

激光辐射伤医学防护

主 编 高光煌
副主编 陈 迹



GUANG
FUSHESHANG
YIXUE FANGHU

军事医学科学出版社

激光辐射伤医学防护

主 编 高光煌

副主编 陈 迹

编 委 (按执笔章节顺序)

陈宗礼 高光煌 张桂素

刘海峰 陈 迹 罗振坤

军事医学科学出版社

内 容 提 要

本书用深入浅出、通俗易懂的语言,简明扼要地阐述了激光辐射对人体健康的伤害及其医学防护知识,各章分别介绍了激光技术及其军事应用、激光器主要辐射参数测量、激光对眼和皮肤的损伤机理和症状、激光器危害的控制和防护措施等。本书是作者根据 20 多年研究成果,并参考了大量文献资料撰写的,是相关专业少有的完全由国内作者完成编著工作的一部专业知识比较系统、适用性很强的激光安全防护书籍。

本书主要适用于从事军用激光器研制、生产、使用的专业技术人员和我军各军兵种广大指战员阅读,也适用于其他应用领域内的激光职业工作者,并可作为高等院校相关专业教科书和师生参考书。

* * *

图书在版编目(CIP)数据

激光辐射伤医学防护/高光煌主编;陈宗礼等编著. —

北京:军事医学科学出版社 1998.5

ISBN 7-80121-076-X

I. 激… II. ①高…②陈… III. 激光辐照-辐射防护 IVR·142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 25270 号

* *

军事医学科学出版社出版

(北京市太平路 27 号 邮政编码: 100850)

新华书店北京科技发行所发行

北京四环科技印刷厂印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13 字数: 325 千字

1998 年 5 月第 1 版 1998 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 24.00 元

(购买本社图书,凡有缺、损、倒、脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

激光的出现,为人类提供了能量高度集中、方向性极强、颜色极纯、近似平行传输的特殊光束。作为一项高新技术,激光在科学研究、医疗卫生、机械加工、国防现代化等领域中得到广泛应用,在军事上的应用更是引人注目,发展迅速。自1961年美国研制世界上第一具军用激光测距机后,短短的36年中,激光测距、制导、雷达、通信、模拟射击训练等数百种型号的军用激光器材已在数十个国家的陆、海、空军中使用;70年代后期研制成的激光致盲武器,已有车载、机载、舰载及肩扛式四种类型10余种型号。几个主要军事强国还在竞相发展拦击或摧毁空中飞行目标的战术激光防空武器和战略激光防御武器。由此可见,无论平时还是战时,广大激光工作者和部队指战员将面临激光辐射伤的威胁,尤其是眼损伤,激光医学防护因而得到普遍重视,并成为军事医学的一项重要研究课题。为适应激光技术广泛应用的需要,作好打赢高技术局部战争的准备,减少或避免激光辐射伤,保障部队战斗力,作者根据20多年的研究成果,参阅了国内外同行发表的最新资料,编著了本书。

本书阐述了激光辐射对人体健康的伤害作用及其安全防护的基本知识。全书分七章,第一章为激光基础,扼要介绍激光器基本工作原理和类型,由陈宗礼高级实验师执笔;第二章介绍激光技术在武器装备和军事训练中的应用,由高光煌研究员执笔;第三章介绍与安全防护有关的激光器主要辐射参数测试方法,由张桂素高级实验师执笔;第四章为眼组织光谱特性、损伤机理、症状、损伤阈值及典型激光人眼损伤事故,由刘海峰副研究员执笔;第五章介绍皮肤组织光谱特性、损伤机理、症状和损伤阈值,由陈迹研究员执笔;第六章介绍不同危害类别、不同使用环境的激光器危害控制方法,由高光煌研究员执笔;第七章介绍眼和皮肤激光照射限值、防护措施及安全防护教育等,由罗振坤副研究员执笔。书中还附录了5项激光安全防护国家军用标准。

本书是一部知识系统、内容新颖、适用性很强的专业书籍。作者采用了集基本知识介绍、基础理论分析、技术法规应用和行为规范要求为一体的写作方法,既汇集了自己的科研成果,又引用国内外同行的文献资料,并跟踪该领域的最新研究进展,在语言上力求通俗易懂,使之具有可读性。

本书主要适合于从事军用激光器研制、生产、使用的专业技术人员和广大指战员,也适合于医疗卫生、机械加工、科学研究等领域内的激光职业工作者阅读,并可作为理工医类高等院校相关专业师生的教学参考书。

激光辐射伤医学防护涉及到光、机、电、生物学、医学、劳动卫生学等多学科知识,因作者缺乏经验,水平有限,书中内容安排、理论观点、文字表述等方面的缺点甚至错误在所难免,热忱欢迎广大读者批评指正。

我国著名辐射防护专家叶常青研究员对本书编写提出过宝贵意见,军事医学科学院放射医学研究所毛秉智研究员以及胡向军、杨景庚、张东蕾等同志在本书出版过程中给予了大力支持和帮助,作者在此一并表示感谢!

作 者

1997年10月10日于北京

目 录

第一章 光、激光和激光器	(1)
第一节 光	(1)
第二节 激光	(3)
第三节 激光器	(8)
第四节 激光器实用技术	(16)
第二章 激光技术军事应用	(26)
第一节 激光与军事	(26)
第二节 军用激光器材	(28)
第三节 激光武器	(40)
第三章 激光器主要辐射参数测量	(48)
第一节 概述	(48)
第二节 激光辐射能量和辐射功率测量	(50)
第三节 激光脉冲宽度测量	(64)
第四节 光束发散度测量	(66)
第四章 激光辐射眼损伤	(71)
第一节 眼组织结构和光学特性	(71)
第二节 激光辐射眼损伤机理	(76)
第三节 激光辐射对眼的危害	(78)
第四节 激光眼损伤阈值	(81)
第五节 激光人眼损伤事故	(83)
第五章 激光辐射皮肤损伤	(89)
第一节 皮肤组织结构和光学特性	(89)
第二节 激光辐射皮肤损伤机理和症状	(94)
第三节 激光的皮肤损伤阈值	(99)
第六章 激光器危害控制	(103)
第一节 危害评价	(103)
第二节 控制措施	(118)
第三节 警告标志	(123)
第四节 职业人员健康监督	(124)
第七章 激光辐射损伤防护	(127)
第一节 眼照射限值	(127)
第二节 眼防护措施	(130)
第三节 皮肤照射限值	(144)
第四节 皮肤防护措施	(145)
第五节 安全防护教育	(146)
附录 A 中华人民共和国国家军用标准——激光安全防护术语	(148)

附录 B	中华人民共和国国家军用标准——激光辐射警告标志	(167)
附录 C	中华人民共和国国家军用标准——激光防护眼镜生理卫生防护要求	(171)
附录 D	中华人民共和国国家军用标准——激光防护眼镜防护性能测试方法	(176)
附录 E	中华人民共和国国家军用标准——军用激光器危害的控制和防护	(183)
参考文献		(197)

第一章 光、激光和激光器

第一节 光

光是一种能够刺激眼视网膜而产生视觉的电磁辐射。凡是能发光的物体均可称为光源。太阳是自然界的光源,称为“自然光源”,还有一类称为“人工光源”,激光器就是一种新的人工光源。

光和人类有着极密切的关系,人类所需的大部分能源都直接或间接来自光。有了光,农作物才能生长;有了光,人们才能认识世界,改造世界。本节简要介绍光和激光的基本知识。

一、光的基础理论

(一) 光的波粒二象性

人们对光的认识开始得很早,但发展缓慢,直到 17 世纪才形成以牛顿为首的微粒说和以惠更斯为首的波动说。前者认为光是从光源发出的微粒流,后者则认为光是一种像水波、声波一样的波动,两派相持,互相争鸣。麦克斯韦总结、分析了电磁学的研究成果,提出光波同无线电波、微波、X 射线,乃至 γ 射线一样都是电磁波,光波只是电磁波谱的一小部分。波动说能很好地解释光的反射、折射、干涉和衍射等现象,但不能解释光的吸收、发射、光电效应等问题。直到本世纪初爱因斯坦为解释光电效应提出了光子说,认为光是由一粒一粒运动着的粒子流组成的,这种粒子称为光子或光量子。光子说一方面认为光是光子流,另一方面也不否认光是电磁波,所以光具有波粒二象性。光的两种属性是相辅相成的,光在传播时表现出波动性,在与物质作用时表现出微粒性。

光波是一种横波,是电场和磁场振动在空间的传播。电场和磁场的振动方向相互垂直,而且同时垂直于光的传播方向(图 1-1),电振动和磁振动矢量分别用 E 和 H 表示,因为在讨论光波时主要考虑电场振动,通常把电场强度 E 称做光矢量。

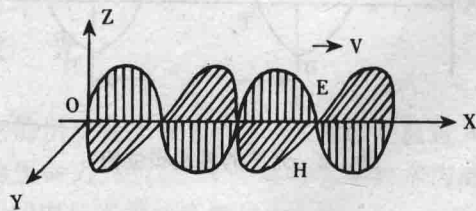


图 1-1 电磁波示意图

(二) 光速、频率和波长

1. 光速

光速是指光在真空中的传播速度。真空中的光速 c 约为 3×10^8 m/s, 光在折射系数为

n 的介质中传播速度 v 为:

$$v = c/n \quad (1-1)$$

2. 频率

光波电场在一秒钟内的振动次数称为频率, 以 ν 表示, 单位是赫兹(Hz), 而完成一次振动所需要的时间称做周期 T , 单位是秒(s)。频率 ν 和周期 T 互为倒数关系。

$$\nu = 1/T \quad (1-2)$$

3. 波长

光波常用正弦曲线来表示, 如图 1-2。光在一个周期内向前传播的距离称为波长, 以 λ 表示, 波长一般用微米(μm)、纳米(nm)为单位, 也常用 $\text{\AA}$ (埃)为单位, $1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。图中的最高点(B, F)称为波峰, 最低点(D, H)称为波谷。两个相邻波峰或波谷之间的距离就是一个波长。

光速、频率和波长有如下关系

$$c = \lambda\nu \quad (1-3)$$

上式说明, 波长愈长频率愈低, 波长愈短频率愈高。

(三) 光波的振幅和位相

1. 振幅

光波中电场振动的最大值称为光波的振幅, 如图 1-2 中的 B 点, 其值以 E_m 表示, 振幅大小决定了光的强弱。

2. 位相

光波的位相是在一个波长范围内决定各点电场大小的物理量, 以角度表示, 符号为 θ 。图 1-2 中 A 点的位相角为 0° , B 点位相角为 90° , C 点为 180° , D 点为 270° , E 点为 360° 。在一个波长范围内光波瞬间振幅 E 按位相角的正弦规律变化, 其值为:

$$E = E_m \sin\theta \quad (1-4)$$

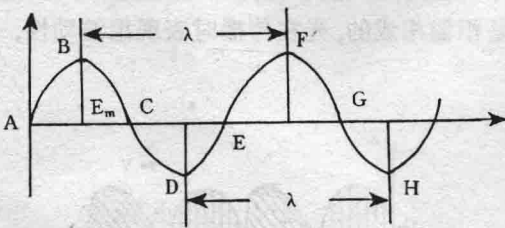


图 1-2 光波的振幅和位相

二、光的主要特点

(一) 干涉

干涉现象是光波动性的基本特征之一, 应用很广泛。特别是激光的出现, 给干涉的应用提

供了优质光源,使全息照相成为现实。

若两束频率(ν)相同、振动方向相同、位相相同或相差 180° 的光波迭加,便产生明暗交替或彩色条纹,这种现象称为光的干涉。若两束光位相相同,迭加后其波峰与波峰、波谷与波谷一一对应,合成波的振幅则是原来波振幅的两倍;若两光波位相差 180° ,波峰与波谷一一对应,则两光波的振动相互抵消。

两束光的频率相同、振动方向相同、位相恒定,便可产生干涉,这种光通常被称为相干光。

(二) 衍射

衍射是光波动性的另一特征。当光在传播过程中遇到线度可与波长相比拟的障碍物或小孔时,就偏离直线传播路径。在障碍物或小孔后边,本应出现阴影处出现亮纹,在本该亮的地方出现暗纹,这种光绕过障碍物偏离直线传播并出现光强分布不均匀的现象称为光的衍射,如图 1-3 所示。

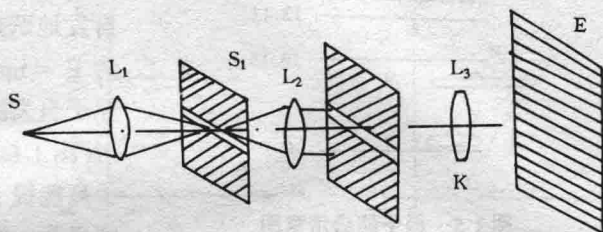


图 1-3 光的衍射

(三) 偏振

光的偏振也是光波动性的重要特征。横波的特点是振动矢量方向永远和传播方向相垂直。振动方向与传播方向构成的平面叫振动面。光矢量在一个固定振动面内只沿一个固定方向振动,这种光称为面偏振光(简称偏振光)。

在振动面内所有方向都产生振动,并且振幅都相同的光波称为自然光,如图 1-4a 所示;若在振动面内所有方向都有振动,而不同方向的振幅不同的光称部分偏振光,如图 1-4b 所示;若光波的电场只沿固定方向产生振动,则称这种光为线偏振光或平面偏振光,如图 1-4c 所示。

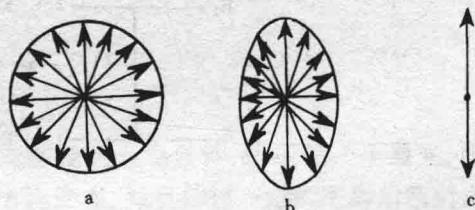


图 1-4 光的偏振

第二节 激光

激光是 60 年代发展起来的一项重大新技术,它的出现标志着人们掌握、利用光波进入了一个新阶段。激光的出现不仅赋予光学技术以新的生命力,而且把无线电与光学技术沟通起来,两者相互渗透,相互补充,开辟了一系列光学、无线电技术的新领域。

一、激光的产生

(一) 光的自发辐射、受激辐射及受激吸收

物质由原子、分子和离子等微粒组成,原子又由原子核和电子构成,电子沿着各自的轨道不停地运动。根据量子理论,各电子运动轨道代表电子的不同运动状态,它们互相分立,各有

特定的能量,通常把电子具有最低能量的状态称为基态,其余称激发态。若用水平线的高低表示不同轨道的电子能量大小,就可得到如图 1-5 所示的阶梯式能级图。现以最简单的二能级系统(图 1-6)讨论光的自发辐射、受激辐射及受激吸收。

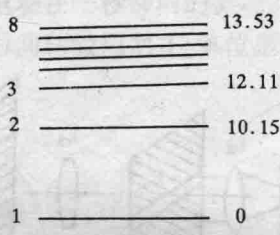


图 1-5 原子能级示意图

1. 自发辐射

能级 E_1 和 E_2 分别表示基态和激发态,若原子起初位于激发态能级 E_2 ,因 $E_2 > E_1$,处于激发态的原子不稳定,即使没有任何外界信号作用,也将自发地跃迁到基态 E_1 上,跃迁时辐射出一个能量为 $E = h\nu_{21} = E_2 - E_1$ 的光子。这种处于激发态的原子自发跃迁到低能态时产生的光辐射称自发辐射(图 1-6a)。自发辐射完全是一种随机过程,处于高能级 E_2 上的大量原子,它们各自独立地发射频率为 ν 的光波,这些光波彼此之间的相位、发射方向和偏振状态都无确定关系,自发辐射也可以

无辐射跃迁形式从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 上,这时辐射能量($h\nu_{21}$)就以其他方式(如热)释放出来。

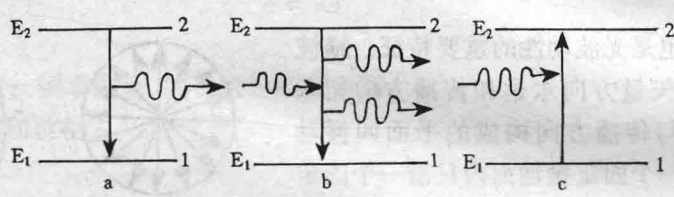


图 1-6 光的自发辐射、受激辐射和受激吸收

2. 受激辐射

处于激发态 E_2 上的原子,在频率为 ν_{21} 的外界光信号激励下,从 E_2 能级跃迁到 E_1 能级上,发射能量为 $h\nu_{21}$ 的光子,并且与激励光信号的振动频率、偏振状态和位相相同,这种过程称受激辐射,如图 1-6b 所示。

3. 受激吸收

由图 1-6c 所示,处于低能级 E_1 上的原子,在频率等于 $(E_2 - E_1)/h$ 的外界光信号作用下,吸收 $h\nu_{21}$ 能量后跃迁到激发态 E_2 上,这种过程称为受激吸收。

自发辐射、受激辐射和受激吸收三者都是由原子特定能级的特性所决定的,三者之间相互关联。

(二) 激光产生的基本原理

由以上分析可知,当光束通过原子(或分子、离子)系统时,总是同时存在受激吸收和受激辐射两种相互对立的过程,前者使入射光束强度减弱,后者使光束强度增强,激光器便是利用受激辐射使光放大而获得激光的。为此,在激光器的工作物质中需建立一种工作状态,使光的受激辐射过程比其他过程占支配地位,这个状态就是工作物质处于粒子数反转分布。

1. 粒子数反转分布

通常把某个已知能级上单位体积内的原子数称为该能级粒子数。在正常条件下,处于激发能级 E_j 上的粒子数 N_j 只有极少数(图 1-7a),而且能级愈高,粒子数愈少。若采取某些手段,使高能级上的粒子数 N_j 比低能级 E_i 上的粒子数 N_i 多,这就形成了粒子数反转分布(图 1-7b)。

应该指出,不是所有物质都能够实现粒子数反转分布,而是要具备一定条件,主要是物质的内部结构。将两个能级能实现粒子数反转分布的物质叫做激活介质,即通常所说的工作物质,这种介质可以是气体、固体或液体。常用的激光工作物质,其能级可分成三能级和四能级系统两大类。

2. 反转粒子抽运

在外界激励源的作用下,粒子从低能级跃迁到高能级,从而实现粒子数反转分布的过程称为抽运(或泵浦)。抽运方法主要有两种:光激励和电激励。大多数固体工作物质都采用光激励,大多数气体和半导体工作物质采用电激励的方法,一般采用直流辉光放电。由于不同工作物质的能级系统不一样,辉光放电电压可在几千伏至几万伏范围。

3. 激光谐振腔

(1) 谐振腔的构成与作用

实现工作物质粒子数反转,只是提供了产生激光振荡的必要条件,仍不能产生激光,因为光在激活介质中传播时,受激辐射的光在多个不同方向产生,并且传播一定的距离后就射出工作物质,难以形成极强的光束。为此,必须使光束来回反复地通过激活介质,进行多次放大。谐振腔就是用于产生光振荡并可达到多次放大的装置。最常见的谐振腔是由相互平行而又同时垂直于工作物质轴线的两块反射镜组成,一块是全反射镜 r_1 ,另一块为部分反射镜 r_2 ,激活介质放在两反射镜之间。谐振腔使受激辐射的光在腔中不断地往返反射,每经过一次工作物质就得到一次放大。当光被放大到等于或超过光损耗时,就产生激光振荡,并在部分反射镜一端产生激光输出。谐振腔中的初始光辐射来自自发辐射,这种光辐射没有规律,不是激光(图 1-8a)。而沿轴线方向的自发辐射,在传播过程中不断产生受激辐射并通过谐振腔往返反射使光放大而产生激光(图 1-8b)。

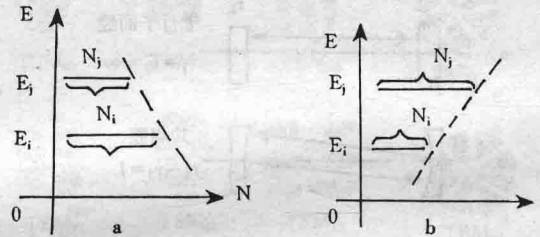


图 1-7 粒子数的正常分布和反转分布

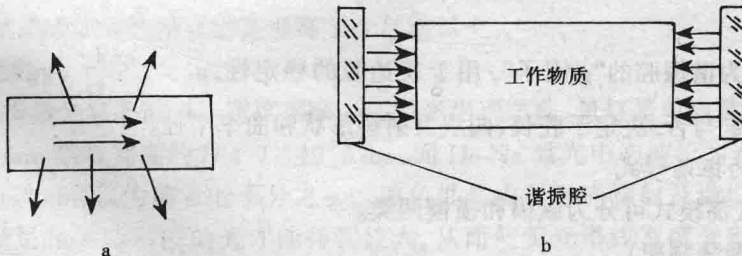


图 1-8 谐振腔的放大作用

(2) 谐振腔的种类

谐振腔的种类很多,图 1-9 是几种常见的谐振腔。为方便起见,设左面反射镜曲率半径为 r_1 ,右面为 r_2 , L 为两反射镜之间的距离,称为腔长。除图 1-9 中所列谐振腔外还有平-凸腔和凹凸腔等。

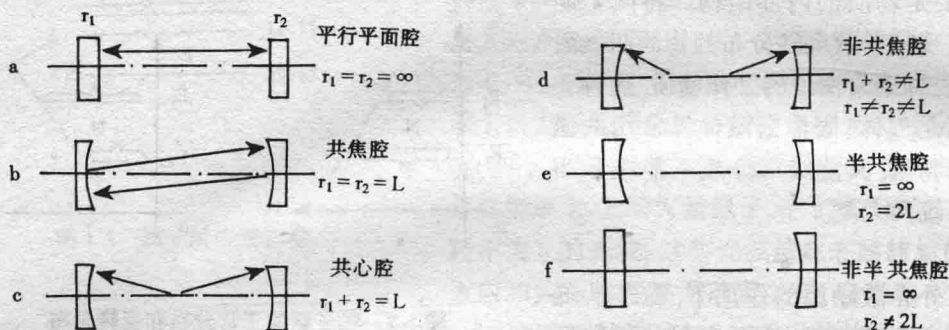


图 1-9 常用的激光谐振腔

- a 平行平面腔:由两块垂直于光轴 1 相距为 L 、平行放置的平面反射镜组成。
- b 共焦腔:由相距为 L , 曲率半径分别为 r_1 和 r_2 的两块凹面反射镜组成,
且 $r_1 = r_2 = L$, 两凹面镜的焦点在腔内重合。
- c 共心腔:由曲率半径之和等于腔长的两球面反射镜组成。
- d 非共焦腔:由两球面反射镜组成。
- e 半共焦腔:由一个平面反射镜和一个曲率半径为 $2L$ 的凹面反射镜组成。
- f 非半共焦腔:除半共焦腔以外的所有平行腔, $r_1 = \infty$, $r_2 \neq 2L$ 。

(3) 谐振腔的稳定条件

图 1-9 所示各种谐振腔可产生激光,但必须有一定的结构,使其满足稳定振荡条件。根据几何光学理论,光束在腔的两反射镜之间往复反射,始终不逸出腔外,才能实现稳定振荡,其条件应满足

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1 \quad (1-5)$$

$$\text{或 } g_1 = g_2 = 0 \quad (1-6)$$

式中 g_1 、 g_2 为谐振腔的“ g 因子”,用于表达腔的稳定性, $g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}$, $g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$ 。公式说明,谐振腔的稳定与否,决定于腔长、两块反射镜形状和曲率半径。

4. 谐振腔的振荡模式

谐振腔的振荡模式可分为纵模和横模两类。

(1) 纵模(振荡频率)

通常把腔内沿光轴方向形成的每一种稳定驻波形式的光振荡方式称为激光的纵模。

在谐振腔中,并非所有频率的电磁波都能产生振荡,只有频率满足一定共振条件的光波才能在腔内往返反射,获得最大强度。由物理光学可知,这个条件就是光波相干形成极大值的条件,就是光束在谐振腔内往返一次后,其位相变化 2π 的整数倍。当腔长 L 一定时,在轴线方向能产生腔内振荡的频率不止一个,输出激光中也就包含多个频率,形成了激光纵模,只含有一个频率的激光模式为单纵模,含有多个频率的为多纵模。

(2) 横模

横模是指激光束在谐振腔中往返反射时,横截面上的能量分布不随时间而变,这种稳定光强分布的图样称为横模,图 1-10 为横模示意图。

产生横模的原因是那些稍微偏离轴线的光在谐振腔内振荡的结果,横模通常以 TEM_{mn} 表示,TEM 表示横向电磁波,mn 表示横截面 x, y 轴方向出现的节点数(光强为零的位置),其中 TEM_{00} 模没有节点,称为基横模或单模,m 和 n 不同时为零的横模称高阶模,应用中可根据需要进行模式选择。

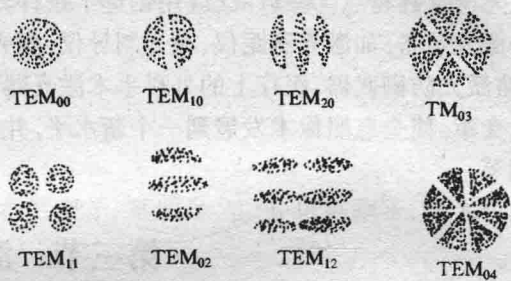


图 1-10 激光横模

二、激光的特点

激光与普通光源比较有四个显著的特点,即高方向性、高亮度、高单色性及高相干性。

(一) 高方向性

激光的高方向性是指激光束在空间传播发散角很小。普通光无方向性,射向四面八方,而激光是受激辐射光,只沿谐振腔光轴方向发射、传播。因此,激光发散角很小,一般气体和固体激光器的发散角在毫弧度(mrad)量级,可以视为平行光束,若发散角为 1 mrad,则传输到 1 km 处的光斑直径仅为 1 m,这对普通光源是无法做到的。若用最好的探照灯和一般的激光束同时射向月球,则探照灯在月球的直径约 1 000 km,而激光束直径只有 1 km。

(二) 高亮度

亮度的物理意义是光源在单位立体角(Ω)内法线方向的辐照度或光源在单位立体角、单位时间内法线方向的辐照量。激光束高亮度原因之一是它的高方向性,能量只集中在一个方向上发射;二是发射时间短,能量在时间上高度压缩,如固体激光所用氙灯的发光时间为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ s,而相应的调 Q 激光器输出光能量可集中在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ s 范围内,锁模激光器,其脉冲宽度可短至皮秒(ps,即 10^{-12} s),甚至飞秒(fs,即 10^{-15} s)量级,一台巨脉冲固体激光器输出激光的亮度,可比地球表面太阳光的亮度高 100 亿倍以上。

(三) 高单色性

高单色性是指激光频率的谱线宽度很窄。在激光出现之前,氪灯是单色性最好的光源,中心波长为 605.7 nm,谱线宽度约为 4.7×10^{-3} nm,而 He-Ne 激光中心波长为 632.8 nm,它的谱线宽可窄到 10^{-6} nm,仅为前者的千分之一。单色性是由受激光辐射及谐振腔的作用所决定的,只有频率满足 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光才能得到放大,从而使荧光谱线宽度受到限制。并且这种光辐射还受到激光器选频作用,在某一条荧光谱线内不是所有频率都能起振,从而使得共振

频率的谱线宽度比荧光谱线宽度还窄得多。

(四) 高相干性

普通光源发光是随机的自发辐射,彼此相互独立,其位相互不相关,两波相遇时很难产生干涉现象。激光是由受激辐射产生的,且谱线宽度很窄,因此,两束同频率、同相位、同偏振方向的光波很容易产生干涉现象,表现出极好的干涉性能。如普通光的相干长度为 3 m,而 He-Ne 激光的相干长度可达数十公里,所以激光的高相干性是普通光源无法比拟的。

激光的上述特点,为其广泛应用创造了条件。在军事上利用它的高方向性和高亮度研制了各种激光装备,如激光测距仪、激光制导仪、激光雷达、低能激光致盲武器、战术激光防空武器、战略激光防御武器、医疗上的外科手术激光器等。激光的高单色性和高相干性使光通信技术发生变革,使全息照像术发展到一个新水平,并在生物医学领域中已广泛用于诊断、治疗、图像识别等。

第三节 激光器

激光器主要由三部分组成:激光工作物质、谐振腔和激励源。按工作物质,激光器可分为固体激光器、气体激光器、液体激光器、半导体激光器、自由电子激光器、化学激光器等。按工作方式可分为连续激光器和脉冲激光器。脉冲激光器又可分为长脉冲(脉宽为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ s 量级)、巨脉冲(脉宽为 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ s 量级)、超短脉冲(脉宽为 $10^{-10} \sim 10^{-15}$ s 量级)和重复频率脉冲激光器等。本节将按激光工作物质,介绍几种常用激光器的结构和工作原理。

一、固体激光器

最早实现激光振荡的就是固体激光器。目前,固体激光器工作物质已达数百种,谱线有数千条。固体激光器的特点是:输出能量大、脉宽窄、峰值功率高。

固体激光器工作物质是把激活粒子掺入基质材料中制成的。其理化性能主要取决于基质材料,光谱特性主要决定于激活粒子的能级结构。目前可做激活粒子的元素有:过渡族金属离子、三价稀土金属离子和二价稀土金属离子等。

基质材料应具有良好的机械、光学及热性能,能为激活粒子提供适宜的配位场,基质材料有晶体和玻璃两大类。

(一) 基本结构

固体激光器除 Q 开关、倍频晶体等特殊部件外主要由工作物质、谐振腔、泵浦系统、冷却、滤光系统、电源和触发电路等部分组成,图 1-11 为固体激光器的基本结构(图中没有冷却、滤光系统)。

工作物质种类很多,最常用的有红宝石、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和钕玻璃等。激活粒子是工作物质中的金属离子,如 Nd^{3+} 、 Cr^{3+} 等。工作物质通常加工成圆柱形,俗称激光棒。

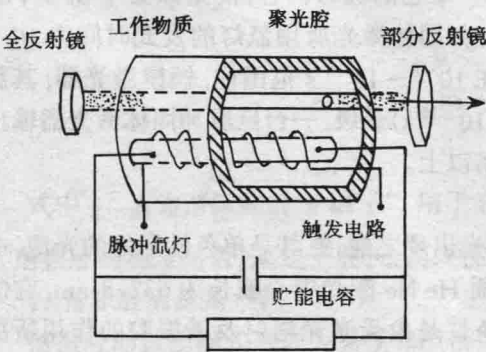


图 1-11 固体激光器结构示意图

谐振腔由全反射镜和部分反射镜组成,激光从部分反射镜端面输出。反射镜多采用玻璃材料,表面镀相应波长多层介质膜。

泵浦系统包括泵灯和聚光腔,由泵灯发光经聚光腔会聚到激光棒上,使工作物质中的激活粒子形成粒子数反转,泵灯的能量由容量为 C 的储能电容和电压值为 V 的高压充电电源供给,储能电容的能量为 $E = \frac{1}{2} CV^2 (\text{J})$ 。

冷却、滤光系统的作用是防止激光器温度过高,减少泵灯的紫外辐射对工作物质的有害影响。

触发电路的作用是产生高压,帮助点燃泵灯。

(二) 几种常用的工作物质

1. 红宝石晶体(ruby)

红宝石的化学式为 $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$, Cr^{3+} 是激活离子,基质是 Al_2O_3 俗称刚玉,是无色透明的负单轴晶体。

红宝石晶体具有机械强度高、热膨胀系数小、导热率高、化学稳定性好、容易长成大尺寸等特点,可做单脉冲和低重复频率调 Q 巨脉冲器件。缺点是激光阈值高,易受温度影响,不宜做高重复率器件。红宝石为三能级系统,通常只发射 694.3 nm 的线偏振激光。

2. 掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)

掺钕钇铝石榴石,简称 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 。基质是钇铝石榴石晶体,分子式为 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$,简记为 YAG 。激活离子为三价钕离子 Nd^{3+} 。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 属各向同性立方晶体。

$\text{Nd}:\text{YAG}$ 有量子效率高、受激截面大、阈值低、热性能好等优点,是目前唯一能在室温下连续工作、实用性很强的固体激光工作物质,在中小功率,尤其是高重复频率脉冲器件中应用广泛。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 为四级系统,通常只输出 $1.06 \mu\text{m}$ 激光。

3. 钕玻璃

钕玻璃是以玻璃为基质掺入激活粒子 Nd^{3+} 而制成的另一种激光工作物质,常用玻璃有硅酸盐、硼酸盐、磷酸盐等。激活粒子为 Nd^{3+} ,另外还有铕(Eu^{3+})、钇(Y^{3+})、铒(Er^{3+})、铈(Ho^{3+})和镝(Dy^{3+})等。钕玻璃制备技术成熟,可获取光学均匀性好,可塑性强,尺寸可大可小,直径可达 100 mm ,长 2 m 的基质材料,而激光玻璃纤维直径仅数毫米。钕玻璃也属四能级系统,它有三条荧光谱线,中心波长分别为 0.921 、 1.06 和 $1.37 \mu\text{m}$, $1.06 \mu\text{m}$ 荧光最强,通常只产生 $1.06 \mu\text{m}$ 激光振荡。钕玻璃比红宝石阈值低,而效率高,适用于制作大能量、高功率以及锁模激光器件,单级输出激光能量可达上万焦耳,多级行波放大功率器件输出峰功率可达 $1 \times 10^{13} (\text{W}/\text{cm}^2)$ 。钕玻璃缺点是热导率低,热胀系数大,不适宜作连续和高重复频率激光器。

4. 波长可调谐的固体激光工作物质

实现激光可调谐是近年来固体激光技术重大进展之一。可调谐工作物质是一些晶体,如 $\text{Ni}^{2+}:\text{MgF}$ ($1.6 \sim 1.8 \mu\text{m}$), $\text{Ce}^{3+}:\text{LiYF}_4$ ($0.305 \sim 0.335 \mu\text{m}$), $\text{V}^{2+}:\text{MgF}$ ($1.05 \sim 1.3 \mu\text{m}$), $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ($0.700 \sim 0.818 \mu\text{m}$), $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ($0.68 \sim 1.1 \mu\text{m}$) 及色心晶体等。其中,掺钛蓝宝石($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)是性能最好的可调谐固体激光物质,它在激光光谱、激光化学、激光遥感、非线性光学及医学方面有着广泛的应用前景。此外 $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ 晶体,又称掺铬金绿宝石,同样具有阈值低,调 Q 输出功率高,物理、光学性能好,可在室温下工作等优点。

此外,常用的工作物质还有掺钕铝酸钇晶体(Nd:YAlO_3 代号 Nd:YAP),可与 Nd:YAG 媲美,主要发射激光波长为 $1.064\ \mu\text{m}$,但破坏阈值低,热畸变严重;以铒为激活离子,以镱(Yb)为敏化剂,可在室温下工作,输出 $1.54\ \mu\text{m}$ 激光,由于它的眼损伤阈值高,又称它为人眼安全激光。

(三) 泵浦系统

1. 主要泵浦源

固体激光器,最常用的泵浦源有惰性气体放电灯(灯内充氙、氪等)、金属蒸气灯(灯内充汞、钠、钾等金属蒸气)、卤化物灯(碘钨灯、溴钨灯等)、半导体发光二极管等。其中氙灯的辐射强度、辐射效率最高,常用于脉冲激光器中;氪灯在低电流工作时,它的辐射光波可与 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 吸收带相匹配,在连续和小能量脉冲 Nd:YAG 器件中应用较多;碘钨灯用 $220\ \text{V}$ 供电,使用简单方便,可用于功率小于 $10\ \text{W}$ 的连续 Nd:YAG 激光器中;高压汞蒸气灯的辐射光谱与红宝石吸收谱相匹配;砷化镓(GaAs)半导体激光器体积小,产生的激光波长与掺钕工作物质吸收波长相吻合,泵浦效率高达 30% 以上,在小型掺钕激光器中应用愈来愈多。

2. 触发及预燃

触发放电灯的方式有内触发和外触发两种:内触发是将触发脉冲电压直接加在灯的电极上,使灯内气体电离,触发电压与储能电容充电电压相串联,又称串联触发(图 1-12a),优点是触发可靠;外触发是将触发脉冲电压加在灯外(图 1-12 b),结构简单,功率消耗小,重量轻,体

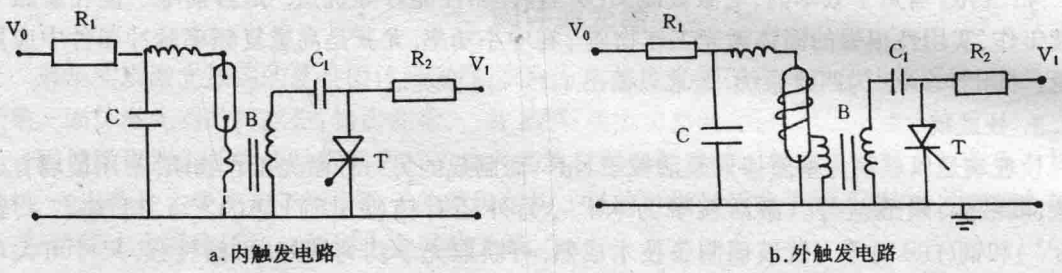


图 1-12 触发电路

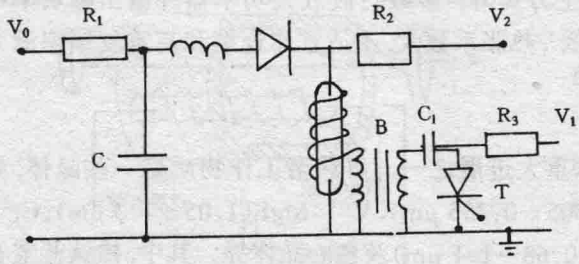


图 1-13 脉冲氙灯预燃电路

积小。以上两种触发方式的共同缺点是,灯每点燃一次,都需一个高压触发脉冲,易造成电极的溅射,对电子线路有强烈的电磁干扰,影响灯的寿命。为此,采用图 1-13 所示的预燃措施,在灯的电极上再加一电压 V_2 使灯经过一次触发后,可由 V_2 长时间维持小电流弧光放电,在重复率工作时,无需再触发,只需打开放电可控硅 T 即可。采用预燃可缩短放电时间,提高峰值放电电压,从而提高转换效率和发光稳定性。

3. 聚光腔

聚光腔的作用是将泵浦源辐射的光能有效地聚到工作物质上去,聚光腔的性能直接影响激光转换效率。常用聚光腔有以下几种。

椭圆柱聚光腔。这种聚光腔内反射表面的横截面是椭圆,聚光效果好(图 1-14a)。

圆柱聚光腔。内反射表面的横截面是圆柱空腔,聚光效果不如椭圆柱聚光腔,但结构简单,加工方便。

相交圆柱聚光腔。是由两圆柱面相交而成,其聚光效率较高,加工方便(图 1-4b)。

多泵聚光腔。有双泵椭圆柱聚光腔或四泵椭圆柱聚光腔(图 1-14c),这种腔泵浦光照均匀,激光输出功率高,但加工复杂,体积大。

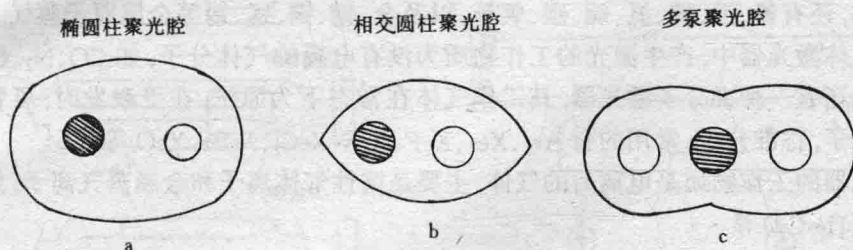


图 1-14 不同类型的聚光腔

紧包聚光腔。紧包腔的特点是灯和棒靠得很近,结构简单,体积小、加工方便、效率高,但棒内光照均匀性差,不利散热(图 1-15)。

聚光腔常用的金属材料有铝、铜和不锈钢等,非金属材料有玻璃、陶瓷等。

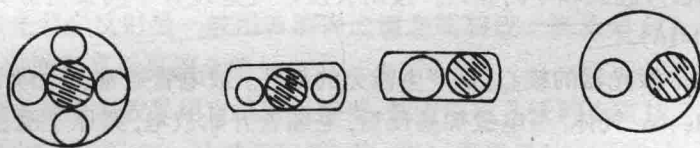


图 1-15 紧包聚光腔

4. 冷却滤光系统

(1) 冷却

固体激光器光电转换效率只有百分之几,绝大部分能量都变成热,使泵灯、工作物质和聚光腔温度升高,由此产生热透镜效应、热应力以及热畸变等而影响激光器工作状态。为维持正常工作,除单脉冲工作方式靠自然冷却外,对连续和重复频率脉冲工作器件均需采取强迫冷却措施。常用的冷却方法有液体、气体冷却和传导冷却等方法。其中最常用的是液体冷却,用流动的液体带走泵灯、激光棒及聚光腔所产生的热能。冷却液应具有热容量、密度和导热率大、凝固点低、粘度小、不易燃、不易爆、光学性能稳定、对接触元件无腐蚀作用以及在工作物质吸