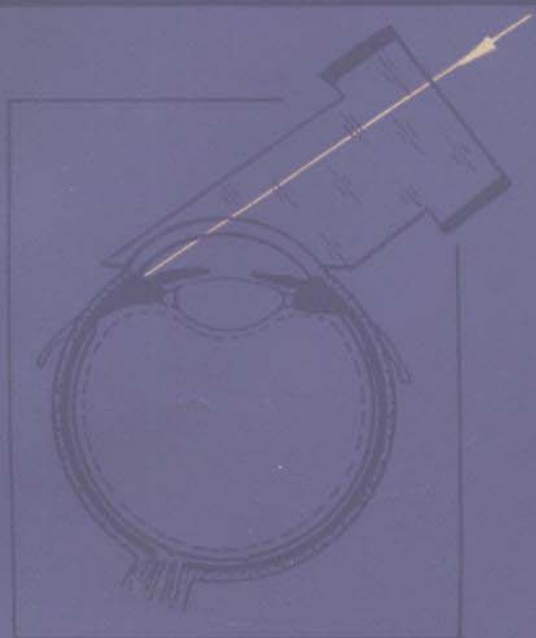




卢信义 主编

激光眼科学

JIGUANG YANKEXUE

人民卫生出版社

激光眼科学

主 编

卢 信 义

编 写 者

卢 信 义 边 协 义

庞 文 范 李 建 训 季 汉 庭

人 民 卫 生 出 版 社

内 容 简 介

本书就与眼科有关的激光基础知识、激光眼科治疗仪器、激光虹膜切除术、激光治疗眼底病、眼的激光全息术,以及激光对眼的损伤及其防护等几个主要方面做了重点的介绍。可供眼科工作者和激光工作者参考。

激 光 眼 科 学

卢信义 主编

人民卫生出版社出版
(北京市崇文区天坛西里10号)

人民卫生出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 14 $\frac{3}{4}$ 印张 9插页 336千字
1981年3月第1版第1次印刷
印数: 1—5,300

统一书号: 14048·3950 定价: 1.80元

前 言

激光是近代重大的科学技术进展之一，在医学领域特别是在眼科得到日益广泛的应用。为了把激光新技术更好地用于眼病防治，使人们更好地从事四个现代化的伟大建设，我们撰写了这本《激光眼科学》。在写作中，我们对国内眼科激光应用的经验作了比较全面和重点的介绍，同时对国外的先进经验和进展也作了必要的概括和介绍，以供眼科医生和从事激光工作的有关人员参考之用。在编写过程中，济南市第二人民医院、洛阳市第二人民医院、安徽省人民医院和中国科学院安徽光学精密机械研究所等单位给予了大力支持；蔡东方和常志仁等同志协助绘制了不少插图，在此一并志以谢忱。

由于经验和水平所限，书中错误和缺点在所难免，深望读者批评指正。

编 者

1980 年 7 月

目 录

第一章 激光的基本原理	1
第一节 激光的主要特性	1
第二节 激光基础知识	3
第三节 激光器种类	8
第四节 激光调Q原理与倍频	14
第五节 激光全息原理	15
第六节 激光的生物效应	17
第二章 与激光有关的眼球的结构及其生理光学特点	18
第一节 眼球的结构	18
第二节 眼的生理光学特点	21
第三章 激光眼科治疗仪器	26
第一节 红宝石激光眼科治疗机	26
第二节 氩离子激光眼科治疗机	35
第三节 染料激光器	39
第四节 倍频掺钕钇铝石榴石激光治疗机	39
第五节 其他激光治疗机	40
第四章 激光虹膜切除术	44
第一节 简史及概况	44
第二节 激光虹膜切除的原理	47
第三节 激光虹膜切除的操作方法及注意事项	49
第四节 影响虹膜透切的因素	51
第五节 激光虹膜切除术的适应症、光切方法及临床效果	52
第六节 激光虹膜切除时的眼部变化、术后反应和并发症	58
第七节 激光虹膜切除的组织病理学变化	60
第八节 激光虹膜切除术的优缺点	60
第九节 虹膜囊肿的激光治疗	60
第五章 激光周边虹膜切除术治疗原发性闭角青光眼	68
第六章 激光滤帘光刺术治疗单纯性（开角型）青光眼	74
第一节 动物实验及临床应用概况	74
第二节 激光滤帘光刺术存在的问题及展望	78
第七章 激光治疗眼底病概论	81
第一节 光凝治疗眼底病的发展史	81
第二节 激光治疗眼底病的机理	82
第三节 与激光光凝有关的若干名词的解释	83
第四节 眼底激光光凝的分级	84
第五节 对眼底激光光凝分级的探讨	88
第八章 激光封闭视网膜裂孔	94

第九章	激光治疗视网膜劈裂等症	109
第一节	视网膜劈裂症的激光治疗	109
第二节	视网膜血管样线条症的激光治疗	110
第三节	出血性老年黄斑盘状变性的激光治疗	111
第四节	白内障摘除术后黄斑水肿的激光治疗	112
第五节	Fuchs 斑的激光治疗	112
第六节	黄斑囊肿的激光治疗	112
第七节	先天性视神经盘坑洞并发黄斑浆液性脱离的激光治疗	112
第八节	黄斑区局灶性视网膜脉络膜炎性病变的激光治疗	113
第九节	视网膜囊样变性的激光治疗	114
第十节	激光治疗脉络膜色素母细胞瘤	114
第十章	中心性浆液性视网膜脉络膜病变的激光治疗	116
第一节	与红宝石和氩激光治疗有关的问题	116
第二节	氦-氟激光治疗	121
第十一章	激光治疗眼底血管疾患	126
第一节	概论	126
第二节	视网膜静脉分支阻塞症的激光治疗	128
第三节	Eales 病的激光治疗	129
第四节	Coats 病的激光治疗	130
第五节	视网膜血管瘤病 (Von Hippel 病) 的激光治疗	131
第六节	其他视网膜血管病的激光治疗	132
第七节	脉络膜血管瘤的激光治疗	133
第八节	激光对视网膜前积血和局限性大片视网膜出血的治疗	134
第十二章	糖尿病性视网膜病变的激光治疗	136
第十三章	激光在眼科其他方面的应用	145
第一节	激光治疗眼睑、结膜及角膜病	145
第二节	激光治疗前房与玻璃体积血和玻璃体混浊	148
第三节	激光治疗软性白内障	151
第四节	用激光测量眼屈光不正	152
第五节	激光干涉视力计	159
第六节	盲人激光手杖	161
第十四章	眼全息术	164
第一节	眼全息术的发展	164
第二节	眼全息照相基本技术	166
第三节	眼全息术参数的选择	169
第四节	眼全息术的用途	171
第十五章	激光对眼的影响和损伤	176
第一节	概论	176
第二节	激光诱发的视系统电位波形特征	179
第三节	视网膜激光辐射伤对各级视单元电位的影响	184
第四节	激光辐照对视功能的影响	186
第五节	激光辐照眼部后所致的生化和生理改变	187

第十六章	常用不同波长激光对眼的损伤 ·····	191
第一节	激光对眼辐照伤的损伤途径·····	191
第二节	常用不同波长激光对眼的不同损伤·····	193
第三节	影响激光眼损伤的因素·····	202
第十七章	激光眼损伤的防护 ·····	208
第一节	激光安全防护措施·····	208
第二节	激光眼损伤的阈·····	218
第三节	眼的激光照射安全标准·····	220

第一章 激光的基本原理

第一节 激光的主要特性

激光是六十年代初出现的一种新颖光源，最初由 Maiman 所发现，在工业、农业、国防、科学技术和医学方面，正获得日益广泛的应用。

大家知道，凡是能够发光的物体都叫做光源，如电灯、日光灯和炽热物体的发光等，都是普通的光源。而激光是由激光器产生的一种新光源。由于激光与普通光在光源内部所产生的机理完全不同，所以激光与普通光相比有许多独特的性能。

一、激光的单色性好

光波和无线电波一样，都是电磁波，只是波长不同。如果按照波长或频率的顺序，把这些电磁波排列成谱，如图 1-1 所示，称为电磁波频谱图。

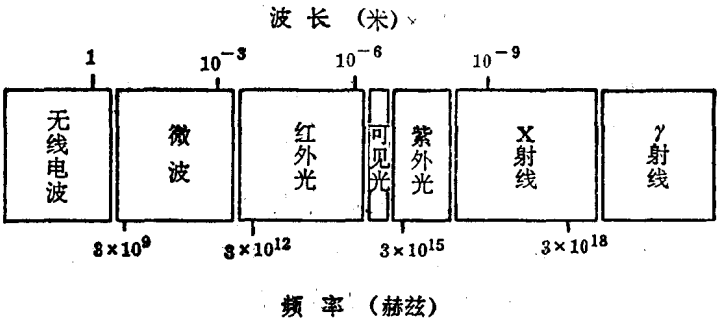


图 1-1 电磁波频谱图

不同波长的光作用在人眼睛的视网膜上，就使人们感觉到各种颜色。波长比 0.76 微米长的光称为红外光。波长比 0.40 微米短的光叫做紫外光。红外光和紫外光是人眼看不见的，而从紫外光以上的波长到红外光以下的一段波长的光，人眼能分辨出来，称为可见光。如表 1-1 所示。

表 1-1 可见光各种颜色的波长范围
(微米)

单色光是指波长范围极小的一段辐射。波长范围越窄，光的颜色越纯，即单色性越好。例如，在激光出现以前，氪同位素 86 (符号是⁸⁶Kr) 的波长为 6,057 Å (1 Å = 10⁻⁸ 厘米) 光的单色性最好，它在低温时其谱线宽度为 0.047 Å。与此相比，单模稳频氦氖激光器，当波长为 6,328 Å 时，其谱线宽度接近 10⁻⁸ Å。所以说激光的单色性是普通光不能相比拟的。各种不同种类的激光器，单色性也有区别。一般而言，气体激光器的单

光的颜色	大概的波长范围
红 色	0.76~0.63
橙 色	0.63~0.60
黄 色	0.60~0.57
绿 色	0.57~0.50
青 色	0.50~0.45
蓝 色	0.45~0.43
紫 色	0.43~0.40

色性最好，其次是固体激光器，染料激光器最差。

二、激光的方向性好

普通的日光灯和电灯是向四面八方辐射光的。与普通光源不同，激光是一定向辐射体，从激光谐振腔端面射出的激光都具有良好的指向。射出的光束基本上是沿着与输出镜面垂直的方向上传播的，或者说激光光束发散角是很小的。发散角 ϕ 的示意图如图1-2。发散角 ϕ 由下式表示

$$\phi = 2.44 \frac{\lambda}{D}$$



图 1-2 激光发散角示意图

式中 D 代表激光光束直径， λ 表示辐射波长，如果直径和波长都以米为单位计算，发散角就以弧度表示。

如果把光束直径为 D 的激光，用焦距为 F 的透镜会聚时，在焦平面上激光光斑的直径由下式求得

$$R = F \times \phi = 2.44 \frac{F}{D} \lambda$$

例如，气体激光器的发散角一般约为1毫弧度。因此激光的能量可以集中在直径为几个波长左右的一点上，这可以大大提高激光输出的能量密度。

三、激光的亮度高

激光在单位面积上，向某一方向的单位立体角里辐射的光功率，称为激光光源在这个方向上的强度，即亮度。激光器的出现，是光源亮度上的一次飞跃。例如，一台高能量的红宝石巨脉冲激光器，发散角为1毫弧度，在每平方厘米上的输出功率达1千兆瓦。这比高压脉冲氙灯的亮度高数十亿倍。

激光之所以亮度高，一方面是由于它的发散角小，能把激光辐射的能量在方向上高度集中起来；另一方面，因为辐射的光脉冲时间很短（光脉冲持续时间可以短到微微秒量级），所以辐射的能量在时间上也能高度集中。汇聚高亮度巨脉冲激光，能在直径为万分之几毫米或者千分之几毫米的范围内产生数百万度的高温、数百万个大气压的高压和每平方厘米几千万伏的强电场。可以在坚硬的宝石上打孔，能切割肌肉和骨头等等。

四、激光的相干性好

光有相干光，非相干光和部分相干光三类。激光是最好的相干光源。激光在空间任一时刻的相位有相关关系，称为激光的时间相干性。或者说，光完全相干时，光波在空间上两点之间的振幅和相位有相关性。还可以进一步解释，如果光在空间和时间上完全相干，那么光在空间任意两点间电场的变化应完全相关。一般说来，光的时间相干性的实验测量，是用一束光相对于另一束光的延时进行测量。从光的干涉实验中能观察到干涉条纹。如果激光的相干长度为 l_c ，在介质中光速为 C ，那么相干时间 t_c 以下式求得

$$t_c = \frac{l_c}{c}$$

当已知激光器的谱线宽为 $\Delta\nu$ ，则相干长度 l_c 用下式表示

$$l_c = \frac{c}{\Delta\nu}$$

由式可知，当激光器辐射的谱线越窄，相干长度越长，则单色性越好。

例如，某激光器辐射中心波长 $\lambda = 500$ 毫微米，其线宽为 100 毫微米时，相干长度仅有 2.5 微米。如果在相同的波长上，线宽为 10^{-3} 毫微米时，相干长度为 0.25 米，相干长度增加了 10 万倍。一般说来，光源单色性的优劣与时间相干性有直接关系。如果光源的相干长度是很长的话，其光波在相当长的时间是非常有规律的。

第二节 激光基础知识

激光 (Light amplification by stimulated emission of radiation, 缩写 Laser) 一词在某种意义上，它表示出产生激光的基本过程。简单的概括激光产生的基本原理，即当激光工作物质受到外激发时(如外光泵浦，电子泵浦和化学泵浦等)，工作物质基态上的原子向高能级跃迁，由于高能级上原子寿命较短，就迅速地以无辐射跃迁跳到亚稳态，而亚稳态上原子寿命较长，当在连续泵浦条件下，在亚稳态上就积累了大量的粒子数，并达到粒子数反转，产生受激辐射光子，经光学共振腔的反馈作用，当光子增益大于损耗时，产生激光输出。为了比较清楚的了解激光发生的基本原理，下面简要地叙述与产生激光有关的一些基本理论。

一、原子及其能级

我们知道，物质是由分子和原子所组成。原子是由原子核和围绕原子核运动的电子所组成。原子核带正电荷，周围的电子带负电荷。一个复杂原子具有多个电子，所有电子所带的负电荷和原子核所带正电荷数量相等。结构最简单的原子是氢原子(图 1-3)。

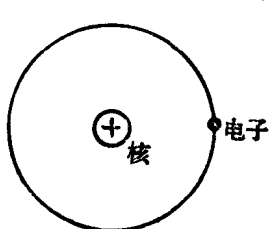


图 1-3 氢原子模型

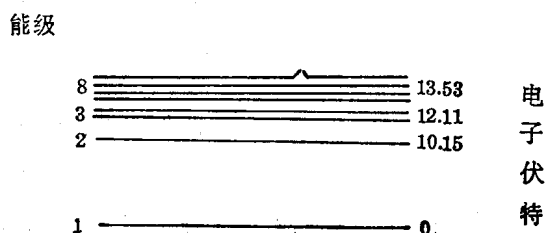


图 1-4 氢原子能级图

原子核周围的电子在不同轨道上运动着，当原子不受外界激发时，靠近原子核最近的那个轨道上的电子，处于最低能量状态，称为基态。在量子力学中，人们把原子的各级能量状态形象化地用能级图表示出来。氢原子的能级如图 1-4 所示。能量的单位一般用尔格、电子伏特、厘米倒数表示，三者之间的关系是

$$1^{-1} \text{ 厘米} = 1.986 \times 10^{-6} \text{ 尔格,}$$

1 电子伏特 = $8,066^{-1}$ 厘米

二、自发辐射和受激辐射

基态能级上原子数最多，较高能级上原子数少，例如红宝石晶体中在室温时，处于基态的铬离子数比激发态铬离子数高约 10^{40} 倍。在没有任何外界影响的情况下，原子也能自发地从高能级跃迁到低能级，并以光的方式释放出能量（图 1-5）。

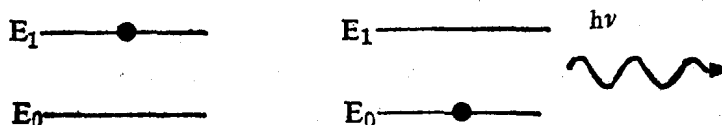


图 1-5 原子的自发辐射

所辐射的光子频率服从玻尔频率条件，即 $E_1 - E_0 = h\nu$ ， h 为普朗克常数，并等于 6.55×10^{-27} 尔格秒，由此推导出自然辐射跃迁的光波频率由下式计算

$$\nu = \frac{E_1 - E_0}{h}$$

这种跃迁是随机的，称为自发跃迁，伴随着自发跃迁的光辐射，叫做自发辐射。而自发辐射的光子传播方向、相位和偏振都是随机的。

当处于高能态的原子受到适当频率的外界光子激发时，也发生跃迁，并辐射 1 个光子，所辐射的光子与外界入射光子的频率、相位和传播方向，偏振都相同，把这种跃迁叫做受激跃迁或感应跃迁。伴随着受激跃迁的光辐射称为受激辐射，如图 1-6 所示。受激辐射跃迁的产生，是形成激光的重要条件。必须说明，只有外界入射光频和原子能级相当时，才能产生受激辐射。理论指出，受激辐射的几率与爱因斯坦吸收系数有关。

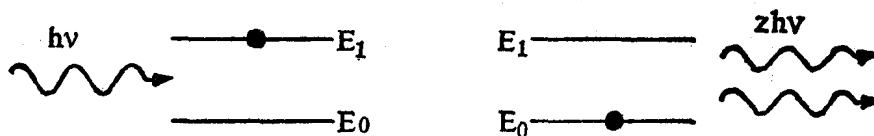


图 1-6 受激辐射示意图

三、原子跃迁的寿命

具有很多原子组成的物质中，当原子激发到高能级后，很快地跃迁到低能级，把原子在高能级停留的时间，叫做原子在该能级的寿命，也叫做荧光寿命。原子的寿命长短与跃迁几率的大小都是由原子结构决定的。

四、谱线宽度

上面已说到过光子的频率服从玻尔频率条件，在这里必须指出所产生的荧光频率并不是绝对单色的，也就是说，激光器辐射的频率有一定的线宽。下面简要地说明影响谱线宽度的几个原因。

(一) 自然线宽 当原子不受外界任何影响时，所辐射或吸收的光也有一频谱宽度，

这就是自然线宽。根据罗伦兹电子理论，这是由于辐射阻尼使原子发出的光辐射为一列有限长的波列。阻尼越大，波列越短。由频谱分析可知，波列越短，频谱就越宽。反之，阻尼越小，波列越长，所以频谱就越窄。根据理论推导出自然谱线宽度由公式

$$\Delta\nu_{\text{自}} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

计算。上式中 τ 就是前面所提到的原子跃迁寿命。由于原子的寿命是有限的，就决定了自然线宽的宽窄。也就是说受激辐射的光频不是纯单色的，所辐射的激光束具有一定的带宽。自然线宽的形状为罗伦兹线形，如图 1-7 所示。从图示自然线宽的线形中最大高度的一半处所包括的频率范围，称为自然线宽。

(二) 均匀加宽 原子的自然线宽是很窄的。一般原子跃迁的寿命约为 10^{-8} 秒量级，代入到自然线宽公式中求得的谱线宽度约 10 兆赫。这是指单个原子辐射的理论值。事实上，原子受到外界各种影响而使谱线宽度比理论值大得多。

均匀加宽是由于受到外界某种影响时，使全部原子的跃迁谱线都加宽了，人们也称为一致加宽。引起均匀加宽的原因很多，其中在气体原子或分子中的碰撞作用而引起的谱线加宽就是属于均匀加宽。

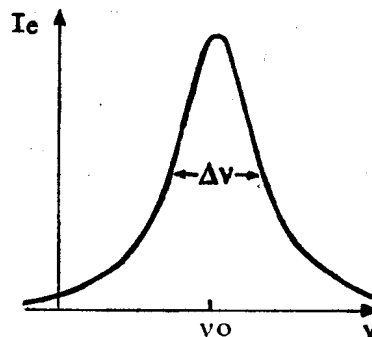


图 1-7 自然线宽线型

在气体中原子跃迁辐射的光子，受到其他粒子碰撞，虽然碰撞后原子仍然辐射光波，但这时辐射的光波与碰撞前的光波互不相干，没有任何联系。即碰撞后相当于另一个不相干的原子在辐射光波。或者可以认为原子跃迁的有效寿命减短了。如果有效寿命减短了，所以跃迁辐射的频谱宽度相应加宽了。因为碰撞作用对所有原子都是相同的，所以称它为均匀加宽或碰撞加宽。根据理论计算指出，均匀加宽的谱线形状与自然线宽形状相同。

(三) 非均匀加宽 在气体中发光原子总是在不断的热运动中，因此每个发光原子的频率实际上是有差别的。其原因是原子对着观察者之间产生了相对的运动，原子相对速度同观察者之间的这种变化运动，使观察者能感觉到有频率的变化，这种物理现象叫做多卜勒效应，由这个效应产生的频率漂移称为多卜勒频移，由下式计算

$$\Delta\nu_{\text{多}} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{V}{C} \cos\theta\right)$$

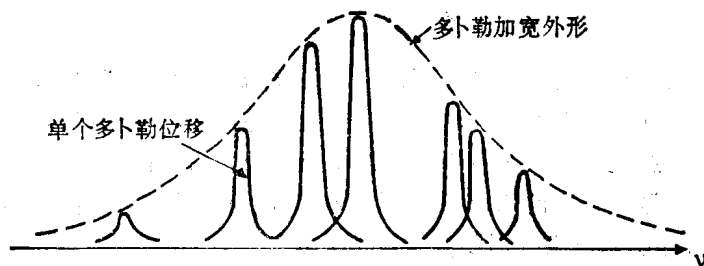


图 1-8 多卜勒加宽线型

上式中 ν_0 为静止原子发射的光频率, V 为热动原子与观察者的相对速度, θ 是两者间夹角。在这里我们考虑的是不规则热运动的各种原子所辐射光波的叠加, 因此总的谱线形状就是各种中心频率不同的原子的自然线宽的叠加。如图 1-8 所表示的线形。

由于多卜勒效应对速度不同的发光原子所产生的作用不同, 多卜勒频宽也不同, 所以多卜勒效应所产生的频率加宽是一种非均匀加宽。在气体中温度越高时, 原子或分子的热运动加剧, 产生的多卜勒频宽也越宽。其谱线宽度的线型为高斯线型。

五、粒子数反转和增益系数

在热平衡条件下, 在各能级上的粒子数, 根据玻尔兹曼方程计算。高能级上粒子数总是比低能级上粒子数少。在这种情况下, 介质总是表示吸收光的, 并是衰减的, 因而不能得到光放大。为了使介质具有光放大的特性, 光必须要有增益。在外来的能量激发下, 破坏了热平衡状态, 人为的造成高能态的粒子数大于低能态的粒子数, 把这种状态称为粒子数反转。实现粒子数反转就是各种激光器的理论和实践的基本问题。图 1-9 表示三能级粒子数反转的情况。

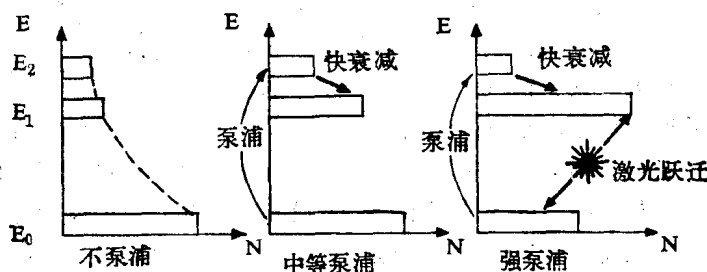


图 1-9 三能级光泵粒子反转过程

有粒子数反转的工作物质, 受激辐射光增强, 即光子有放大作用, 这种放大作用通常叫做介质增益。光增益常用增益系数来描述。增益系数 $K(\nu)$ 由下式计算

$$K(\nu) = \frac{A_{21} C^2 F(\nu)}{8\pi \nu^2 n^2} \left(N_2 - \frac{g_1}{g_2} N_1 \right)$$

式中 A_{21} 为能级 2 的自发跃迁几率, c 为光速, n 为工作物质的折射率, $(N_2 - \frac{g_1}{g_2} N_1)$ 表示粒子数反转的大小。由此公式可以看出, 增益系数是频率的函数, 它的形状与谱线的罗伦兹线型一样。

六、激光振荡的阈值条件

仅有粒子数反转还不能形成激光振荡, 还要有增益和“反馈”作用, 有了足够的“反馈”作用才能产生光振荡并有激光输出。在激光振荡器中, “反馈”是由共振腔来实现的, 最简单的共振腔是由两块平行平面反射镜组成的。由共振腔保证产生激光振荡的最低条件, 人们称为激光振荡的阈值条件。当两块相距 L 的平行平面反射镜的反射系数各为 r_1 和 r_2 时, 推导出阈值条件需要满足以下公式

$$r_1 r_2 e^{2\alpha L} = 1$$

七、激光共振腔

我们已知道了产生激光的基本条件，首先要有能实现粒子数反转的工作物质，其次要有光学共振腔。当工作物质不能实现粒子数反转时，尽管发光很强，都不是辐射的单色光。由此可见，实现粒子数反转是激光产生的物质基础，光学共振腔是重要条件。这就是激光与普通光的本质上的区别。

通常情况下共振腔是由两块镀了高反射率的多层介质膜或者金属膜的反射镜组成。1个为全反射镜，要求反射率大于98%以上，另1个是部分反射镜，其透过率和反射率根据实际工作需要选定。

共振腔的用途之一是使光信号能够多次反复地沿着一定方向通过工作物质，使光获得放大，最后达到饱和，产生激光输出。共振腔的第二个作用是限制激光振荡模式，使激光输出有较好的时间和空间相干性。

光学共振腔一般分为两类，一是驻波腔，其二是行波腔。而每类共振腔又有许多不同形式的组合，如图1-10所示。

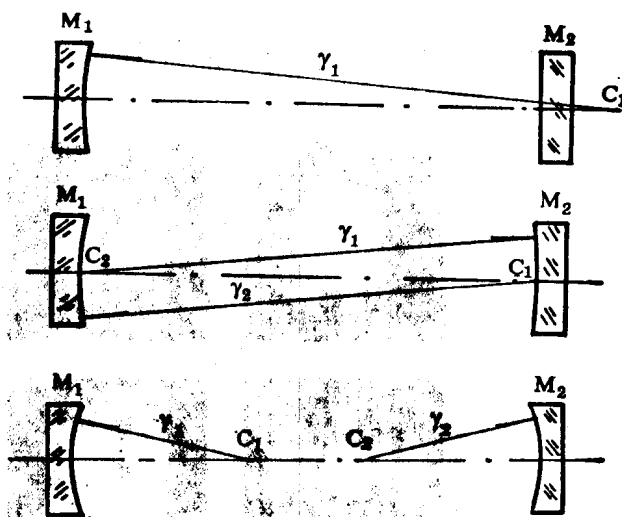


图 1-10 共振腔的几种形式

八、激光的模式

光学共振腔对激光输出频率有选择作用，只有那些满足驻波条件的光频才能在共振腔中不断来回反射并被放大。

(一) 激光的纵模 激光器输出的频率受到工作物质谱线宽度的限制，另一方面共振腔只能够满足驻波条件的那些共振频率的光被放大，因此激光振荡器只能发生在同时满足上述两个要求的光频上。在这种条件下，振荡器的频率间隔差就由下式给出

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\pi L}$$

如果针对某一种工作物质的原子荧光谱线宽度恰好落在这个频率间隔上，就能产生激光。只有1个频率上能形成激光输出，称为纵模。也可以称为单频激光器。如果在激光器的输出中有可能出现2个或者3个频率的振荡输出时，这就是多频或多模激光器。

激光器纵模与原子自发辐射的荧光线宽有直接关系，荧光谱线越宽，出现纵模越多的可能性大。此外，由上式看出，与腔长L有关，共振腔越长，频率间隔差越小，因此在同样的荧光线宽里可以容纳的纵模越多。

(二) 激光的横模 我们已经知道了光学共振腔具有很高的Q和低损耗，同时损耗小于介质增益时，可以形成激光。但是高的Q条件不能维持激光全部频率都能发射激

光，在共振条件下，只有某些中心频率在获得振荡和放大。即激光可能以间隔为 $C/2L$ 的频率输出，称为激光的横模频率。

不同的激光模式，对应的激光光束的垂直截面上光强的分布具有一定的形状，我们把这种光斑的各种花样称为激光的横模，其横模截面上的光强分布为高斯线形，其数学表示式为

$$I_0 = I_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega}}$$

把各种模式的激光射到一观察屏上，其光斑花样的摄影如图 1-11 所示。

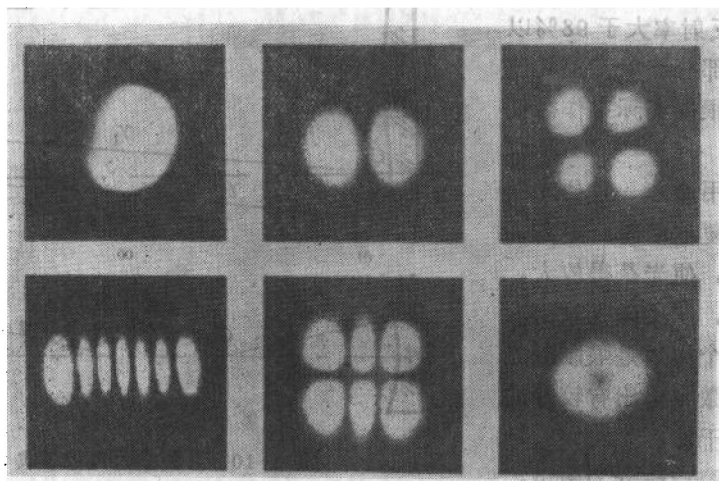


图 1-11 激光横模花样

激光器工作在单纵模，单横模时，最接近为单色光源，具有最好的单色性。但是由于有非均匀加宽的作用，输出的激光同时有许多单纵模和横模存在，如果要获得单模输出，可以用选模技术得到。

第三节 激光器种类

1960 年激光器问世后，1961 年用激光凝固视网膜剥离获得成功，引起了各国医学界的广泛兴趣。激光在医学中的应用被逐步推广，人们还深入进行了激光生物效应和激光防护的研究。激光在眼科应用更为突出。本节仅就当前眼科治疗中常用的几种激光器基本工作原理进行叙述。

一、固体激光器

固体激光器是以固体材料作为激光工作物质的激光器。它是以各种晶体和非晶体物质作为基质材料，并将产生激光作用的激活物质掺入到里面去。例如红宝石，掺钕钇铝石榴石（简称 Nd^{3+}YAG ）和钕玻璃等就是当前固体激光器的主要工作物质。由上面激光原理的讨论可知，一般固体激光器由下面 3 个主要部分组成。即是工作物质，激励源和共振腔。此外还有光泵和聚光腔，电子控制系统。图 1-12 是固体激光器原理结构图。

固体激光器按工作方式分为脉冲激光器，高重复频率激光器和连续输出激光器。

现在描述固体激光器的工作过程：当与脉冲氙灯并联的储能电容器已充好预定的电压后，接通高压触发器线路，并输出万伏以上的电压，加到氙灯的触发电极上，氙灯就电离，同时电容器上的高压对氙灯放电，氙灯发光谱线一定的极强光能，经过聚光腔的作用，把光会聚在照射工作物质，光能一部分被工作物质所吸收，将低能态粒子数激发到

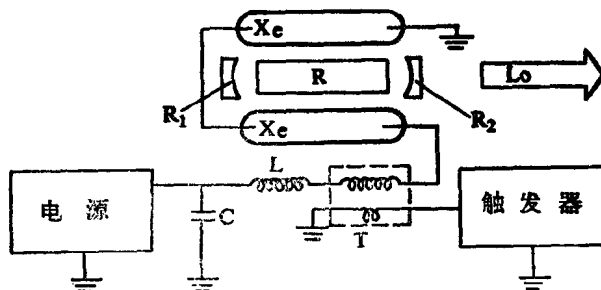


图 1-12 固体激光器原理图

$R_1 R_2$ —反射镜 Xe—脉冲氙灯 R—激光工作物质 C—储能电容器 T—触发变压器 Lo—激光输出 L—脉冲整形电感器

高能态并在亚稳态上积累了大量粒子数，达到粒子数反转状态，在共振腔的作用下，当输入能量满足阈值条件，放大作用超过损耗，形成受激辐射并产生激光输出。

上面提到了固体激光器的工作物质是晶体或者玻璃，但是只有晶体或玻璃并不能产生激光。为了产生激光，必须在晶体或者玻璃中掺入少量的特别元素。它们是过渡金属如有铬（Cr）、锰（Mn）、钴（Co）、镍（Ni）等，还有稀土元素如有钕（Nd）等。

（一）红宝石激光器的工作物质和工作原理 红宝石材料是在三氧化二铝（ Al_2O_3 ）晶体中掺入少量的三氧化二铬（ Cr_2O_3 ），在高温条件下生长成的粉红色晶体。其中三氧化二铝为基质， Cr^{3+} 是激活离子。由于铬的含量不同，生长成的红宝石颜色深浅不一样。

红宝石激光工作物质的能级示意图如图 1-13 所示。

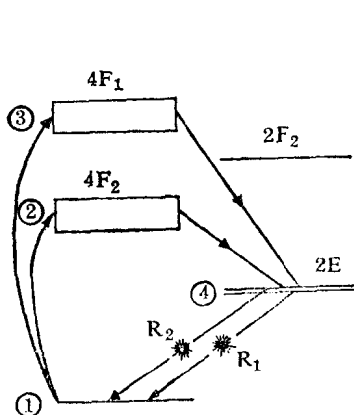


图 1-13 红宝石激光器粒子反转过程

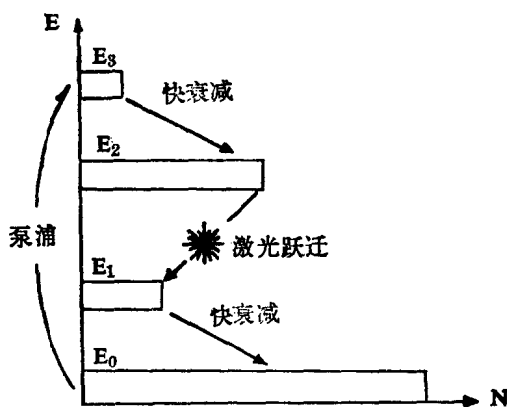


图 1-14 四能级激光器的粒子数反转

图中 $4F_1$ 和 $4F_2$ 为吸收带， $2E$ 代表亚稳态， $R_1 = 6,943 \text{ \AA}$ ， $R_2 = 6,927 \text{ \AA}$ 。①②③④表示光泵后产生激光的过程。

当没有光泵时，大多数 Cr^{3+} 都处在基态上。当光泵时，部分铬离子吸收了泵浦光中 $5,600 \text{ \AA}$ 左右的绿光和 $4,000 \text{ \AA}$ 左右的蓝紫光，并跃迁到相应的吸收带 $4F_1$ 和 $4F_2$ 上，由于铬离子在这两个吸收带上的寿命仅有 10^{-9} 秒，因此被激发到 $4F_1$ 和 $4F_2$ 上的铬离子

很快以无辐射跃迁的形式转移到亚稳态 $2E$ 上。因为铬离子在亚稳态上的寿命为 3×10^{-8} 秒量级，比吸收带上寿命长得多。外光泵浦不断激发时，使亚稳态上的粒子数逐渐积累，并达到一定数量后，就形成了亚稳态与基态之间的粒子数反转，于是亚稳态上的铬离子主要以受激辐射返回基态。加上共振腔的反馈作用和对谱线 R_1 的选择性，当增益大于损耗时，就形成激光输出。它输出红色的 6,943 埃激光。

通过以上分析红宝石激光器工作原理，可以清楚地看到，参与激光作用的能级有三个，即基态、亚稳态和吸收带，因此称它为三能级系统。一般说来，三能级系统激光器的阈值要求较高，效率较低。

(二) 钕玻璃激光器的工作物质和工作原理 钕玻璃是在各种玻璃中加入 2~6% 的三氧化二钕制成的。其中钕离子 (Nd^{3+}) 为激活离子，玻璃为基质。根据不同的工作性质，可选用硅酸盐玻璃，碱硼硅酸盐玻璃等。在钕玻璃激光器中参与激光工作的物质是 Nd^{3+} ，它的能级结构如图 1-14 所示。

图中 E_0 表示基态能级， $E_1 \sim E_3$ 表示从低到高能级。由能级图可看出，当泵浦光照射在钕玻璃上时，基态上大量的 Nd^{3+} 吸收了泵浦光中从 5,000 Å 到 9,000 Å 之间的光能，并分别跃迁到高能级 E_3 上，由于 E_3 上寿命短，约 10^{-8} 秒，所以钕离子在亚稳态上以无辐射跃迁很快地返回到亚稳态能级 E_2 上，而 E_2 上的寿命约 10^{-3} 秒，比 E_3 长得多，所以在 E_2 上可以积累大量的钕离子，当粒子数积累许多，并能达到粒子数反转时，在 E_2 上的粒子数以受激辐射跃迁到 E_1 上，同样加上光学共振腔的反馈作用，增益大于损耗时，产生了激光输出，输出谱线是 1.06 微米的近红外激光。参与激光工作的能级有 4 个，称为四能级激光器。它的阈值条件比三能级红宝石激光器低。

(三) 掺钕钇铝石榴石激光器的工作物质及工作原理 该激光器的工作物质为掺钕钇铝石榴石，它是在钇铝石榴石中掺入少量的三氧化二钕制成的，钕离子在晶体中取代了一部分钇原子， Nd^{3+} 的含量大约是钇原子的百分之一。 $Nd^{3+}YAG$ 激光器也是四能级系统，粒子数的反转过程和激光产生的原理与钕玻璃相同，激光波长也是 1.06 微米近红外光。但由于它的阈值条件低，转换效率高，能够连续工作。

(四) 固体激光的泵浦 因为固体激光的工作物质，有较宽的吸收光谱，所以可很方便地用各种光泵的激励方法。光泵浦方式有脉冲和连续泵浦两种工作方法，都是将电能转换成光能，使工作物质吸收一定谱线的光能，造成粒子数反转，产生激光。贮存在电容器上的能量大小，由下式计算

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

式中当 C 为法拉，电压 V 为伏特时，能量 W 为焦耳。激光输出的大小，与工作物质的效率和灯由电能转换为光能的效率等有关。目前常用的脉冲泵浦光源是氙灯，有直管灯和螺旋式两种。连续泵浦光源有碘钨灯、氪灯、汞灯等。

(五) 光学共振腔和聚光腔 从激光形成的原理可知，当激光工作物质在光泵激励下，实现了粒子数反转的条件，为了产生强的输出激光，还要有光学共振腔。固体激光器的共振腔类型较多，常采用两块互相平行的平面反射镜组成。其中一为镀了多层介质膜的全反射镜，另一块为部分反射镜，作为激光输出端。反射镜平行度要求 5 秒左右。根据激光器要求不同，可以镀以多层介质膜，如硫化锌、氟化镁等，每层膜的厚度约为