

光电子技术

激 光 原 理

【激光】通过受激辐射跃迁产生光，并能进行光放大的一种新型光源。普通光源中发光原子从高能级跃迁到低能级是通过自发辐射跃迁完成的，所产生的光子从频率、位相、传播方向到振动方向都是杂乱无章的，称自然光。激光器所发光则是通过受激辐射跃迁完成的。泵浦源将能量传递给激光工作物质中的激活粒子，将它们抽运到激光上能级，使激光上下能级间出现粒子数反转。在某个能量恰好等于激光上下能级差的光子诱发下，激活粒子从上能级跃迁到下能级，并放出与诱发光子性质相同的光子。这两个光子再去诱发其他激活粒子，生成更多光子而形成激光。激光具有许多优点：（1）亮度高；（2）单色性好；（3）方向性好；（4）相干性好。激光是光学与电子学发展到一定阶段和相互结合的必然产物，它的出现是对整个科学技术领域的一次深刻变革，不仅使光学面貌焕然一新，且产生了许多新兴光学学科，如光电子学、量子电子学、非线性光学、傅里叶光学、导波光学等。对化学、生物学、医学及工农业、军事等几乎所有国民经济部门都产生巨大

影响。它的应用极为广泛，如工业上的机械加工、精密测量，农业上的育种，医学上的皮肤病与肿瘤治疗，军事上的激光雷达与激光武器，科学研究中的全息术、光通信、光计算和光信号处理等。

【跃迁】激光工作物质中的激活粒子从某一能级状态变到另一能级状态的过程。跃迁的方向有两种，一种是从低能级向高能级跃迁，是激活粒子从外界吸收能量时发生的。另一种是从高能级向低能级跃迁，这种跃迁过程伴随着能量的释放，有辐射跃迁和非辐射跃迁两类。辐射跃迁是以放出光子的形式释放能量，即发光，又有自发辐射与受激辐射之别。非辐射跃迁则是以其他形式释放能量，如机械能或热能等，不发光。无论什么形式的跃迁都存在一定的跃迁几率，它定义为单位时间内从某能级跃迁到另外能级上去的粒子数占原能级总粒子数的百分比。在激光发光过程中，发生的激光上能级和下能级之间的跃迁过程主要是受激吸收跃迁和受激辐射跃迁。当前者的跃迁几率大于后者时，激光减弱，激光工作物质相当于是一个激光吸收器。当后者的跃迁几率大于前者时，激光增强，激光工作物质相当于激光放大器。无论何种形式的跃迁都必须遵从能量守恒，即吸收或释放的能量等于两个能级之差。

【无辐射跃迁】处在高能级上的原子以除光能以外的其他形式释放能量而跃迁到低能级上去的过程。例如通过与其他原子或电子发生碰撞，将能量传递给被撞粒子而使自己能量降低，或者通过放出热量使自己能量降低。这种跃迁过程由于不发射光子，因而不会发光。

【自发辐射跃迁】处在高能级上的发光原子自发地跃迁到低能级上去，并发射光子的过程。其跃迁几率与外界条件无关，而且每个发光原子所发射出来的光子从频率、传播方向、振动方向以及位相等都是杂乱无章，彼此毫无关系。这种光又叫自然光，一般的光源所发出的光都属于这一类。

【受激辐射跃迁】激光上能级上的激活粒子在某个入射光子的激发下跃迁到激光下能级去的过程。该入射光子的能量必须正好等于激光上、下两能级的能量差，并且激活粒子跃迁过程中所放出的光子从频率、传播方向、振动方向到位相等都与入射光子完全一样。这种跃迁的几率与外界条件有关，与入射光的强度成正比。由受激辐射跃迁产生的光就是激光。

【受激吸收跃迁】处在激光下能级上的激活粒子吸收光子跃迁到激光上能级的过程。所吸收的光子的能量等于两能级之间的能量差。受激吸收跃迁与受激辐射跃迁同时存在于激光产生的过程之中，如果受激吸收跃迁的跃迁几率超过了受激辐射跃迁，则激光通过激光工作物质后将减弱。反之，如果受激辐射跃迁的跃迁几率超过了受激吸收跃迁，则激光通过激光工作物质后将增强。

【均匀加宽】由于受外界因素的干扰，使得所有发光原子的自然线宽都同样变宽，从而整个激光源的谱线宽度变宽的现象。这种外界因素干扰对于不同激光工作物质的表现形式不同。气体激光器中，发光原子处于无规则热运动中，由于相互碰撞使处在激光上能级的粒子提前跃迁而缩短了上能级寿命，引起了谱线加宽。固

体激光器中, 由于晶格热振动引起发光原子的能级在一个范围内做微小变化, 使得发出的光中频率成分增多而引起了谱线加宽。均匀加宽的特点是: 引起加宽的物理因素对每个发光原子都是等同的, 每个发光原子对整个激光光源的光谱曲线的加宽具有相同的贡献, 因此无法区分光源光谱曲线上某一频率成分是由哪些发光原子发出的。

【非均匀加宽】由于各个发光原子所处物理条件的差异使得每个发光原子所发光的中心频率也略有差异, 从而整个激光源的谱线宽度变宽的现象。这种物理条件的差异因不同激光工作物质而有不同的表现。气体激光器中, 每个发光原子做无规则热运动, 并存在一定的速度分布。尽管每个发光原子静止时的中心频率一样, 但按多普勒频移效应, 不同速度的发光原子, 其中心频率的移动也不同。因此光源的光谱曲线宽度比单个发光原子的自然线宽要宽。固体激光器中, 各发光原子周围情况的不同, 使其能级产生差异。因而每个发光原子的中心频率也略有差异, 并引起激光源谱线加宽。非均匀加宽的特点是每个发光原子对整个激光源谱线加宽的贡献不同, 因此可以区分光源的光谱曲线上某一频率成分是由哪些发光原子所发出来的。

【粒子数反转】处在激光上能级的激活粒子数多于处在激光下能级的激活粒子数的状态。通常情况下, 按照玻尔兹曼热力学统计规律, 处在低能级的粒子数总是多于处在高能级的粒子数。通过外界激励, 如加热、光照、放电等方法, 可以使处在激光下能级的激活粒子被抽运到激光上能级去, 形成粒子数反转状态。只有在激光上、下能级之间实现粒子数反转, 才可使受激辐射跃迁的跃

迁几率超过受激吸收跃迁的跃迁几率。因此，实现粒子数反转是产生激光的必要条件。其途径有三能级系统和四能级系统两种。

【增益系数】光束通过激光工作物质时，光强的相对增加量。增益系数是光频率的函数，它随频率变化的曲线称为增益曲线。只有频率在增益曲线范围内的激光才能被放大。

【增益饱和】激光器中的激光光强被放大到一定程度时，增益系数表现出随光强而减小的现象。产生该现象的原因是因为入射光的受激辐射跃迁作用显著地减少了粒子数反转。

【吸收系数】激光束通过介质时，由于介质的吸收作用产生的光强相对减小量。是光频率的函数，它随频率变化的曲线称吸收曲线。介质对光的吸收是由于介质分子吸收光子，由低能级跃迁到高能级上去的结果。

【吸收饱和】又称非线性吸收。激光强度大到一定程度后，介质对光的吸收系数表现出随光强增加而减小的现象。光强小时，吸收系数为一个常数，即光的吸收量正比于入射光强。光强大到一定程度，由于介质高能级粒子数增多、低能级粒子数减少，使吸收系数减小。光的吸收量与入射光强之间的关系呈非线性。这一现象广泛用于激光的稳频、锁模、调 Q 等技术中。

【激光振荡模式】能够在光学谐振腔内存在的稳定的激光光波基本形式。对于某个给定的光学谐振腔，激光振荡模式可以有很多，通常用 m 、 n 、 q 三个模参数来区分不同的振荡模式。 m 和 n 表征该

模式在垂直于腔轴平面内沿 x 轴和 y 轴上振幅为零的点的数目，称横模数； q 表示该模式沿腔轴振幅为零的点的数目，称纵模数。

【横模】由表征垂直于腔轴平面内的光波振幅分布情况的模参数 m 与 n 所确定的激光振荡模式。横模参数 m 与 n 分别表示垂直于腔轴平面内沿 x 轴与 y 轴方向上振幅为零的点的数目。 m 与 n 都为零的横模称为基模，它的特点是能量集中在腔轴附近，光斑为圆形，衍射损耗最小。除基模以外的其他横模都为高阶模，它们的光斑有复杂的几何图形。 m 与 n 的数值越大，图形越复杂，能量分布偏离腔轴也就越远，衍射损耗越大。许多应用都要求激光器是单基横模工作。

【纵模】由表征沿腔轴方向光波振幅分布情况的模参数 q 所确定的激光振荡模式。 q 值表示沿腔轴振幅为零的点的数目。对于同一种横模，可以有许多不同的纵模，它们的频率不同。相邻两个纵模之间的频率间隔与腔长成反比。

【模式竞争】激光器中满足激光振荡条件的某一个或某几个模式由于相应的增益较大而优先起振，并通过增益饱和作用抑制其他模式起振的现象。模式竞争与激光器的谱线加宽性质有很大关系。以均匀加宽为主的激光器所有处在增益曲线频率范围内的纵模都可参加模式竞争，竞争的结果往往是离增益曲线中心频率最近的纵模取胜，其他纵模被抑制，故这种激光器是单纵模输出。以非均匀加宽为主的激光器只是对称地处在中心频率两侧的两个纵模之间才会产生模式竞争，哪个模式取胜完全是由随机的偶然因素所决定。这两个纵模间的竞争与其他模式无关，故这种激光器是多

纵模输出。

【跳模】激光器工作时，由于种种外界因素引起模式振荡条件的变动，使激光器工作模式骤然改变的现象。例如由于机械振动或热胀冷缩作用使得光学谐振腔的腔长发生变化，从而导致工作模式的骤变。

【烧孔效应】非均匀加宽气体激光器的增益曲线上，与中心频率对称的两个频率处下降的现象。入射光变强后，通过受激发射使具有某一速度的气体分子的反转粒子数减少，表现为增益曲线在该激光频率处下降，形成一个“烧孔”，光强越大，“烧孔”越深。因为激光是在谐振腔内往返传播，使具有与上述速度大小相等、方向相反的气体分子的反转粒子数也减少。结果在增益曲线上出现两个对中心频率对称的“烧孔”，这两部分的气体分子对激光都有贡献。

【兰姆凹陷】非均匀加宽气体激光器输出功率的频率特性曲线上，在中心频率处出现功率下降的现象。此现象与烧孔效应紧密相联。当激光频率偏离中心频率时，增益曲线上有两个对称烧孔，对应的两部分气体分子对产生激光有贡献。当激光频率靠近中心频率时，两个烧孔合为一个，对产生激光有贡献的气体分子数减少，激光输出功率随之减小，造成功率率的频率特性曲线中心处形成一个凹陷。该现象在激光稳频技术上有重要应用。

【反兰姆凹陷】在激光器谐振腔内放吸收管，充以某些特定气体，由于它们的饱和吸收作用，使激光器输出功率的频率特性曲线在

中心频率处出现一个很窄的尖峰现象。吸收管对光的吸收作用,在远离中心频率处,由于光强较弱,其吸收系数与光强无关,输出光功率的频率特性基本上与增益曲线相似。当频率变至中心频率处,由于增益系数变大,光强增大,而吸收介质的吸收系数却反而减小,使得输出光功率的频率特性曲线在中心频率处,突然向上产生一窄尖峰,正好与兰姆凹陷的现象相反。这一现象可被应用于稳频技术中。

【频率牵引效应】由谐振腔尺寸决定的无源腔纵模振荡频率,当腔内有激活介质工作时,稍向介质增益曲线中心频率方向靠近的现象。频率移动的大小与激光器工作条件有关,近似正比于原频率与中心频率之差。

【超辐射】激光放大器内自发辐射产生的光在传播过程中被放大的现象。当激光工作物质被激励,形成粒子数反转时,对自发辐射产生的光也会有放大作用。如果增益系数足够高、工作物质足够长,就可以形成足够强的输出光。利用这一现象可制成无谐振腔的激光器,称超辐射激光器。尤其在紫外及 X 射线波段,由于反射镜材料的困难,该种激光器很有发展前途。超辐射现象也有其不利影响的一面,它会使激光放大器的噪声增大而增益下降。

【光学谐振腔】激光器中用以形成稳定光波振荡模式的装置。光学谐振腔一般是开放式的,它由两个相对的球面或平面反射镜构成,其中一面镜是全反射镜,另一面镜是部分反射、部分透射,作为激光的输出镜。将激光工作物质放在光学谐振腔内,它们一起构成一个对光波进行放大、谐振和反馈的系统。当光波在两面镜之

间来回反射时，会互相干涉叠加，使得只有满足一定振荡条件的光波才能在腔内形成稳定的振荡模式。按照反射镜的曲率半径以及两镜间距的不同，可以将光学谐振腔分成两大类。一类是稳定谐振腔，另一类是非稳定谐振腔。区分这两类谐振腔是由稳定性条件来决定的，凡是满足关系式 $0 \leq \left(1 - \frac{d}{r_1}\right) \left(1 - \frac{d}{r_2}\right) \leq 1$ 的谐振腔都为稳定谐振腔，其他的为非稳定谐振腔。式中 d 为两反射镜的距离，也就是腔长。 r_1 与 r_2 分别是两个反射镜的曲率半径，凹面镜取正、凸面镜取负。

【稳定谐振腔】满足稳定性条件的光学谐振腔。它的特点是腔内光线可以往返多次而不横向逸出。换句话说，这种谐振腔的衍射损耗极小。因此，它是广泛使用的一种光学谐振腔。具体的形式有平面平行腔、共焦腔和半共焦腔等。由稳定谐振腔形成的激光束为高斯光束，这种光束在谐振腔内有一截面很小的腰，因此不能充分利用激光工作物质。

【平面平行谐振腔】又称法布里—珀罗谐振腔。由一对平行的平面反射镜组成的光学谐振腔。是最早采用的一种光学谐振腔。这种腔的衍射损耗与调整精度的关系很大，镜片的微小倾斜都会引起衍射损耗的急剧增大。

【共焦谐振腔】由两个曲率半径相等并等于腔长的凹面反射镜组成的光学谐振腔。其衍射损耗在各类稳定谐振腔中最小，因此使用广泛。但由于它处在稳定性条件边缘，反射镜曲率半径略有变动就会变成非稳腔。

【半共焦谐振腔】由一面平面镜和一个曲率半径等于腔长两倍的凹面反射镜组成的光学谐振腔。它的衍射损耗与共焦谐振腔一样也是各类稳定腔中最小的，因此使用广泛。

【非稳定谐振腔】不满足稳定性条件的光学谐振腔。一般只在大能量、高功率的激光器中才使用。由非稳定谐振腔形成的光束在腔内设有小截面积的腰，故这种腔可以达到充分利用激光工作物质，高效率提取激光能量的目的。

【谐振腔损耗】光波在谐振腔中来回反射时能量的损失，用往返一次光能量损失的百分比来量度。谐振腔损耗通常包括：（1）光在谐振腔两端反射镜上的透射与吸收；（2）光在腔内传播时被激光工作物质和插入腔内的其他光学元件所散射、反射和吸收；（3）由于反射镜的位置调节不准确而产生光波的横向逸出；（4）衍射损耗。

【谐振腔衍射损耗】光在谐振腔内往复反射时，由于光的波动性，一部分光能量从腔的周围和反射镜的四周衍射出去而造成的光能量损失。不同的激光横模衍射损耗也不同，基模的能量集中在腔轴附近，因此衍射损耗最小。横模的阶数越高，能量分布离开轴线越远，衍射损耗也就越大。

激 光 器

【激光器】利用受激辐射跃迁产生激光的装置。由三部分组成：(1) 激光工作物质或称激活介质；(2) 光学谐振腔；(3) 泵浦源。激光工作物质中有大量可以发射激光的原子、分子或离子，统称为激活粒子。它们可以单独存在，也可以寄存在基质中。光学谐振腔由放置在激光工作物质两端的反射镜组成，其中一面为全反镜，另一面为半反半透镜。谐振腔与激光工作物质一起构成一个对光进行谐振、放大与反馈的系统，确保形成稳定的光振荡模式。泵浦源将能量供给激活粒子，使之从能量低的基态跃迁到高能态上，形成激光上下能级间的粒子数反转，为受激辐射跃迁创造条件。按激光工作物质不同可分为固体激光器、气体激光器、液体激光器和半导体激光器四类。按工作状态不同可分为连续激光器和脉冲激光器两类，其中脉冲激光器又有单脉冲激光器和重复频率脉冲激光器两种。

【激光工作物质】具有激光放大作用的介质。它可以是气体、固体或液体。激光工作物质由激活粒子和基质组成。激活粒子是可以产生激光的发光粒子，可以是原子、分子或离子。在气体激光工作物质中，激活粒子能独立存在，不需要基质。在固体和液体激光工作物质中，激活粒子都是寄存在基质中的。

【激活粒子】 激光工作物质中能产生受激辐射跃迁而发光的粒子。它可以是原子、分子或离子。在气体激光工作物质中，激活离子可独立存在。如氦氖激光器中的氖原子、二氧化碳激光器中的二氧化碳分子和氩离子激光器中的氩离子等都是激活粒子。固体激光工作物质中，激活粒子一般不能独立存在，而是寄存在固体基质中。如红宝石激光器中，就是在作为基质的红宝石晶体中掺入三价的铬离子作激活粒子。又如钕玻璃激光器中是在作为基质的玻璃中掺入三价的钕离子作为激活粒子的。

【基质】 在固体或液体激光工作物质中做为激活粒子所寄存的材料。如红宝石激光器中的红宝石晶体和钕玻璃激光器中的玻璃以及液体激光器中的溶剂等。

【泵浦】 又称抽运或激励。将能量供给激活粒子，使其由基态跃迁到高能级上去以便形成粒子数反转的过程。泵浦的方式有脉冲泵浦和连续泵浦两种。具体的方法很多，固体激光器常使用普通光源做为泵灯进行光泵浦，如氙灯、钨灯、水银灯等。气体激光器通常使用气体放电进行激励，可以是直流放电也可以是交流放电。其他泵浦方法还有半导体激光器中的注入式泵浦、染料激光器中的激光泵浦以及化学激光器中的化学泵浦等。

【连续激光器】 连续输出激光的激光器。这种激光器工作时，各能级粒子数及腔内的辐射光场都具有稳定的分布，维持这种稳态的关键是由于激光工作物质的增益饱和作用。固体激光器中的掺钕钇铝石榴石激光器（YAG 激光器）、气体激光器中的氦氖激光器、二氧化碳激光器、液体激光器中的染料激光器等都可以制成连续

激光器。

【脉冲激光器】输出光脉冲的激光器。该类激光器工作时，各能级粒子数及腔内的辐射光场都处于剧烈的变化之中，是一种非稳状态。有单脉冲激光器与重复频率激光器两类。前者输出单个脉冲，可以人为控制输出时间。后者输出一串有规律的周期性脉冲序列。实现光脉冲输出的方法有两种，一种是用脉冲泵浦来产生脉冲激光。另一种是连续泵浦，靠 Q 开关、腔倒空、锁模等技术实现脉冲输出。所使用的激光器可以是固体激光器中的红宝石激光器、钕玻璃激光器或掺钕钇铝石榴石激光器（YAG 激光器），液体激光器中的染料激光器和半导体激光器等。脉冲激光器在测距、高速摄影、引发核聚变、激光打孔及焊接等方面有重要应用。

【高斯光束】由稳定谐振腔组成的激光器所输出的光束。基模高斯光束在任意一个横截面上的振幅分布都是圆对称的高斯型函数，即圆心处振幅最大，离开圆心后，振幅按平方律衰减。一般取最大振幅的 $\frac{1}{e}$ 处做为该截面光斑的边缘，此处与圆心的距离就为光斑半径。高斯光束在传播过程中，光斑半径会发生变化，光斑半径最小处称为此光束的腰。

【激光器输出特性】衡量激光器性能好坏的主要特征参数。连续激光器有：（1）输出功率；（2）输出功率稳定度；（3）输出功率密度；（4）亮度；（5）输出频率；（6）输出频率稳定度；（7）光束发散角；（8）输出线宽；（9）偏振度；（10）噪声。脉冲激光器还有：（1）脉冲宽度；（2）脉冲输出能量；（3）脉冲重复频率等。

【激光输出功率】激光器每秒输出的能量。单位为瓦。对于连续激光器来说，输出功率是一个恒定的数值。对于脉冲激光器来说，输出功率则是变化的，有脉冲峰值功率和脉冲平均功率之分。前者指光脉冲输出功率的最大值，后者是每个脉冲的输出能量与脉冲重复周期的时间间隔之比。

【激光输出功率稳定度】描述激光器输出功率稳定程度的参数。定义为在一定时间范围内（一般取一个小时），输出功率变化的绝对值 ΔP 与此时间内的输出功率平均值 $\bar{P}$ 之比： $\Delta P/\bar{P}$ 。

【激光输出功率密度】输出激光束通过垂直于传播方向上的单位面积的功率。单位为瓦/厘米²。因为激光器具有很好的方向性，照射在物体表面上的光斑尺寸很小，因此激光的输出功率密度往往相当高。尤其是脉冲激光器的峰值功率密度更大。

【激光束亮度】激光器输出端面上，单位面积向单位立体角范围内所发射的激光功率。单位是瓦/厘米² 立体角。由于激光具有良好的方向性，所以激光器的亮度远大于普通光源，如红宝石激光器的亮度可以是太阳亮度的 3×10^9 倍。

【激光输出频率】激光器输出光束的频率，也可用波长表示。它是由激光器中符合振荡条件的模式所决定的，其中纵模对频率的决定作用远远大于横模。

【激光输出频率稳定度】描述激光器输出频率稳定程度的参数。定义为当激光器连续运转时，在一定时间范围内输出频率的变化量

$\Delta\nu$ 与该时间内的平均输出频率 $\bar{\nu}$ 之比： $\Delta\nu/\bar{\nu}$ 。所取时间称取样时间。该时间小于 1 秒时的稳定度为短期稳定度，大于 1 秒的为长期稳定度。通常激光器输出的频率受工作条件的影响而产生漂移，可采取各种稳频技术使之稳定。参见“激光稳频技术”。

【激光束发散角】离开激光器输出端面较远时，锥形光束纵向截面中两条母线所夹之角。激光束为高斯光束，它的横截面光斑尺寸随传播距离而变，光束发散角的大小与激光束腰处的光斑半径成反比。发散角越大，说明该激光束的方向性越差。为提高方向性能，可使用倒望远镜系统（即由一个小焦距凸透镜和一个大焦距凸透镜组成的光学系统）对激光束进行扩束和准直。一般地说，气体激光器的方向性较好，其发散角只有 10^{-3} 弧度。固体激光器方向性稍差，发散角约 10^{-2} 弧度。半导体激光器方向性最差，发散角能达到几度甚至十几度。

【激光输出线宽】激光器输出光谱曲线的频率宽度。可反映激光器单色性能的好坏。从理论上讲，激光器的线宽极限可以达到非常窄，典型值为 10^{-2} — 10^{-3} 赫。但由于激光器工作环境所限以及激光器的多纵模工作状态都将使实际的输出线宽比理论值大得多。线宽最窄的激光器首推气体激光器，如氦氖激光器可达几个赫兹。

【激光偏振度】描述输出激光偏振性能的物理参数，定义为偏振部分光的光强与整个输出光强的比值。有些气体激光器在放电管两端装有布儒斯特窗，使输出激光成为线偏振光，有利于腔外调制器如声光、电光、磁光调制器的使用。固体激光器和半导体激光器输出的激光一般则为非偏振光。

【激光器噪声】激光器输出光波的振幅及位相的无规则涨落。产生噪声的原因很多，如工作环境的机械振动、激光介质工作时产生的热变化、泵浦条件的变化、激光器本身的多模工作以及与自发辐射相联系的量子噪声等。激光器的噪声主要表现在输出谱线的线宽、输出功率和频率的不稳定。尽量减小噪声使激光器输出特性参数稳定是许多激光器在应用时所必须考虑的问题。

【激光脉冲宽度】脉冲激光器输出的光脉冲持续时间。利用调 Q 技术或锁模技术可以使激光脉冲宽度压缩到 10^{-12} — 10^{-13} 秒级。脉冲宽度越窄，激光峰值功率就越高。

【激光脉冲重复频率】重复频率脉冲激光器在 1 秒时间内所输出的脉冲个数。采用脉冲泵浦的方法所获得的脉冲序列，其重复频率较低，采用调 Q 和锁模的方法获得的脉冲序列，其重复频率可以达到上百兆赫兹。

【激光脉冲能量】脉冲激光器所输出的每一个光脉冲所含的能量。单位为焦耳。

【固体激光器】激光工作物质为固体的激光器。通常固体激光器使用晶体或玻璃做为基质，激活粒子为稀土元素的离子。泵浦采用普通光源如氙灯，工作方式既可以是连续的也可以是脉冲的。目前应用最广泛的固体激光器有红宝石激光器、钕玻璃激光器和掺钕钇铝石榴石激光器（YAG）。其中红宝石激光器属三能级系统，其他固体激光器大都为四能级系统。固体激光器的优点是输出功

率高，体积小，坚固。缺点是寿命和效率常常受泵灯的限制，相干性与频率稳定性不如气体激光器。由于固体激光器贮存能量的能力较强，故很适合实现 Q 开关技术，产生高功率脉冲。又由于它的荧光线宽较宽，经锁模后可得超短脉冲激光。

【红宝石激光器】使用掺铬离子的红宝石晶体做为工作物质的固体激光器。它是世界上最早制成的激光器。基质红宝石晶体的成分为三氧化二铝。掺入的三价铬离子为激活粒子，是三能级系统。发出的光波长有 6943 埃和 6929 埃两种，都为深红色。红宝石晶体为棒状，两端面严格平行并抛光。反射镜放在棒的两边，也可以直接在棒端面镀反射膜做为反射镜。由于红宝石材料的阈值高，室温下的导热率较低，因此室温下连续工作有困难，通常采用单脉冲或低重复频率脉冲工作方式。泵浦源使用脉冲氙灯，将它与红宝石棒平行放在圆形或椭圆形反射面内。脉冲式红宝石激光器具瞬时输出大功率、脉冲能量大等优点，广泛应用于激光打孔等机械加工中。

【钕玻璃激光器】使用掺有钕离子的玻璃做为激光工作物质的固体激光器。玻璃为基质，钕离子为激活粒子。它属于四能级系统，发出的光波长为 1.06 微米，是红外线。由于钕离子在玻璃中受到的点阵作用不均匀造成谱线宽度较宽，玻璃的导热率又低，因此钕玻璃激光器的效率不高，不能采用连续工作或高重复频率的脉冲工作。但是，玻璃成本低，可制成几何尺寸大的棒状，掺钕量又很高，所以钕玻璃激光器的输出功率相当高。它广泛地应用于机械加工中。

【掺钕钇铝石榴石激光器】又称 YAG 激光器。使用掺有钕离子的钇铝石榴石晶体做为工作物质的固体激光器。它与钕玻璃激光器都用三价的钕离子做为激活粒子，属四能级系统，发光波长为 1.06 微米。但由于钇铝石榴石比玻璃的导热率高，因此它的效率比钕玻璃激光器要高，适合于中等功率的连续工作或高重复频率的脉冲工作，广泛应用于测距、制导及机械加工等方面。

【气体激光器】激光工作物质为气体的激光器。它是目前应用很广泛的一类激光器。可分为三类，一类是原子气体激光器，如氦氖激光器；一类是分子气体激光器，如二氧化碳激光器；一类是离子气体激光器，如氩离子激光器和氦镉激光器；气体激光器一般都是靠气体放电进行激励的。它的单色性和相干性比其他激光器好，输出功率很稳定，容易制成连续工作的激光器。广泛应用于测量、通讯、全息摄影等方面。

【原子气体激光器】使用中性的气体原子做为激活粒子的气体激光器。原子气体激光器可分为两类。一类是惰性气体原子激光器，也就是工作物质为惰性气体如氦、氖、氙、氪等。这些气体除氙以外增益都较低，通常都使用氦做为辅助气体，借以提高输出功率。目前应用最广泛、研究最透彻的是氦氖激光器。另一类是金属蒸气原子激光器，工作物质是一些金属在高温下产生的蒸气如铯、铅、锌、锰、铜、锡等，为了提高输出功率，通常也加入氦做为辅助气体。

【氦氖激光器】以氖原子做为激活粒子、氦为辅助气体的原子气体激光器。氦氖激光器可获得数十种谱线的连续振荡，目前使用最

多的是 6328 埃的红光。将氦气与氖气的混合气体充入内径只有几个毫米、长度由十几个厘米到几十个厘米的细长的水晶放电管中，氦气的压强约为 1 毫米汞柱，氖气约 0.1 毫米汞柱。放电管两端分别封装阳极和阴极两个电极，反射镜分别放在放电管的两边。氦气在氖原子实现粒子数反转的过程中起到重要作用，可提高激光器的输出功率。氦氖激光器有诸多优点，它的单色性好，谱线宽度极窄，可达 10^3 赫兹。方向性强，发散角只有约 1 毫弧度。相干长度可达几十公里。并且输出功率以及频率都很稳定。缺点是效率低，输出功率小，放电管长 1 米的氦氖激光器输出功率只有几十个毫瓦。氦氖激光器广泛应用于精密计量、准直、全息摄影、陀螺仪、通讯、跟踪等方面。

【离子气体激光器】使用气态离子做为激活粒子的气体激光器。离子气体激光器可分为两类，一类是惰性气体离子激光器如氙离子、氪离子、氩离子等；另一类是金属蒸气离子激光器，如镉离子、硒离子、锌离子等。典型的离子气体激光器有氙离子激光器和氪镉激光器。离子气体激光器的输出功率比原子气体激光器要高得多。

【氙离子激光器】使用氙离子做为激活粒子的离子气体激光器。它有多种输出波长，其中最强的为蓝色的 4880 埃和绿色的 5145 埃，输出功率可以达到 150 瓦，是可见光谱区中连续输出功率最大的气体激光器。氙离子激光器的基本结构与氦氖激光器相似，为了提高放电管轴线附近的电流密度，增加输出功率，一般在放电管外附加一个产生轴向磁场的线圈。为了使放电管内的气体分布均匀，在放电管两端的电极之间加一个回气支管，做为气体的循环回路。为了防止放电管因过热引起破裂，须有水冷装置。氙离子

激光器在全息摄影、信息存储、快速排字以及科研、医学等方面都有广泛应用。

【氢镉激光器】使用金属镉蒸气的离子做为激活粒子，氢气做为辅助气体的离子气体激光器。它的主要输出光波长有蓝色 4416 埃和紫外 3250 埃。氢气的作用是提高输出功率。为防止金属蒸气在管内分布不均匀而导致输出功率减弱与波动，在放电管两端的电极之间加回气支管形成气体循环回路。氢镉激光器的输出功率与氢氙激光器差不多，但它阈值电流较低，效率比氢氙激光器高。它可用于化学、生物学与医学等方面的研究。

【分子气体激光器】使用中性气体分子做为激活粒子的气体激光器。分子气体激光器可分三类：一类为双原子分子气体激光器，如 CO 、 N_2 、 H_2 等；一类为三原子分子气体激光器，如 CO_2 、 H_2O 、 N_2O 等；一类为多原子分子气体激光器，如 NH_3 、 C_2H_2 、 CH_3CN 等。其中二氧化碳激光器是目前使用最广泛的一种分子气体激光器。分子气体激光器的主要特点是波长范围广、效率高、输出功率大。

【二氧化碳激光器】使用二氧化碳气体分子做为激活粒子的分子气体激光器。输出光波长为 10.6 微米，是远红外光。通常在工作气体中充入氮气和氢气做为辅助气体，它们有利于实现二氧化碳分子的粒子数反转，有提高输出功率的作用，并且氢还有冷却作用。二氧化碳激光器由放电管和谐振腔构成，由于工作时温度较高，为保证输出功率的稳定，必须在放电管外边装上水冷套管加以冷却。该激光器主要优点是效率高、输出功率大。放电管长一米的二氧

化碳激光器可以有几百瓦以上的输出功率，是连续输出功率和能量转换效率最高的气体激光器。它广泛应用于激光切割、焊接、打孔等机械加工以及激光医疗上。另外，因为它的输出光波长正好处在大气传输性能好的波段上，故在激光通讯中具有举足轻重的地位。

【液体激光器】激光工作物质为液体的激光器。它的工作物质又称激光溶液，由溶质与溶剂组成。按照溶剂的不同可分为无机液体激光器和有机液体激光器两类。采用光泵浦。液体激光器可实现激光溶液的循环流动，因此它的光学均匀性好，无炸裂及损伤的问题，体积大小不受限制，造价低，容易制备。缺点是光发散角大，某些激光溶液具有腐蚀性和毒性。应用最为广泛的液体激光器是有机染料液体激光器。

【无机液体激光器】使用无机溶液做激光工作物质的液体激光器。激光溶液中的溶剂为三氯化磷或二氯化硒等无机溶剂，溶质为钕的化合物，激活粒子是钕离子。无机液体激光器的增益高，阈值低，平均功率高。但由于其发散角大，工作物质具有毒性和腐蚀性，因此应用不广泛。

【有机液体激光器】使用有机液体做为激光工作物质的液体激光器。早期有机液体激光器使用稀土元素螯合物的有机溶液做为激光溶液，它无毒、无腐蚀性，但输出能量很小，不被人们所注重。另一种有机液体激光器使用染料的有机溶液做激光溶液，它增益高、效率高、价格低、易制备。还具有输出光波长可调的优点，深受人们的重视。

【染料激光器】使用染料做为激光工作物质的激光器。染料可以有三种不同的状态：（1）染料的有机溶液；（2）染料在有机塑料中的固溶体；（3）染料蒸气。因此染料激光器可以是液体、固体或气体激光器，但是最常用的还是有机液体染料激光器。这种激光器由四部分组成：（1）盛放染料溶液的染料池；（2）染料溶液的循环和过滤系统；（3）泵浦光源；（4）光学谐振腔。它的工作方式有单脉冲、高重复频率脉冲以及连续三种。染料激光器最突出的特点是通过改变溶液的成份、染料种类和浓度、温度以及染料池长度等方式可以使输出光波长连续可调，调节范围从 3400 埃到 12000 埃。此外，染料液体激光器增益高，效率高，价格低廉，容易制备。激光溶液可以循环操作，有利于冷却，光学均匀性好。它是应用最为广泛的一种液体激光器。

【P—N 结注入式半导体激光器】利用对半导体 P—N 结注入电流的方法进行激励的半导体激光器。这种激光器的结构是由一块 P 型半导体与一块 N 型半导体结合而成的 P—N 结。P 型半导体中有大量带正电荷的载流子空穴，N 型半导体中有大量带负电荷的载流子电子。形成 P—N 结时，由于空穴与电子的互相扩散，在结区内形成电场，相当于一个阻挡层，使 N 区电子及 P 区空穴不能继续扩散。在 P—N 结上加正向电压后，阻挡层电场被削弱，注入 N 区的大量电子便可流向 P 区，并在结区与空穴结合放出光子。该激光器有两类：一类为同质结激光器，使用同一种半导体材料做成 P 型和 N 型半导体；另一类为异质结激光器，使用不同材料做 P 型及 N 型半导体。它可以通过改变注入电流的强弱来控制激光的强弱，是应用较广泛的半导体激光器之一。

【电子束激励半导体激光器】采用高能电子束轰击半导体材料的方法进行激励的半导体激光器。这种激光器所使用的半导体材料不需要制备 P—N 结,它的发光区宽度取决于电子束的穿透深度。激励的电子束能量越高,穿透越深,发光区就越宽,输出的激光功率就越大。电子束的加速电压一般为数万伏到数十万伏,并且在脉冲条件下工作。这种激光器比 P—N 结注入式半导体激光器输出功率大,可使用某些不易制成 P—N 结的半导体材料做为工作物质。但它的设备复杂,要与高压电源配合使用。

【砷化镓激光器】使用砷化镓作为激光工作物质,采用 P—N 结注入式激励的半导体激光器。它所发出的光波长在室温条件下为 9000 埃,在 -196°C 的液氮温度条件下为 8400 埃。同质结的砷化镓激光器在室温下只能脉冲工作,低温下才可连续工作。如果用砷化镓做成 P 型半导体,在它上面生成一层 N 型的铝镓砷半导体,可制成铝镓砷——砷化镓异质结激光器。它在室温下便可连续工作。砷化镓激光器是半导体激光器中应用最为广泛的一种,广泛应用在光通信、集成光学和光雷达等方面。

【分布反馈激光器】由折射率或增益做周期性变化的薄膜状激光工作物质构成的激光器。它的结构类似于光栅,可使部分光反射形成反馈,令满足布拉格条件的波长振荡。常用的激光工作物质有增益较高的半导体材料和染料薄膜。这种激光器为平面型,不使用反射镜,适合于集成光路。它还可以利用光栅状间隔来调整输出频率,并有滤波作用,输出激光的谱线宽度也很窄。

【气动激光器】又称气体动力学激光器。采用气体动力学的方法实现粒子数反转的激光器。这种激光器的工作物质通常为气体，如一氧化碳和二氧化碳。当工作气体通过超音速喷管时，迅速绝热膨胀而使温度降低，处在激光上能级的激活粒子由于它们的能量转移过程比气体冷却过程慢，来不及发生变动。而处在激光下能级的激活粒子，能量转移过程较快，能跟上气体冷却的过程，因而下能级的粒子数减少。这样，膨胀后的气体便可实现粒子数反转而产生激光。气动激光器的激励方式有用燃烧的、化学的、电弧加热的以及爆炸的等。它的连续功率输出是各类激光器中最高的。缺点是总体效率不高、装置较大、光束质量较差。

【化学激光器】通过化学反应来实现粒子数反转的激光器。它用化学反应时释放的能量将激活粒子激励到高能级上去，可以不要外界能源。有的化学能转化成激光能的效率相当高，可制成体积小、重量轻的激光器。自从在化学激光器中采用了气动技术以后，它在高能激光器中很引人注目。化学激光器用的工作物质有碘、氟、溴、一氧化碳、二氧化碳等，发出的光波长从 1.3 微米到 10.6 微米。

【自由电子激光器】利用聚焦的高能电子束在周期性横向磁场中运动时产生受激辐射的激光器。由一个螺线管和光学谐振腔组成。螺线管通电后形成空间周期性的横向磁场，直线加速器产生的高能电子束从螺线管一端引入。它在沿管轴线运动时，受到方向周期性变化的横向磁场作用，产生周期性的会聚与发散。它相当于一个电偶极子，在其运动过程中就会辐射电磁波，在谐振腔的作用下形成激光输出。通过改变横向磁场的空间周期，或改变注入电

子束的总能量，可以改变输出激光的频率。其调谐范围远远超过可见光的范围，可从毫米波到 X 光。用于激光光谱、激光核聚变等领域。

激 光 技 术

【激光调 Q 技术】激光器运转过程中，突然令谐振腔的品质因数 Q 值增加，使积累在激光上能级的大量激活粒子在很短时间内产生受激辐射跃迁，使激光器输出一个持续时间短、峰值功率高的巨脉冲技术。使用该技术须满足两个条件：（1）泵浦速度必须大于激活介质亚稳态的自发跃迁速度，否则无法在激活介质中积累起大量的反转粒子数；（2）Q 值突增的速度必须极快，否则受激辐射增长缓慢，在输出激光未达到极大以前就消耗掉了大量激活粒子，使峰值功率下降、脉宽加大。使用调 Q 技术可获从几个毫微秒到几十个毫微秒的脉冲宽度以及从几个兆瓦到几十个兆瓦的峰值功率。实现调 Q 方法很多，常用的有机械调 Q、电光调 Q、声光调 Q、饱和吸收调 Q 等。

【机械调 Q】利用机械方式改变光学谐振腔的 Q 值而获得巨脉冲的技术。使用一个由高速马达带动的全反射棱镜和一个半反半透镜组成谐振腔。棱镜高速转动。当两个镜面不平行时，谐振腔 Q 值很低，泵浦只能将能量贮存在激活介质内。两镜面平行时，Q 值

突然升高，输出一巨脉冲。它要求转镜与泵浦同步，使激活介质达到最大粒子数反转时， Q 值达到最大。该方法简便易行，但调 Q 速度慢，难以达到很窄的巨脉冲，且往往是多脉冲输出，易引起振动和噪声。

【电光调 Q 】使用电光器件实现光学谐振腔 Q 值突变而产生巨脉冲的技术。将起偏器与电光器件放在激活介质与全反射镜之间，在电光器件上加适当电压，经起偏后的线偏振光通过器件后偏振方向转过 45° 。反射镜将此光线反射再次通过电光器件，偏振方向再转 45° ，与起偏镜的偏振方向垂直无法通过。这时的 Q 值极低无激光输出。在泵浦到大反转粒子数时，突然切断加在电光器件上的电压，上述过程消失，使 Q 值升高而输出巨脉冲。该技术的开关速度高，开关时刻可精确控制，但开关性能受电光晶体的品种和质量的影响较大。

【声光调 Q 】使用声光器件实现光学谐振腔 Q 值的突变而产生巨脉冲的技术。将声光器件放在激活介质与全反射镜之间。在声光器件上加高频等幅振荡的驱动电信号，它所激发的超声波与入射光相互作用，使光传播方向发生偏转不能形成反馈。此时谐振腔损耗很大， Q 值极低。当泵浦到大反转粒子数时，突然切断加在声光器件上的驱动电信号，器件对光偏转作用消失， Q 值上升产生巨脉冲输出。该方法不用起偏器，它对激光输出的能量损耗比起电光调 Q 要小。但由于超声波在晶体中传播速度比光速慢得多，它的调 Q 速度不如电光调 Q 快，开关时刻的控制也欠准确。

【饱和吸收调 Q 】使用饱和吸收剂在强辐射照射下出现饱和吸收作

用而产生巨脉冲的技术。将饱和吸收剂放在激活介质与全反射镜之间，光很弱时，由于它的吸收使谐振腔 Q 值很低，无激光输出。当腔内自发辐射的荧光强度达到一定的程度时，饱和吸收剂的吸收率迅速减小， Q 值则突然增大而产生巨脉冲激光振荡。可用于调 Q 的饱和吸收剂有掺铀玻璃及某些有机染料。该方法简便易行，可重复使用。但开关时间不能精确控制，寿命较短并且只适用于某些波长范围的激光。

【爆裂膜调 Q 】使用烧穿镀膜的方法获得巨脉冲的技术。在玻璃片上镀一层薄铝膜，把膜片放到激光介质与全反镜之间，用透镜把光聚焦在这层膜上。当腔内自发辐射的荧光功率密度达到一定程度时，将此膜烧穿， Q 值突然增大而产生巨脉冲激光输出。该方法简便易行，无须控制开关时间，但由于膜片每次使用后都必须更换，只能用于单脉冲工作方式。

【腔倒空】利用声光偏转器将谐振腔内的激光进行偏转而形成巨脉冲输出的技术。将声光偏转器放在由两个高反射率的全反镜组成的谐振腔内，声光偏转器上未加控制电信号时，腔内形成的激光振荡无法输出。在声光偏转器上加控制电信号，使激光突然被偏转并输出，这相当于谐振腔的某一端反射镜的反射率从近于 100% 突然降到零，而使腔内的激光能量全部倒空。该技术可用于多种激光器并可获高重复频率的脉冲输出。

【光脉冲整形技术】改进激光脉冲形状的技术。通常指缩短脉冲持续时间和使光脉冲的前后沿变陡。可用两个快速电光开关分别切除光脉冲的倾斜前沿和后沿，获得具有陡峭前沿、后沿的窄光脉

冲。提高电光开关速度可增加前、后沿的陡度，改变两电光开关相对延迟时间可改变整形脉冲的持续时间。

【光脉冲压缩技术】将光脉冲持续时间缩短，提高光脉冲峰值强度的技术。由锁模激光器输出的短脉冲序列通过光学移频器，使脉冲前沿的频率高于后部。然后将此脉冲通过一个色散元件，此元件能使不同频率的光波得到不同程度的延迟。频率越高，延迟量越大，从而令脉冲后部追上它的前沿而达到缩短脉冲持续时间，提高峰值功率的目的。

【激光放大技术】对脉冲激光的功率或能量进行放大的技术。激光器输出功率或脉冲能量常常与光束发散角、单色性、脉宽等指标相互矛盾。使用单个激光器产生既要保证光束优质，又要有大功率、大能量的激光，往往是很困难的。为了克服这一矛盾，可先让激光振荡器运转在较低能量水平上，产生一个脉宽很窄、发散角小、单色性能好的优质激光脉冲。然后再通过激光放大器，对它的功率或能量进行放大。

【激光放大器】对激光脉冲的功率和能量进行放大的装置。由激活介质与泵浦源两部分组成。激活介质在光泵浦作用下，处于粒子数反转的状态，但不发生振荡。此时如有外来光信号通过，处在激光上能级的粒子在外来光信号作用下，产生强烈的受激辐射，使外来光得到放大。激光放大器与激光振荡器必须配合使用。按放大器的级数多少有单级激光放大器与多级激光放大器之分，按放大器与振荡器之间配合的关系不同有行波激光放大器与注入激光放大器之分。

【多级激光放大器】使用两级或两级以上激光放大器对激光脉冲进行放大的装置。为防止高功率密度的激光对激光工作物质的破坏作用，可使光束的截面积逐级扩大，激光工作物质的截面积也相应地逐级扩大。为避免放大器产生自激振荡，并减小放大器中的自发辐射造成的反转粒子数损失，激光工作物质的长度不能太长，并且各级放大器之间加光学隔离器，只允许激光沿一个方向传播。放大器级数越多，脉冲激光功率的放大倍数就越大。

【行波激光放大器】激光一次通过激光工作物质而被放大的激光放大器。它与激光振荡器串接，实际上振荡器内的光波是驻波，放大器内的光波由于无谐振腔变成行波。因激光束一次性通过放大器中的工作物质，所以它的破坏阈值可以大大提高。在相同的激光功率密度条件下，放大器工作物质比起振荡器工作物质更不易被破坏。在技术上，要使振荡器输出的激光进入放大器时，正好放大器工作物质处于最大的反转粒子数状态。为此，两泵浦灯的触发时间必须严格控制，使它们有合适的相对时延。

【注入激光放大器】又称再生激光放大器。由两个串接激光振荡器组成的激光放大器。先由一个振荡器产生微弱的激光信号，将它做为种籽，注入到另一个激光振荡器中。在这个激光器里，激光振荡是在注入的种籽基础上发展起来的，而不是象一般的激光振荡器那样，从噪声中产生发展。待籽光束充分放大以后，可利用腔倒空技术输出到腔外。

【激光锁模技术】又称激光锁相技术，使激光各振荡纵模的位相之

间保持一定的关系，变连续激光为高强度、高重复频率的超短脉冲序列的技术。未经锁模的连续激光中所包含的各纵模之间的位相毫无关系，输出总光强各纵模光强之和。锁模后输出总光波电场强度为各纵模光波电场强度之和，输出总光强变成周期性重复的脉冲序列。重复周期等于相邻二纵模频率间隔的倒数，它对每个脉冲宽度的倍数以及每个脉冲光强对未锁前总光强的倍数都等于待锁纵模的个数。因此锁定的纵模数越大，光脉冲持续时间越短且光强越大。有主动锁模、被动锁模和自锁模三类。

【主动锁模】将外加调制信号加到谐振腔内的光调制器上实现激光锁模的技术。所加调制信号的调制频率等于待锁定的两个相邻纵模之间的频率间隔。光调制器可以是光振幅调制器或光频率调制器。前者通过调制谐振腔的损耗使各纵模的幅度被调制，后者则使各纵模的频率被调制。这二种方法的效果都是使每个被调制的纵模频谱增加了等于其他纵模频率的成分，使原来位相无关的各纵模间相互耦合，实现位相锁定。所用光调制器可以是声光调制器或电光调制器。由于锁模稳定性好，故它是常用的一种锁模方法。

【被动锁模】利用饱和吸收介质的非线性吸收进行锁模的技术。它不需要外加调制信号。在谐振腔内放入适当的饱和吸收介质，这种介质对光的吸收系数在弱光条件下为一个常数，与光强无关，在强光条件下，则随光强的增大而减小。在这种非线性吸收效应的作用下，谐振腔的损耗会产生周期性变化，变化频率恰好等于相邻纵模的频率间隔。各纵模幅度因谐振腔损耗的变化受到调制，并使每个纵模频谱增加了等于其他纵模频率的成分，使各纵模间相

互耦合而实现锁模。所用饱和吸收介质多为有机染料。该方法简便易行，是常用的一种锁模方法。

【自锁模】利用激活介质本身的非线性增益饱和现象而形成的锁模。这种介质对光的增益系数在弱光条件下为常数，与光强无关，在强光条件下随光强增大而减小。在这种非线性增益饱和效应作用下，激活介质的增益会产生周期性变化，变化频率等于相邻纵模的频率间隔。各纵模幅度因增益系数的变化而受到调制，使得它们相互之间耦合实现锁模。该方法由于输出不稳故应用不广泛。

【激光选模技术】使激光器的输出具有某一特定的模式，从而改善激光质量的技术。通常满足激光振荡条件的模式无论是横模还是纵模都有很多，模式越多，激光的方向性、单色性和相干性能就越差。选模分选横模与选纵模两种。

【选横模技术】使激光器输出的横模为基横模或低阶横模，以改善输出激光的方向性的技术。基横模的光束发散角小，方向性好，它的光斑横截面为圆形，能量集中在光束轴线附近。高阶横模光斑的横截面形状复杂，能量远离光束轴线，其光束发散角大，方向性差。使用最多的方法是小孔选模，也可增大谐振腔的长度与通光孔径比以及使用非稳定腔等。

【小孔选模】利用小孔光阑抑制高阶横模，选出基横模的技术。将孔径适当的小孔光阑放在激光束的束腰处，孔平面与光传播方向垂直，孔心与光束轴线重合。由于束腰处的基横模光斑尺寸最小，可不受阻挡通过光阑。高阶横模由于尺寸大被光阑挡掉。方法简

便易行，但不精确，小孔易遭强光破坏，适用于中小能量的激光器。

【选纵模技术】使激光器输出的纵模个数减少，以提高激光单色性的技术。凡是频率处在激光器的激活介质增益曲线频带宽度内的纵模，都可满足激光振荡条件而起振。未经选膜的激光器所输出的激光，谱线宽度大、单色性能差。常用选纵模的方法有短腔选模、法布里——珀罗标准具选模和耦合腔选模等。

【短腔选模】适当缩短谐振腔的腔长，实现激光器的单纵模输出的技术。满足激光振荡条件的纵模频率，必须处在激活介质增益曲线的频带范围内，相邻两个纵模的频率间隔与谐振腔腔长成反比。适当缩短腔长，可使这一频率间隔加大到在增益曲线频带范围内只剩一个纵模，从而实现单纵模输出。如氦氖激光器谐振腔只要小于 10 厘米就可获单纵模输出。此方法简单易行，但由于腔长短，激活介质相应也短，势必影响激光器的输出功率。

【耦合腔选模】将几个谐振腔耦合起来进行选纵模的技术。一个较长的激光谐振腔往往可以有许多同时满足振荡条件的纵模，如果将它与一个短的无源腔（即没有激活介质的谐振腔）耦合起来，可以起振的纵模必须同时满足这两个腔的谐振条件，使起振纵模数大大减少。适当选择各腔长度及耦合方式，可获得所需要的纵模选择。法布里——珀罗标准具选模为常用的一种耦合腔选模。它可克服单纯使用短腔选模所造成的输出功率降低的缺点。

【法布里——珀罗标准具选模】使用法布里——珀罗标准具实现选纵模

的技术。标准具由两个互相平行并镀有反射膜的平板组成，可以代替谐振腔的一个反射镜，也可以插入谐振腔内。标准具相当于一个与原谐振腔耦合的短腔，适当选择它的两块平板之间的距离，便可选出频率大小由此间距所决定的纵模。

【激光稳频技术】使激光器输出的激光频率稳定在一定水平上的技术。激光器工作时，在腔内温度、气压、振动等因素的影响下，腔长经常发生变化，引起激光频率的变化。选定某一标准频率做为稳频的参考频率，当光频率偏离这一参考频率时，由光学鉴频器产生误差信号，信号的振幅与频率偏差成正比，位相取决于频率偏差的方向。信号放大后加到贴在谐振腔反射镜后边的压电陶瓷环上，使之伸缩，改变腔长，将激光频率自动拉回到参考频率上。所选参考频率有两类；一类是利用激光原子谱线本身的特性，选择某一特殊频率做为参考频率，如兰姆凹陷稳频和增益曲线的塞曼效应稳频；另一类是使用外界器件的频率特性，选择某一频率值做为参考频率，如无源腔稳频、吸收曲线的塞曼效应稳频和反兰姆凹陷稳频。

【兰姆凹陷稳频】以气体激光器输出功率的频率特性曲线上出现的兰姆凹陷中心所对应的频率作为参考频率进行稳频的技术。在与反射镜相连的压电陶瓷环上加微小的音频正弦信号，使腔长以同一频率伸缩。当输出激光的频率偏离参考频率时，会引起激光输出功率受此正弦信号的调制。通过光电接收、交流放大和相敏检波等处理，产生一误差信号。此信号的振幅大小反映频率偏离的大小，位相反映偏离方向。信号被放大后驱动压电陶瓷环，调整腔长将频率拉回到参考频率上。由于激光管中气体的组分与压力

在长时间工作后会产生变化,致使兰姆凹陷中心处频率产生移动,这将影响频率的长期稳定性与重复性。

【塞曼效应稳频】利用塞曼效应进行稳频的技术。在外加磁场作用下,塞曼效应能使激光介质的增益曲线和吸收曲线都分裂为两条曲线。两曲线由原曲线向相反方向平移形成,二线交点所对应的频率正好为原曲线中心频率,并以此做为参考频率。有两种不同塞曼效应稳频方式。第一种是在单频激光器增益管上加轴向磁场,使原来单一频率的激光分解为两个不同频率、沿相反方向旋转的圆偏振光。只有当两频率相对于参考频率对称时,两个圆偏振光强度才相同,以二光强之差做为误差信号控制腔长,便可达到稳频目的,称为增益曲线的塞曼效应稳频。第二种方法是在单频激光腔外放一个吸收管,并加轴向磁场;从激光器输出的激光先通过电光器件分解成两个沿相反方向旋转的圆偏振光,再通过吸收管,当光频率偏离参考频率时,两圆偏振光吸收系数不同、光强也不同,利用两光强差做为误差信号达到稳频目的,称为吸收曲线的塞曼效应稳频。

【无源腔稳频】以外界无源腔的谐振频率做为参考频率的稳频技术。无源腔通常为由两个反射镜组成的法布里—珀罗标准具。由于腔内无激活介质,不易产生热膨胀,其谐振频率相当稳定。将它与激光器谐振腔耦合起来,在无源腔的压电元件上加上微小的音频正弦信号。当输出激光频率偏离参考频率时,会使激光功率受到调制。通过光学鉴频器产生误差信号,控制腔长达到稳频目的。

【反兰姆凹陷稳频】又称饱和吸收稳频，在激光腔中放吸收管，以激光功率频率特性曲线的反兰姆凹陷中心所对应的频率做为参考频率，进行稳频的技术。其稳频原理与兰姆凹陷稳频相似。由于吸收管中所充气体的压强较低，又不放电，造成反兰姆凹陷的峰宽很窄，频率位移很小，因此它的频率稳定性和重复性都很高。

【光调制器】改变光波的某一参数，实现信息传输的装置。被改变参数的光波称载波，被传输的信号称调制信号。有多种分类方式。按照被改变的光波参数的不同可有光振幅调制器、光强调制器、光频率调制器、光位相调制器和光偏振调制器五类。按照实现光调制手段的不同可分为机械光调制器、电光调制器、声光调制器和磁光调制器四类。按照调制器放在激光器谐振腔的内外不同可分为腔内光调制器与腔外光调制器两类。按照载波的不同可分为光模拟调制器和光脉冲调制器两类。光调制器广泛应用于激光通讯、激光锁模、激光调 Q、光信号处理等领域。

【光强度调制器】简称调强器，用调制信号改变光波强度的光调制器。输出光强与调制信号大小成正比。可用电光调制器、声光调制器、磁光调制器实现。

【光振幅调制器】简称调幅器，用调制信号改变光波电场强度大小的光调制器。它输出的光波振幅与调制信号大小成正比，电光调制器、声光调制器与磁光调制器都可实现调幅。光振幅调制与光强度调制在器件结构上无原则差异，区别仅在于检测时一个是振幅检测，一个是强度检测。

【光位相调制器】简称调相器，用调制信号改变光波电场的瞬时位相角的光调制器。它可以使输出光波的位相角与调制信号成比例。常用电光调制器实现调相。

【光频率调制器】简称调频器，用调制信号改变光波频率的光调制器。输出光波的频率对入射光频率的频差与调制信号大小成正比。机械调制器、电光调制器、声光调制器可以实现调频。

【光偏振调制器】简称调偏器，用调制信号改变光波偏振方向的光调制器。它使入射的线偏振光偏振方向相对于所选定参考轴产生正比于调制信号大小的旋转。常用电光调制器与磁光调制器实现调偏。

【机械光调制器】利用光学零件的机械运动来改变光波的某一参数的光调制器。可用于频率调制。将谐振腔的全反射镜换成振镜，它的位置可随调制信号的大小而变化，谐振腔的腔长便受调制信号的控制。腔长的变化可引起输出激光纵模频率的变化，从而实现调频。

【声光调制器】利用声光效应对激光的某一参数进行控制的器件。按所控制的光参数不同主要有振幅调制器、强度调制器和频率调制器。其中调幅和调强的原理相似，它们都是在换能器上加载波频率固定、幅度随调制信号而变化的驱动电信号，衍射光位置固定不变而光振幅或光强随调制信号而变。二者的区别仅在于探测器是振幅探测还是强度探测。为提高调制速度可用透镜将入射光聚焦，使之形成极细的腰，减小超声波渡越光束所用时间。驱动

电信号调制方式分脉冲调制和连续正弦波调制两种，前者用于声光调 Q、声光数字运算等，后者用于激光通讯、激光电视等。调频使用载波频率随调制信号而变，幅度固定不变的驱动电信号。衍射光强度也固定不变，频率却随调制信号而变实现调频。由于光频远大于超声波频率，声光调频要求入射激光谱线宽度必须很窄，故它仅适用于单模稳频激光的调制。

【电光调制器】利用电光效应对激光束的某一个参数进行控制的装置。所控参数有振幅、强度、频率、位相及偏振方向等，相应的调制器为调幅器、调强器、调频器、调相器与调偏器。根据不同的调制要求，必须选择不同的电光晶体、选择不同的外加电场方向和通光方向。但无论何种电光调制器都以调制信号作为外加电场去改变电光晶体的双折射特性而达到改变光波参数的目的。按外加电场方向与通光方向垂直还是一致有横向电光调制器与纵向电光调制器之分。电光调制易于实现，结构稳定，不易失调，但所需要的调制电压较高，驱动电源的功率损耗较大。

【磁光调制器】利用磁光效应对激光的某一参数进行控制的器件。包括光强调制和光偏振调制。在圆柱形磁光介质棒外绕上线圈，将调制电信号通入线圈，在沿介质棒轴线方向上会产生随调制信号变化的磁场。介质棒前端放起偏镜，入射线偏振光沿磁场方向传播，在磁场作用下偏振方向随调制信号而变化，实现偏振调制。若在介质棒末端再放检偏镜，输出光强便随光偏振方向而变化，即随调制信号而变化，实现光强调制。由于介质材料的透明波段的限制，磁光调制主要用于红外光。

【腔内光调制器】放置在激光谐振腔内部的光调制器。通过改变激光振荡器的参数如增益、谐振腔的 Q 值、谐振腔腔长等手段而进行光调制。可实现调幅、调强、调频、调相。其调制效率高，但增加了激光振荡器结构的复杂性，工作稳定性变差。通常用于激光锁模、激光调 Q 等技术中。

【腔外光调制器】放置在激光谐振腔外部的光调制器。调制时只改变光波参数不影响激光振荡器本身的参数。可实现调幅、调强、调频、调相、调偏等。使用灵活方便，稳定性好。

【光模拟调制器】以连续光波做为载波，用调制信号改变载波各种参数的光调制器。它可使连续光波的振幅、光强、频移、位相、偏振方向对参考方向的旋转角与调制信号的大小成正比。

【光脉冲调制器】以光脉冲序列做为载波，用调制信号改变光脉冲序列的某一参数的光调制器。它可以使光脉冲序列的振幅、脉冲宽度、脉冲位置、脉冲的重复频率等的变化与调制信号的大小成正比，分别称为脉冲调幅、脉冲调宽、脉冲调位与脉冲调频。还有一类光脉冲调制器是将调制信号经抽样、量化与编码后用有脉冲与无脉冲的不同排列形式表示各时刻的调制信号瞬时值，以达到传递信息的目的。这种调制方式保密性能好，抗干扰的能力强。

【光偏转器】使激光束传播方向发生偏转的装置。按照实现光偏转的手段不同有机械光偏转器、电光偏转器、声光偏转器三类。按偏转方式分有连续光偏转器与数字光偏转器两类。前者可实现光束的连续扫描，后者为飞点式扫描。按偏转方向的维数分有一维

光偏转器和二维光偏转器两类。前者为直接扫描，后者为平面扫描。光偏转器广泛应用于激光显示、激光传真、激光照排、激光信息存储、激光电视等激光扫描系统中。

【机械光偏转器】利用光路中光学零件的机械振动使光束偏转的装置。按机械运动方式的不同有振动式机械光偏转器，称振镜。旋转式机械光偏转器，称转镜。这种偏转器结构简单、光损耗小，但扫描速度低。

【声光偏转器】利用声光效应对激光束的方向进行控制的器件。加在换能器上的电源电压为等幅。当频率改变时，声光介质内的超声波波长随之改变，相当于光栅的周期发生变化，导致衍射光的方向改变。当电源的频率连续变化时，可使激光连续扫描，电源频率飞点变化时，使激光飞点扫描。一般采用布拉格声光衍射，可以是正常声光衍射也可以是反常声光衍射。它具有衍射效率高、偏转速度快、可分辨点数多等优点，用于激光电视、激光寻址、激光打印等扫描系统中，也可用于激光调 Q 的腔倒空技术中。

【电光偏转器】利用电光效应使激光束偏转的装置。由两块相同电光晶体按不同晶向贴粘在一起，在外加电场的作用下，使两块晶体的折射率发生相反的变化，在两晶体接合处形成折射界面，使入射线偏振光在此界面处产生折射而偏转。偏转角度的大小由外加电场的强弱来控制，用于激光存储及显示等激光扫描系统。

【激光探测技术】接收激光并检测其振幅、强度、频率、位相等参数的技术。按探测机理的不同可分为热电探测与光电探测两大类。

按探测器的光谱响应特性分有选择性光谱响应与非选择性光谱响应两类。这两种分类方式是有对应关系的,非选择性光谱响应指对各种光波长都有响应,热电探测就属于这种情况。选择性光谱响应指对某一波长成分的光,或小于某一波长阈值的光才有响应,光电探测属于这种情况。另外按照探测系统的方法来分还有直接探测与相干探测之分。

【激光非相干探测】又称激光直接探测或激光包络探测,将待测激光直接照射到光电探测器上,解调出激光所载信息的探测方法。整个系统包括光电探测器和低通滤波器。光电探测器将入射光子流变成电子流,将载波激光所携带的信息变成电信号通过低通滤波器。滤波器可以有效地限制探测器的噪声通过。这种探测方法可以对调幅或调强的激光进行解调,对调频或调相的激光无法检测。

【激光相干探测】又称激光外差探测或激光混频探测。将待测激光与本振激光器发出的激光一起入射到光电探测器上,解调出激光所载信息的探测方法。整个系统由本振激光器、光电探测器和带通滤波器组成。本振激光器为单模的稳频激光器,频率固定不变。光电探测器相当于一个光混频器,它的输出电流中包含有二激光频率之差的分量,经过带通滤波器后,电信号的振幅、频率、相位都与激光所载信号成比例。故这种探测方法不仅可以探测调幅和调强的激光,而且可以探测调频和调相的光信号。

【激光热电探测器】利用激光辐射引起的温度上升,探测与温度有关的某个电参数,从而确定入射激光的功率或能量的装置。温度升高是一种热积累过程,这种探测器对可见光以及红外光都有响

应，属于非选择光谱响应。常用探测器有热电偶、热敏电阻、热释电探测器。热释电探测器的响应速度很快，可以用来探测激光所载信息。其余两种探测器响应速度很慢，无法胜任激光信息的解调，只能用来做激光功率或激光能量的测量。

【热电偶】利用温差电效应制成的激光热电探测器。将两种不同的金属丝接成一个闭合环路，接头之一被激光照射而温度升高。两个接头之间的温度差使闭合回路中出现电流，大小随温差而变。因此通过测量环路中电流的大小，可以推算出激光的功率。为提高测量灵敏度，常将若干个热电偶串联起来称为热电堆，所用金属丝对的材料可以是铋-银、铜-康铜、铋-铋锡合金等。由于热积累过程需要时间，它的响应速度很慢，无法用于载波激光的解调，只能用来测量激光能量或功率。也可以用来测量温度。

【热敏电阻】利用某些金属或半导体的电阻值随温度而变化的现象制成的元件。金属材料温度升高后，晶格热振动加剧，妨碍电子的定向运动使电阻率加大。半导体材料温度升高后，会使电子脱离正电荷的束缚，增加载流子（可以导电的电子与空穴）浓度，从而减小电阻率。通过测量这些材料的电阻值可以推算出照射到它上边的激光功率。由于热积累过程需要时间，它的响应速度很慢，无法探测激光所带调制信号，只能用来测量激光功率或能量。也可以用它直接测量温度或做为一个电气元件接入电子线路中。

【热释电探测器】利用热释电效应制成的激光热电探测器。某些热电——铁电体如硫酸三甘酞、铌酸锶钡、钛酸钡等晶体的两个端面之间的电压，能随温度而变化。测量这个电压可推算出照射激

光的强度。这种效应对温度非常灵敏，不需要热平衡过程，也不必热积累。因此它对激光强度变化的响应非常迅速，可以用来进行激光载波的调制信号的检测。广泛用于中、远红外激光的信号探测。

【激光光电探测器】利用光电效应将光信号转变成电信号的激光探测器。按照光电子是否逸出材料的表面，将光电效应分成外光电效应与内光电效应两种。外光电效应中光电子逸出材料表面，又称光电子发射效应。利用这种效应制成的探测器有光电管和光电倍增管。内光电效应中所产生的光电子不逸出材料，按原理不同又有光电导效应与光生伏特效应。其中利用光电导效应制成的探测器有光敏电阻，利用光生伏特效应制成的探测器有光电池、光电二极管、光电三极管等。所有光电探测器要产生光电子，都要求入射光子的能量必须大于某一个阈值，也就是光波长小于某一个阈值，称它为红限波长。不同受照材料，红限波长也不同，因此这类探测器的光谱响应具有选择性。

【光电管】利用光电子发射效应制成的光辐射探测器件。包括一个由金属或金属化合物制成的对光敏感的光电阴极和一个收集光电子的阳极组成。所用的阴极材料有铯铯、银氧铯、铯钠钾铯等。将阳极和阴极分别接到电源的正、负极上，用光照射阴极，光电子从阴极上发射出来，在外加电源的电场作用下飞向阳极，在阳极回路中形成光电流。光电流大小与入射光强成正比。按照入射光照明位置的不同，有侧面受光的侧窗型和顶部受光的端窗型。按照阴极与阳极位置的不同，有中心阴极型和中心阳极型。按光电阴极材料的透明程度不同，有半透明型和不透明型。按管子内充

气与否有真空型和充气型。所充气体为惰性气体，它的灵敏度与增益比真空型约大 10 倍。光电管结构简单，但无放大作用，检测灵敏度较低。用于较强的光辐射与快速光脉冲的探测。

【光电倍增管】利用光电子发射效应与二次光电子发射效应制成的有放大作用的光辐射探测器件。包括一个光电阴极、若干个倍增极和一个阳极。光电阴极与倍增极所用材料主要有铯铯、银氧铯、铯钠钾铯等。在光电阴极、各倍增极和阳极之间依次加正向电压。光照射阴极，发射出光电子，在电场加速下飞往第一倍增极，与之碰撞后可发射出二次光电子，然后依次与各倍增极相碰，使光电子数不断放大，最后被阳极收集形成光电流。它比光电管具有高得多的探测灵敏度，可用于检测极微弱的光辐射，是精密辐射探测仪器中不可缺少的光电探测器件。

【光敏电阻】又称光导管。利用在光照下半导体材料电阻率发生变化的光电导效应而制成的光电探测器。其结构很简单，在一块半导体材料两端焊上两个引线即可。对不同波长的光使用不同材料制作，可见光区使用广泛的有硫化镉和硒化镉；近红外区用硫化铅和硒化铅；远红外区有锗掺汞、锗掺铜以及由碲化镉和碲化汞混合在一起的碲镉汞。在光照下电子脱离正电荷束缚，增加了半导体材料的载流子浓度，使材料的电阻率减小。由于半导体材料受光照射时，光激发与热激发同时存在，为了减小热激发的影响，光敏电阻需要工作在低温条件下。尤其是远红外波段的光敏电阻要用液氧或液氮等致冷剂降至 -200°C 以下。

【光电池】利用光生伏特效应在光照下产生电压的装置。可以用半

导体硅、锗、碲化镓、碲化镉等制作。有两种不同结构，一种是用 N 型半导体材料做基片，在它表面上扩散一层硼，形成 P 型半导体薄膜构成 PN 结，并以 P 型薄膜做受光面。另一种用 P 型做基片，表面扩散磷形成 N 型薄膜做受光面。无光照射时，N 区内多数载流子电子与 P 区多数载流子空穴互相扩散，在 PN 结区内形成一个内建电场，方向由 N 指向 P。光照时，在结区及其附近增加了电子与空穴的浓度，这时 P 区中的光生电子与 N 区中的光生空穴在内建电场作用下，互相漂移过结使 P 区带正电、N 区带负电，两端产生电压。光电池受光面积可以做得很大，掺杂浓度很高，因此它电阻率低，能向负载提供较大电流，但响应速度慢。主要用作太阳能电源，为了提高电压与输出电流，可将多片光电池串并联成电池组。特别适合于做人造卫星、宇宙飞行器上的能源。

【半导体光电探测器件】在光通信及光信息处理系统中，用以检测光信号，并可以将光信息转换成电信息、具有增益特性的半导体光电子器件。它是构成光探测器或光接收机的核心部件，主要类型有 PIN 光电二极管、雪崩光电二极管 (APD)、光晶体管、多数载流子器件 (如 CCD 等)、及高速光电导器件等。光电探测器件的中心功能是对微弱光信号的检测，最重要的综合性能参数是最小可探测光功率。具体化的重要特性参数或性能指标包括有：高量子效率、低倍增噪声、快响应速度、高灵敏度、低暗电流、响应波长范围以及高可靠性、低成本等。光探测器应用最多、性能最优的理想器件是各种类型的雪崩光电二极管。针对不同的光波长范围，相应最适用、最理想的光探测器件是：1.06 μm 以下波段，数平面结构的 $n^+ - P - \pi - p^+$ 拉通型 Si 雪崩光电二极管；1.3 μm

波长, P^+-n 型浅结结构 G_e 雪崩光电二极管; $1.55\mu m$ 波长, 为小光敏面 P^+-n-v 结构拉通型 G_e 雪崩光电二极管; 而吸收区与倍增区分离式的 G_aI_nAs/I_nP 雪崩光电二极管 (SAM APD) 被认为是目前光纤通信中很有前途的一种光探测器; 新近发展起来的一种新型三元超晶格半导体——具有高—低电场分布、吸收区与倍增区分离的渐变带隙超晶格长波长雪崩光电二极管 (HI—LO SAM APD), 可以消除严重影响高速工作的脉冲响应特性中的“长尾现象”。为适应光纤通信中波分复用和解复用这类技术难题的需要, 正朝“集成光电探测器”方向发展。在这方面, 则 PIN 光电二极管要比 APD 更适用, 主要有四类: 即光电探测器列阵、发光器件反馈用光监控器、PIN 器件/FET 集成及解波分复用的光电探测器。适于制作光探测器件的半导体材料有锗 G_e 、硅 Si 、Ⅲ—Ⅴ 族及 Ⅱ—Ⅵ 族化合物, 以及各种异质结材料、超晶格材料等, 而最常用的基础材料是 G_e 、 Si 及合金系列 $AlGaSb$ 、 G_aI_nAsP 、 $HgCdTe$ 等。制作各类光探测器件的工艺, 涉及到液相外延、汽相外延、分子束外延等超晶格生长技术, 以及离子注入工艺、干法微细加工工艺 (包括电子束光刻、离子束加工、激光束掺杂等) 以及其他常规光电子器件制备工艺。为了做出高性能、低噪声乃至无噪声的雪崩光电探测器, 必须令其材料中的电子离化系数 α 与空穴离化系数 β 两者相差越大越好。因为器件的过剩噪声因子 F 与离化系数之比 α/β 关系极为密切, 为此, 探索出一系列离化系数比 α/β 很大的新型材料, 特别是基于“能带剪裁工程”概念而设计制出的一系列超晶格或多量子阱材料、渐变带隙材料、及调制掺杂异质结材料等, 为制作各种高性能的理想光探测器提供了巨大潜力。

【光电二极管】利用光生伏特效应制成的包含一个 P—N 结的光电探测器。所用半导体材料有硅、锗、铟化镓、碲镉汞，前两种主要用于可见光，后两种主要用于红外光。结构是在 N 型或 P 型半导体基底上分别扩散硼或磷，形成 P 型或 N 型薄膜作为受光面。工作时加一反向电压，即 N 区接正极、P 区接负极。外加电压形成的电场与 P—N 结区范围内因多数载流子扩散建立的电场方向一致。光照时，光生载流子很快漂移过结，在外加电压作用下形成光电流。按照结构与外加电压高低的不同，有 P—N 结光电二极管、PIN 光电二极管、雪崩光电二极管、金属半导体光电二极管几种类型。由于光电二极管具有量子效率高、噪声低、响应速度快、耗电少、体积小、寿命长、使用方便等诸多优点，成为载波激光的调制信号检测的最佳器件，广泛应用于激光通信中。

【P—N 结光电二极管】由半导体 P—N 结组成，加适当反向偏压工作的光电二极管。它的结构就是最基本的光电二极管的结构，由于基底层半导体材料较厚，光照时，它里边的光生载流子漂移过结所需要的时间较长，因此响应速度在各类光电二极管中最低。所加反向偏压不高，不存在二次光生载流子的激发，故没有光电流的放大作用。

【PIN 光电二极管】在 P 型与 N 型半导体层中间加入一层不掺杂的本征半导体材料而构成的光电二极管。本征半导体材料的加入，相当于将原来的 P—N 结区范围加大了，在光照时，本征半导体材料所产生的光生载流子本身就处在 P—N 结内建电场中，因此这些光生载流子可以快速过结形成光电流。它的响应速度大大超过了简单的只由 P 型、N 型两层半导体材料构成的 P—N 结光电二

极管。它工作时所加反向偏压不高，无放大作用。

【雪崩光电二极管】由半导体 P—N 结组成，在高反向偏压条件下工作，对光生载流子有倍增作用的光电二极管。它的结构类似于一般的 P—N 结光电二极管，只由一层 P 型和一层 N 型半导体材料构成。工作时所加反向偏压很高，接近结区的击穿电压。光照时，在 P—N 结区及结区附近的半导体材料中产生光生载流子，这些载流子在强电场作用下，高速通过结区。在它运动过程中与晶格碰撞，使之电离，产生二次载流子。这些二次载流子被加速后又可碰撞出新的二次载流子，造成载流子雪崩式倍增。雪崩光电二极管不仅响应速度快，而且对光电流有放大作用。为使器件在高反向电压下正常工作，要求结区做的均匀，并在器件边缘加保护环。

【金属半导体光电二极管】又称肖特基势垒光电二极管。由金属和半导体接触形成阻挡层而构成的光电二极管。典型结构是用 N 型硅片做基底，在它表面形成约 300 埃左右的二氧化硅薄膜，上边再镀约 70 埃的薄金层作为受光面。工作时加反向偏压，N 型硅片接电源正极，金膜接负极。它的光谱响应范围宽，灵敏度比一般的硅光电二极管高，光敏面积可以做得很大，均匀性好，响应速度高。适用于激光跟踪、定位、侦察、制导。

【光电三极管】又称光晶体管。根据光生伏特效应制成的包括两个 P—N 结的光电探测器。它由三层半导体材料组成，发射区与集电区用同一型材料，基区用另一型材料。因此有 NPN 型和 PNP 型两类三极管。工作时，将发射极与集电极接到电源上，使发射区

与基区形成的发射结得到正向电压，集电区与基区形成的集电结得到反向电压。基极悬置。光从发射区入射，在基区内激发光生载流子，形成光电流，它相当于输入的基极电流。由外接电源供电，从发射区注入、集电区输出的电流，随基极电流即光电流而变化，变化幅度大于光电流的变化幅度。因此光电三极管不仅可完成光电转换，同时还有放大作用。

【光电子集成（回路）】将光子器件与电子器制作在同一半导体芯片上的单片集成（回路），简称“OEIC”。它分为系统集成（SOEIC）及功能集成（FOEIC）两大类，一般又区分为集成光发射机、集成光接收机、集成光子开关、及光神经网络等光电子集成器件芯片类型。其制作工艺主要包括有异质结超薄层生长工艺（如 MBE、MOCVD、CBE 及液相外延、汽相外延等）、干法微细加工（如电子束光刻、离子束加工、激光束掺杂等）及有关微电子集成技术等。七十年代初，美国加州理工学院 A·Yariv 和日本科学家 K·Hayashi 首先提出“光电子集成”设想，二十多年来取得不少突破，探索出：多功能量子阱结构材料是实现 OEIC 最适宜的基础材料，半绝缘衬底平面化集成结构为获得高性能 OEIC 芯片的可行设计途径，超薄层生长技术及干法微细加工技术为发展新一代 OEIC 的关键工艺手段。超高速光学器件与超高速电子器件的结合与集成是 OEIC 的发展方向。所谓集成光发射机系指包含发射光源、光调制器和驱动电路的 OEIC 芯片，最简单的就是一个激光器与一个 MESFET 或 HBT 相容集成的芯片。集成光接收机系指配置有可调谐稳频激光器、波导定向耦合器、光电探测器、光频差分放大器及中频放大器的 OEIC 芯片，最简单的就是一个 PIN 光电二极管与一个低噪声 MESFET 相集成的光探测器芯

片。所谓 OEIC 列阵，常指光双稳开关列阵、激光器或 LED 面列阵，或探测器面列阵等而言。这些光电子集成器件广泛地应用于光信息处理、光计算技术、及光通信交换网络，以及未来的光学神经网络系统方面，并与微电子相互融合，构成功能多样、性能奇妙、丰富多彩的未来信息时代新产品。

【激光调谐技术】使激光器输出的激光频率或波长能在一定范围内变化的技术。主要是利用一些晶体的非线性光学效应来实现的。有光倍频、光参量放大、光参量振荡、频率上转换等技术，可实现红外光变可见光以及从红外到紫外的连续变化。这种可调谐激光器在检测大气污染、物质结构的研究以及激光光谱学中都很用处。

【光倍频】利用非线性晶体的二次非线性光学效应，使入射光的频率加倍的技术。当频率为 ν 的强激光入射非线性晶体中，由晶体极化强度与光电场强度关系中的二次项，可产生 2ν 的频率成分。分别称频率为 ν 、 2ν 的光为基频光、倍频光，倍频光强度与入射基频光强度之比称倍频效率。入射基频光强越大，非线性晶体的非线性光学系数越大，倍频效率越高。为使效率提高，还须适当选择切割晶体的方向及长度，使之满足相位匹配条件。非线性晶体既可放在激光谐振腔内也可放在腔外，前者称腔内倍频，后者称腔外倍频。由于腔内基频光强度大，因此倍频效率高于腔外倍频。

【光参量放大】利用非线性混频效应，对微弱光信号进行放大的过程。将频率为 ν_1 的待放大微弱光信号与频率为 ν_2 ($\nu_2 > \nu_1$) 的强激光一起入射到非线性晶体中，可以使能量从频率为 ν_2 的泵浦光波

向频率为 ν_1 的信号光波以及频率为 $\nu_3 = \nu_2 - \nu_1$ 的空闲光波转移。如果入射的两个光波的频率恰好满足 $\nu_2 = 2\nu_1$, 则有 $\nu_3 = \nu_1$, 此时称简并光参量放大, 它正好与光倍频相反, 出射光频率变成入射光频率的一半。

【光参量振荡】利用光参量放大过程, 使信号波或空闲波形成激光振荡的技术。将非线性晶体放在对信号波或空闲波满足谐振条件的光学谐振腔内, 用泵浦激光照射非线性晶体。当它的强度超过某一个阈值时, 信号波或空闲波在谐振腔内不断得到放大, 便可形成激光振荡。通过改变非线性晶体的方向、温度, 或在晶体上外加电场等方法, 可以使满足相位匹配条件的信号波或空闲波频率发生改变。因此, 利用光参量振荡技术可以获得连续可调谐的激光输出。其频率变化范围取决于晶体的特性及调谐方式。如使用钽玻璃激光器倍频输出的 0.53 微米激光做为泵浦, 连续改变磷酸二氢 (KDP) 晶体的方位, 可获得从 0.96—1.18 微米的激光输出。

【频率上转换】利用非线性混频效应, 提高入射光频率的技术。将频率为 ν_1 的强激光与频率为 ν_2 的光一起在非线性晶体内进行混频, 可以得到 $\nu_3 = \nu_1 + \nu_2$ 的光输出。频率上转换的效率一般比较低, 它的实用价值是作为一种探测红外辐射的办法。将红外波段的弱光信号变换成可见光是一项重要技术。因为用红外器件检测红外信号不仅效率低, 而且需要冷却, 使用不便。可见光波段有比较灵敏的探测器, 可以补偿频率上转换过程中效率低的不足。

激 光 应 用

【激光机械加工】利用聚焦激光束对工件进行各种机械加工的技术。激光亮度高、方向性好，经透镜聚焦后，光斑直径小到只有微米数量级，可获极高的能量密度。脉冲激光还可获极高的功率密度。它可以对很多材料，包括金刚石、硬质合金、陶瓷、玻璃等硬度大、熔点高、易碎易裂的材料进行机械加工。所用设备包括激光器、光学系统、机械操纵系统、显微观察系统四部分。其中光学系统包括聚焦透镜，用以保证获得适当的聚焦点；偏转系统以控制光束的偏转，移动加工点。机械操纵系统用来固定工件和移动工件。显微观察系统使用显微镜对工件定位并监视加工情况。激光机械加工包括打孔、切割、焊接、刻槽等。与一般机械加工相比，它速度快、质量好、热影响区小、工件无污损、不存在工具的磨损、便于自动控制。在微形加工、对硬脆材料的加工方面更显优越性。

【激光打孔】利用激光对工件进行打微小圆孔的加工过程。为提高激光的功率密度，用透镜将激光能量聚焦到工件表面的微小区域上，使物质迅速气化形成微孔。所用激光器大多是脉冲式大功率激光器，如红宝石激光器、钕玻璃激光器、钕铝石榴石激光器和二氧化碳激光器等。由于激光器与工件无机械接触，激光打孔不存在工具的磨损，也没有机械应力，不会使工件变形。它可以方

便地用聚焦系统实现工件的精确定位，适合于打微形孔以及对质硬、熔点高的材料进行打孔。

【激光焊接】利用激光对相同材料或不同材料进行焊接的加工过程。激光束经透镜聚焦后具有极高的功率密度，可使材料局部熔融实现焊接。对大尺寸材料进行焊接，须使用大功率的连续激光器或脉宽较宽的高重复频率的脉冲激光器。对微型件如微电子器件引线焊接和密封焊接，可使用脉冲激光器。可焊接一般金属，也可焊接高熔点或极易氧化的金属。可进行各种不同金属之间以及金属与非金属之间的焊接。它具有作用时间短、不受电磁场影响、热影响区域小、与工件无机械接触、可以通过透光物质对密封容器内的工件进行焊接等优点。

【激光切割】用激光对材料进行切割的加工过程。为提高功率密度，用透镜对激光束进行聚焦并对准待切割部位，使物质迅速气化实现切割。所用激光器为大功率连续激光器或有较高重复频率的激光器，如钕铝石榴石激光器和二氧化碳激光器等。它具有切缝窄、速度快、热影响区域小等优点，适于切割用普通方法难以切割的易碎易裂的脆性材料和高硬度、高熔点材料，如钢板、钛板、陶瓷、石英等。在切割金属材料时，可辅之以吹氧，提高切割厚件的能力。在切割有机材料时，吹惰性气体，可使切缝平整，避免材料的烧灼与破坏。

【激光刻槽】利用激光在材料表面上刻划出适当深度的沟槽的加工过程。如在薄膜电阻上刻出螺旋槽以增大阻值，制造电容量较小的间隙电容器，与计算机配合使用还可在一些材料表面刻划出复

杂图案做为艺术品等。可使用钕铝石榴石激光器和二氧化碳激光器。它具有加工精度高、刻缝窄、效率高、便于自动控制、能避免加工工具的磨损等优点。

【激光淀积】利用激光气化各种金属或非金属材料，使之淀积在基体上的加工过程。可用来制作各种光学薄膜、导电薄膜。其特点是能气化与淀积各种高熔点的金属与非金属材料，可制作与蒸发源具有相同化学计量比的化合物薄膜和合金薄膜。如果在基体上加掩膜，将金属材料有选择地淀积到基体上，还可实现集成电路或其他微型电路各元件之间的电气互连。

【激光微区光谱分析】利用激光分析物质微小区域内的化学成分的技术。将激光束聚焦在样品表面上，使微小区域形成高温高压，使之局部分解、气化或熔解。然后再经摄谱仪记录分析，便可得知这一区域内的化学成分。这种分析方法所用样品量少，对样品没有太大的损坏，样品也不必预先处理。对导体或非导体、透明体或非透明体都可进行操作。操作简便快速。如果对同一样品在不同地方进行微区分析，还可用来检查材料的均匀性。它广泛应用于地质、冶金、医学、电子工业等部门。

【激光热处理】利用激光对固体材料进行热处理的过程。激光照射在固体材料表面上时，被照区域上的激光能量转变成热能，使温度升高，可对某些材料和元件进行退火、淬火、表面硬化等处理。

【激光受控核聚变】用大功率激光照射热核反应物，使之进行可控核聚变反应的技术。将参加热核聚变反应的反应物氘和氚按适当

比例混合，制成小球状，放在球形容器内。用多路高度聚焦的大功率激光从许多不同方向以球对称形式同时照到反应混合物上，使它产生向心微爆炸，达到足以引发聚变反应所需要的高温高压而引爆。聚变成氦，同时辐射出高能中子流。在球形容器外边用吸收装置吸收反应中释放出来的高能中子流，并将能量转移给适当的工作液体，推动发电机发电。通过控制氘氚反应混合物的质量、滴入球形容器内的速率以及照射激光的功率，可以控制热核聚变反应的进展速率。

【激光干涉测量】以稳频激光为光源，利用光的干涉原理对各种物理量进行精密测量的技术。将激光分为两束，一束做为参考光，另一束经被测物返回做为信号光，通过分析两束光的干涉信号可获被测参数。按信号光变化参数的不同，分为两类：一类利用信号光的相位变化进行测量，如激光测长、测厚、测宽、测角等；另一类利用信号光的频率变化进行测量，如测速、测加速度等。由于激光的单色性、方向性、相干性好，激光干涉测量具有精度高、误差小、测量范围大、易于实现自动化控制等优点，是计量领域内的一个极为重要的测量方法。

【激光测长】以稳频激光作为光源，通过干涉仪进行长度的测量。将激光分成两束，一束由固定镜反射做为参考光，另一束由可以移动的可动镜反射做为信号光。当可动镜移动待测长度时，信号光位相发生相应变化，反映在两束光的干涉条纹变化上。测出干涉条纹移动的条数可推算出待测长度。用光的干涉原理测长实际上相当于用光波长做为尺子，再加上激光本身的单色性、相干性好，因此这种测量方法精度高、误差小、量程大、亮度高，还便

于实现自动测量。

【激光测厚】用激光做光源,进行厚度的测量。对激光透明的材料,可用激光干涉仪做非接触测量。通过观察材料旋转一定角度时,干涉条纹的变化而推算出厚度。对激光不透明的材料,可用由激光发射器与探测器组成的测厚装置进行非接触测量。由探测器接收被测表面反射回来的激光,根据反射光位置推算厚度。激光测厚精度高,适于测薄材料的厚度。

【激光测速】以激光为光源,利用多普勒效应对运动物体进行的速度测量。激光照射运动物体,反射的信号光频率发生多普勒频移,频移大小与物体运动速度有关。将信号光与从发射激光中分出的参考光进行混频检测,可得到和运动物体速度成比例的拍频信号,分析这一信号可测出物体速度。激光测速的精度高,可测量的速度范围大。

【激光测加速度】使用激光做为光源,测量运动物体加速度的技术。在激光器谐振腔内放入一个双折射传感器,它可以使激光器产生一对互相垂直偏振的激光束。将这个激光器固定在运动物体上,当它随物体一起做加速运动时,传感器因受到应力作用而使折射率发生变化,且对两束偏振光的折射率不同,使它们的光程不同而产生了频率差。频差的大小正比于加速度,检测出这两束偏振光的频率差,可推算出加速度大小。

【激光雷达】向目标发射激光,并探测目标反射或散射的回波,以确定目标某个参数的装置。由激光发射系统与安装在发射系统旁

边的激光接收系统两大部分组成。激光发射系统中有大功率激光器和望远镜发射器，接收系统包括接收望远镜、光电转换器与电信号处理显示器。按照所测目标及所测目标的参数不同有多种雷达。最常用的是测距雷达，所测距离的范围远到天体如月球和人造卫星，近到只有几米、十几米。既可以在空气中测距，也可以在水下测距。测速雷达是利用多普勒频移效应，测定目标的运动速度。气象雷达利用米氏散射、分子散射和喇曼散射等效应测量大气成分和污染物浓度。由于激光雷达发射的光波比普通雷达发射的微波波长还要短，所以它的分辨本领比普通雷达高。

【激光测距】使用激光雷达测量目标距离的技术。有两种测距方法：脉冲测距法与位相测距法。脉冲测距法是通过测量发射的激光脉冲在测距机与目标之间往返一次所需时间，推算目标距离。它的测距精度在米数量级上，虽精度不高，但测量距离远，适用于天体的测距，如人造卫星测距和月球测距。位相测距法是通过测量发射的连续调制激光在待测距离上往返一次后所产生的位相变化，计算所需时间，并最后推算出距离。它的测距精度高，适用于工程和军事测距。脉冲测距法使用的激光器多用大功率的调 Q 或锁模固体激光器，位相测距法使用的激光器为大功率半导体激光器或气体激光器。

【激光天体测距】使用激光测距雷达测定天体到地球的距离的技术。整个系统由大功率红宝石脉冲 Q 开关激光器、大口径发射与接收望远镜、低噪声高灵敏度光电倍增管和控制电子系统组成。将它们安装在精密转台上，可以人工目视跟踪或用计算机程序控制跟踪。为了把反射回波提高到可探测的强度，还可以在人造卫星、

月球上安装光学角反射器。通过对人造卫星或月球的定期测距,可以了解它们绕地球运转的轨道变化情况。从而推断地球的形状、地球重力场和地极的变化。也可以用于大陆漂移和地震的研究。

【激光测大气污染】使用激光雷达检测与监视大气污染物的技术。用激光雷达向待测大气发射激光,大气中的污染物在激光照射下会产生各方向的散射光,用探测器测量散射回波光的频率、偏振状态和强度可以分析出污染物的性质与浓度。污染物颗粒直径大于光波长时所产生的散射称米氏散射,散射强弱与入射光波长无关。污染物颗粒直径与分子直径为同一数量级时产生的散射称分子散射,散射作用的强弱与入射光波长有关,波长越短散射作用越强。这两种散射都不会改变入射光频率。可以用 Q 开关的红宝石激光或钕玻璃激光测定大浮游颗粒的浓度分布,而用紫外氮激光器测定微浮游颗粒的浓度分布。

【激光测大气成分】使用激光雷达测量大气中各种气体分子所占比例的技术。用激光雷达向大气发射激光,大气中各种气体分子在激光的照射下,除了产生一般的分子散射以外,还能产生受激喇曼散射。前种散射不改变入射光频率,后种散射能改变入射光频率。不同气体分子产生的频移也不同,因此用探测器测量散射回波中不同频移光的强度,就可以分析出不同气体分子所占的比例。由于喇曼散射作用的大小与入射光波长有关,波长越短,散射作用越强烈。因此一般使用波长为 3371 埃的紫外氮脉冲激光器做为辐射源。

【激光干涉检验】以激光做光源,利用光的干涉原理,对材料的表

面或内部所进行的质量检验。对经过抛光处理后的光学表面，可使用普通的激光干涉仪检验平板材料表面的平面度、平行度、光洁度。对复杂或粗糙表面的质量检验以及对材料内部进行无损探伤可以使用全息激光干涉仪，通过照全息干涉图的办法来进行。

【激光陀螺仪】利用环形激光器测量航行物在航行过程中航向的仪器。将激光管放在正三角形的环形谐振腔中，它可产生两束激光，一束在腔内沿顺时针方向传播，另一束沿逆时针方向传播。当激光器旋转时，这两束激光之间会产生频率差。利用光敏探测器探测并记录显示，根据频差的变化情况可得知飞机或轮船航行方向的有关数据。比起传统的机械陀螺仪，它的灵敏度高、可靠性好。

【激光导向仪】用激光束控制运动物体前进方向的光学仪器。由激光发射系统与光电接收系统组成。将激光发射系统安装在物体前进的方向上，它包括激光器和发射望远镜及有若干运动自由度的工作台。光电接收系统安装在运动物体上，包括接收望远镜、光电探测器和方位显示、纠偏等装置。它非常适合于隧道掘进机。

【激光准直仪】以激光束为基准直线，测量轴孔同心度、导轨直线性等的光学测量仪器。包括激光发射系统与光电检测系统两部分，激光器使用方向性好的氦氖激光器，并严格准直。它用于建筑、隧道工程、大型设备安装、铁轨铺设等。

【激光晶轴定向仪】以激光为光源，用于硅、锗等单晶体的晶轴方向测定的仪器。用氦氖激光照射经表面腐蚀处理过的单晶表面上，从单晶体的光发射图像的对称性来确定晶轴方向。由于激光方向

性好、亮度高，大大提高了晶轴定向的精度。

【激光通信】用激光做为运载工具的传递信息的技术。包括信号的发送、传输与接收三部分。首先将待传递信息通过信号变换器转变成电信号，再用光调制器去调制激光并将其发送出去。传输方法有两种：一是直接在大气中传输，称大气激光通信；另一种是通过光纤传输，称光纤激光通信。接收时，由光电探测器把光信号转变成电信号，再通过信号变换器还原成初始信号。因光频大大高于无线电波频率，因此激光通信最大优点是信息容量大，传送路数多。

【大气激光通信】载有信息的激光直接在大气中传输的激光通信。使用波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的远红外二氧化碳激光做为载波。为提高激光传输的方向性，要将经调制的激光用发射望远镜扩束准直后发射到大气中。接收处的激光束直径可达几米，使用大口径接收望远镜将大面积光信号接收下来聚焦成小光斑，再用光电探测器检测。所用激光为不可见光，不易被截获，保密性能好。此外由于不用铺设任何线路，设备简单，经济实用。但由于大气对激光的吸收和散射等衰减作用，影响通信距离，大气湍流影响通信质量。再加上瞄准困难，不能越过障碍物，使它的应用范围受到一些限制。它适合于空间宇宙飞行器间以及城市中高层建筑物之间的通信。

【光纤激光通信】将载有信息的激光通过埋设在地下的光纤波导进行传输的激光通信。使用可见光激光如氦氖激光做为载波。把经调制的激光用光束耦合器耦合进光纤进行传输，在接收端再用光

束耦合器耦合出光纤进行检测。将许多根光纤包在一起组装成光缆，埋设在地下，每一根光纤都可以同时容纳许多路电话或电视信号的传输。其容量之大是传统有线通信无法相比的。激光在光纤中传播时，由于受到吸收、散射、色散作用会使信号发生衰减和畸变，因此在发射端与接收端之间须加若干中继站，恢复光信号的大小与质量。光纤通信具有频带宽、容量大、不导电、不受电磁干扰、重量轻、线路成本低、工作稳定、不易被窃听等诸多优点，是信息社会中各种信息网的主要传输工具。

【激光电视】用激光代替阴极射线管显示图像的电视。连续的可见激光经光调制器使光强受到电视图像信号的调制，然后再经过二维的光偏转器进行平面扫描，使图像在屏幕上显示出来。所用光调制器可以是声光或电光调制器，偏转器可以是声光、电光或机械偏转器。由于激光功率大，因此激光电视具有图像清晰、亮度高、显示面积大等优点，但成本较高。

【激光生物效应】激光照射生物体时，受照部位的组织结构或机能发生变化的现象。其表现因激光波长、能量密度及照射对象的不同而变化。如细胞受照时，其分裂与生长过程会受到影响，引起染色体的畸变而改变遗传性。组织器官受照时，较低的能量密度可引起局部表层组织的变化，高能量密度同时引起表层与深层组织的变化。生物色素受照时，对不同波长的激光具有选择性的吸收。产生这些效应的原因是当激光与生物体相互作用时，发生了复杂的多种形式的能量转换与吸收，主要有热效应、光化学效应、压力与冲击效应、电磁效应等。将这些效应合理地应用到农业生产中可以提高产量，应用到医学上可以进行激光治疗。

【激光农业技术】激光用于农业生产,提高农作物产量的各类技术。用不同波长、不同剂量的激光照射农作物的种子、植株或某一个特定的器官,可以使细胞的分裂与生长受到影响,引起染色体的畸变从而改变其遗传性,再经过选择或杂交可以培育出优良的品种。此外利用激光还可以直接促进种子的发芽和生长,增强农作物的抗病能力,加速对农作物有利的微生物新陈代谢,消灭对农作物有害的病虫以及预测农作物生长速率等。

【激光治疗】使用激光医治疾病的一种疗法。在治疗眼疾、牙病、皮肤病和消除肿瘤、结石等方面尤其具有明显的疗效。在治疗眼科疾病中,激光可用来封闭视网膜的裂孔,具有凝固时间短、凝点面积小、组织损伤小、不须麻醉等优点。治疗牙病中,可以去除牙腐质、融化珐琅质、打通牙髓腔,减轻病人受牙钻的痛苦。皮肤病治疗中,可治牛皮癣、厚皮病、皮肤溃疡、神经性皮炎等顽症。用激光照射肿瘤时,会使肿瘤的生长受到抑制,甚至被破坏。尤其是含有色素的肿瘤,对激光具有较好的吸收性,疗效尤为显著。如人体表浅部位的黑色素瘤、眼底色素瘤、血管瘤、皮肤癌等。借助于导光装置,将激光引入人体内,可以捣碎肾结石、膀胱结石等。激光除了可直接治疗某些疾病以外,还可以用做手术刀,进行各种外科手术。

【激光手术刀】使用经聚焦后的大功率激光进行外科手术的器具。二氧化碳激光经聚焦后能量高度集中,利用它的高温高压作用可以切割组织,施行各种外科手术。还可以用它来切割肿瘤、骨骼等。它的优点是切割速度快、切口出血少、不易感染。缺点是切

口愈合时间较长。

【激光武器】利用激光辐射能量摧毁敌方目标或使其丧失战斗力的武器。由强激光器系统、目标搜索与跟踪系统、辐射能量发射与聚焦系统、指挥控制系统组成。分为战术武器与战略武器两类。前者包括用于反击坦克、飞机、战术导弹，破坏敌方的侦察、指挥、控制系统，杀死杀伤敌方人员的武器。后者包括拦截洲际弹道导弹、宇宙飞行器，引爆氢弹的武器。激光武器与常规武器相比，有两个显著的优点，首先因为它以光束做为“子弹”，飞行速度极快，可使对运动目标的瞄准变得更加容易，大大提高了射击命中率。其次由于光束的惯性小，射击时无后坐力，可迅速改变射击方向而不影响命中率，也可在高速运动情况下向任意方向进行射击。参见军事科学技术。

非线性光学效应器件

【非线性光学效应】见第一卷中的“非线性光学效应”。

【二次非线性光学效应】见第一卷中的“二次非线性光学效应”。

【非线性光混频】利用非线性晶体的二次非线性光学效应，从入射的两种不同频率的激光中得到和频与差频激光的过程。为获得比

较明显的非线性效应,入射的两束光中至少要有一束是强激光。利用这一效应,可以实现光参量放大或光参量振荡,对激光频率进行连续调谐。还可实现频率上转换,将红外光变为可见光。

【三次非线性光学效应】见第一卷中的“三次非线性光学效应”。

【光学位相共轭】利用非线性晶体的三次非线性光学效应,在几个入射光波混频的过程中,产生与某一入射光波场振幅互为复共轭,传播方向相反的新光波场的现象。参加混频的光波数可有三个或四个,分别称三波混频与四波混频的位相共轭。此技术可消除光束的位相畸变,如光纤传送图像会因位相畸变而模糊不清,通过位相共轭技术可使图像复原。所用晶体有钛酸钡和某些半导体材料如锗、硅、铋化铟等。

【光学双稳态】非线性晶体对应于某一输入光强,存在两个稳定输出光强的状态并可以用光信号进行瞬间转换的现象。实现双稳要求:(1)器件光透过率必须与晶体折射率之间有一个非线性关系;(2)透射光强能够反馈控制晶体的折射率。双稳器件有全光学型与光电混合型两类。全光学型利用强激光入射时,光强本身来改变介质折射率,这是一个三次非线性光学效应。光电混合型是利用外加电信号来控制晶体折射率的变化,这样可使用较弱的激光入射。光电混合型又有电光双稳态与声光双稳态两种,即分别使用电光器件与声光器件做为双稳器件。利用光学双稳器件可实现对输入光信号的开关、放大、限幅、整形、计数、存储等。它具有开关速度快、不受电磁干扰等优点。在光学信号处理、光通讯、光计算等领域有很大的应用潜力。

【受激喇曼散射】激光通过非线性介质时，受介质分子的散射作用而改变频率的现象。处于某一能级 E_1 状态的介质分子，先吸收一个频率等于 ν_1 的入射光子，向上跃迁到某一高能级。然后它再发射一个频率等于 ν_2 的光子，向下跃迁到能级 E_2 。按照 E_1 与 E_2 大小的不同，有两种受激喇曼散射。当 $E_2 > E_1$ 时，散射光频率 ν_2 低于入射光频率 ν_1 ，称斯托克散射。当 $E_2 < E_1$ 时， ν_2 高于 ν_1 ，称反斯托克散射。如果入射光强很弱，散射光基本上是自发辐射。当入射光为强激光，光强达到某一阈值以后，散射光变成受激辐射。其光强会超过入射激光的几百倍，甚至上千倍，光谱变窄，方向集中。利用这一现象可制成激光移频器或喇曼激光器，由泵浦的激光中产生出它的斯托克线或反斯托克线的激光输出。

【自聚焦】强激光束在某些非线性晶体中传播时，自己会聚成非常细的光束的现象。非线性晶体的折射率不是常数，它与光波电场强度之间有一定的依赖关系，场强大处折射率就大。由于激光强度在光束截面上的分布是从中心向外逐渐减小，因此当激光在这种非线性晶体中传播时，沿光束轴线的折射率最大，沿半径方向向外逐渐减小。根据全反射现象，光由折射率大处向折射率小处传播且入射角超过某一临界值时，会被全部反射回来。激光便会自动向光束轴线处会聚，形成非常细的光束。在自聚焦区域内光的能量密度相当大，容易损坏晶体。

【非线性晶体】非线性光学效应所使用的晶体，可用于光倍频、光参量振荡、频率上转换等。对此类晶体的要求有：（1）具有较高的非线性光学系数，这样才可产生明显的非线性光学效应；（2）能

承受足够强的激光照射，因为一般非线性光学效应都是在强激光入射条件下起作用的；(3) 光学均匀性、机械性能好，不易潮解变质，易于生长等。常用的非线性晶体有磷酸二氢钾 (KDP)、磷酸二氢铵 (ADP)、铌酸钾锂、铌酸钡钠等。

【布拉格声光衍射】沿光传播方向上超声波场的长度较大时所产生的声光衍射。由超声波形成的“光栅”相当于一种体光栅，它对光的衍射作用类似于晶体对 X 射线的衍射作用。当入射光线与超声波波面之间所夹的微小角度满足布拉格匹配条件时，出射光除零级光以外，只有一个衍射光，或 +1 级衍射光、或 -1 级衍射光。它的衍射效率很高，可用于声光调制和声光偏转。

【喇曼—奈斯声光衍射】沿光传播方向上超声波场的长度较短时所产生的声光衍射。由超声波形成的“光栅”相当于平面光栅，它对光的衍射作用类似于普通的光学光栅。入射光垂直于超声波传播方向，在零级光两侧对称地出现多级衍射光，分别为 ± 1 级、 ± 2 级衍射光等。由于衍射级次多，故衍射效率低，可用于声光调制。

【正常声光衍射】衍射光的偏振方向与入射光相同的声光衍射。实现这种衍射的超声波为振动方向与传播方向一致的纵波。在超声纵波作用下，声光介质的折射率椭球只发生半径大小的变化，主轴方向不变，因此衍射光的偏振方向保持与入射光偏振方向相同。可用于正常声光衍射的晶体有钼酸铅、石英、重火石玻璃等。与反常声光衍射相比，它的偏转角小、衍射效率低、所需晶体尺寸大，但所用材料的成本低、易制作。

【反常声光衍射】衍射光偏振方向与入射光垂直的声光衍射。实现这种衍射的超声波为振动方向与传播方向垂直的切变波。在超声切变波的作用下，声光介质的折射率椭球不仅半径大小变化而且主轴方向也转过 45° ，这就使得衍射光偏振方向从入射光偏振方向上转过 90° 。用于反常声光衍射的晶体为二氧化碲。由于在二氧化碲晶体内的超声切变波的传播速度很慢，使得它具有偏转角大、效率高、晶体尺寸小等诸多优点。

【声光器件】利用声光衍射效应制成的器件。由声光互作用介质和电声换能器构成。声光介质可用水、石英、重火石玻璃、钼酸铅和二氧化碲等，换能器使用具有良好压电性能的铌酸锂晶片，可使电信号变成超声波。按照沿通光方向上换能器的长短不同分为布拉格器件与喇曼—奈斯器件两类；按照衍射光与入射光偏振方向的相同与否分为正常器件与反常器件两类；按照超声波的类型分有行波器件和驻波器件两类。驻波器件的声光介质底面与换能器平面严格平行，无吸声装置，使反射超声波与入射波叠加形成驻波，而行波器件的声光介质底面有吸声装置或与换能器平面不平行使入射声波不反射。按照器件工作性质的不同有调制器、偏转器、可调谐滤光器三种。调制器可控制激光的振幅、强度和频率，偏转器可控制激光的方向，滤光器可从入射的复色光中滤出所需的单色光。声光器件以其速度快、效率高而广泛应用于激光调 Q、激光扫描、激光通讯、光信号处理等领域。参见激光调制技术中的“声光调制器”和激光偏转技术中的“声光偏转器”。

【可调谐声光滤光器】利用声光效应对入射复色光进行可调谐滤光，使衍射光变成单色光的器件。加在换能器上的驱动电源为频

率可变的等幅振荡信号。对给定频率，入射复色光中只有某一波长成分的光波与该频率相应的超声波符合布拉格匹配条件，使此波长的光被衍射。当驱动电信号频率变化时，衍射光波长也会随之改变。一般使用二氧化碲做声光介质，因此属于反常声光衍射。结构上有共线互作用和非共线互作用两类：共线指超声波传播方向与光传播方向一致；非共线指两方向垂直。它具有调谐范围大、集光能力强、调谐速度快等优点，用于对自发辐射的光源进行光谱分析以及彩色图象的分色术等。

【电光器件】主要利用线性电光效应制成的器件。由电光介质在选定外加电场方向上镀电极而构成。常用电光介质有 KDP 晶体、ADP 晶体、铌酸锂晶体等。按器件结构分有横向电光器件与纵向电光器件二种，前者指外加电场方向与通光方向垂直，后者外加电场方向与通光方向一致。按器件工作性质分有电光调制器与电光偏转器二种。电光调制器可控制激光的振幅、强度、频率、相位与偏振方向，电光偏转器可控制激光方向。在激光调 Q 技术、激光扫描系统、激光通讯、光信号处理等领域内有广泛应用。参见激光调制技术中的“电光调制器”和激光偏转技术中的“电光偏转器”。

【磁光器件】利用磁光效应制成的器件。由磁光介质棒如 YIG 棒及绕在棒外的线圈组成。按其功能分主要有磁光调制器和磁光光隔离器二种。前者用于激光调制技术，后者用于多级激光放大器的级间去耦。参见激光调制技术中的“磁光调制器”。

【磁光光隔离器】只允许光线从一个方向通过，阻止它沿原路返回

的装置。由一个磁光器件和两个偏振片组成。将起偏器与检偏器分别放置在磁光器件两边，令它们的偏振化方向成 45° 角，在磁光器件的线圈上加适当电信号，控制磁场大小恰好使入射线偏振光的偏振方向可沿顺时针方向或逆时针方向转 45° 。当光线沿某一方方向顺次通过起偏器和磁光器件后，偏振方向正好与检偏器方向一致而能通过，但它反方向返回时，由于磁光效应与光传播方向无关，会使检验偏器和磁光器件后，光偏振方向恰与起偏器方向垂直而无法通过。它常用于激光放大器的级间去耦，以提高储能水平，并防止自激。

激光全息技术

【全息术】记录物体所反射光波的强度与位相分布的全部信息的技术。将一束激光分为两束，其中一束直接照到感光干板上，称为参考波；另一束照明被摄物，反射后照到干板上，称为物体波。它的振幅反映物体的光强分布，位相反映物体的纵深厚度，它携带着被摄物的全部信息。两束光波在感光板上互相叠加，形成干涉条纹。经曝光、显影、定影处理后，得到的全息图记录下被摄物的强度与位相。再现时，用与参考光相同的激光照明全息图，图上的干涉条纹就犹如衍射光栅一样，对入射光起到衍射作用。衍射光波可以完全再现原来的物体波，对着它观察就可看到被摄物的虚像。全息摄影有三个特点：（1）看到的是三维物体像，立体感极强；（2）全息干板的任何一部分都记录下整个物体的信息，因

此当相片有缺损时，仅使观察角度受到限制而不损坏图像的完整性；(3) 一张全息感光板可多次曝光，记录多个不同的物体像，只要每次参考波照明角度不同即可。按记录时光源、被摄物、感光板位置的不同有同轴全息图与离轴全息图之分。按全息感光板上乳胶厚度的不同有平面全息图与体积全息图之分。按感光介质记录信息的方法的不同分位相全息图和振幅全息图。此外还有许多形形色色的特殊全息图如付里叶变换全息图、计算全息图、彩虹全息图、模压全息图等等。全息图不仅可做为供欣赏的艺术品，而且在全息干涉测量、质量检验、无损探伤、信息存储与显示、各种全息光学元件等领域内有广泛应用。

【同轴全息图】又称盖伯全息图。记录时将激光源、被摄物、全息感光板放在一条直线上所获得的一种全息图。这种全息图在摄制时不需要参考光波，被摄物放在光源与感光板之间，并且必须是一种高度透明的物体。是最早出现的一种全息图。再现时，除了可以看到与被摄物一样的虚像以外，还要受到与之孪生的实像的干扰以及来自光源的直接照明光干扰。

【离轴全息图】又称利思全息图。记录时激光源、被摄物、全息感光板不放在一条直线上所获得的一种全息图。被摄物可以不透明。再现时，避免了孪生实像与直接照明光的干扰，比起同轴全息图，像的质量大大提高。

【平面全息图】全息干板上感光乳胶的厚度比全息图上干涉条纹间距小得多的全息图。这种全息图再现时，对照明光波的方向要求较低，不必与参考波严格一致，衍射效率较低。

【体积全息图】全息干板上感光乳胶的厚度比全息图上干涉条纹间距大得多的全息图。这种全息图再现时，对照明光波的方向要求严格，只有满足布拉格衍射条件时才能再现物体的像。利用这种特性，记录时可改变参考波的方向做多次记录，再现时又不会相互混淆，大大增加介质的记录容量。此外，其衍射效率比较高。如果记录时，令由物体反射的物体波与参考波从感光乳胶层的两侧反向照明，可以实现白光再现单色像，像颜色取决于记录时所用激光的波长。

【振幅全息图】又称吸收全息图。感光介质以其透明程度不同的黑白线条的形式，来记录物体波与参考波干涉条纹的全息图。显影过程中，感光乳胶中还原出来的金属银随曝光量的不同而变，曝光量大处金属银粒多，透明率低，称为负片，反之称为正片。这种全息图再现时，对照明光波起振幅光栅的作用，由于对照明光有吸收作用，衍射效率较低。

【位相全息图】感光介质以其厚度或折射率的不同，来记录物体波与参考波干涉条纹的全息图。按制作方法的不同可分为二种：一种称浮雕型位相全息图，将普通振幅全息图放在鞣化漂白槽中，除去曝光部分的金属银，并使银粒周围的明胶因鞣化而膨胀，使得曝光量大处介质变厚，曝光量小处介质薄，就像浮雕；另一种称折射率型位相全息图，利用某些氧化剂，如铁氢化钾、氯化汞，将振幅全息图中的银粒氧化成透明的氧化银，它的折射率随银粒密度而变，使得曝光量大处介质折射率大，曝光量小处折射率小。全息图再现时相当于一个位相光栅，由于整个全息图是透明的，衍

射效率比振幅全息图高许多。

【计算全息图】由给定物体光波函数通过计算机运算求得干涉图形并描画出来的全息图。这种全息图能够再现出实际上并不存在的一个三维的景物，特别适用于设想中的各种立体模型。

【付里叶变换全息图】记录被摄物体的付里叶变换即空间频谱的全息图。利用凸透镜的付里叶变换性质，将透明的平面被摄物放在凸透镜前焦面上，把全息感光板放在后焦面上。用单色平行光照明被摄物，经过透镜后在感光板上被聚焦为一个很小的光点。这个光点就是被摄物的付里叶变换。另将照明光的一部分做为参考波直接照到感光板上，记录下参考光与物体的付里叶变换光点的干涉图样，即可得到付里叶变换全息图。再现时，把付里叶变换全息图放在凸透镜前焦面上，用同样的单色平行光照明，后焦面上可得原被摄物的像。由于物体的空间频谱的能量范围很小，付里叶变换全息图的几何尺寸也很小，它用于全息信息存储具有容量大、信息密度高等优点。

【像全息图】记录物体像的全息图。有两种制作方法，分别称为一步法与二步法。一步法是在物体与全息感光干板之间放一会聚透镜，使物体所成实像在干板前方附近，再按一般记录全息图的方法制作。二步法是先按一般方法记录物体的全息图，然后用记录时所用参考光的共轭光（由参考光束中各条光线的逆向光线所组成的光束）照明全息图，可得物体的共轭实像（与原物体的凹凸正好相反的实像），并以它做为物，再引入另一束参考光，记录全息图就为像全息图。这种全息图再现时对照明光源的方向要求不

严，因此用白光照明再现像时，可看到彩色像。

【彩虹全息图】又称线全息图。加窄缝记录的像全息图。可按像全息图的一步法与二步法两种方法制作。一步法中，将窄缝放在物体与透镜之间，使物体所成实像在感光干板的前方附近，而窄缝像在干板后方。二步法中，在第二步记录全息图时，将窄缝放在物全息图后边紧贴着它。彩虹全息图实际上记录了许多窄条状的全息图，每个窄条全息图都可再现一个完整的物体像。白光再现时，如果连续变化观察方向，看到的像的颜色也会连续地从红色变成紫色，象雨后天空中彩虹一样。这是由于眼睛在不同位置，相当于通过不同的窄缝去观察，而不同的窄缝对应于不同的光波长。

【模压全息图】采用模压工艺大量复制生产全息图的技术。生产过程分为三个阶段：（1）原版全息图的记录；（2）金属模板的铸造；（3）模压复制。原版全息图使用可以白光再现的彩虹全息图，并将它制成浮雕型位相全息图。然后在它上面镀银、镀镍，制成金属模板。用聚氯乙烯透明片做为模压材料，放在金属模板上加热加压。最后在浮雕面上镀一层铝，涂上压敏胶，贴上防粘纸就可制成反射式的模压全息图。它可以白光再现出彩色像，可以象印刷机一样批量生产，成本很低。广泛用于商品广告、商标、身份证、图书装帧、贺年卡等。

【夹层全息图】只有当编码全息图与解码全息图合在一起再现时，才可显示信息的全息图。被摄物为多个压电晶体片排成一个矩阵组成的模片，每个晶体片代表一个像元，加电压后，由于压电效应而使晶片产生形变，高度发生光波长数量级的变化。按照事先

设计好的图案，有选择地给某些晶片通电使之变形，记录下变形模片的全息图做为编码全息图。再记录不加电压，无变形模片的全息图做为解码全息图。分别再现两张全息图，只能看到模片像。由于压电晶片的形变极小，肉眼根本无法区别两张像。只有把两张全息图精确对位后再现，两个再现像发生干涉，才会使有形变与无形变的晶片所成像的明暗不同，显示出预先设计的图形。它具有相当高的可靠性与安全性，非常适用于防伪。

【全息干涉检测】利用全息术将待检测物体的物波面与标准物体的物波面进行干涉，从而检验物体质量或测量物体某一参数的技术。有三种方法：（1）一次曝光法。通过一次曝光将标准物体的物光波记录下来，然后再现，用它去和待检测物体的物光波进行比较，达到检测目的；（2）二次曝光法。用同一张全息干板两次曝光，记录两个不同时刻的物波面干涉图样，比较其差异。用这种方法可观测物体受应力而产生的形变或观察植物的生长情况；（3）连续曝光法。用于观测物体的振动情况，显示物体的振动模式。全息干涉检测具有以下优点：（1）可做立体干涉测量；（2）既适用于镜面反射体，又适用于漫反射体；（3）既适用于透明物体，也适用于不透明物体；（4）由于检验时与待检物不接触，可实现无损检验。

【全息显微术】利用全息术对微小物体进行全息放大的技术。如果记录时使用短波长的光如 X 射线（几个埃），再现时换用可见光（几千个埃），不须什么特殊的光学系统，就可以得到几千倍的放大率，实现全息放大。另外全息术的三维立体性可以弥补普通显微镜景深过小的缺点，适用于观察活动景物如游动的微生物或运

动的微粒场等。

【全息信息存储】利用全息术将文字、图表等资料照成全息图存储起来的技术。方法是先将待存储的文字或图表资料拍摄成普通的照象底片，然后将它做为被摄物，制作付里叶变换全息图。由于付里叶变换图的范围很小，这种信息存储方法具有大容量、高存储密度等优点。如在一块 10×10 平方厘米的全息干板上可记录约 2000 页文字资料。

【全息透镜】又称全息波带片。记录两个不同曲率球面光波叠加形成的干涉图样所制成的全息图。它实际上是一组黑白相间的同心圆环。制作时将扩束准直的激光分为两束，分别用不同会聚透镜聚焦后照射全息感光板，也可以只聚一束。要使两球面波的球心连线与干板平面垂直。其焦距取决于二球面波球心到全息干板的距离。与普通光学透镜的不同处有：（1）由于它对入射光有多级衍射，故有多个焦点，一个物体可成多个像；（2）衍射光有正、负级之分，使它既可起凸透镜作用，也可当凹透镜；（3）因不同波长光的衍射角不同，使得焦距随波长而变。用白光照明时，成像具有严重色差。但是它便于制作和复制，成本低，重量轻，相对孔径大，可与普通透镜相互补充，用于成像、付里叶变换、光束的扩束准直等。

【全息光栅】记录两个平面光波叠加而形成的干涉图样，所制作的全息图。把激光扩束准直，用分束器分成两束，并令两束光从适当的夹角照到全息感光干板上，曝光显影后，可得到黑白相间的直线条纹。用它代替传统的刻划光栅，可做为一种色散元件。由

于它的光透过率函数是余弦函数，透射光除零级以外，只有正、负各一级衍射光。比起刻划光栅，它具有更短的光栅周期，而且没有周期误差。因此用它做光谱分析，不会产生鬼线，分辨率更高。此外，它制作方便，对环境条件的要求远没刻划光栅那样苛刻。

光学信号处理技术

【光学信号处理】用光学方法变换或处理输入信息的技术。按照输入信息形式的不同，分成两大类：一类输入信息是光信号，如记录在感光胶片上的透明图像，称这种处理为光学图像处理。在这类处理中，按所用光源的不同，又分成相干光信号处理、非相干光信号处理和白光信号处理三种。另一类输入信息不是光信号，可以是电信号或声信号等。这时须要先用声光器件或电光器件将电信号转换成光信号，再输入光学系统内处理，最后用光电二极管或 CCD 等光电探测器件把光信号还原成电信号。这类处理称声光信号处理或光电信号处理。在处理输入信息为光信号的图像处理中，除光学图象处理以外，还有用电学方法或计算机方法处理的数字图像处理。这两种图像处理比较互有优缺点。光学处理为并行处理，用平行光照明，记录在输入透明片上的所有数据点可以同时输入到系统内进行处理。处理时间实际上等于光通过系统所用时间，因此处理的速度极快，可实现实时处理。它的结构简单、操作方便、容量大。缺点是缺少灵活性，运算精度不高。数字处

理为串行逐点处理,它是通过对图像扫描产生时间序列的信号,经抽样变成数字信号后,由计算机进行处理。因此它的运算速度慢,无法实时处理,系统结构复杂。优点是灵活性高,有编程、控制、分析、判断的能力,运算精度高。为了互相弥补,二种处理方法可以结合在一起做混合处理。

【相干光信号处理】用相干性能好的激光做光源,对输入光信号进行处理的光学图像处理技术。典型光路为 $4f$ 系统,包括两个焦距为 f 的付里叶变换透镜(即凸透镜),将第一个透镜的后焦面与第二个透镜的前焦面重合,把待处理图像做为物体,放在第一个透镜的前焦面上,称此面为输入面或物面。用扩束准直的激光沿系统光轴照射物面,则在二焦面重合的面上得到物体的空间频谱,称此面为频谱面。而在第二个透镜后焦面上得到物体的像,称此面为输出面或像面。整个系统从输入面到输出面的长度正好是 $4f$ 。利用这个系统所进行的相干光信号处理包括相干空间滤波、光学相关、光学频谱分析等。这种处理方法因有确定的频谱面而可以方便地进行各种空间滤波,它信息容量大、运算速度快。缺点是容易在输出面上产生激光散斑,对光学元件上的缺陷比较敏感。这些都会影响输出图像的质量。

【相干空间滤波器】按预定目的对待处理图像的空间频谱加以改变的装置。将它放在相干光信号处理 $4f$ 系统的频谱面上。它对入射光的透过率函数称滤波函数,是个复函数,有振幅函数和位相函数两部分。按滤波函数特点可将滤波器分成三类。第一类振幅函数不为常数,位相函数是常数,它只改变图像频谱的振幅,称振幅空间滤波器。第二类位相函数不是常数,振幅函数是常数,它

只改变图像频谱的位相，称位相空间滤波器。第三类振幅与位相函数都不是常数，它同时改变图像频谱的振幅与位相分布，称复空间滤波器。

【振幅空间滤波器】滤波函数中的振幅分布函数不是常数，可改变图像频谱的振幅分布的空间滤波器。它实际上是一个厚度均匀，透过率不均匀的膜片。常用的制作方法有：（1）先画制滤波器图案，然后照像；（2）在透明玻璃基片上控制镀不透光的金属膜；（3）制作全息图。按照滤波函数形式和作用的不同可分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、方向滤波器、光栅滤波器等。它们用于图像质量的改善，信噪比的提高，图像的加减、微分运算。

【低通滤波器】只允许图像频谱中的低频分量通过，将高频分量挡掉的振幅空间滤波器。图像频谱面上中心处为零频，越往外频率越高。因此要想滤掉高频分量，滤波器的图形应是中心为半径适当的透明圆孔，其余地方不透明，用它可以消除经传真系统传送的图像常出现的周期性网格。因为这种周期性网格的空频往往是比较高的。

【高通滤波器】只允许图像频谱中的高频分量通过，将低频分量挡掉的振幅空间滤波器。它的图形与低通滤波器正好相反，中心处为半径适当的不透明圆屏，其余地方全都透明。它可以起到加大图像反差，增强轮廓线的作用。因为一个图像的透过率锐变区域即图像的边缘或称轮廓线往往包含较多的高频成分。

【带通滤波器】只允许某一频率附近的频率分量通过，将其他频率

分量全都滤掉的振幅空间滤波器。它的图形是中心对称的具有一定宽度的透明圆环，其余地方全都不透明。这样，频谱面上靠近中心处的低频分量以及远离中心处的高频分量都被滤掉，只有中间的某一频率分量通过。它适用于有用信号的频谱集中在某一频率附近频带范围内，无用噪声的频谱分散在各频率范围内的图像处理。由于它能有效抑制噪声，而不影响有用信号，因而能大大地提高信噪比。

【方向滤波器】只允许频谱面上沿某一个特定方向上的频率分量通过或不通过的振幅空间滤波器。其图形为沿某一特定方向为透明的狭缝，其余地方都不透明。或者反过来，沿特定方向为不透明窄光屏，其余地方全都透明。利用这种滤波器可以抑制或者突出具有某一特征的图像。如用竖直方向的不透明窄条光屏可以去掉地震仪所记录的地震波曲线中的正常水平信号，突出异常信号也就是地震信号。这是由于水平线图像的频谱集中在频谱面竖直轴附近。又如用十字形不透明光屏可以检验集成电路掩膜的疵病，这是因为集成电路图形是由规则的相互垂直的矩形线段组成，它的频谱分布在频谱面上的水平与竖直轴附近。

【光栅滤波器】用做振幅空间滤波器的一维余弦型光栅。它的透过率函数分布沿某一个方向为余弦函数，制作方法与全息光栅相同。用它可以实现图像的加、减运算。将待运算的两个图像不重叠地放在 $4f$ 系统的输入面上，光栅放在频谱面上。由于余弦型光栅对入射光可以产生零级光和正、负各一级衍射光，物面上的两个图像分别在输出像面上形成三个像，其中两物体各有一个像重叠在像面中心处。控制光栅的位置，可以实现这两个图像的相加或相

减。两个图像的相加突出了它们共同的结构，两个图像的相减可提取它们的差异。这在军事、医学上很有意义，如不同时间拍摄的两张病理照片相减后，可直观地发现病情。两张地形照片相减后，可发现新增添的工程设施。

【复合光栅滤波器】做为振幅空间滤波器的二个频率稍有差别的一维余弦型光栅。制作方法是在同一块全息干板上先后两次拍摄频率稍有差别的全息光栅。它可用来对图像进行微分运算，达到突出图像的边缘轮廓和细节的目的。

【位相空间滤波器】滤波函数中的位相分布函数不是常数，可以改变图像频谱的位相分布的空间滤波器。它实际上是一个厚度不均匀的全透明膜片。一个成功的典型例子是相衬滤波器，它是在一块透明玻璃基片的中央镀上一个具有适当厚度、半径很小的圆形透明膜，可以用来观察透明物体。透明物体不同部分的厚度或折射率不同，肉眼无法分辨这种位相结构。把物体放在 $4f$ 系统输入面上，相衬滤波器放在频谱面上，并且令中央的透明膜对准中心的零频分量。如果膜厚正好使零频分量的位相比其他分量多延迟 $\frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3}{2}\pi$ ，就可以将物面的位相分布结构变成强度分布结构，在像面处可以分辨出透明物体的不同部分。

【复空间滤波器】滤波函数的振幅与位相的分布函数全都不是常数，因而可同时改变图像频谱中振幅和位相分布的空间滤波器。由于滤波函数本身为复函数，制作比较复杂。一般采用制全息图的办法。两个成功的例子是用匹配滤波器进行图像识别，用逆滤波

器进行图像的消模糊处理。

【匹配滤波器】用于图像识别，即检验和判断图像中是否包含某一特定信息的复空间滤波器。它的滤波函数等于待检的这一特定信息频谱函数的复共轭。制作方法是对这个信息图像制作付里叶变换全息图。将它放在频谱面上，把待识别的图像放在输入物面上。如果图像中含有要识别的信息，则这个信息的频谱正好与匹配滤波器吻合，在输出面上可以观察到一个亮点。这一技术可用来在大量指纹档案中查出罪犯指纹，在病理照片中识别出癌细胞，在侦察照片中检查出特定的军事目标等。

【逆滤波器】用于消模糊，使模糊图像变清晰的复空间滤波器。造成图像模糊的原因有成像系统的像差，对焦不准，大气扰动和目标活动等。这是成像过程中的系统传递函数不完善所致。为了补偿修正这个传递函数，可以在相干滤波系统频谱面上加一个滤波函数等于这个传递函数的倒数的逆滤波器，使得处理后总传递函数等于 1，在输出面上得到物面上的模糊像的清晰像。

【光学频谱分析器】分析二维图像的空间频谱的装置。把待分析图像放在付里叶变换透镜（即凸透镜）的前焦面上，用扩束准直的激光照明，在透镜后焦面上就可以观察到它的空间频谱。这也是一个二维的图样，其中零频分量在中心处，离中心越远，频率越高。频谱面上每一确定点都对应某一确定的频率。通过分析频谱图样光强分布就可以得知图像不同频率成分所占的比例。利用频谱分析可以研究和判断某个目标照片的性质，如分析卫星拍摄的地面照片，可判断哪些地区是城市、哪些地区是山岭、哪些地区

是沙漠等。判断准确速度快，可实现实时处理。

【光学相关器】利用相干信号处理系统求两个光学信号的相关函数的装置。以空间坐标做为自变量的相关函数，是令参加运算的两个函数相对运动，求它们的图形互相重叠的面积随相对位移量而变化的关系。它可以反映两个图形之间的相似程度。相似性越高，相关函数的峰值就越大。实现光学相关的办法有许多，典型方法有两种：一种是把两个待相关图像一起放在付里叶变换透镜前焦面，用扩束准直的激光照射，透镜后焦点处放光电二极管检测。当两图像沿垂直于光轴某方向上相对移动时，光电二极管输出电压随位移量变化的关系便为这两个图像沿此方向的一维相关函数。另一方法是先分别制作待相关两图像的付里叶变换图，将它们一起放在透镜前焦面上，用扩束准直的激光照射，后焦面上立即可得到二维的相关函数。

【非相干光信号处理】用准单色的扩展光源做光源，对光信号进行处理的技术。在非相干处理系统的光瞳面上，放置一块掩模板，改变光瞳函数，就可以进行非相干空间滤波。如做消除像差、改善成像质量、进行特征识别和做积分、相关等运算。这种处理方法不存在激光散斑的问题，对光学元件的缺陷也不敏感，它可以大大削弱噪声的影响。但是，它无确定的频谱面，滤波操作不如相干处理系统方便，有许多滤波操作无法做。另外，它处理信息的容量也不如相干系统。

【白光信号处理】用宽频带的白色点光源做为光源，对光信号进行处理的技术。处理系统也采用 $4f$ 系统，只是在输入物面后紧贴着

放一个光栅，此光栅对入射光除零级光外，还产生正、负若干级衍射光。其中零级光方向不变，也无色散作用。频谱面中心处得到的是各波长光照明下物面的频谱光斑，仍为白色。在与光栅缝垂直的方向上，正、负衍射光形成的是一串频谱光斑，因色散作用都被拉长为一彩虹条。这使得频谱面上的滤波操作更加灵活多样，可供选择的滤波参数除了振幅和位相以外，又增加了波长和衍射级次。这种处理的最重要的应用是假彩色编码，即使可以使输入的黑白图像，输出时带有彩色。

【假彩色编码】将黑白输入图像变成彩色输出图像的技术。它实质上就是把原图像的光强调制改变成光波长调制。编码方法有等空间频率编码、等密度编码、空间编码等。由于人眼对黑白图像中的灰度变化层次不敏感，对颜色变化很敏感。所以使用这种技术，对遥感照片、医学照片的判读与分析都具有重要意义。

【等空间频率假彩色编码】使黑白图像中不同空间频率处具有不同颜色的假彩色编码技术。在输入的黑白物面后放一个光栅，频谱面上与光栅缝垂直的方向上可得到一串物面图像的频谱光斑。中间由零级光形成的频谱光斑为白色，其他为彩虹条。用加有滤色片的狭缝做为滤波器，使不同空频相应于不同颜色的频谱分量通过，如低空频令蓝色通过，高空频令红色通过。这样，在输出面上得到一个彩色图像，凡是低空频处被染上蓝色，高空频处则被染上红色。

【等密度假彩色编码】使黑白图像中不同密度处具有不同颜色的假彩色编码技术。将黑白图像放在输入面，后边紧接着放一个光栅。

频谱面上得到一串呈彩虹颜色的图像频谱光斑。用两个不同颜色的滤色片狭缝分别让这两种颜色的频谱分量通过。并在其中某一种颜色滤色片后加 π 位相滤波器,使这个颜色的频谱产生 π 位相延迟,得到对比反转的负像。当不同颜色的一正一负两个图像叠加在一起,就可以使原图像的不同密度带上不同的颜色。

【空间假彩色编码】又称 θ 调制。使黑白图形的不同区域带上不同颜色的假彩色编码技术。将待处理图形放在输入面上,在图形不同区域后放不同方向的光栅。这样在频谱面上的不同方向上,可以得到相应图形的一串彩虹颜色的频谱光斑。如果不同方向上使用不同颜色的滤色狭缝,使不同的频谱分量通过。在输出面上将看到图像上不同区域染上了不同的颜色。

【声光信号处理】利用声光器件,用光学方法处理电信号的一种光信号处理技术。声光器件可以很方便地将电信号转变为光信号,然后送入相干光信号处理系统中进行处理,最后再使用光电转换器件如光电二极管把光信号还原为电信号。如声光频谱分析和声光相关,它们都在军事上具有重要意义。

【声光频谱分析器】使用声光器件,用光学方法分析电信号的时间频谱的装置。将待分析的电信号加到声光器件上,而声光器件则放在付里叶变换透镜的前焦面上。用扩束准直的激光照射器件。通过声光衍射,不同频率的电信号使光产生不同方向的衍射,衍射光强正比于电信号中相应频率分量的强度。在透镜后焦面上形成一排明暗不同的衍射光点,不同位置对应于不同的电信号频率。用光电二极管阵列检测不同位置的衍射光点强度,就可以得知电信

号中不同频率分量的强弱。这种频谱分析器结构简单、运算速度快。尤其是它能实时分析，用于电子对抗，能迅速分析出敌方雷达发射机或雷达干扰机所发出信号的频谱。

【声光相关器】使用声光器件，用光学方法计算两个电信号的相关函数的装置。所用声光器件是在一块声光晶体的两个相对晶面上分别粘贴二个换能器。把待相关的两个电信号分别加到两个换能器上，晶体中会激发出两列沿相反方向传播的超声波。把器件放在付里叶变换透镜前焦面上，用扩束准直激光照射器件，后焦点上用光电二极管检测，就可以获得相关函数了。这种相关器结构简单，运算速度快。可以实时运算。用它做为雷达接收机，将目标反射的混有干扰噪声的回波信号和雷达发射机所发射的参考信号进行相关，可以大大提高回波信号的信噪比，甚至能将已被干扰淹没的雷达信号检测出来。

【激光散斑】用激光照射透明或不透明物体的粗糙表面，在物体前方或后方附近观察屏上所产生的无规则分布亮暗斑纹。该现象的产生是由于受照粗糙面上每一点子波源所发出的散射波在观察屏上相干叠加的结果。因散射光方向杂乱无章，故观察屏上的明暗分布也是完全随机的。在进行相干光图像处理时，若激光散斑出现在输出图像上，会降低像质。但散斑照像的技术也可用在某些物体的微小形变或位移的测量以及某些图像的空间滤波上，成为光信号处理中的一个分支。

【激光散斑照像测量】通过对激光散斑的照像，来测量物体的微小位移或形变的技术。用激光照明待测粗糙物体，对它形成的散斑

图做第一次曝光，物体发生形变或有微小的位移后，再对它的散斑图用同一底片做第二次曝光。将二次曝光后的底片经显影、定影处理，所得图像是同一个散斑图错位叠加的结果，实际上是一些成对的小颗粒的随机分布。然后将它放在凸透镜前焦面上，用单色平行光照明，在透镜后焦面上可观察到类似杨氏双缝的干涉条纹。它们是均匀分布、明暗相间的平行直条纹，条纹方向与物体位移或形变的方向垂直。测量两个相邻干涉条纹的间距，可推算出物体的位移量或形变量。除两次曝光法以外，还有多次曝光法、连续曝光法等，原理基本类似。此技术可用于研究焊接裂缝的形变、测量大型钢压力容器伤纹周围发生的畸变等。

【激光散斑调制图像处理】先用激光散斑图调制待处理图像，然后再对它进行空间滤波的技术。在使用相干光处理系统对图像进行空间滤波时，因图像频谱往往集中在谱面上很小的空间区域内，使滤波器的制作及使用有很大困难。如果用激光散斑对图像进行调制，则因散斑具有很细的颗粒结构，包含很高的空间频率，将使待处理图像的频谱在谱面上扩展成较大的空间区域，使滤波操作便于进行。具体方法可用平行激光照射透明的毛玻璃，把待处理图像和感光板放在玻璃后边，这样照成的像便是经散斑调制后的图像，然后再对它进行处理。只要选用合适的毛玻璃，使散斑图的颗粒结构细到一定程度，不会影响图像的清晰度。

光学计算技术

【光计算技术】利用光波做为工具完成各类数字运算、模拟运算、或逻辑运算的技术。与传统的电子计算技术相比，它具有如下优点：（1）具有并行传输和处理信息的能力，因光波的干涉条件相当苛刻，使得在同一光波导内可以同时传输很多个不同波长、不同偏振态、不同位相的光波，它们之间不会发生相互干扰，还可以将一个光器件设计成具有几个不同性能的功能器件，使之有并行处理不同信息的能力；（2）运算速度快，这是因为光在光波导中的传播速度接近光速，不存在通常电子计算机中因电路的寄生电容与寄生电阻而影响电信号传输速度的问题；（3）可以采用非二进制，光器件可以实现多稳元件，使用非二进制表示某个数时，所需的位数少于二进制，这样就可以提高计算机的运算速度；（4）使用光盘做计算机的外存贮器，其信息容量高于传统的磁盘约百倍；（5）抗外界电磁干扰的能力强，这是由于电磁干扰的频率远低于光频的缘故。光计算有光学模拟计算与光学数字计算两大类。

【光学模拟计算】输入的计算量与输出的计算结果都为连续信号的光计算。实现该类计算的光学系统称光学模拟系统。它的输入、输出函数一般采用二维的图像光场透过率函数。可以实现的光学模拟计算有图像加减、图像相乘、光学付里叶变换、光学相关、图

像微分等。光学模拟运算最大优点是速度极快，但精度差。

【图像加减运算】使用光学模拟系统获得两个图像之和或之差的运算过程。实现方法有两种：一种方法是使用马赫——曾德尔干涉仪，它将单色平行光分成两束，分别照明两个输入图像。通过凸透镜将两个图的像一起成在输出面上。调节某一光路上的补偿板方位，可控制输出面上两个图像所成像的位相差。当位相差等于 π 的偶数倍时，可以实现相加运算；当位相差等于 π 的奇数倍时，可实现相减运算。另一种方法是使用光栅滤波器对输入的两个图像进行加减运算。参见“光信号处理技术”中的“光栅滤波器”。

【图像乘法运算】使用光学模拟系统获得两个图像的乘积的运算过程。是光学模拟计算中最简单的一种运算。将待相乘的两个图像透明片重叠在一起放在凸透镜前方二倍焦距处做为物，用单色平行光照明，在透镜后方二倍焦距处便可得到与物等大小的像，即相乘的结果。

【光学付里叶变换】使用付里叶变换透镜获得输入图像的二维付里叶变换的运算过程。实际上就是输入图像的空间频谱。只要将输入图像放在凸透镜前方一倍焦距处，用单色平行光照明，在透镜后方一倍焦距处就得到输入图像的付里叶频谱。该系统也可称光学频谱分析器。参见“光信号处理技术”中的“光学频谱分析器”。

【图像相关运算】利用光学模拟系统获得两图像的相关函数的运算过程。该光学系统又称光学相关器。参见光信号处理技术中的

“光学相关器”。

【图像微分运算】使用复合光栅滤波器对图像进行空间滤波，完成微分运算的过程。参见光信号处理技术中的“复合光栅滤波器”。

【光学数字计算】输入的计算量和输出的计算结果都为离散数字的光学计算。有程序控制和非程序控制两类。程度控制的光学数字计算实际上就是光计算机。非程序控制的光学数字计算一个非常典型的实例是光学矩阵运算系统。

【程序控制式光计算机】用程序操纵整个计算过程的光计算机。有三部分：（1）用来接收、存贮、传送原始数据、中间结果及最后结果的存贮器，有内存与外存两种；（2）用来执行运算的运算器，有数字运算及逻辑运算两种；（3）用来控制计算过程的控制器。光计算机与传统电子计算机的基本结构相类似，实现光计算的基本关键器件主要是光学双稳逻辑器件和作为外存的光盘。

【光学双稳态逻辑器件】输入光通过介质时，由于介质的非线性光学效应，能够存在两个可以互相转换的稳定输出光强状态的装置。是光计算机中的基本器件，具有正反馈的非线性效果。按反馈方式的不同可分为纯光型和光电混合型两类。纯光型是利用光强的正反馈来获得双稳的，光电混合型是利用介质的电光、声光效应而实现双稳的。用光学双稳器件可以做成“与”门、“或”门、“非”门等各种逻辑门。

【纯光型光学双稳态逻辑器件】利用光强正反馈而实现光学双稳态

的装置。实现光强正反馈的方法是在非线性晶体两端放两个平行的反射镜，即法布里—珀罗标准具。按照非线性晶体与光波作用的机理不同，可分为色散型和吸收型两种。其中色散型介质的折射率具有非线性，它不是常数，而是光强的一次函数。如铋化镉、砷化镉和碲镉汞是常用的色散型器件晶体。吸收型介质的吸收系数具有非线性，当光强大到一定程度时，吸收系数会减小，使吸收作用达到饱和。如砷化镓、砷铝镓等是常用的吸收型器件晶体。

【光电混合型光学双稳态逻辑器件】利用具有声光、电光效应的晶体做为非线性介质而制成的光学双稳态器件。晶体的声光、电光效应可使它的折射率产生非线性效应，其折射率变化量与光强成正比。正反馈是由输出光强经光电转换变成电信号后，加到声光晶体的换能器上或电光晶体的电极上。用于光学双稳器件的声光、电光器件可以是体波器件或表面波器件。

【激光光盘】利用激光作为记录及读取信息的工具的存储器。外形类似唱片，其存贮信息的容量比传统的磁盘高出几百倍。它是通过沿圆盘的螺旋线轨迹上大量的记录斑来贮存信息的。每个记录斑的面积只有 1 平方微米，光斑间的距离也只有约 1.3 微米，轨迹线间的间隔距离约 1.6 微米。如此高密度的记录斑使光盘具有相当大容量的存贮能力。光盘记录的信息或数据采用二进制编码，记录斑上的记录介质两种不同的状态分别代表“0”和“1”。读取信息时，激光沿记录轨迹扫描照到记录斑上，反射光的强度或偏振态随记录介质的不同状态而变，读出信息。按照记录介质所记录的信息是否可以消除有不可擦除光盘和可擦除光盘两类。前者一次写入后，信息便永久保留下来，是只读存贮器。后者可将存

入的信息消除，重新记录，是读写存贮器。

【不可擦除激光光盘】存入的信息不能擦除，可永久保留的激光光盘存储器。由基体、记录介质、铝反射膜和保护层组成。基体是高精度、高透过率的平板光学玻璃或光学塑料。记录或读取信息时，激光束都是透过基底照射到记录介质上的。记录时，激光束强度有强、弱两种状态，分别代表“1”和“0”。经显微物镜聚焦后照射到记录介质上，使介质的透明度或反射率发生相应变化，形成记录斑。记录介质有两种，一种是感光胶，强光照射时，感光胶受照区曝光量大，透射率便高。反之，弱光照射，受照区曝光量小，透射率低。另一种是热效应薄膜，有金属薄膜或有机薄膜，如铋、碲、锗的氧化物。它们具有低熔点，低导热率和高光能吸收率等特点。强光照射时，可在被照区域上烧出一个小孔使该区透射率高。弱光照射时，无法烧出小孔而使受照区透射率低。在记录介质的后面镀上一层高反射率的金属铝膜，读取信息时，透射率高的记录斑反射光较强而透射率低的记录斑反射的光较弱。由于记录时形成的记录斑无法消除，故此类光盘上的信息可永久保留。它可以做为光卡，如医院的病历卡、个人微机中需要永久保留的数据存贮器、图书资料的存贮器等。其存储量非常之大，如在一张 300 毫米的双面光盘中可以存放 A4 幅面的图书资料近 6 万余页。此外，它还可以做激光唱片、激光视频机等。

【可擦除激光光盘】存入的信息可以擦除，写读反复进行的激光光盘存储器。所用记录介质有相变型与热磁反转型等。相变型记录介质主要有碲基介质、银锌介质及氧化钒等。这些介质在室温下有两个稳定态：晶态与非晶态。晶态颗粒大、透过率高、反射率

低，非晶态颗粒小、透射率低、反射率高。记录前，整个介质呈晶态，当强光照射时，受照区受热升温又骤然冷却，导致大直径的晶粒淬裂成小直径的晶粒，由晶态变成非晶态。而弱光照射时，晶态不变，从而将信息记录下来。擦除时，用低功率、宽脉冲激光沿记录轨迹线扫描，使记录介质渐渐升温并慢慢冷却，可使介质又恢复成晶态。热磁反转型记录介质主要是非晶稀土过渡金属合金，如钐铽钴合金、铽铁合金、钐钴合金等。这些材料具有热磁反转效应。记录时用一束光强不变的激光照射，使材料的温度升至居里点，便于材料磁化方向的转变。记录“0”或“1”时，加不同方向的外磁场，使介质记录斑形成不同的磁化方向。读取时，用线偏振激光沿记录轨迹扫描，因“0”与“1”态的磁化方向不同，反射光偏振方向也不同，经检偏器检出的光强也不同。擦除时，加某一个方向的外磁场，同时用激光照射，可统一全部记录斑的磁化方向而消除信息。因这种光盘的写与读可反复使用，故它最适合做光计算机的外存储器，存贮容量是电子计算机外存磁盘的上百倍。

【激光光盘系统】读取存在激光光盘内信息的装置。由光源、读出光学头、调焦系统与轨迹自动跟踪系统组成。通常使用体积很小的半导体激光器做为光源，由于光盘上的记录斑尺寸很小、密度极高，要求读出光学头的激光必须用高质量的显微物镜将激光聚焦成极小的光斑。光盘工作时处于旋转状态，盘面存在跳动，这会导致聚焦光斑与记录斑不重合。因此必须有自动调焦系统，上下移动显微物镜，消除这种离焦现象。另外，由于光盘上的记录斑轨迹线很密，如果读出光学头偏离了轨迹线，就会出现误读。因此还须有一个轨迹跟踪机构，使光学头沿轨迹线行进。

【光学矩阵运算系统】利用光学系统完成矩阵与矢量、矩阵与矩阵乘法运算的光学数字运算系统。它是一种非程序控制的光学数字运算。有两种光学矩阵运算系统，一种是将参加运算的矩阵各元素数据用二进制数表示，并制成掩膜，称掩膜光学矩阵运算系统，可完成矩阵与矢量的乘法运算。另一种是使用声光器件或电光器件，将参加运算的矩阵各元素数据用二进制编码，通过将脉冲调制的高频电信号送入器件，进行光计算，称声光或电光光学矩阵运算系统。它可完成矢量与矩阵、矩阵与矩阵以及数与数的乘法。

【掩膜光学矩阵运算系统】将矩阵各元素数据用二进制数码表示，并制成掩膜进行光学矩阵运算的系统。它主要用于矩阵与矢量的乘法。掩膜是一块透光率各处不等的二维透光板，不透明处代表“0”，透明处代表“1”。用发光二极管阵列做为光源，它受矢量各元素数据的二进制编码的调制，发光处代表“1”，不发光处代表“0”。发光二极管阵列所发出的光经透镜的扩束照射整个掩膜板，完成相乘运算。从掩膜板输出的光通过透镜的会聚作用，用光电二极管阵列接收，完成相加运算。这种运算系统的优点是所有元素的乘法与加法运算都是同时并行地进行的，几乎不存在运算操作时间，仅需光的传播时间及光电二极管的响应时间。运算速度之快是任何电子计算机所无法相比的。但由于掩膜板不能随意更改数据，它只能用于解决某一类特定计算问题，因此灵活性很差。

【声光光学矩阵运算系统】将矩阵各元素数据用二进制编码后加到声光器件上进行光学矩阵运算的系统。可用来完成数与数相乘、矢量与矩阵相乘、矩阵与矩阵相乘、矢量与矢量相乘等多种运算。光

路系统既可以用发光二极管或其阵列做为一个数据输入器件、声光器件做为另一个数据输入器件，也可以分别用两个声光器件做为两个数据输入器件。声光器件可以是一维或二维，也可以是单通道或多通道。光电接收可用单个光电二极管，也可用光电二极管阵列或者线阵、面阵的电荷耦合器件（CCD）等。依照完成运算的是数、矢量还是矩阵，光路系统也各有不同。数据输入的时间先后次序必须严格控制，有脉动式输入和啮合式输入等。该系统各元素乘与加的运算不是同时并行进行的，因此运算时间比掩膜系统慢些，但它的灵活性大大提高。

光波导技术

【光波导】用来传输激光的封闭通道。它可以避免激光在大气中传输时所受到的吸收、散射、湍流等影响，并且可以随意地控制激光沿确定的方向传输。按其几何形状来分，有平面波导和圆柱波导两类。平面波导指封闭通道的形状象是一个平板状，如介质薄膜波导，主要用于集成光路中。圆柱波导指封闭通道的形状为圆柱体，如空腔圆柱波导、透镜波导、光纤波导等，它主要用于激光通信。

【平面薄膜波导】由三层平面薄膜介质组成的光波导。中间一层介质膜的折射率最大，为光传播的通道，称为波导膜。下层为衬底，

上层为覆盖层，可以用空气做覆盖层。衬底与覆盖层折射率相等的为对称型波导，不相等的为非对称型波导。波导膜折射率分布有跃变分布和渐变分布二类，跃变分布指波导膜折射率均匀不变，在膜的上下两个界面处折射率是跃变。光线在波导膜中传播时，只要在上下界面处入射角大于临界角，就会全反射。光线将被限制在波导膜内以锯齿线形状向前传播。渐变分布是指波导膜折射率从中间分别向上下逐渐减小，光线在波导膜中传播时，由于连续折射作用也可将光线限制在波导膜内以正弦线形状向前传播。平面薄膜波导主要用于集成光路中的光通道。

【圆柱空腔波导】内壁涂有高反射率涂层的中空圆柱形管子。光线在管内经管壁来回反射，沿曲折路径前进。它限制激光线只能在管内传播，避免了在大气中传播时所受的散射、吸收、大气湍流等影响。这种波导结构简单，反射损耗也不大，但会使激光束发散。

【透镜波导】在光传输的管道里周期性安装一些会聚透镜，以聚焦光束、减小发散的光波导。这虽然克服了空腔波导会使激光束发散的缺点，但无法克服由于振动、透镜不稳定所造成的影响。而且透镜的存在必定对光能量产生散射、吸收等损失。

【光纤波导】折射率按圆柱对称分布的介质光波导。它克服了圆柱空腔波导与透镜波导的缺点，可以很好地控制激光在它内部传播，不会发散也不怕振动。它的频带宽、传输容量大，光损耗小，连续两次放大的中继距离长。由于使用来源丰富的石英砂做主要原料，成本低、重量轻、截面尺寸小、铺设方便。并且抗电磁干扰

的能力强、保密性能好。成为激光通信中的主要传输工具。按照折射率分布规律的不同，主要有阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤两种。

【阶跃折射率光纤】又称包层光纤。折射率分布沿轴向均匀，在横截面上为台阶状的光纤波导。由高折射率的纤芯与外面的低折射率包层两部分组成，在纤芯与包层交界处折射率的变化是阶跃式的。光线进入纤芯以后，只要在界面处的光线入射角大于临界角，就会被全反射回来。它限制光线在纤芯内成锯齿形路径向前传输。这种光纤拉制工艺很简单，但由于对光束无聚焦作用，传输带宽不如折射率渐变型的光纤。

【渐变折射率光纤】又称自聚焦光纤。折射率分布沿轴向均匀，在横截面上为抛物线状曲线的光纤波导。只有纤芯，没有包层。纤芯轴线上折射率最大，沿横截面半径向外，折射率以平方律减小，到纤芯边缘处达到最小。光线进入纤芯后，如果其方向沿轴线，则直线传播；如果其方向与轴线有夹角，由于连续折射的作用，它会自动地又向轴线处折返，形成正弦曲线形路径向前传播。一束发散的激光束进入光纤后，每隔一段距离，被自动地聚在一起，称为自聚焦作用。因此这种光纤具有比折射率阶跃型的光纤具有更大的传输带宽，每根光纤的传输容量也就更大，但它的拉制工艺较复杂。

【光束耦合器】将激光引入到平面薄膜波导中或从波导中引出的装置。按照激光输入光波导的方向不同分为两类：横向耦合器和纵向耦合器。横向耦合器又称直接耦合器或对接耦合器，是利用透

镜直接将激光束聚焦在光波导敞开的横断面上而进入波导层。由于波导膜厚度只有几个微米，故它对透镜的调节精度的要求极为严格，这使得它的应用受到限制。纵向耦合器则是将光线从波导膜的上面斜入射到波导膜内，具体的方法有棱镜耦合器、光栅耦合器、尖劈耦合器。

【棱镜耦合器】用折射率大于波导膜的直角棱镜将激光引入或引出平面薄膜波导的装置。将直角棱镜放在复盖层为空气的波导膜上方，令其中一条直角边与波导膜平行，二者之间留有很窄的空气。光由棱镜斜边入射，调节入射角与空气隙的宽度，可使入射激光耦合进波导或耦合出波导。它的耦合效率较高，但选择高折射率棱镜材料以及空气隙宽度的调节都有一定困难。为了提高耦合器的工作稳定度，可以用适当的粘合材料将棱镜与波导膜粘合起来。

【光栅耦合器】用光栅将激光引入或引出平面薄膜波导的装置。将光栅放在覆盖层为空气的平面薄膜波导层上边，当入射光以某一特定角入射到光栅时，它的衍射光可进入波导膜内。这种耦合器对入射光的入射角度十分敏感，可以提高耦合效率，但要求激光的准直度也很高。对于发散角较大的半导体激光器来说，耦合较困难。为了使耦合器的工作更可靠，可以直接在波导膜上边制作光栅。在波导膜上涂有光致抗蚀剂，用两束相干激光照明，对干涉条纹进行曝光、显影处理即可。

【尖劈耦合器】将波导膜的出口或入口做成厚度逐渐变化的尖劈状，实现激光引入或引出平面薄膜波导的装置。光线以锯齿形在平面薄膜波导内从等厚区进入尖劈区后，由于膜厚越来越小，使

光线在膜的上下界面处的入射角越来越小。当入射角小于临界角后就无法全反射而离开波导膜。尖劈耦合器引出的激光束是由许多发射方向不同的光线组成,因此出射光有较大的发散角。用它做输入耦合器用时,入射光也应具有较大的发散角。因此这种耦合器适用于具有较大发散角的半导体激光器。

【光波导调制器】对在平面薄膜光波导中传播的激光进行调制,控制它的某一参数变化的器件。按所控参数不同包括调幅、调强、调频、调相。按照调制机理不同有声光波导调制器、电光波导调制器、磁光波导调制器。这种调制器与一般光调制器相比,它的尺寸小,所需驱动电信号的功率小,适合用于光信号处理。

【声光波导调制器】利用声光效应制作的光波导调制器。使用具有压电性能的晶体如铌酸锂或石英做衬底,在上面部分覆盖地淀积一层折射率大于衬底的均匀薄膜做为波导膜。在未覆盖区域上镀叉指换能器,它的两个电极形状犹如两个互相交叉的梳子,彼此绝缘。驱动电信号加在电极上,可在衬底中激发出表面声波,沿衬底表面传播,并穿过波导膜。令激光在波导膜中沿着与超声表面波成适当角度的方向传播,声表面波与波导膜中的光波互相作用,可产生衍射光,它的振幅或强度受电信号调制。波导膜中的激光可以由波导膜上的棱镜耦合器或光栅耦合器输入或输出。

【电光波导调制器】利用电光效应制作的光波导调制器。用具有较高电光系数的晶体如钽酸锂晶体做衬底,在它上面扩散金属铌,形成一层折射率高于衬底的钽酸铌锂做为电光波导膜。用光刻法在波导膜面上制作叉指电极。将调制电信号加在电极上,在电光波

导膜中形成外加电场，令激光从适当方向通过有电场的电光波导膜，就会受到电场大小的调制作用。选择合适电光晶体及外加电场方向等，可以实现光的调幅、调强、调频、调相。激光输入输出波导膜可使用棱镜耦合器、光栅耦合器。

【磁光波导调制器】利用磁光效应制作的光波导调制器。使用具有较好磁光性能的材料如钇石榴石做衬底，在它表面上扩散钇、镱、钐、铁生长一层折射率大于衬层的波导薄膜。在波导膜上制作具有螺旋形结构的电极，将调制电信号加在电极上，可在波导膜中形成磁场。令激光穿过波导膜中的磁场，受到磁场的调制作用。可实现光的调强、调幅。光的耦合可使用金红石棱镜耦合器。