
第三节 军事医学计量测量标准的考核与管理·····	(383)
一、建立测量标准前的调研·····	(384)
二、测量标准的建立与考核·····	(385)
三、测量标准的复查、更换、封存、撤销和使用中的监督管理·····	(398)
四、测量标准的溯源和量值传递·····	(400)
五、测量标准的维护·····	(404)
六、检定、校准的记录和证书·····	(405)
第四节 计量人员的考核与管理·····	(407)
一、计量检定人员的考核与管理·····	(408)
二、主考员的考核与管理·····	(409)
第五节 军事医学计量技术机构考核与管理·····	(410)
一、军事医学计量技术机构考核标准·····	(410)

二、军事医学计量技术机构考核的准备和程序·····	(413)
三、技术机构考核表的填写·····	(415)
四、军事医学计量技术机构管理·····	(417)
第六节 校准和测试实验室的认可·····	(418)
一、实验室的质量体系·····	(418)
二、校准和测试实验室能力的通用要求·····	(425)
三、实验室质量体系的建立·····	(431)
四、实验室技术能力的证明·····	(435)

第八章 医用激光计量

激光医学是一门新兴的边缘学科,虽然只有 40 年左右的历史,但已经在基础医学研究、医学诊断与临床治疗等各方面取得了很大的发展。目前,激光医学已发展成为一门体系完整、相对独立的学科,在医学中发挥着越来越重要的作用。

在激光医学应用中,为了量值准确、统一,其计量要求是非常高、非常严的。这对于从事激光医学计量研究、测试工作的人员来说,对医用激光计量有一个全面、深刻的认识是基本的和必需的。医用激光计量所涉及的知识包括激光和激光器的基础知识与医学应用、激光测量仪器的基本原理与特性、激光医学计量检定体系和检定技术等等。本章将对上述内容逐一介绍。

第一节 激光器基础与医学应用

激光是一种单色性佳、相干性强、方向性好、亮度高的相干光。“激光”的英文名称是“Laser”,即“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”(辐射的受激发射引起的光放大)第一个字母的缩写。可见,激光的物理基础是“受激辐射”,这一理论是由爱因斯坦于 1916 年提出的。但直到 1960 年,才由梅曼制成了世界上第一台激光器——红宝石激光器。在该激光器问世的第二年,就开始用于视网膜凝固治疗。以后随着激光技术的发展和各种新型激光器的出现,激光医学应用范围迅速拓宽。

一、激光基本原理与特性

(一) 物质能级与受激辐射的概念

按照近代物质结构理论,所有物质都是由大量的原子、分子或离子等微观粒子组成的。原子是组成物质的基本单位。根据量子理论,处于束缚态的微观粒子的内部结构只能处于一系列分立的稳定状态中。处于不同状态的粒子具有不同的、不能连续变化的特定能量,这些特定的能量值称为能级。粒子的最低能级称为基态,除此以外的高能级称为激发态。

处于不同能级的粒子不断地在能级之间跃迁,同时吸收或辐射能量。爱因斯坦将跃迁过程分为两类:受激跃迁与自发跃迁。其中受激跃迁包括受激辐射和受激吸收,而自发跃迁只有自发辐射。为了简化问题,我们从粒子系统的大量能级中取出两个能级 E_2 和 E_1 ($E_2 > E_1$)。上述三种跃迁过程可以描述如下(图 8-1)。

1. 自发辐射

处于激发态的粒子是不稳定的,它们在激发态停留的时间一般都非常短,大约在 10^{-8} s 的数量级。处于较高能级 E_2 的粒子会自发地跃迁到较低能级 E_1 ,这一过程称为自发跃迁。跃迁过程中释放出的能量为两能级的能量差 ($E_2 - E_1$),如果这部分能量以电磁波(光子)的形式释放出来,则该过程称为自发辐射(图 8-1(a)),辐射光子频率为 $(E_2 - E_1)/h$,式

中 h 是普朗克常数。如果能量以热或其他非辐射的形式释放出来，则称为无辐射跃迁。

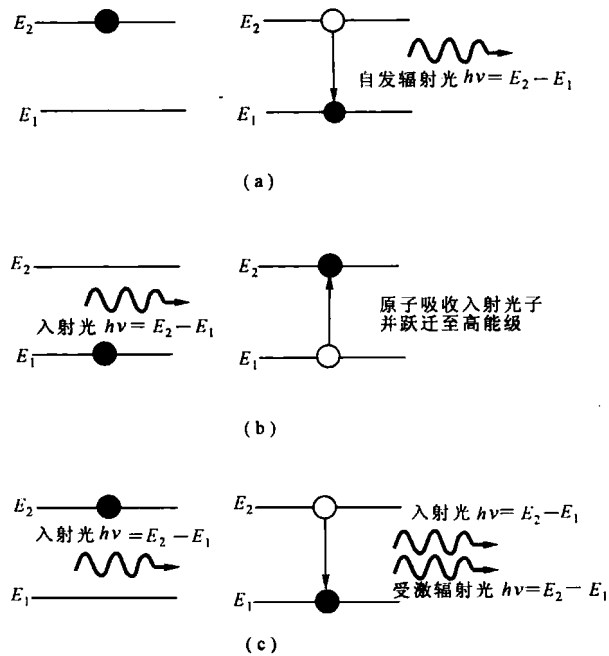


图 8-1 原子的自发辐射、受激辐射和受激吸收示意图

2. 受激辐射

仍考察处于高能级 E_2 的原子。当有一频率为 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 的电磁波（光子）从外部射向原子时，由于入射的频率与原子的跃迁频率相同，该入射波将驱使原子以一定的几率产生 $E_2 \rightarrow E_1$ 的跃迁。同时能量差 $(E_2 - E_1)$ 将以电磁波的形式释放出来，这一过程称为受激辐射（图 8-1（c））。

3. 受激吸收

假定原子最初处于低能级 E_1 。如果这个能级是基态，则只要原子不受到某种外来的激励，它将长期处在这个能级上。如果有频率 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 的外部电磁场作用于原子，则原子将按一定几率吸收外部电磁场的能量，而上升到 E_2 能级，这一过程称为受激吸收（图 8-1（b））。显然，受激吸收与外界电磁场有关，它是不可能“自发”进行的。没有外界电磁场的激励并提供能量，处于低能级的原子不可能自发地跃迁到高能级。受激吸收也就是我们通常所说的吸收。

应该指出，对于一个粒子系统，当自发辐射一产生，则上述三个过程总是不可分割地同时存在；对其中某一个粒子而言，当外来光子逼近它时，其在某两个能级间发生受激吸收（当处于低能级）和受激辐射（当处于高能级）的几率是相同的。因此，要使受激辐射大于受激吸收，必须使高能级的粒子数 N_2 多于低能级的粒子数 N_1 ，即要求粒子数反转。

（二）激光器的基本结构原理

能够产生激光辐射的器件称为激光器。激光器的基本结构通常包括三部分：激光工作

物质、泵浦源和谐振腔。泵浦源把外界能量（电能、光能、化学能等）提供给激光工作物质，使物质粒子（分子、原子或离子）由基态跃迁到激发态，形成粒子数反转，如果满足振荡阈值条件（增益大于损耗），则自发辐射光在通过工作物质时就会因受激辐射而得到放大，进而通过谐振腔的选模作用获得激光输出。

1. 激光工作物质

根据能量最小原理，处于基态的原子（粒子）最稳定；处于激发态的原子，因其能量较高而不稳定，它只能在激发态停留约 10^{-8} s（能级寿命）的时间。但有一些物质的能级中有些特殊的激发态，原子在其上停留时间可长达 10^{-3} s 以上，这种特殊的激发态称为亚稳态。具备亚稳态能级结构的物质，就能用作激光器的工作物质。

激光工作物质的种类很多，分类方法也很多。根据其物理状态，可以分为气体（如 Ne、CO₂、N₂、Ar⁺等）、固体（如红宝石、Nd³⁺:YAG 等）、液体（如有机染料）、半导体（如 GaAs、GaAlAs 等）、自由电子等等，相应的激光器也分别称为气体激光器、固体激光器、液体（染料）激光器、半导体激光器和自由电子激光器；根据物质能级结构，可以分为三能级系统（如红宝石）、四能级系统（如 Ne、Nd³⁺:YAG 等）。

2. 泵浦源

泵浦就是借助适当的方法把某种形式的能量提供给粒子系统，使处于基态的粒子获得能量后跃迁到较高能级的激发态，并在粒子系统的两个或几个能级之间形成粒子数反转的过程。泵浦方式主要包括光泵浦、放电泵浦、热泵浦、化学泵浦、电流注入泵浦、核泵浦等。其中最主要的是光泵浦和放电泵浦。

光泵浦是采用外部光源辐照激光工作物质，通过选择性吸收，在工作物质的某些特定能级间形成粒子数反转分布。脉冲激光器常用的泵浦光源是脉冲氙灯；连续激光器常用的泵浦光源有连续氙灯、氙灯、钾-钠灯、汞灯等。激光也可以作为泵浦光源，称之为激光泵浦。光泵浦最常用于固体激光器和染料激光器，某些气体和半导体激光器也采用光泵浦。

放电泵浦主要用于气体激光器，所以也称为气体放电泵浦。即：在充有一定气压的工作气体的激光管的两个电极之间加上高压，形成强电场，阴极发射的电子被电场加速而获得足够的动能后，与工作气体粒子发生碰撞并使之激发到高能态并最终形成粒子数反转。

热泵浦是利用热能造成粒子数反转，如气动二氧化碳激光器。化学泵浦是利用化学反应释放出的化学能激发工作物质，造成粒子数反转，如氟化氢（HF）激光器。电流注入泵浦是用于半导体激光器的泵浦方法，即在半导体 p-n 结正向偏置电压所注入的电流的作用下，有源层内形成价带和导带间的粒子数反转分布。核泵浦是利用核裂变产物和高能重粒子束与气体相互作用，使之激发或电离以形成粒子数反转，目前这种激光器仍处于研究阶段。

3. 谐振腔

要实现激光振荡输出，除了能够提供光放大的激光工作物质外，还必须具备正反馈、谐振和输出系统，这些功能由谐振腔来完成。在激活物质的两端恰当地放置两个反射镜片，就构成一个最简单的谐振腔。谐振腔提供正反馈就是使光波反复通过工作物质，这等于延长了工作物质的作用长度。谐振的过程有选模作用，即谐振腔只允许单模或少数几个轴向模式振荡。

激光发展史上最早提出的谐振腔是平行平面腔，即法布里-珀罗腔，由两块平行平面反射镜组成。随后广泛采用的是由两块共轴球面镜构成的谐振腔，称为共轴球面腔。反射镜中有一个（或两个都）为平面的谐振腔是共轴球面腔的特例。理论分析这类谐振腔时，可以认为其侧面没有光学边界，因而也称之为开放式谐振腔，简称开腔。气体激光器是采用开腔的典型例子。

固体激光器则与上述不同。由于固体激光工作物质的折射率较高（如红宝石的折射率为 1.76），在侧壁磨光的情况下，那些与轴线夹角不太大的光线将在侧壁上发生全反射。如果谐振腔的反射镜紧贴着激光棒的两端，则称为闭腔；如果固体激光器的反射镜和激光棒互相分开且分离得比较远，且棒的直径远大于激光波长，则这种谐振腔的特性基本上与开腔类似。

另一种谐振腔叫做气体波导腔，其典型结构是在一段空心介质波导管两端适当位置处放置两块适当曲率的反射镜片。这种谐振腔与开腔的差别是：波导管的孔径较小（虽然仍远大于波长），因而不能忽略侧面边界的影响。

以上几种谐振腔的典型结构如图 8-2 所示。这些谐振腔都只有两个反射镜，结构比较简单。由两个以上的反射镜构成的谐振腔也比较常见，如折叠腔和环形腔。在开腔内插入透镜一类的光学元件，就可以构成复合腔。所有上述谐振腔都是端面反馈式的。近年来新发展了分布反馈式谐振腔，主要在半导体激光器和集成光学中使用。

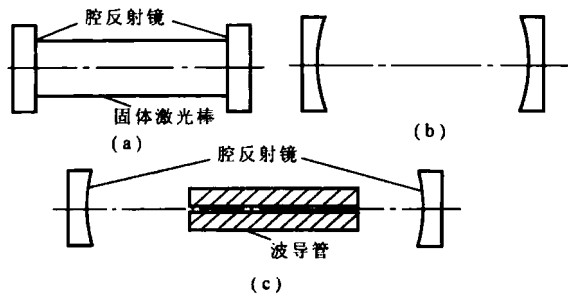


图 8-2 几种谐振腔的典型结构

(a) 闭腔 (b) 开腔 (c) 气体波导腔

(三) 激光的特性

激光具有高度的单色性、相干性、方向性和亮度。激光的四条特性本质上可归结为一点，即激光具有很高的光子简并度，或者说，在任一稳定振荡模式内都包含有数目极大的光子。激光的这一特性正是由于受激辐射的本性和谐振腔的选模作用才得以实现的。

1. 单色性

光源的单色性是指光源发出的光强按频率（或波长）分布曲线的狭窄程度，通常用谱线宽度描述。线宽越小，光源的单色性越好。我们知道，光源中的发光物质包含着大量能级。对于普通光源，这些能级之间的光学允许跃迁会导致各种频率的光谱发射，甚至呈连续分布。即使对其中某一条谱线而言，由于谱线加宽，线宽也相当大。普通光源中，单色

性最好的是氪灯 (^{86}Kr) 的 605.7nm 谱线, 其线宽约 400MHz。He-Ne 激光器中 Ne 原子 632.8nm 自发辐射谱线的线宽约 2000MHz。

激光的单色性较普通光源要好得多。激光高度单色性的原因有两个: 一是在大量能级的发光跃迁中, 只有一对特定能级的跃迁能够得到放大; 二是在这一跃迁谱线的宽度内, 只有满足谐振频率的光波才能在谐振腔中存在。大多数情况下, 这些频率的数目有数十个甚至上百个。但通过选模技术使激光器单模运转时, 激光的线宽就可以达到相当窄的程度。例如, 单模稳频 He-Ne 激光器 632.8nm 谱线的线宽一般可窄到 0.01MHz 以下, 其单色性较相应的自发辐射提高 4 个量级以上。

2. 相干性

光的相干性分为时间相干性和空间相干性。时间相干性是空间同一点上不同时刻光场的相干程度, 它与光源的单色性密切联系在一起。与普通光源相比, 激光器任何一个稳定振荡模式的线宽都很窄, 即有很高的单色性, 因而其时间相干性也非常高。不过应当注意的是, 多模激光器的不同振荡模式之间是不相干的。

空间相干性则是指同一时刻光波场上不同点光场的相干程度。对于普通光源, 它与光源的线度有关, 为了提高空间相干性, 必须在光源前加上光阑以限制其有效线度。激光与普通光完全不同, 由于它的受激辐射本质, 同一模式的激光在位相、频率、偏振和传播方向上都保持相同。在单模激光器前边直接放置一双缝, 不论光斑面积多大, 在双缝前的屏上都能形成非常清晰的干涉条纹。单模激光波前上任意两点都是相干的, 因此是完全空间相干光。

3. 方向性

激光器发射的光束局限于很小的立体角 Ω 范围内。与普通光源向 4π 立体角发射相比较, 方向性提高了 $4\pi/\Omega$ 倍。如果通过横模选择技术使激光只有基横模输出, 激光的方向性还可以得到进一步改善。但即使在后一种情况下, 由于衍射, 光束仍有一定的发散。光束的方向性可以用发散角描述, 基横模高斯光束的远场发散角:

$$\theta_f = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (8-1)$$

对于腔长为 0.4m 的共焦腔 He-Ne 激光器, 可以求出基横模的远场发散角约为 1mrad。

4. 亮度

亮度是表征面光源在一定方向范围内辐射强弱的物理量。激光由于辐射功率集中在很小的立体角范围内, 因而在传播方向上亮度非常高。例如, 输出功率为 1mW 的 He-Ne 激光器, 在各类激光器中属于功率较低的器件, 但其亮度仍然高达 $10^9 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (设腰斑半径为 1mm, 发散角为 1mrad)。作为比较, 输出功率 100W 的高压汞灯, 亮度仅为 $10^6 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。就是说, 1mW 激光器的亮度可以达到 100W 普通光源的 1000 倍。

二、几种典型的激光器

医用激光器的种类繁多, 波长覆盖范围也很广。虽然各种激光器的基本结构类似, 都是由激光工作物质、泵浦源和谐振腔构成, 但每种激光器又各有其自身结构特点和发光机理。我们在此首先介绍 He-Ne 激光器、 CO_2 激光器和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器, 这三种激光器在

医学上应用较早，目前应用也比较广泛，而且分别是激光小、中功率标准装置和激光能量标准装置的照射光源。然后介绍目前医疗应用中倍受重视的四种激光器，即氩离子激光器、半导体激光器、半导体激光泵浦的固体激光器和准分子激光器。限于篇幅，其他激光器不作介绍，表 8-1 列举了较常用的医用激光器的基本参数和主要用途。

表 8-1 常用的医用激光器

激光器	波长/nm	典型的脉冲宽度	主要用途
ArF	193	(10~20) ns	光蚀除
Ar ⁺	488/514	连续	凝固
Kr ⁺	531/568/647	连续	凝固、光动力
铜蒸气	511/578	准连续	凝固、低强度照射
金蒸气	628	准连续	光动力、凝固
He-Ne	633	连续	低强度照射
红宝石	694	1μs ~250μs	凝固
染料	450~900	连续或脉冲	光动力、凝固
半导体（二极管）	670~900	连续或脉冲	低强度照射、光动力
钛蓝宝石	660~1160	10fs~100ps	电离蚀除
变色宝石	700~830	50ns~100μs	凝固
自由电子	800~6000	(2~10) ps	电离蚀除
连续 Nd ³⁺ :YAG	1064	连续	凝固
调 Q Nd ³⁺ :YAG	1064/532(倍频)	(5~20) ns	凝固、切割
锁模 Nd ³⁺ :YAG	1064	(30~100) ps	电离蚀除
Ho ³⁺ :YAG	2120	100ns~250ms	汽化、凝固
Er ³⁺ :YAG	2940	100ns~250ms	汽化、凝固
CO ₂	10600	连续	汽化、凝固

（一）氦-氖激光器

He-Ne 激光器属于中性原子气体激光器，是最早研制成功的气体激光器。这种激光器结构简单，操作方便，工作可靠，因而应用非常广泛。

1. 结构

He-Ne 激光器由放电管、谐振腔和泵浦电源组成。放电管是气体放电区域，也是产生激光的地方。放电管通常由毛细管和贮气室构成。放电管中充有一定比例的 He、Ne 气体，当电极加上高压后，毛细管中的气体开始放电，使氖原子受激，产生粒子数反转。贮气室与毛细管相连，这里不发生气体放电，其作用是补偿因慢慢漏气及管内元件放气或吸附气体所造成的 He、Ne 气体比例及总气压的变化，延长器件寿命。放电管的阳极一般用钨棒制成，阴极常用铝及其合金制成圆筒状。谐振腔一般采用平面和凹面反射镜组成的平凹腔，两个反射镜都镀有多层介质膜，一个是全反射镜，另一个是激光输出端的部分反射镜。泵浦电源为直流高压小电流电源。

He-Ne 激光器结构形式多样, 按照谐振腔反射镜与放电管接触状况的不同, 可以分为内腔式、外腔式和半内腔式, 按照阴极及贮气室位置的不同, 又可分为同轴式、旁轴式和单毛细管式, 如图 8-3 所示。放电管与反射镜分离时, 其端面要贴窗片, 即布儒斯特窗, 这种情况下输出激光为振动方向平行于入射面 (纸面) 的线偏振光。

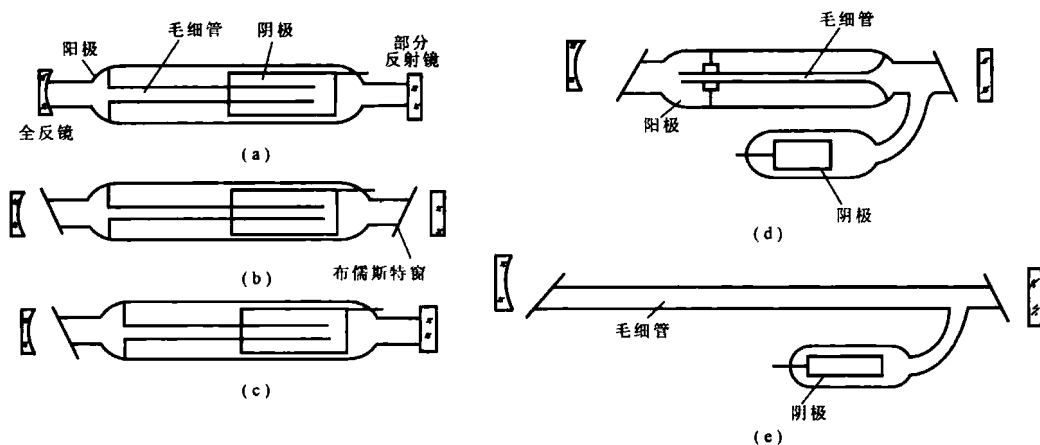


图 8-3 He-Ne 激光器结构示意图

(a) 内腔式 (b) 外腔式 (c) 半内腔式 (d) 旁轴式 (e) 单毛细管式

2. 原理

He-Ne 激光器的工作气体是 He 和 Ne, 其中产生激光跃迁的是 Ne 气。He 是辅助气体, 用以提高 Ne 原子的泵浦效率。图 8-4 为 He 和 Ne 原子的能级图。He 原子有两个电子, 基态时两个电子都处在 $1s$ 壳层上, 即 1^1S_0 态; 受激后其中任何一个电子从 $1s$ 壳层跃迁到 $2s$ 壳层, He 原子就处于 2^3S_1 、 2^1S_0 激发态, 这两个都是亚稳态。Ne 原子有 10 个电子, 正常状态下电子构型是 $1s^2 2s^2 2p^6$, 其中 6 个 $2p$ 电子中任一个激发到 $3s$, $3p$, $3d$, ... 等壳层就构成 Ne 的激发态。图 8-4 中, 这些激发态用 $1S$ 、 $2S$ 、 $3S$ 、 $2P$ 、 $3P$ 等符号 (帕邢记号) 表示, 其中 $1S$ 、 $2S$ 和 $3S$ 分别由 4 个子能级组成, 而 $2P$ 和 $3P$ 则各包含了 10 个子能级。这些子能级在帕邢记号中用右下角阿拉伯数字表示, 如 $3S_2$ 、 $2P_1$ 等。由于 He 原子的 2^1S_0 和 2^3S_1 能级分别与 Ne 原子的 $3s$ 和 $2s$ 能级十分靠近, 因而通过共振能量转移 (第二类非弹性碰撞) 可以将基态 Ne 原子有效地泵浦到 $3s$ 和 $2s$ 能级。电子和基态 Ne 原子直接碰撞也可以引起 Ne 原子激发, 但其贡献较共振能量转移要小得多。

Ne 原子 S 态寿命约为 100ns, 而 P 态的寿命是 10ns 左右, 两者相差一个数量级, 所以 $3S$ 和 $2S$ 态可以作为激光上能级, $3P$ 和 $2P$ 态可以作为下能级。根据能级跃迁的选择定则, Ne 原子可以产生的谱线有很多条, 其中最强的谱线有三条, 即 632.8nm、3.391 μ m 和 1.152 μ m, 分别对应的能级跃迁为 $3S_2 \rightarrow 2P_4$ 、 $3S_2 \rightarrow 3P_4$ 和 $2S_2 \rightarrow 2P_4$ 。由于 632.8nm 和 3.391 μ m 跃迁具有同一激光上能级, 而 632.8nm 和 1.152 μ m 跃迁的下能级相同, 因而谱线之间将产生竞争, 即一条谱线的增益和输出功率会因其他谱线的存在而下降。例如, 632.8nm 跃迁由于 3.391 μ m 的存在而消耗了上能级粒子数, 同理 1.152 μ m 谱线的振荡增加了它的下能级粒子数, 于是引起 632.8nm 跃迁粒子数反转的减少。为了消除这种谱线竞争效应, 需要通