

高等学校教学用书

激光基础

袁加勇 编著

浙江大学出版社

ZhongGuo Hang
Zhou Zhe Jiang
DaXue ChuBanShe

目 录

1. 绪论.....	(1)
1.1 光的本质.....	(1)
1.2 激光的发展简史.....	(5)
1.3 激光器的基本组成和种类.....	(6)
1.4 激光的基本特点和应用前景.....	(13)
2. 激光产生的原理.....	(18)
2.1 原子的能级概念.....	(18)
2.2 光和物质的相互作用.....	(22)
2.3 光谱线的宽度和加宽机制.....	(27)
2.4 介质对光的增益作用.....	(35)
2.5 光学谐振腔和激光模式.....	(51)
2.6 激光的产生.....	(60)
2.7 激光器的工作特性.....	(65)
3. 激光束的特性.....	(81)
3.1 方向性.....	(82)
3.2 单色性.....	(84)
3.3 亮度特性.....	(85)
3.4 相干性.....	(87)
3.5 激光束的空间分布特性——高斯光束.....	(89)
4. 激光器.....	(108)
4.1 固体激光器.....	(109)

4.2 气体激光器	(157)
4.3 液体激光器	(174)
4.4 半导体激光器	(185)
4.5 化学激光器	(196)
5. 激光基本技术	(202)
5.1 谱线选择技术	(202)
5.2 选模技术	(206)
5.3 稳频技术	(209)
5.4 倍频技术	(215)
5.5 调Q技术	(225)
5.6 锁模技术	(234)
5.7 激光参数测量技术	(243)
6. 激光的应用	(261)
6.1 激光加工	(261)
6.2 激光在精密计量和测量学中的应用	(270)
6.3 全息摄影	(278)
6.4 激光通信	(285)
6.5 激光在其他方面的应用	(298)
附录	(313)
[A1] 常用物理常数	
[A2] 物理量单位变换	
参考文献	(314)

1. 绪 论

1.1 光 的 本 质

人们对光的性质的认识，经历了一个不断完善发展的历程。从牛顿的微粒说到惠更斯的波动说，使人们对光的认识提高了一大步。波动说成功地解释了光的干涉、衍射和偏振等物理现象。19世纪60年代麦克斯韦在前人研究的基础上建立起著名的电磁理论，预示了电磁波的存在，并证明电磁波在介质中的传播速度等于光速。因此，麦克斯韦确信光是一种电磁现象，光波是一种波长较短、频率较高的电磁波。1888年，赫兹在实验中发现无线电波也具有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的现象，进一步证实了光的电磁理论。

波是振动在空间的传播。在机械波中，振动的是介质中的质点；在电磁波中，振动的是空间的电磁场。通常用电矢量 $\vec{E}$ 来描述电场，用磁矢量 $\vec{B}$ 描述磁场， $\vec{E}$ 和 $\vec{B}$ 互相垂直，且都垂直于电

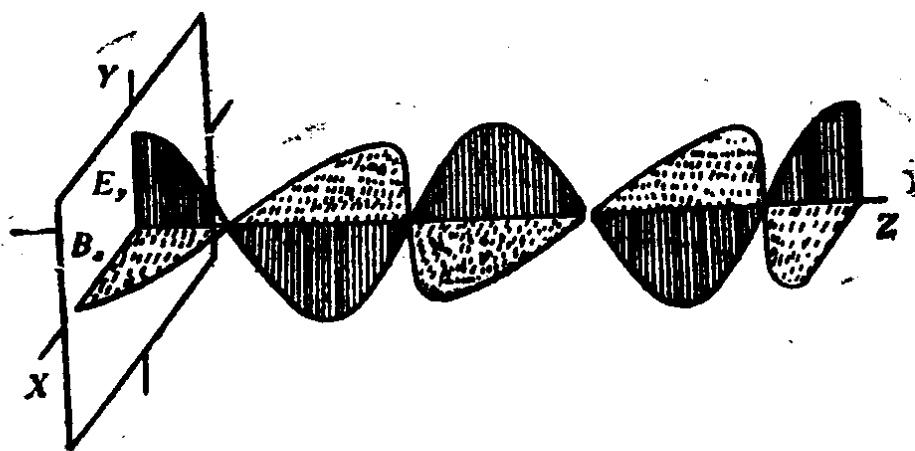


图1-1 电磁波

磁波（光）的传播方向，如图 1—1 所示。

频率为 ν 的电磁场在空间沿 Z 方向传播时，电矢量 $\vec{E}$ 随距离 Z 和时间 t 变化的规律为：

$$\vec{E} = \vec{A} \cos 2\pi \left(\nu t - \frac{Z}{\lambda} \right) \tag{1-1}$$

其中： $\vec{A}$ 是振幅矢量； ν 为频率； λ 为真空中波长。设光在真空中的传播速度是 c ，则光的频率、波长和速度有如下关系：

$$\lambda \nu = c \tag{1-2}$$

已经知道，除了光波和无线电波外， x 射线、 γ 射线也都是电磁波，它们的波长比光波波长更短，但它们在本质上与光波或无线电波完全相同。按照波长或频率把这些电磁波排列成谱，称为电磁波谱，如图 1—2 所示。通常所说的光学区或光学频谱，它包括紫外光、可见光和红外光，波长范围约从 $10 \text{ \AA}$ （ $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ）到 1 mm 。可见光是人眼可以感觉到各种颜色的光波，其波长范围从 $0.40 \mu\text{m}$ 到 $0.76 \mu\text{m}$ （ 4000 到 $7600 \text{ \AA}$ ），紫外光和红外光则不能引起视觉。

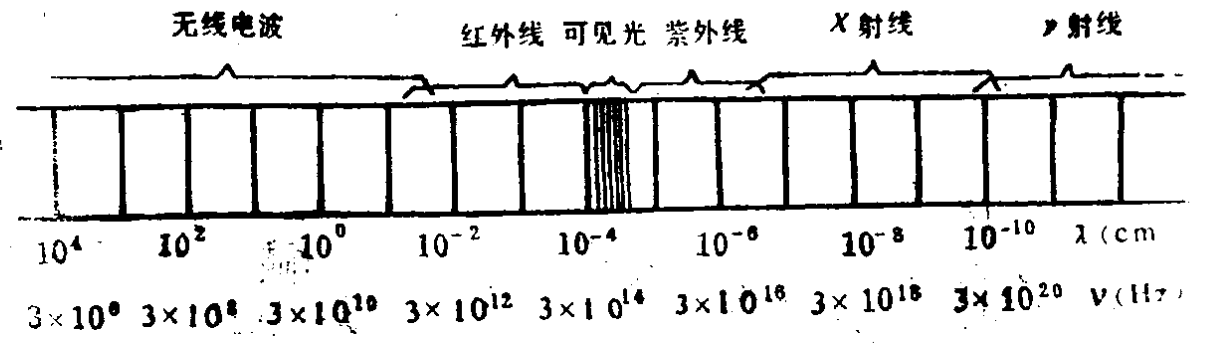


图1-2 电磁波谱

光波与电磁波的统一，这就产生了光的经典电磁理论。但是经典理论在解释黑体辐射、光电效应等一些新的物理现象面前遇到了困难。科学的发展，导致了认识上的又一次飞跃——建立了量子理论，从而统一了光的波动性和微粒性。

1900年普朗克首先提出了电磁辐射的量子化假设：以固有频率 ν 振动的振子，其振动能量不能连续变化，而只能取一些分立值，这些值是最小能量 ε_0 的整数倍，即 ε_0 、 $2\varepsilon_0$ 、 $3\varepsilon_0$ ……。最小能量 ε_0 与振子固有频率 ν 成正比

$$\varepsilon_0 = h\nu \quad (1-3)$$

式中 h 称为普朗克常数，由近代物理实验测得

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}。$$

爱因斯坦首先肯定了光的这种微粒说，他认为电磁辐射不仅是在被发射和吸收时以能量为 $h\nu$ 的微粒形式出现，而且以光速 c 在空间传播。这种粒子叫做光子或光量子。这一观点成功地解释了光电效应等物理现象。

量子理论表明：具有一定频率的光辐射，就对应存在一定能量的光子。单色光就是由同一能量的光子组成的光。不同频率的光，光子具有不同的能量，且光频与能量遵守 $\varepsilon_0 = h\nu$ 的关系。从而，光的波动性和微粒性得到了辩证地统一，揭示了光具有二重性——波动性与微粒性并存——的本质。

1905年，普朗克用量子化假设成功地解释了黑体辐射。某一能够完全吸收任何波长电磁辐射的物体叫做绝对黑体，简称黑体。如图 1—3 所示的空腔辐射体就是一个较理想的绝对黑体。因为从外界射进小孔的任何波长的电磁辐射都将在腔内来回反射而不再逸出腔外。

物体除吸收电磁辐射外，还会发出电磁辐射，这种电磁辐射称为热辐射或温度辐射，普通光源一般是一种热辐射光源。当黑体处于某一温度 T 的热平衡情况下，则它所吸收的辐射能量应等于发出的辐射能量，即黑体和辐射场之间处于能

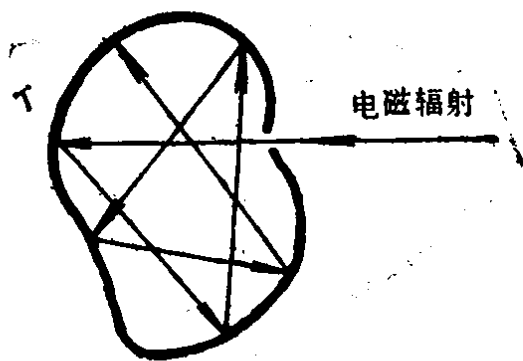


图1-3 绝对黑体示意图

量平衡状态。显然,这种平衡导致空腔内具有确定的辐射场,这种辐射场被称为黑体辐射。

黑体辐射是黑体温度 T 和辐射频率 ν 的函数,可用单色能量密度 ρ_ν 描述。 ρ_ν 定义为在单位体积内,频率处于 ν 附近的单位频率间隔中的电磁辐射能量。普朗克从辐射能量量子化假设出发,成功地推导了与实验相符的黑体辐射普朗克公式,即

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/KT) - 1} \quad (1-4)$$

式中 K 为波尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。 ρ_ν 是频率为 ν 的辐射能量密度,其量纲为 $[\text{J} \cdot \text{s}/\text{m}^3]$ 。(1—4)式所表示的黑体辐射,实质上是辐射场 ρ_ν 与构成黑体的物质原子相互作用的结果。为简化问题,我们只考虑原子的两个能级 E_2 和 E_1 , 并有

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1-5)$$

爱因斯坦从辐射与原子相互作用的量子观点提出,相互作用应包含原子的自发辐射跃迁、受激辐射跃迁和受激吸收跃迁三种过程。处于高能级 E_2 的一个原子自发地向低能级 E_1 跃迁,并发射一个能量为 $h\nu$ 的光子,这种自发跃迁发出的光称为自发辐射。显然,如果构成黑体的物质原子和辐射场的相互作用只包含上述的自发跃迁过程,就不能维持由(1—4)式所表示的腔内辐射场的稳定值。因此,爱因斯坦认为,必然还存在一种原子在辐射场作用下的受激辐射的跃迁过程,从而第一次从理论上预言了受激辐射的存在。

在频率为 ν 的辐射的辐射场作用下,处于低能级 E_1 的一个原子,受激后向 E_2 能级跃迁,并吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子,这种过程称为受激吸收跃迁。受激吸收跃迁的反过程就是受激辐射跃迁,由原子的受激辐射跃迁发射的光称为受激辐射。

爱因斯坦根据上述辐射和原子相互作用的三种过程,重新推

导了黑体辐射的普朗克公式，并引出了相应的三个系数，即 $A_{2,1}$ ——原子的自发辐射跃迁几率； $B_{1,2}$ ——原子的受激吸收系数； $B_{2,1}$ ——原子的受激辐射系数。它们的关系

$$\frac{A_{2,1}}{B_{2,1}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (1-6)$$

$$B_{1,2}g_1 = B_{2,1}g_2 \quad (1-7)$$

式中 g_1 和 g_2 分别为能级 E_1 和 E_2 的统计权重（后面再说明它们的含意）。

40年后，受激辐射的概念相继在微波和激光技术上得到了应用。

1.2 激光的发展简史

1954年，美国汤恩斯首先在微波段制成了微波量子振荡器，这种系统称为辐射受激发射的微波放大，取英文字头即为“Maser”，音译“脉泽”。

1958年，汤恩斯等人提出了利用F-P干涉仪作为光学谐振腔，从而把量子放大技术推广到光波段成为可能。

1960年7月，美国梅曼制成世界上的第一台红宝石激光器，这是一个光波段的量子振荡器，或称光量子振荡器。它用一个螺旋状氙灯作为激励光源，在其轴线上放置一根红宝石棒，两端面抛光，其中一端面镀全反射膜，另一端面镀部分反射介质膜。把棒和灯一起放在圆柱形聚光器内，如图1—4所示。这样在氙灯光激励下就输出一束发散角很小、单色性很好的红色激光。从此

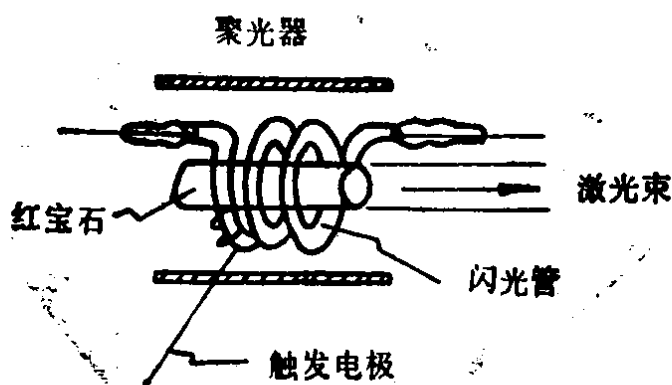


图1—4 红宝石激光器

人们观察到了光的受激辐射现象。

激光，我国早期称为“莱塞”，来自LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)，直译为“辐射的受激发射光放大”。我国定名为“激光”。

从1960年到1970年的大约10年时间里，激光理论逐渐完善，各类激光器件相继问世。在这段时间内，相继制成了氦氖激光器、二氧化碳激光器、氩离子激光器、半导体激光器和有机染料液体激光器等。固体激光器除红宝石激光器外，还有钕玻璃激光器和掺钕钇铝石榴石晶体激光器等。激光器品种繁多，并逐步走向系列化、商品化。1970年以后是结合重大应用及其相应理论和技术发展的开拓阶段，如激光核聚变和“星球大战”空间激光武器的研究，光盘和光计算机研究等。激光研究结合应用向纵深发展，如开拓新波段，研制新型激光器，提高激光器效率和寿命，激光器件小型化等。

1.3 激光器的基本组成和种类

1.3.1 激光器的基本组成

各种激光器的基本组成都是相同的，一般都由工作物质、激励系统和光学谐振腔三个部分组成，如图 1—5 所示。

1. 工作物质

激光工作物质

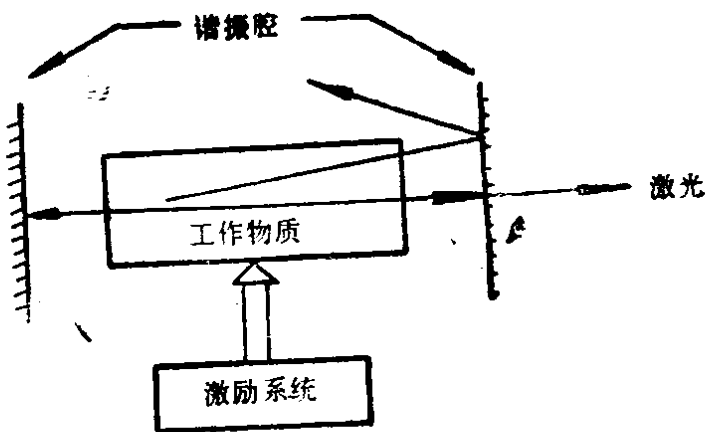


图 1—5 激光器的基本组成

是激光器的核心部分，是产生光受激发射作用的物质体系，可以是固体、气体、液体、半导体等材料。

(1) 固体工作物质。一般是把具有适当能级结构和发光能力的杂质金属离子掺入晶体或玻璃基质材料而制成，其中掺入的离子起光的受激发射作用，被称为产生激光的工作粒子，又叫做激活离子。

(2) 气体工作物质。可由单种气体组成，也可以由多种气体混合组成。工作气体粒子可以是原子、分子或离子，它们均起着产生受激发射的作用。在混合气体情况下，其它成分的气体粒子，对实现和维持工作气体粒子的受激发射作用，起着不同程度的有益辅助作用。

(3) 液体工作物质。通常包括无机液体和有机液体两类。前一类是在特定的金属化合物溶液中掺入能产生受激发射作用的杂质金属离子。后一类是把特定染料溶入适当的有机溶液，产生受激发射作用的是有机染料分子。

(4) 半导体工作物质。可以是面结型的半导体材料，也可以是单晶型半导体材料，这一类材料是依靠一定的激励方式，在导带和价带的特定区域间，实现非平衡载流子粒子数的反转并产生受激发射作用。

2. 激励系统

为了使激光工作物质处于能产生受激发射作用的能级状态，必须采用一定的激励方式和激励装置。根据工作物质特性和运转条件不同，可采用不同的方式和装置来达到这一目的，即采用不同的激励系统。通常采用的激励方式有：

(1) 光激励（光泵）

利用外界光源来照射工作物质，以实现粒子数反转并产生受激发射作用的激励方式，称为光激励或光泵浦（简称光泵）。几乎所有的固体激光器、液体激光器和个别气体激光器均采用这种

激励方式。光泵光源一般采用发光能力强的气体放电光源（高压氙灯、氪灯）或卤钨灯。由于常规光源的发光是空间各向分布的，因此需要采用适当形式的聚光器，以便使光源发出的光能尽可能多地进入工作物质内部。由于激光的出现，提供了高亮度和高定向性的光辐射，因此也可利用一种激光器发出的激光去激励另外一种激光工作物质以产生新的激光作用，例如可用氩离子激光器或氮分子激光器输出的激光去激励染料激光器。

（2）气体放电激励

大部分常见气体激光器普遍采用这种激励方式。在气体放电作用下，部分气体粒子电离后，在电场作用下自由电子具有较大动能，高速运动的电子在同工作气体粒子碰撞过程中能使后者跃迁到较高的激发能级，从而有可能在工作粒子的特定能级之间实现受激辐射。在实际气体激光器中，可根据工作物质特性和器件使用的不同要求，分别采取脉冲放电、直流放电、交流放电和高频放电等各种方式进行激励。

（3）化学激励

这是对某些工作物质（主要是气体工作物质）所采用的一种特殊的激励方式，其原理是：在一定条件下工作物质内部发生化学反应，反应生成物粒子可在反应释放出来的化学能的激励下处于激发态，从而产生受激发射作用。化学激光器就是采取这种激励方式，它的特点是：激励作用是依靠反应本身放出的化学能，原则上不需要其它能源输入，因此产生激光运转的效率较高。

（4）热激励

通过某种加热方式使工作物质体系温度升高，从而使工作物质粒子到达高能级，然后再通过某种方式（如高温气体绝热膨胀）使处于高能级的粒子实现粒子数反转，产生受激辐射作用。这种方式已在二氧化碳气动激光器中使用。

3. 光学谐振腔

光学谐振腔是一般激光器的三个主要组成部分之一，它的作用一方面是提供光学反馈，从而形成受激发射的持续振荡，另一方面则是对振荡光束的方向和频率进行限制，以保证激光输出的高单色性和高方向性。

光学谐振腔通常由两块具有一定曲率半径的光学反射镜组成。一种最简单且具有代表性的光学谐振腔是由两块严格平行的平面反射镜组成，其中一块为全反射镜，另一块为部分反射镜，工作物质置于中间。由图 1—5 可以看出，沿两镜面公共法线往返行进的光，可以多次通过工作物质经受放大而逐次增强。当这种腔的增益作用足够强，足以抵销各种腔内损耗和部分反射镜的透射损耗时，就可形成持续的激光振荡，而从部分反射镜透射的那部分激光能量，就是通常所说的激光辐射，或称激光输出。

1.3.2 激光器的种类

激光器的种类很多，可以从不同的方面进行分类。

1. 按工作物质分类

根据工作物质的不同可以分为固体、气体、液体、半导体等几大类。

(1) 固体激光器。这类激光器所采用的固体激光工作物质是把能产生受激发射作用的金属离子掺入晶体或玻璃基质中而制成，它可分为晶体激光器和玻璃激光器两类。晶体激光器以红宝石 ($\text{Cr}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$) 和掺钕钇铝石榴石 (简称为 $\text{Nd} : \text{YAG}$) 为代表，玻璃激光器以钕玻璃为典型代表。

(2) 气体激光器。这类激光器采用气体工作物质，它是使用工作物质数目最多、激光发射波长分布范围最广的一类激光器。气体工作物质可以是原子气体、分子气体和离子气体，相应的激光器则分别称为原子气体激光器，分子气体激光器和离子气体激光器。

原子气体激光器采用的主要是几种惰性气体（如氦、氖、氩等），有时也采用某些金属原子（如铜、锌、镉、铯、汞等）蒸气。原子气体激光器的代表是氦、氖激光器。

分子气体激光器所采用的主要分子气体有 CO_2 、 CO 、 N_2 、 H_2 和水蒸汽等。分子气体激光器的代表是二氧化碳（ CO_2 ）激光器和氮分子（ N_2 ）激光器。

离子气体激光器是利用电离后的气体离子产生激光作用，主要有惰性气体离子和金属蒸气离子。离子气体激光器的代表是氩离子（ Ar^+ ）激光器和氪离子（ Kr^+ ）激光器。

（3）液体激光器。液体激光器所采用的工作物质主要分为两类，即有机染料溶液和稀土金属化合物的无机化合物溶液。

有机荧光染料液体激光器是使用较为普遍的一类液体激光器，目前已有数十种有机荧光染料（如若丹明、荧光素、香豆素等）的有机溶液用作激光工作物质。这类激光器一般均采用光泵激励，其光泵光源可以是脉冲放电闪光灯，也可以是其它激光器。这类激光器的特点是输出激光的波长可调谐和波长覆盖的光谱区域较宽。若丹明6G染料激光器是一种典型的液体激光器。

无机液体激光器所采用的工作物质通常是将稀土金属化合物（如氧化钕）溶于一定的无机化合物〔如二氯氧化硒（ SeOCl_2 ）〕。代表性的无机液体激光器是 $\text{Nd}^{3+} : \text{SeOCl}_2$ 激光器。

（4）半导体激光器。这是以半导体材料做工作物质的激光器。依照器件的组成和结构来分，它包括同质结半导体激光器和异质结半导体激光器两大类，后者又分为单异质结和双异质结两类。若以激励方式来分，它又分为电注入式半导体激光器，高能电子束激励式半导体激光器和光激励式半导体激光器三类。

在半导体激光器中，目前性能较好、应用较广的是具有双异质结结构的电注入式GaAs二极管激光器。

2. 按运转方式分类

由于激光器所采用的工作物质和使用目的的不同，激光器的运转方式也有所不同，常用的有如下几种。

(1) 单脉冲式激光器

按此方式运转的激光器，工作物质的激励以及相应的激光发射，从时间上来说，均是一个单次的脉冲过程。一般固体激光器、液体激光器、半导体激光器和某些气体激光器常采用此种运转方式工作。

以单脉冲方式运转的激光器可提供较高水平的激光能量和中等水平的激光功率。以单脉冲固体激光器为例，输出脉冲能量在 $1 \sim 10^4 \text{J}$ 之间，功率约为 $10^3 \sim 10^5 \text{W}$ ，脉冲持续时间约为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{s}$ 。单脉冲激光器广泛用于激光打孔，激光焊接等激光加工和各种激光基础研究。

(2) 重复脉冲式激光器

按此方式运转的激光器，其输出为一系列重复激光脉冲。为此，可对工作物质以重复脉冲的方式进行激励，或者以连续方式进行激励，但按一定方式调制激光振荡，以便获得重复脉冲激光输出。一些固体激光器、气体激光器和半导体激光器均采用这种工作方式。由于重复脉冲运转过程中工作物质和激励装置会产生发热效应，因此还需采取某些冷却措施，以保证稳定的正常运转。

采用重复脉冲方式运转的激光器，可提供中等水平的激光能量和功率。例如重复脉冲固体激光器的输出脉冲能量在 $10^{-1} \sim 10^2 \text{J}$ 之间，功率在 $10^3 \sim 10^5 \text{W}$ ，重复率范围在 $1 \sim 10^4 \text{Hz}$ 。重复脉冲激光器在激光测距，激光雷达和激光通讯等方面均有重要的应用价值。

(3) 连续波激光器

此类激光器对工作物质的激励和相应的激光发射，具有一个较长时间的连续过程。它包括连续光源激励的固体激光器，以连续电激励方式工作的气体激光器和半导体激光器。由于连续运转

过程中不可避免地产生器件的热效应，因此大、中功率的连续波激光器都要采用适当的冷却措施。

连续运转的激光器，其连续激光输出功率大多数在 $10^{-3} \sim 10^3 \text{ W}$ 量级范围内，它在激光精密计量，激光通信和激光全息照相以及激光基本研究中均有广泛的应用。用于激光加工的二氧化碳激光器连续输出激光功率最高已达数万瓦。

(4) 调Q激光器

这是一种以特殊的短脉冲方式运转从而获得极高功率输出的激光器。其原理是采用调Q技术，将产生激光的脉冲过程，人为地压缩在极短的时间间隔内完成，以获得极高的功率输出。

调Q激光器又称为Q开关激光器。极高功率输出的固体激光器和某些气体激光器都采用调Q方式运转。此类激光器提供的脉冲激光功率输出可达 $10^6 \sim 10^{12} \text{ W}$ ，脉冲能量为 $10^{-2} \sim 10^2 \text{ J}$ ，脉冲持续时间在 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ s}$ 之间。调Q激光器在远距离的激光测距、激光核聚变和一系列强光学效应研究中，有极为重要的应用意义。

3. 按波段范围分类：

由于激光工作物质种类很多，因此激光谱线的数目已有数千条之多，它们分布在电磁波谱的整个光频波段。电磁波谱的光频波段按照波长可划分为以下几个光谱区域：

红外区	{ 远红外	$25 \sim 1000 \mu\text{m}$
	{ 中红外	$2.5 \sim 25 \mu\text{m}$
	{ 近红外	$0.76 \sim 2.5 \mu\text{m}$
可见区		$0.4 \sim 0.76 \mu\text{m} (4000 \sim 7600 \text{ \AA})$
紫外区	{ 近紫外	$0.2 \sim 0.4 \mu\text{m} (2000 \sim 4000 \text{ \AA})$
	{ 真空紫外	$0.05 \sim 0.2 \mu\text{m} (50 \sim 2000 \text{ \AA})$

与上述区域划分相对应，根据激光输出波长范围，因此激光器又可分为红外激光器、可见激光器和紫外激光器三大类。

(1) 紫外激光器

这是指输出激光波长短于可见光波长（即小于 $4000\text{\AA}$ ）的激光器，其中波长处于近紫外（ $2000\sim 4000\text{\AA}$ ）波段的激光器主要有离子气体激光器（如氦镭 He—Cd 激光器，输出 $3250\text{\AA}$ ）、分子气体激光器（如氮分子 N_2 激光器，输出 $3371\text{\AA}$ ）和染料激光器。

(2) 可见光激光器

这是指工作在可见光波段的激光器，包括晶体激光器（如红宝石激光器，输出波长为 $6943\text{\AA}$ ）、原子气体激光器（如氦氖激光器，输出波长为 $6328\text{\AA}$ ）、离子气体激光器（如氩离子 Ar^+ 激光器，输出波长为 $4880\text{\AA}$ 和 $5145\text{\AA}$ ）和染料激光器（如若丹明6G激光器，输出波长为 $5600\sim 6300\text{\AA}$ ）

(3) 红外激光器

工作在红外波段的激光器数目是很多的。工作在近红外波段的激光器有：固体激光器（如掺钕激光器，输出波长为 $1.06\mu\text{m}$ ）和半导体激光器（如GaAs激光器，输出波长为 $8400\text{\AA}$ ）等；工作中红外和远红外的主要是分子激光器，例如二氧化碳激光器（波长 $10.6\mu\text{m}$ ）和一氧化碳激光器（波长 $5\sim 6\mu\text{m}$ ）；远红外激光器如水分子 H_2O 激光器、HCN激光器等的输出波长可达几百微米以上。

1.4 激光的基本特点和应用前景

1.4.1 激光的基本特点

激光是一种新颖的光；它具有方向性好、单色性好、亮度高的特点。概括地说，激光是一种颜色很纯，能量高度集中的光。显然，激光的这些特点是任何常规光源无法比拟的。

1. 激光的方向性好
激光是定向辐射，它在空间传播时，光束的发散很小，其发散角（除半导体激光器外）

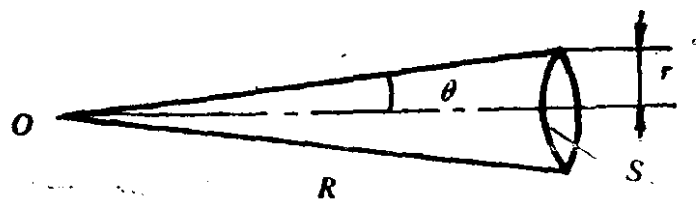


图1-6 激光发散角

都在 mrad 数量级。例如，固体激光器的光束发射角约为 5 mrad，气体激光器在 2 mrad 以内。

激光光束是在空间传播的，需要引入立体角的量度。如图 1-6 所示，定义：以 O 为球心，面积为 S 的一块球面对 O 点所张的立体角为

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (1-8)$$

整个球面（ $4\pi R^2$ ）对球心所张的立体角为

$$\Omega = 4\pi R^2 / R^2 = 4\pi$$

一般光源都是向四面八方发光的，其立体角为 $4\pi \text{ sr}$ 。

激光束的发散角 θ 通常都很小，故近似有

$$\theta = \frac{r}{R}$$

因此立体角可表示为：

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{\pi (R\theta)^2}{R^2} = \pi\theta^2 \quad (1-9)$$

如当 $\theta = 10^{-3} \text{ rad}$ 时， $\Omega = \pi \times 10^{-6} \text{ sr}$ ，这表明：一般的激光器只向着数量级约为 10^{-6} sr 的范围内输出激光束，它比普通光源的辐射立体角（ $4\pi \text{ sr}$ ）要小几百万倍，因此即使两者在单位面积上的辐射功率相近，激光的亮度也要比普通光源的亮度高上百万倍。

激光的方向性好，说明激光在空间传播时能量十分集中。如