2.4.1 激光与激光器

激光（LASER）是“通过受激辐射产生的光放大”（**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation）的缩写，指通过刺激原子导致电子跃迁释放辐射能量而产生的具有同调性的增强光子束，其特点包括发散度极小、亮度很高、单色性好、相干性好等。

世界上第一台红宝石激光器在1960年由美国人梅曼（T. H. Maiman）发明。在中国科学院长春光机所王大珩的率领下，王之江、邓锡铭等研究人员在1961年用国产红宝石制造出了中国第一台红宝石激光器。美国贝尔实验室的Fork等研究人员在1981年首次利用环形染料激光器的脉冲碰撞锁模运转将激光的脉宽缩小至飞秒量级（1fs=10-15 s），得到了飞秒激光脉冲，图2-1所示即是飞秒激光器的震荡级与放大级装置。由于激光加工具有精度高、强度大、无需接触、灵活性好等优点，在制造领域被广泛应用。在早期激光主要被用在一些传统加工领域，比如激光焊接、激光打孔、激光切割等，而且大多选用金属材料为加工对象，金属材料的表面被高强度的激光束照射，这使金属发生烧蚀，进而达到材料被去除的目的。后来随着激光加工技术的迅速发展与应用，在能源、航空和生物医学等领域都能看到激光加工的身影。

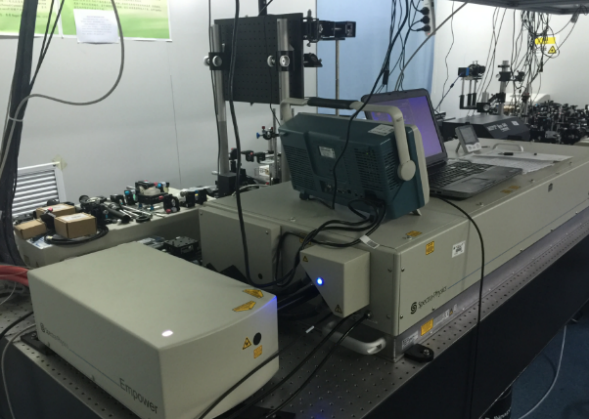


图2-1 飞秒激光发射装置

众所周知，光与物质作用时会发生自发辐射，除此之外，阿尔伯特·爱因斯坦在1917年预测了光受激辐射的过程。根据他的理论，激发态原子向低能态的转变不仅可以自发发生，也可以由适当频率的入射光子激发。单位时间、单位体积的吸收光子数或跃迁数d*N*/d*t* |st如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2‑1 ) |
|  |  | ( 2‑2 ) |

其中，*N*表示处于激发态的能量为*E*的原子密度，*σ*21表示受激辐射的横截面，*t*和*x*分别表示沿传播方向的时间和坐标，*φ*表示光子的通量，光的强度*I*与光子通量*φ*成比例关系，下标“st”表示的是受激辐射的过程。

光的自发辐射会随机地发生在任意方向上，而通过受激辐射产生的光子会在与入射光子相同的方向上传播，且发射光波能与入射光波相干，这意味着它们具有相同的频率和相位。与自发辐射相反，受激辐射能够导致入射光的放大，且辐射光波具有与激发光波相同的频率、相位和传播方向。

总结来说，激光非常重要，因为它具有普通光所不具有的四大特性：亮度高、单色性好、相干性好、方向性好。

通常我们说激光的亮度高，其实就是说激光的瞬时功率大，激光在经过透镜的聚焦后，将其能量集聚在非常小的焦点位置，从而由于能量高度集中可以产生高压和几万甚至几百万摄氏度的高温，这种特性使得激光几乎可以加工所有的材料。随着激光技术的不断发展，除了由于在空间位置上高度集中而产生的高功率，在时间上通过压缩激光的脉宽使之高度集中也会产生很高的瞬时功率。

光已经被证明是一种电磁波，光是什么颜色取决于光的波长，一般来说，普通光源的光的波长范围较宽，所以我们能从太阳光里分出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种可见光以及红外光、紫外光等不可见光。而激光的谱线宽度要窄很多，也就是说激光的单色性非常好，某种确定波长的激光的波长变化范围不到万分之一纳米。

对于波来说，频率相同、相位差恒定是相干的前提。而从激光器发射出来的由无数光量子组成的光波具有相同的频率、相位和偏振方向，这使得激光具有很强的相干性。

普通光源发光方向具有任意性，而激光的发散角可以限制在小于几个毫弧度内，激光几乎可以认为其沿平行方向发射，如果激光射向月球，则其在月球的光斑直径不超过2km。

激光光子具有波粒二象性，其波动性体现在它的本质——激光是一种电磁波，存在相互垂直的电场分量和磁场分量，且满足麦克斯韦方程，其粒子性可由光电效应证明，这也引导提出了光量子的概念，光的辐射实质上是以光速运动的光子流。

激光的定义为通过受激辐射产生的光放大，因此激光器的工作原理基于受激辐射。当外来辐射作用时，受激吸收和受激辐射同时起作用，由受激辐射提供的增益d*I* |st抵消了吸收d*I* |a，因此强度*I*的变化为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2‑3 ) |

当*g d*较小时，增益*G*可由如下公式进行近似：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2‑4 ) |

其中，*g*表示能级的简并度，*d*表示介质的厚度，*σ*表示受激辐射的横截面，*N*表示处于激发态的能量为*E*的原子密度。

因此，产生激光的先决条件是要满足*N*2 > *N*1，这种情况也被称为粒子数反转并且偏离热平衡。在热平衡状态，大多数原子处于基态，原子之间的碰撞导致产生一些处于激发态的原子，它们的能量分别用E1，E2，E3……表示，若系统处于热平衡状态，相应的原子密度N1，N2，N3……可由玻尔兹曼分布给出：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2‑5 ) |

其中，*T*表示开尔文绝对温度，玻尔兹曼常数*k* = 1.38🞨1023 J/K = 8.6🞨10-5 eV/K，在室温下，*T* = 300K，*kT* = 24.9 meV。

我们通常所说的激光器，就是使光源的光子受到激励而发生能级跃迁，实现粒子数反转，然后通过受激辐射而产生光放大的装置。因此激光器一般均由泵浦源（为工作物质实现粒子数反转提供能量）和光谐振腔（轴向传播光放大，决定输出功率、振荡模式、发散角）、增益介质（被激励后能产生粒子数反转的工作物质）三个部分组成。

按照不同的分类标准，激光器可被分为不同的类型：

⮚ 根据增益介质——固体激光器（红宝石，Nd:YAG，钕玻璃激光器等）、气体激光器（He-Ne，CO2，氩离子激光器等）、液体激光器（染料激光器等）、半导体激光器、自由电子激光器；

⮚ 根据运转方式——连续激光器（激光输出以连续方式持续进行）、单次脉冲激光器（激光输出是一个单次脉冲过程）、多次脉冲激光器（激光输出是一系列重复脉冲激光）、超短脉冲激光器（纳秒、皮秒、飞秒、阿秒量级脉宽）、调Q激光器（在短时间内进行强激光振荡和高功率脉冲输出）、可调谐激光器（激光输出波长在一定的范围内连续可控变化）；

⮚ 根据激励方式——光泵式激光器（全部的固体激光器和液体激光器，少数气体激光器和半导体激光器）、电激励式激光器（以气体放电的气体激光器和以结电流/高能电子束注入的半导体激光器）、化学激光器（溴化氢激光器、一氧化碳激光器、氧碘激光器）、核泵浦激光器（以核裂变为激励方式的核泵浦氦氩激光器）；

⮚ 根据波段——远红外激光器（波长范围在25-1000μm）、中红外激光器（波长范围在2.5-25μm）、近红外激光器（波长范围在0.75-2.5μm）、可见波长激光器（波长范围在0.4-0.7μm）、近紫外激光器（波长范围在0.2-0.4μm）、真空紫外激光器（波长范围在0.05-0.2μm）、X射线激光器（波长范围在<0.05μm）。

由于超短脉冲激光在加工领域表现出的超快、超强、三维超精密的特点，不断缩短脉冲激光的脉宽是超快脉冲激光的发展趋势。目前，商用超快脉冲激光器已经可以做到脉宽为飞秒量级（1fs=10-15 s），脉宽为阿秒量级（1as=10-18 s）的超快脉冲激光器也已经在实验室被成功研制。