

激光及其医学应用

1960 年第一台红宝石激光器问世,此后两三年内这类激光器就被尝试用于眼科和皮肤科的治疗.1966 年,华裔科学家“光纤之父”高锟预言光纤将用于通信.到 1973 年通过内窥镜技术成功地将激光导入动物的胃肠道,至此无创导入技术得到了快速发展.在临床医疗中,外科手术治疗是一种十分常见和重要手段:医生用手术刀把病变组织分离出来.现在激光手术得到了长足的发展,利用激光做切口和去除肿瘤已经十分普遍.而在眼科学中激光的应用更加突出,激光可以直接进入眼睛治疗视网膜的疾病或者修复破损的视网膜;利用不可见波段的激光能量可以消除白内障手术后导致的浑浊沉淀物,甚至用来矫正近视.医用激光突出的优点在于它的两个特性:纤细的高密度光束和及其单纯的颜色.本章主要讨论激光的发生原理、物理特性以及生物效应等,并对其在医学上的应用作简单的介绍.

10.1 原子模型

根据玻尔原子模型(见图 10-1),电子按一定的轨道绕原子核运动.和行星的轨道运行方式不同,玻尔原子中电子的运行的固定轨道数目有限.更确切地说,轨道是电子在原子核周围形成一定的形态的电子云.电子在原子中的运动只能有某些允许的轨道,除此之外,就再没有别的轨道了.根据量子理论,每个运动轨道代表电子的不同运动状态,它们互相独立,各有特定的能量.每个轨道运动就相应于一定的电子能量,因此电子的运动能量也就不能具有任意的数值,只能具有某些所允许的不连续的数值.这些所允许的能量状态就称为量子态.这一运动特点是原子世界所特有的.

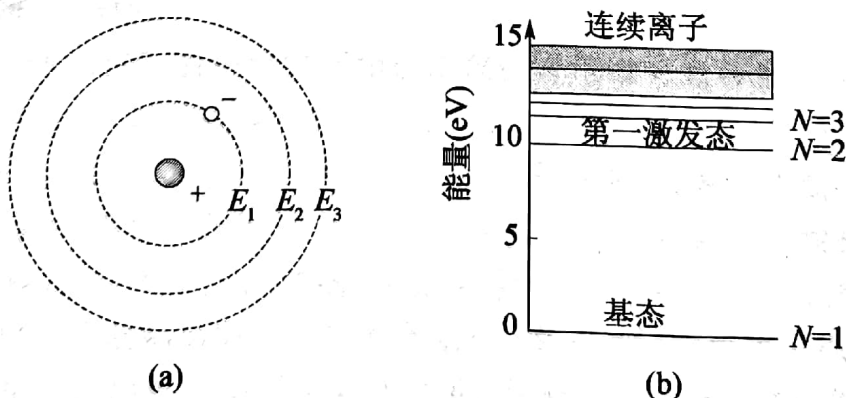


图 10-1 玻尔的原子模型和简单的能级结构图



量子态又可用能级图表示,如图 10-1(b) 所示. 这里 E 表示不同数值的能量,或称能级. 图中电子只能栖于这些由不同的能级表示的轨道上. 电子具有最低能量的状态称为基态 (ground state), 处于基态的电子如果获得外界的能量可以跃迁到较高能级,即为激发态 (excited state). 电子能级变化的这种阶梯被称为量子 (quantum), 由电子能级的差 ΔE 决定其数值. 当电子在原子中的运动表现为从一个能级跃迁到另一能级时,电子的能量就发生变化,这个能量的变化就表现为整个原子能量的变化. 所以在讨论电子在原子中的运动时,通常只说原子的能量,而不说电子的能量.

在一定的条件下,电子可以改变其所处能量状态(轨道),称为跃迁 (transition). 如果电子由低能级跃迁至高能级,则原子必须从外部接收能量,其发生机制有不同形式:如和其他原子发生非弹性或半弹性碰撞,或者通过电磁辐射(光)的形式吸收能量. 同样,如果电子从高能级掉入低能级,原子必须释放其能量. 其方式可以是以动能,称为非辐射跃迁 (nonradiative transitions); 或者以电磁辐射的形式,称为辐射跃迁 (radiative transitions).

10.2 光的自发辐射和受激辐射

10.2.1 光子和能量

17~18 世纪,对光的本性研究充满了争议. 一些学者认为光是由微粒组成,而另一些则提出光是一种波. 两种理论都可以解释一些光的现象,但也都有些无法解释的现象. 1905 年,爱因斯坦提出光(电磁辐射)是量子化的,其基本量现在称为光子或光子. 就是说光是有一种被称为光子的特殊微粒组成,而光子则表现出粒子和波两种特性. 最显著的一个表现就是:一个光子的能量 E 与电磁波的频率 ν 成正比,即

$$E = h\nu \quad (10-1)$$

式中, h 是普朗克常数 ($6.626\ 068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}$).

因此波动性和粒子性都是光的客观属性:一方面光是电磁波,具有波动的性质,有一定的频率和波长;另一方面光是光子流,光子是具有一定的能量和动量的物质粒子. 在一定条件下,可能某一方面的属性比较明显,而当条件改变后,另一方面的属性变得更为明显. 例如,光在传播过程中所表现出来的干涉、衍射等现象中其波动性较为明显,这是可以把光看做是有一列一列的光波组成的;而当光和实物相互作用时,如光的吸收、发射、光电效应等,其粒子性较为明显,这时往往又可以把光看做是一个一个光子组成的光子流.

10.2.2 光和物质的相互作用

原子、分子或离子辐射光和吸收光的过程是与原子的能级之间的跃迁联系在一起的. 光与物质的相互作用有三种不同的基本过程,即自发辐射、受激辐射和受激吸收. 在不同的情况下,各个过程所占的比例不同,普通光源中自发辐射起主要作用,激光器的工作过程中受激辐射起主要作用. 现以最简单的二能级系统介绍光的受激吸收、自发辐射和受激辐射(见图 10-2).



1. 自发辐射

处于激发态的原子自发的从高能级跃迁到较低的能级,把能量以光子的形式向外发射,这一过程称为自发辐射(spontaneous emission).如图 10-2(a)所示,能级 E_1 和 E_2 分别表示基态和激发态,假设原子处于激发态能级 E_2 上.因 $E_2 > E_1$,原子将自发地跃迁到基态 E_1 ,跃迁时辐射出一个能量为 $\Delta E = h\nu$ 的光子.

自发辐射的特点是每个发生辐射的原子都可以看做一个独立的发射单元,原子之间没有联系而且各个原子开始发光的时间不一致.所以虽然各列光波频率相同,但各列光波之间没有固定的相位关系,各有不同的偏振方向,并且各个原子所发的光将在空间各个方向传播.

在正常情况下,处于激发态原子不稳定,平均寿命约为 10^{-8} s.但是对于某些激发态,其平均寿命可能比这长 10^5 倍.这种长寿命的激发状态称为亚稳态,它们在激光器的工作过程中起着重要作用.

2. 受激辐射

1917 年爱因斯坦提出受激辐射(stimulated emission)的概念,即频率适当的光子可诱发处于较高能级的原子发射光子而跃迁到较低能级,称为受激辐射.如图 10-2(b)所示,处于激发态 E_2 上的原子,在频率为 ν 的外界光信号(诱发光子)激励下,从 E_2 能级跃迁到 E_1 能级上,发射能量为 $h\nu$ 的光子.由于此事件是由外来光子引发的,所发射的光子在各个方面都和激发光子相同.因此和这些光子相联系的波都具有相同的能量、相位、偏振态以及传播方向.这样一来,就有两个相同的光子发射出来.如果用电磁波的观点来解释时,这两个光子就代表一个波,而这个波的能量比原来的入射波的能量要大.也就是说,通过受激发射过程,光被加强(或者说放大)了.这也就是激光放大的基本概念.

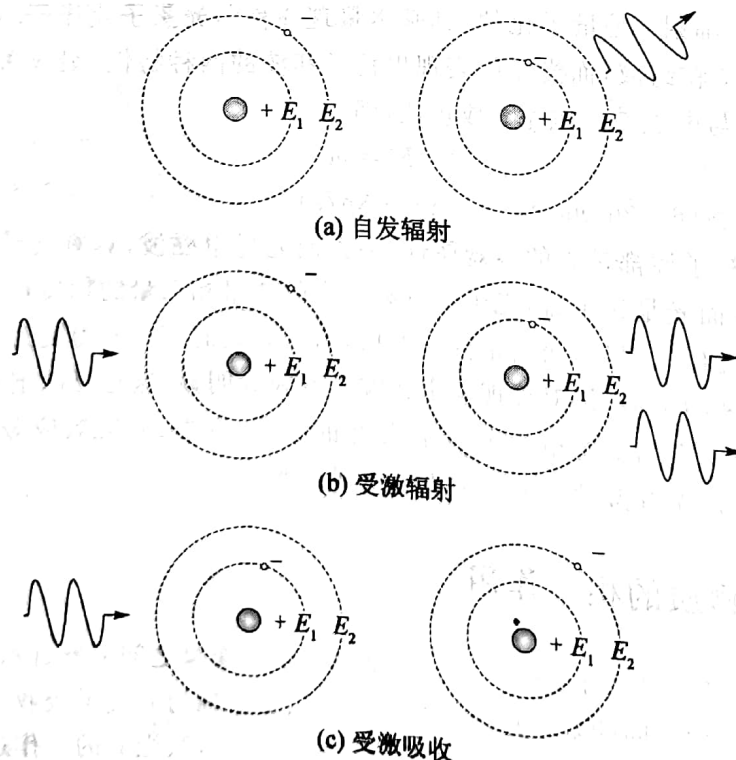


图 10-2 原子能量状态转化的三种方式



受激辐射与自发辐射的重要区别在于相干性. 自发辐射完全是一种随机过程, 处于高能级 E_2 上的大量原子各自独立地发射频率为 ν 的光子, 其传播方向、振动方向、初相位都彼此不相关, 这种光称为自然光. 受激辐射是在外界辐射场的控制下的发光过程, 因而各原子的受激辐射相位具有和外界辐射场相同的相位. 在量子电动力学的基础上可以证明: 受激辐射光子与入射光子属于同一光子态; 或者说, 两者具有相同的频率、相位、传播方向和偏振, 因而是相干的.

3. 受激吸收

光的受激吸收(stimulated absorption)是与受激辐射相反的过程. 如图 10-2(c) 所示, 处于低能级 E_1 上的原子, 在频率为 ν 的外界光子作用下, 吸收光子能量, 引起电子从低能级向高能级 E_2 跃迁, 光子消失, 这种过程称为受激吸收. 其能级差 ΔE 和光子频率的关系满足公式 (10-1), 即 $\Delta E = h\nu$.

10.3 激光产生的基本原理

10.3.1 介质中光的受激辐射放大

与普通光源不同, 激光是靠介质内受激辐射向外发出大量的光子而形成的. 受激辐射产生的光子与外来光子性质完全相同, 使入射光得到放大. 用这种原理制成的光源称为受激辐射光放大器, 简称激光器. 图 10-3 所示为在介质中光子得到受激放大的物理过程. 由于受激辐射产生的光子与外来光子传播方向相同, 这里只考虑一个方向(z 轴方向)的光. 在光和物质的相互作用下, 介质中存在两个物理过程——吸收和受激辐射. 如果吸收大于受激辐射, 沿 z 轴方向进入的入射光穿过介质时, 因介质吸收而减少的光子数目多于因受激辐射而补充的光子数, 光强会逐渐变弱[见图 10-3(a)], 不能形成激光. 反之, 如果受激辐射大于吸收, 沿 z 轴方向进入介质的光会越传越强[见图 10-3(b)], 就有可能形成激光. 因此, 产生激光的基本条件就是受激辐射大于吸收.

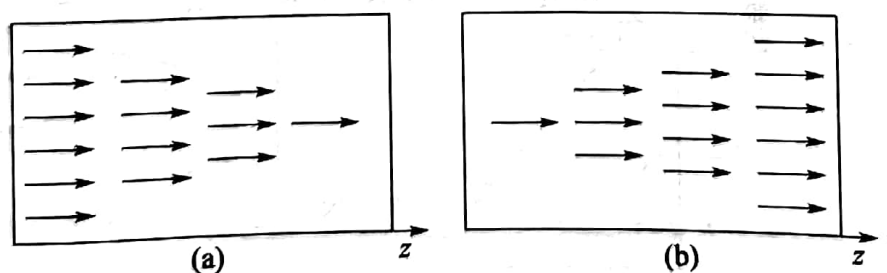


图 10-3 光在介质中传播的物理过程

10.3.2 玻耳兹曼分布

前面介绍了单个原子的受激发射. 通常一个包含大量的原子物质处于温度为 T 的热平衡状态. 在没有接受外界任何辐射的情况下, 设这些原子中有 N_0 个处于能量为 0 的基态, 有 N_1



个原子处于激发态. 根据统计规律性, 大量原子所组成的系统在热平衡状态下, 原子数按能级分布服从玻耳兹曼定律

$$N_x = N_0 \exp\left(-\frac{E_x - E_0}{kT}\right) \quad (10-2)$$

其中, k 是玻耳兹曼常数 ($1.380\,650\,3 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$). kT 是温度为 T 时一个原子的平均动能. 温度越高, 就有越多的原子被热激发 (即原子之间的碰撞) 到较高的能级 E_x . 由于 $E_x > E_0$, 从公式 (10-2) 得出 $N_x < N_0$; 就是说, 激发态中原子的数目总是比在基态中的原子数少. 这是热平衡情况的一般规律.

如果上述物质受到外界光子的辐射 (假设其能量为 $E_x - E_0$), 每个原子进行自发吸收和受激辐射这两个过程的概率是相等的. 由于在基态中的原子数目较多, 总的效果将是光子的吸收. 而为了产生激光, 必须使发射出的光子多于吸收的. 这就是说, 必须形成受激辐射占优势的情况. 方法就是一开始就使激发态中的原子数多于基态的原子. 但是这种情况和热平衡不相容, 我们需要采用一种巧妙的办法来建立和保持这种粒子数反转分布状态.

10.3.3 粒子数反转分布

由上述分析可知, 当光束通过原子 (或分子、离子) 系统时, 同时存在自发辐射、受激辐射和受激吸收三种过程. 受激吸收使入射光束强度减弱, 受激辐射使入射光束强度增强, 激光器就是利用受激辐射使光放大而获得激光的. 由于受激辐射和受激吸收是两个相互对立的过程, 因此, 在激光器的工作物质中需要建立一种工作状态, 使光的受激辐射过程比其他过程更占支配地位, 也就是使高能级上的粒子数比低能级上的粒子数多, 这个状态就是工作物质处于粒子数反转分布, 如图 10-4 所示.

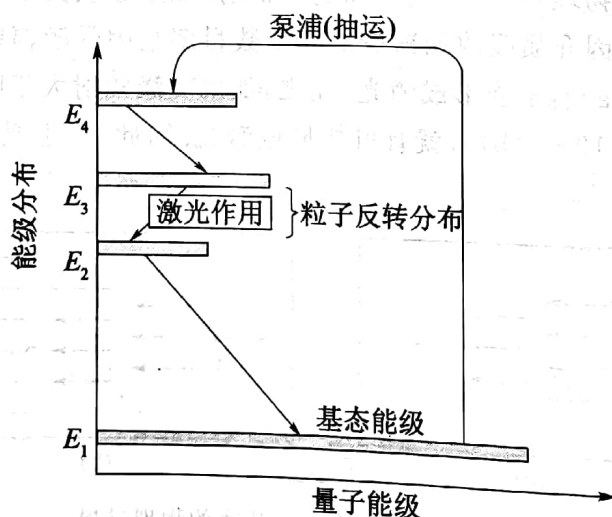


图 10-4 粒子数的正常分布和反转分布

实际的原子的能级结构十分复杂, 电子在不同能级的停留时间反应了能级的稳定性. 其中基态最稳定, 而处于激发态的则不稳定, 平均停留时间为 $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ s}$. 对于有些物质某些激发态的电子停留时间相对较长 (可比典型值长 10^5 倍) 为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}$, 这些能级对于激光的产生十分重要, 称为亚稳态 (metastable state). 因为电子在激发态的停留时间太短, 多数原子将没有机会形成受激辐射就将通过自发辐射方式回到基态, 而只有处于亚稳态的原子有更多的



机会形成受激辐射。

由此可见,实现粒子数反转分布需要两个条件:①有两个以上与反转分布有关且有亚稳态的能级结构,符合这项条件的物质称为**激活介质(active medium)**。②要求外界有能量提供,使得在正常分布下处于低能态的大量原子尽快被激发到高能态,这个过程称为**泵浦或抽运**。

泵浦的方法主要有两种:光激励和电激励。大多数固体工作物质采用光激励,而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。此外根据工作物质的不同,其他的泵浦方式,如化学泵浦、粒子束缚泵浦、气体放电泵浦等也有各自不同的应用。

10.3.4 光谐振腔(optical resonating cavity)

实现工作物质粒子数反转,只是具备了产生激光的必要条件。因为光在工作物质中传播时,受激辐射的光在多个不同方向产生,并且传播一定距离后就射出工作物质,难以形成极强的光束。为此,光束需来回反复的通过工作物质,进行多次放大。谐振腔就是用于产生光振荡并可达多次放大的装置。

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,如图 10-5 所示。一块是全反射镜 R_1 ,另一块是反射率约 90% 以上的部分反射镜 R_2 ,工作物质放在两反射镜之间。谐振腔使受激辐射的光在腔中往返反射,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,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,如图 10-5 所示。

从谐振腔的反馈放大的过程可以看出:激光束只能沿着谐振腔的轴线来传播,因为所有的受激辐射的光子都是同一方向的,所以激光光束具有很高的方向性。

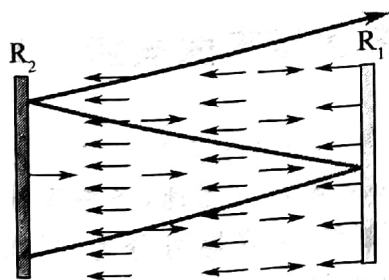


图 10-5 光学谐振腔

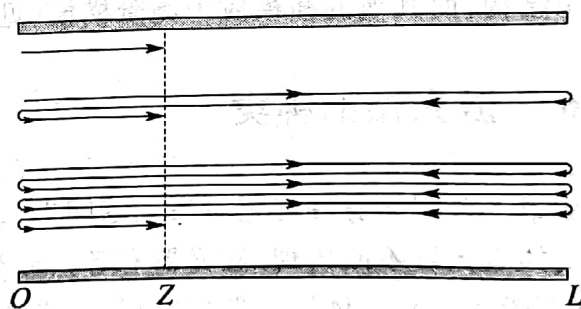


图 10-6 谐振腔的选频作用

谐振腔的反馈放大过程还具有**选频作用**。如图 10-6 所示,在谐振腔内 Z 处的光波中,光子可能已经在谐振腔中往返不同次,它们都在 Z 处相干叠加。如果波长 λ 满足如下条件:

$$2nL = N\lambda \quad (10-3)$$

其中, n 为折射率, L 为谐振腔的长度, N 为正整数。这种频率的波将相应增强,对应的光能密度最大。它们也成为主要的光子用于激发该处介质中的原子。其他不满足上述条件的光波,则受到抑制,逐渐消失。再加上产生激光的频率都是局限在很窄的原子谱线以内,因此谐振腔内能够存在的波长和频率分别为



$$\lambda = \frac{2nL}{N}, \quad \nu = \frac{Nc}{2nL}$$

通常将由整数 N 所表征的腔内纵向场分布称为腔的纵模。

在激活介质产生受激辐射形成光放大的同时,谐振腔内还存在许多光能的损耗因素。通常分为两类:第一类称为内损耗,是由于介质对光的折射、散射和吸收等造成的;第二类称为镜损耗,是由于反射镜产生的吸收、散射、衍射及透射(包括输出的激光)等造成的。因此,欲产生激光,光学谐振腔还必须满足所谓的阈值条件,即光的放大或增益大于或等于上述光损耗。

10.3.5 激光的横模

谐振腔是靠两端的反射镜来实现光束在腔内的往返传播,由于反射镜的大小有限,它在对光束起反射作用的同时,还会引起光波的衍射效应。腔内的光束每经过一次反射镜得到作用,就使光束的一部分不能再次被反射回腔内。因此反射回来的光束的强度要减弱,同时光强的分布也将发生变化。当反射次数足够多时(大约 300 次),光束的横向场分布变趋于稳定。场分布在腔内往返传播一次后能够“再现”出来,反射只改变光的强度大小,而不改变光的强度分布。这种在激光谐振腔中存在着稳定的有规则的横向场分布,就是“自再现模”,通常称作激光器的“横模”。

理论分析表明,在一个给定的谐振腔内,横模可以用二维的积分方程描述。方程的解不唯一,即可以存在许多不同的横模,需要两个模参数(m, n)来区分不同的横模, m, n 称为横模序数。用一个屏接收激光器的输出光束,可以用观察到光束在横截面上光强的分布呈现一系列有规则的图样,如图 10-7 所示。这些光强在光束横截面上的分布就是各种横模花样,用 TEM_{mn} 表示。 $m=0, n=0$ 时所对应的横模 TEM_{00} 称为基模,基模的光强集中在反射镜的中心,是光斑的最简单结构,而其他的横模成为高阶横模(见图 10-7)。



图 10-7 横模光斑示意图

10.3.6 激光器的种类

自从第一台固体脉冲红宝石激光器问世后,激光器的研制发展非常迅速,各种工作物质、运转方式的激光器不断出现。激光器有各种分类方法。按工作物质,激光器可分为固体激光器(如红宝石激光器)、气体激光器(如氦氖激光器)、液体激光器(如染料激光器)、半导体激光器(如砷化镓激光器)、自由电子激光器、化学激光器(如氟化氢激光器)等;按运转方式可分为连续激光器和脉冲激光器;按工作波段分,可分为红外和远红外激光器、可见光激光器、紫外和真空紫外激光器、X 射线激光器等。下面按工作物质,简要介绍几种激光器的主要特性。

1. 固体激光器

以掺杂离子的绝缘晶体或玻璃为工作物质。最常采用的是红宝石、钕玻璃、掺钕钇铝石榴石($Nd^{3+}:YAG$)三种。固体激光器的特点是:输出能量大(可达数万焦耳),峰值功率高(连续功率可达数千瓦),结构紧凑牢固耐用。



2. 气体激光器

以气体或蒸气为工作物质, 由于气体激光器是利用气体原子、分子或离子的分离能级进行工作的, 所以它的跃迁谱线及相应的激光波长范围较宽, 目前已光测到激光谱线不下万余条, 遍及从紫外到远红外整个光谱区. 其特点是输出光束的质量好(单色性、相干性、光束方向性和稳定性等).

3. 燃料激光器

1966年, 人们第一次利用巨脉冲红宝石激光器泵浦氯化铝酞化菁(CAP) 和花菁类燃料, 获得了受激辐射. 此后, 染料激光器得到了迅速的发展. 这类激光器的主要特点是: 输出激光波长可调谐, 某些染料波长的可调节宽度达上百纳米; 激光脉冲的宽度可以很窄(可达 10^{-15} s 量级); 输出功率大, 可与固体激光器比拟, 并且价格便宜.

4. 半导体激光器

以半导体材料为工作物质, 具有超小型、高效率、结构简单、价格便宜, 以及可以高速工作等一系列优点. 20世纪80年代以来发展极为迅速, 是目前光通信系统的最重要光源, 并且在媒体播放机、光盘驱动器、激光打印机、全息照相、激光测距及医疗等许多方面得到了重要应用.

除了上述的几种发展较早和较为成熟的激光器外, 目前还有很多新型的激光器在不断发展中, 例如, 准分子激光器、自由电子激光器、化学激光器、光纤激光器等. 有兴趣的读者可以参看有关书籍作进一步的了解.

10.4 激光的物理特性

激光本质上和普遍光线没有什么区别, 它同样服从光的反射、折射、吸收、透射等物理规律. 但是由于激光的产生形式不同于一般光线, 所以它具有一些特点.

10.4.1 激光的高强度性

激光的能量可集中在很窄的一束光线内, 强度很大. 激光的高强度主要是靠光线在发射方向上的高度集中. 激光的发射角极小(一般用毫弧度表示), 能实现定向集中发射. 一束激光经过聚焦后, 由于其高强度的特点, 能产生强烈的热效应, 其焦点范围内的温度可达数千度或数万度, 能熔化甚至气化对激光有吸收能力的生物组织或非生物材料, 如工业上精密器件的焊接、灯孔、切割, 医学上切割组织(光刀)、气化表浅肿瘤以及显微光谱分析等这些新技术都是利用激光的高强度所产生的高温效应.

10.4.2 激光的高单色性

激光的单色性好指激光频率的谱线宽度很窄. 单色性是由受激辐射及谐振腔的作用所决定的, 只有频率满足 $E = h\nu_{21} = E_2 - E_1$ 的光才能得到放大. 氦氖激光器产生的激光的谱线宽度约为 $8 \sim 10$ nm, 利用这一点, 激光可作为长度的标准.



由于光的生物效应强烈地依赖于光的波长,使得激光良好的单色性在临床治疗上获得重要应用,已成为基础医学研究与临床诊断的重要手段。

10.4.3 激光的高度定向性

激光的高度定向性指激光束在空间传播的散射角非常小,激光在其传播的进程中有高度的定向性。由于激光的单色性和方向性好,通过透镜可以把光束集中(聚焦)到非常小的面积上,焦点的直径甚至可以接近激光本身的波长,这是普通光源所不及的。因为从普通光源中发射出来的光束向各个方向传播,它们是互不平行的光,所以透镜成像时有球面像差。另外,从普通光源中发射出来的光含有很多波长不等的光成分,透镜成像时,由于不同波长光的折射率不同,存在色像差。只有激光才能辐射出几乎是平行的光束,并且波长一致(单色性好),因此可以聚焦成为很小的光点。聚焦激光光束的能量密度可以达到很高的程度,这种特点是临床外科和细胞外科使用光刀的决定条件。

10.4.4 激光的高相干性

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。激光是一个理想的相干光源,单色性最好的光分成两束后只能在数十厘米的光程差内产生干涉,而激光可在数十千米的光程差产生干涉,可用于全息照相和精密测量。

另外,激光的高强度也取决于它的相干性。相干性是一切波动现象的属性。一般光源发射出来的光是非相干光,它是波长不等、杂乱无序的混合光束。由于非相干光的波长、相位、振幅极不一致,因此它们的合成波也是一条杂乱无章、毫无规律的曲线。普通光源如日光、灯光等所辐射的就是这样的非相干光线。

而激光是由受激辐射产生的,这样的辐射波具有相干性,它们的谱线很窄。根据波的叠加原理,如果两列波同时作用于某一点上,则该点的振动等于每列波单独作用时所起的振动代数和。因此,相干光的合成波就是叠加效应的结果。合成波的相位、波长、传播方向皆不改变,只是振幅急剧地增加了。所以,通过叠加后的光色不变,但光的强度极大地增加了。例如,一台功率较大红宝石激光器输出激光的亮度可以比太阳表面的亮度高 10^{10} 倍。

10.5 激光在生物医学中的应用

10.5.1 激光和生物体组织的相互作用

在激光手术和激光治疗中都包括从光到人体组织的能量传递。和普通光类似,激光和任何介质作用也有 5 种不同的现象(见图 10-8),其中,包括光的反射和透射。此外透射的光还通用多种方式被介质吸收,导致光强在传播的途径中逐渐减弱。另外,通过被吸收的光还可能被再



发射,称为荧光.光子与介质中的微粒相互碰撞导致光线传播方向发生改变,这种现象称为媒介对光的传播具有散射作用.这也是光向生物组织传递能量的一种机制.

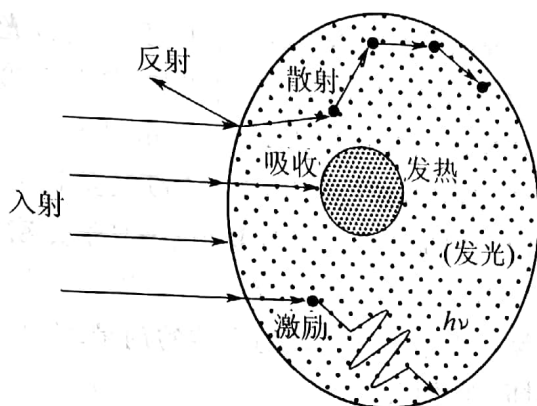


图 10-8 生物体和激光各种类型的相互作用

假如生物体中入射的单色平行光强度为 I_0 ,生物体对于光的吸收是均匀的(见图 10-9),则入射深度 x 和光强 I 的关系为

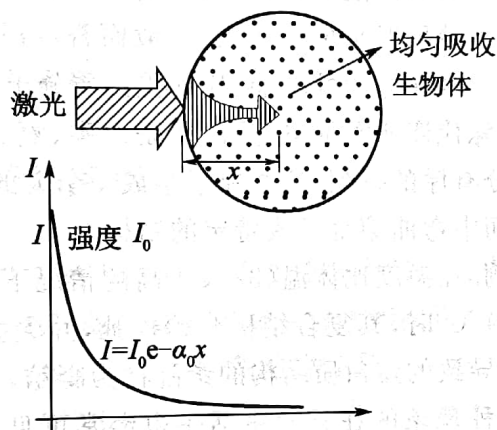


图 10-9 激光入射深度和光强的关系

$$I = I_0 e^{-\alpha_0 x} \quad (10-5)$$

其中, α_0 为吸收系数.如果在吸收作用之外同时考虑散射的影响,式(10-5)中强度的衰减因子可用吸收系数 α_0 和散射系数 α_s 之和代替: $\alpha_t = \alpha_0 + \alpha_s$,即

$$I = I_0 e^{-\alpha_t x} \quad (10-6)$$

如果再进一步考虑生物体表面的反射造成的损失,若反射率为 R ,代入式(10-6)有

$$I = (1 - R) I_0 e^{-\alpha_t x} \quad (10-7)$$

激光手术就是利用吸收或散射作用,将能量传递给生物组织从而将其破坏的一种手段.那么这种能量传递的机理是什么呢?我们知道任意物质内的原子都处于随机运动的状态,即在一么这种能量传递的机理是什么呢?物体温度特性就体现了这种由于随机振动产生的能量.光能最常见的转换形式就是增加被照射组织中分子运动的能量,从而导致区域内温度的升高.这就是光子能量的转换导致的热效应.

光对生物体损伤的程度取决于光源的功率.这是因为功率表示的是能量传递的速率,故大功率的光源传递的能量速度更快.但是实际上在很多医学应用中,大功率的激光器产生的热量也仅相当于一个 100 W 灯泡的作用.因此仅功率还不足以表述激光对生物体的损伤程度,更



重要的量是激光的强度 I , 定义为激光在单位面积上提供的功率:

$$I = \frac{P}{A} \quad (10-8)$$

在激光手术中, 这是一个重要的物理量. 并且借助于透镜激光束可以聚焦到非常小的区域. 聚焦时焦区的直径取决于几个主要因素: ① 入射光的平行度; ② 光的波长; ③ 透镜的焦距 (focal length). 对激光而言, 焦区的直径可以小到 $100 \mu\text{m}$ 甚至几个微米的等级. 一般地, 激光束的直径在 1 mm 以上, 则经过聚焦后强度可以增加 100 甚至到 10 000 倍.

医学应用中另一个重要的物理量是激光的注量, 也就是能量密度, 其定义是

$$F = IT \quad (10-9)$$

注量的概念类似于提供给生物组织中给定区域的光能的剂量. 在要求一定“剂量”的光照的条件下, 功率密度越高需要的时间则越短.

10.5.2 光凝结术 (photocoagulation)

在激光手术中, 多数情况下光束的能量以热的形式传递到血液、身体组织或骨骼中. 这里主要讨论加热的速度问题. 第 1 种情况是慢速加热. 一般而言, 身体中的分子的排列是高度有序的. 分子在空间中构形决定了其在体内的功能. 比如蛋白质分子, 它们可以形成肌肉、结缔组织以及血管; 它们还要运输新陈代谢所需的氧. 蛋白质是由碳、氮、氧和氢原子组成, 这些原子通过化学键结合形成一种十分有序的排列, 这些原子组成一个大的单位称为氨基酸. 构成蛋白质组成部分的氨基酸链在空间中弯曲缠绕形成特定的结构.

以运输氧的肌红蛋白为例. 在温度比体温 (37°C) 高的情况下, 肌红蛋白和其他蛋白质不稳定出现变性. 在温度超过 50°C 时, 其复合结构开始松弛, 并失去原有次序形成密集相互缠绕的网状结构. 这种由于加热导致的蛋白质结构的紊乱称为凝结, 如果该效应是通过激光加热产生的则称为激光凝结术. 这种现象的在日常生活也经常可见. 比如蛋清加热后会出现凝结、变脆并且由透明变为白色.

当激光用于光凝结手术时, 被照组织实质上是被煮熟了. 高温加热的部分组织将改变颜色并失去和周围组织结合的机械完整性, 使其易于分离.

激光手术过程中还有很好的止血能力, 这也是由于其光凝特性造成的. 血管由于凝结作用, 管壁上的蛋白质收缩, 加上受损的血细胞产生凝块从而封闭出血点.

光凝结治疗主要用于眼底病的治疗. 氩离子激光是目前眼底病光凝固治疗的主要光源, 其治疗主要适应症是视网膜裂孔、视网膜血管瘤、脉络膜血管瘤、糖尿病视网膜病变、外层渗出性视网膜病变等.

除激光对眼底病、血管疾患、含血管丰富的脏器疾患、出血性疾患的凝固治疗以外, 近年来, 一些学者正在探索用低功率密度激光束做组织的修复治疗, 如微血管吻合术、外周神经吻合术、输精管吻合术和皮肤的吻合等.

10.5.3 光蒸发术 (photovaporization)

光蒸发实际上是实现光切割的物理过程. 用能量密度极高的聚焦激光束照射组织时, 瞬间



可使被照射组织局部温度升高. 组织液体被超过 100°C 的激光加热时蒸发出水蒸气, 温度再升高到 $300 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 时, 组织则炭化, 使组织变成棕黑色, 用消毒棉花即可将之擦掉, 温度再上升超过 530°C 以上, 则受照组织除了水分急剧蒸发外, 其他成分也发生剧烈烧伤, 使受照组织在瞬间由固态变为气态并被吸除, 这个手术过程称为**光致蒸发术**. 由于人体组织的主要成分是水, 蒸发后导致组织出现切口或者去除相应表层组织, 而且在蒸发区域的边缘产生凝结而无失血情况出现.

蒸发作用需要两个条件: 一是组织必须至少加热到水分的沸点并保持在此温度一定的时间; 二是照射时需要时间非常短和强度非常大以避免在目标区域蒸发前热量被散发掉. 为了实现上述要求激光器通常采用一种脉冲发射的工作方式. 实现脉冲发射的一种方法是采用所谓 Q-切换(Q-switching). 其作用类似电磁开关, 关闭时可以阻止激光的产生而粒子数反转则不断累积到很高的水平; 开关打开后, 则产生非常高能量的激光. 脉冲发生的速率一般为 $1 \sim 10\text{ Hz}$, 持续时间是几个纳秒(10^{-9} s), 携带的能量达到数个焦耳足以蒸发一小块生物组织.

临床激光治疗中多用汽化术将体表的赘生物如疣、痣、色素斑等直接变成含有水蒸气的烟雾而清除掉, 若病变组织过大则可先用激光切割再汽化, 使病变组织彻底消除. 进行汽化时产生大量烟雾必须用吸气机将之吸走, 以保持手术眼清晰, 减少对医务人员健康影响. 有实验表明, 在舌组织汽化时产生的烟雾粒子, 直径在 $11\text{ }\mu\text{m}$ 以上的粒子占全体的 77%, 这么大的粒子完全可以吸入到肺泡而产生沉着, 对人体健康产生影响.

10.5.4 光的波长和光的吸收特性

在激光对于生物体的上述作用的前提条件是组织对光的有效吸收. 激光是一种具有特定波长的单色光, 而组织对于光的吸收能力也和入射光的波长有关. 我们知道物体的颜色和它对特定波长的反射和吸收特性有关. 例如, 白色的物体是由于它几乎反射全部可见光, 而黑色的物体则是由于它吸收了各种波长的光. 大多数物体由于其对不同波长的光吸收能力不同具有其特征性颜色, 即肉眼所观察到的颜色是物体反射的或透射的光.

物体对不同波长光的吸收和物质的原子结构有关. 对孤立的原子, 电子轨道对应的能级差因其化学元素(chemical element)不同可能处于不同波段. 这些波段可以位于 X 射线、紫外线或可见光区域. 当两个或多个原子公用外围电子时组成各类不同的分子, 分子则形成新的能级以便容纳其组成元素的电子. 一般而言, 形成一个较大的分子系统将使得其电子轨道更趋于稳定, 从而导致电子从低能级到高能级状态所需的能量也更大. 也就是表现为光的吸收和发射所关联的波长更短. 举个例子, 当钠和氯结合形成氯化钠(即精盐)时, 它的电子变得更稳定, 相应的能量谱也从淡黄色的钠线移到精盐所具有的紫外色. 由于该化合物只吸收肉眼不可见的紫外光, 所以精盐的颜色看起来呈白色. 物体的颜色除了取决于其分子固有的光吸收性质外, 还受分子浓度的影响.

生物大分子的能级结构很多, 光吸收谱也十分复杂. 图 10-10 是血红蛋白的吸收谱, 它的吸收谱在被氧化状态和脱氧化状态有所不同, 特别是在红色波段的部分(600 nm 的波长). 在和氧结合后, 由于 600 nm 左右波长的光吸收较少而成鲜红色; 在脱氧状态下, 对于红光吸收加强而蓝色区光的吸收减少, 颜色看起来呈暗紫色调.

在激光手术中了解生物组织对光的吸收特性十分必要. 我们知道身体软组织中 70% 的成



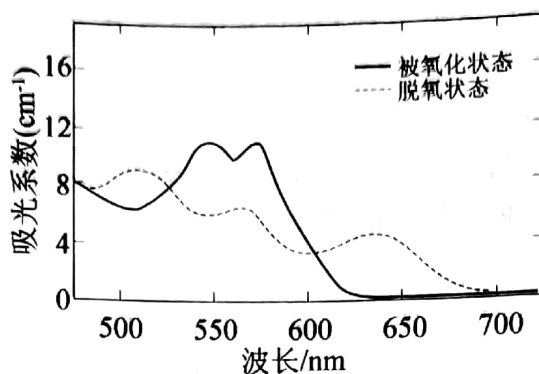


图 10-10 血红蛋白的光吸收谱

分是水,其他是不同浓度的生物分子.虽然水在可见光波段是透明的,但是在低于 300 nm 的紫外区和大于 1 300 nm 的红外光波段水的吸收性很强.蛋白质对紫外波段的吸收强于可见光.

10.5.5 生物体的光谱测量和诊断

通过测定激光照射在生物体时的吸收、散射和荧光等光谱,可以测定有生命的各种各样的生物体信息,进一步发展就能成为对疾病的病理诊断的方法.临床病理诊断的活检(biopsy)是将组织的一部分切片在显微镜下进行病理诊断.光学活检(optical biopsy)是用光谱测量的方法进行无侵袭的诊断.这种方法不仅能得到单纯的解剖学信息,而且还能得到生理学和生化学信息.例如,根据前面介绍的血红蛋白在氧化和脱氧化状态下吸收光谱的差别,通过测量血红蛋白吸收率的不同可以知道组织的氧化程度.目前脑的氧监视装置已经实用化.

10.5.6 光学计算机断层成像(optical computed tomography)

生物体断层成像的典型设备是 X 射线 CT. 其原理是 X 射线源围绕人体旋转从不同的路径穿过人体,由检测器阵列测定 X 射线透射量,再对这些数据以特定的算法(CT 算法)利用计算机求解后构成断层图像. CT 算法的基础是信号在传输方向相反时也能得到同样的输出信号.如果用组织穿透深度较深波段的激光来代替 X 射线,以同样的方法也可得到断层信息.但是与 X 射线在生物体内的直线传播不同,由于散射,激光在生物体内会被扩散掉.扩散光没有确定的光路,得到的信号也没有确定的物理意义,因此从透射光中消除散射的影响,正确检测出直线传播的光成分很重要.目前有很多检测方法,其中最有效的是采用光外差探测法.

光外差探测法是对两个不同频率的光波(信号波和参考波)进行混合后检测拍频信号的方法.它可以得到很高的检测灵敏度.基本做法是将激光束分为参考光和入射光,后者穿过人体后与经过一定频移的参考光混合.由于多色散射得到的光与参考光的偏振方向不一致,不会产生拍频信号,因此检测出的拍频信号就是直线传播光与参考光干涉的结果.

10.5.7 光学相干层析术(optical coherence tomography)

前面介绍的光学 CT 技术是根据 CT 原理得到的断层图像,是利用透射光的信息获取的生物体结构信息.而光学相干层析术(OCT)则是类似超声回波成像方式,利用反射光或散射光



的迟滞时间得到高分辨率的断层图像(两者的英文缩写都是 OCT, 注意区分). OCT 是近十年迅速发展起来的一种成像技术, 它利用弱相干光干涉仪的基本原理, 检测生物组织不同深度层面对入射弱相干光的背向反射或几次散射信号, 通过扫描, 可得到生物组织二维或三维结构图像.

OCT 的原理示意如图 10-11 所示, 其基本结构为迈克耳孙干涉仪 (Michelson's interferometer). OCT 把光分为两束——信号光和参考光, 其中信号光聚焦后照射到组织内得到向后散射光, 参考光通过反射镜在光轴方向上移动来改变参照光的光程, 以实现组织深度方向的扫描. 反射镜为压电陶瓷等器件可以对反射光程进行调制, 实现两束光进行干涉后用外差探测法检测, 得到信号光聚焦点的后向散射光的强度与迟滞时间. 再通过横向二维扫描可测定出在某一断层平面上后向散射光的强度以迟滞时间的分布, 从而得到断层信息. OCT 能够得到空间分辨率为 $10\ \mu\text{m}$ 的生物体断层图像, 接近组织病理切片水平, 远高于 X 射线、磁共振图像 (MRI) 和超声回波等以往的断层图像的分辨率.

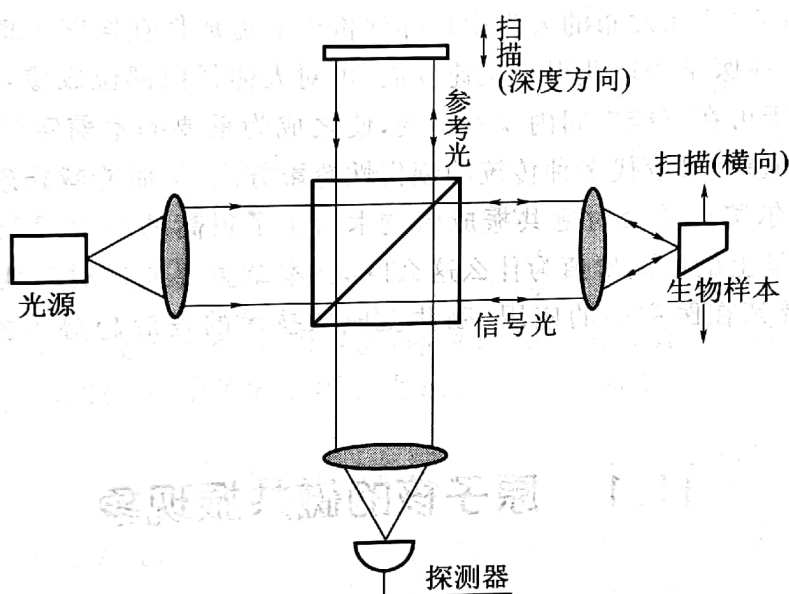


图 10-11 光学相干层析术 (OCT) 原理示

习 题 10

- 10-1 计算下列激光器所产生光子的能量: (1) $10\ 600\ \text{nm}$ 的二氧化碳激光器; (2) $1\ 064\ \text{nm}$ 的 Nd:YAG 激光器; (3) $512\ \text{nm}$ 的氩离子激光器. 这些激光分别属于哪种波段的电磁波? 如果是可见光其颜色是什么?
- 10-2 简述受激辐射的特点以及激光的发生原理.
- 10-3 激光手术具有出血少的特点, 试解释原因. 举例说明光凝结术和光蒸发术的区别.
- 10-4 举例说明光凝结术和光蒸发术的区别. 为什么有些手术须采用脉冲式的激光器的应用?
- 10-5 为什么有些手术须采用脉冲式的激光器的应用?
- 10-6 计算下面情况下的激光的功率密度: (1) 光凝结视网膜时激光照射采用 $500\ \mu\text{m}$ 直径的光斑和功率为 $200\ \text{mW}$ 的激光器. (2) 光蒸发去除眼睛中浊斑时采用 $50\ \mu\text{m}$ 直径的光斑和功率为 $2\ \text{W}$ 的激光器. (3) 比较两者功率密度之比, 并解释这样做的原因.

