2004 年全国太阳能光伏组件技术培训班教材

《激光基础知识与固体激光器》

主讲：黄维玲　教授

一珠海市粤茂激光设备工程有限

公司华中科技大学

主办：　国家发改委世界银行/GEF 项目办

上海交通大学太阳能研究所

协办：　上海交大泰阳绿色能源有限公司

上海太阳能科技有限公司

浙江省化工设计研究院

秦皇岛奥瑞特科技有限公司

珠海市粤茂激光设备工程有限公司

二零零四年五月

激光基础知识与激光划片机

黄维玲教授
(粤茂激光设备工程有限公司)
2004．5．27

一、 激光的特性

A．什么是激光

LASER

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

激光是受激辐射的光放大。

受激辐射：
相同的频率，方向与相位
光放大器：
获得高功率

B．激光的特性

a． 单色性好：$\nu/\lambda=10^{-10}$-10^{-13}
b． 高亮度：
太阳光：$2X10^{3}W/cm^{2}$。Sr
气体激光器：$10^{8}W/cm^{2}$。Sr
固体激光器：$10^{11}W/cm^{2}$。Sr
c． 方向性好：发散角小
d． 高相干性：描述光波的相位关系，有空间与时间相干性，它由光波场的空间分布（发散角）和频谱分布决定，常用相干长度表示。
红宝石 ：8M
He-Ne ：1。$5X10^{8}M$
普通光源：800mm

二、 激光发展史：

世界发展：
1960 年，T． Maiman 第一台红宝石激光器诞生；
1960 年年底，第一台 He-Ne 激光器诞生；
1962 年，半导体激光器诞生；

1964 年，CO2 激光器诞生；
1965 年，YAG 激光器诞生；
1968 年，开始发展高功率 CO2 激光器；
1970 年，准分子激光器面世
1971 年，出现 1KW 商用高功率 CO2 激光器；
80 年代，CO2 激光器已达上万瓦，YAG 激光器已发展到千瓦；
80 年代后期，1-5KW 的纵向快流 CO2 激光器进入市场；
90 年代，二极管泵浦的固体激光器诞生，到 1999 年，人们称为二极管激光器年，因为二极管激光器已广泛被使用。

我国发展
1961 年，在长春光机所我国第一台红宝石激光器诞生；
1963 年，在长春光机所我国第一台 He-Ne 激光器诞生；
1965 年，上海钟表元件厂已用上了红宝石激光宝石轴承打孔机；
70 年代中期，YAG 激光焊接机，已在生产中使用；
70 年代末期，1KWCO2 激光器在我校与上海光机所相继研制成功；
80 年代，高功率 CO2 激光热处理研究实验工作已在全国蓬勃开展；
我国从“六五”-“九五”，连续四个五年计划，激光一直是国家重点攻关项目，也是国家自然科学基金，“863”计划、国家“火炬”计划等的重要项目。

三、 激光原理

A．原子结构与能级

分子是由原子组成，原子由原子核和电子组成，原子核带有正电荷，电子带有负电荷，绕原子核旋转。这是原子结构的最基本规律。从激光辐射的原理出发，还有以下的假设：

i. 每个原子可沿某些稳定的轨道运动，并有确定的能量 E，E＝hν 其中 h 为普朗克常数；ν为光波频率 $\nu=\frac{C}{\lambda}$ ； C 为光速；λ为光波长。
ii. 原子核外的电子不能任意的自由分布，必须满足量子化条件。
iii. 一个原子从一个特定的较高 E_1（或较低）状态跃迁到另一能量较低 E_2（或较高）的特定状态时，伴随着要发射（或吸收）一个光子，这个光子的能量等于跃迁前后两个能量之差，即 $h\nu=E_2-E_1$

B．粒子数反转

原子、分子在热平衡状态下，粒子在各能级的分布满足波尔兹曼定律，即：$\frac{N_i}{N_1}=e^{-\frac{E_i-E_1}{kT}}$。式中，k＝1。38×10^{-23}J/K，称为波尔兹曼常数，T 为原子体系的绝对温度。由于 $E_i > E_1$，绝对温度为正数，则 $N_i / N_1 < 1$。由此可见，在通常的情况下，粒子体系总是处于热平衡状态，上能级的原子数总是比下能级的原子数少，处在基态的原子数最多。

若采用某种方式，在一种特定的条件下，获得 $N_i / N_1 > 1$ 的状态，这

种状态称为粒子数反转。显然，粒子数反转只有在外界条件的作用下，也就是外界向粒子体系通过特定方式不断输入能量的条件下才能发生。或者说，粒子数反转只能在非热平衡状态下才能产生，且是不稳定的，一旦没有外界的作用就会回到正常的波尔兹曼分布状态。粒子数反转是产生激光的重要条件。

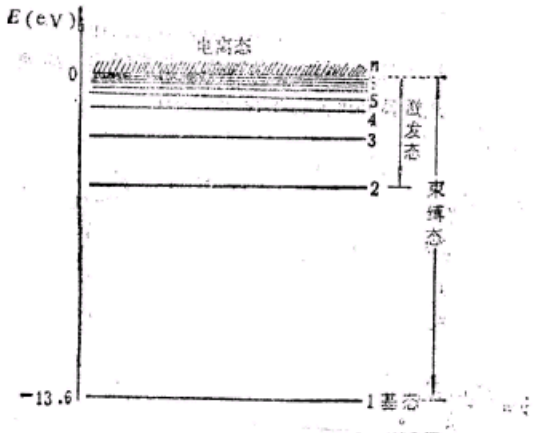


图1-4 氢原子能级图

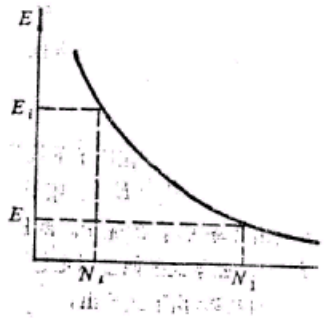
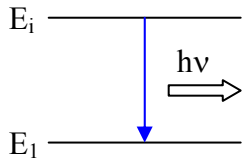


图1-5 玻尔兹曼分布律

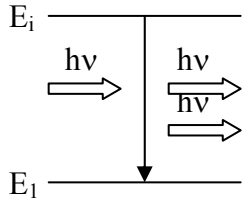
C．光的辐射与吸收

a． 自发辐射



粒子由较高的能级 E_i 自发地衰变到能量较低的能级 E_1 时，挥发射出频率为ν_{i1} 的光子，其光子能量为 E_i-E_1。这种现象称为自发辐射。自发辐射几率 A_{i1} 与粒子在上能级停留的时间有关，即 $A_{i1}=\frac{1}{\tau}$， 式中τ为粒子在上能级停留的时间，也称为粒子在上能级的寿命。通常可由荧光实验测得，即可求得自发辐射几率。自发辐射时，一个粒子发射的光子与另一个粒子发射的光子没有确定的相位关系，彼此之间是不相干的，而且发射方向是任意的。

b． 受激辐射



若一个光子从外部发射到物质上，光子的频率恰好是$\nu=(E_i-E_1)/h$ (即等于自发辐射波的频率)，由于入射光子的频率与粒子跃迁的频率相同，

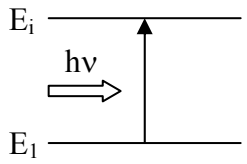
故入射光子能驱使粒子产生跃迁，并发射出光子叠加到入射光子上。由于粒子的辐射过程是由入射光子所驱使，因而受激辐射同相的相干叠加于入射光子上，与入射光子有同样的频率、相位和传播方向。

受激辐射几率（W_{i1}）除与高能级的粒子数有关外，还与入射光子的能量密度成正比（ρ）。常用下式表示：

$$W_{i1}=B_{i1}\rho=\sigma_{i1}F$$

式中：B_{i1} 称为爱因斯坦受激辐射系数；σ_{i1} 称为受激辐射截面；F 为入射光子通量。

c． 受激吸收



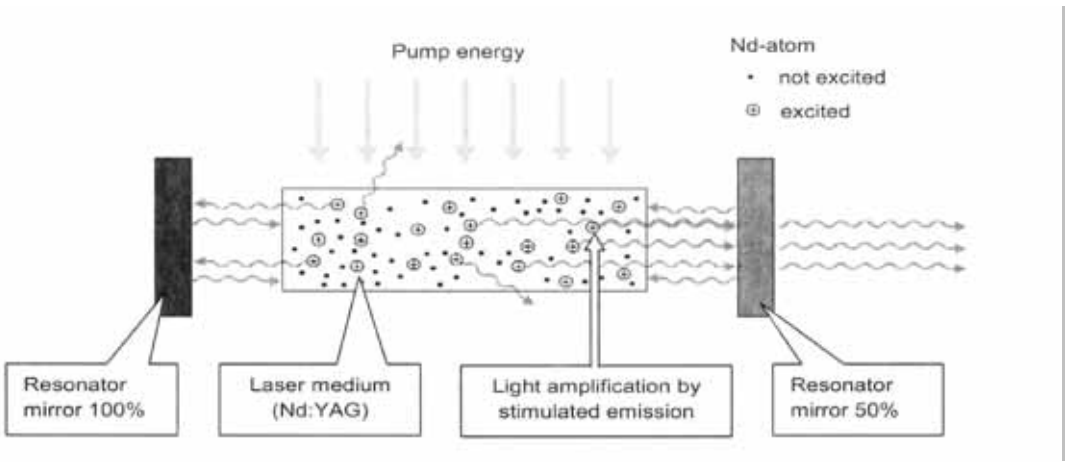
这是与受激辐射完全相反的过程。处于低能级 E_1 的粒子受到能量恰好为 $h\nu=E_i-E_1$ 的光子照射时，将吸收光子而跃迁到高能级 E_i 上，此过程称为受激跃迁。与受激辐射相似，

$$W_{1i}=\sigma_{1i}F$$

式中：W_{1i} 为受激吸收几率；σ_{1i} 为受激吸收截面；且有 $\sigma_{1i}=\sigma_{i1}=\sigma$。σ 称为跃迁截面。

D．谐振腔

是激光器中的重要部件，它包含一个全反镜，一个部分反射镜，激光工作物质置于这两个反射镜中间。受激辐射的光在两个反射镜的导向下，重复反射通过激光工作物质，获得受激辐射与放大。其中一部分光从部分反射镜输出，形成激光。



四、 固体激光器原理

A.　固体激光器的基本结构

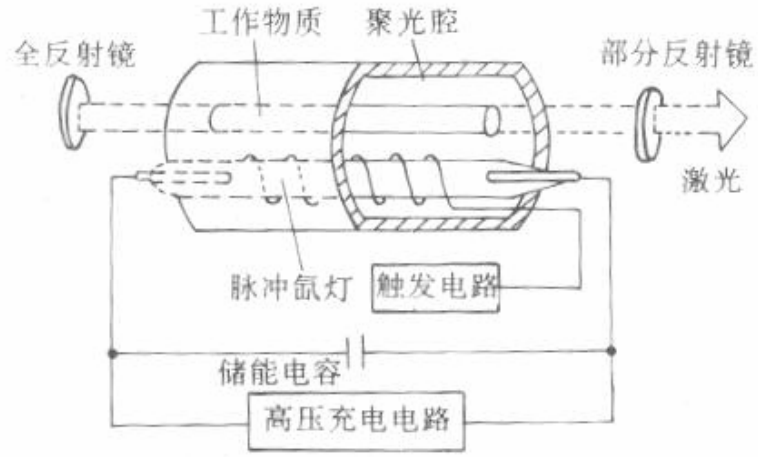
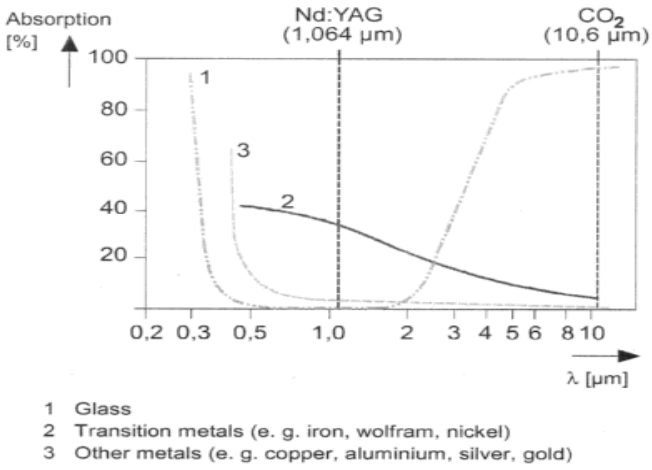


图 2.1.1　固体激光器的基本结构简图

B.　固体激光器的特性

a．发射光谱：　1064nm，属于近红外



b．优点

固体激光大多能用光学玻璃传递与聚焦，也可以用光纤传递。大多数材料尤其是金属材料对其具有较高的吸收率。　材料对激光的吸收率越高，激光辐射的更多的能量可以进入材料。这意味着这种激光器在应用时是更有效。

C．主要用途

固体激光器的主要用途与其特性相关，

- 激光材料加工：

激光热加工： 材料去除（切割、打孔、划片、标记、微调、刻槽等）
焊接
表面改性（强化、合金化、涂覆、毛化等）
冷加工：紫外波段的倍频激光与非金属的相互作用，用于微加工。

- 激光医疗与美容
- 激光演示 （绿光、激光电视）
- 激光检测 （测距仪、制导等）

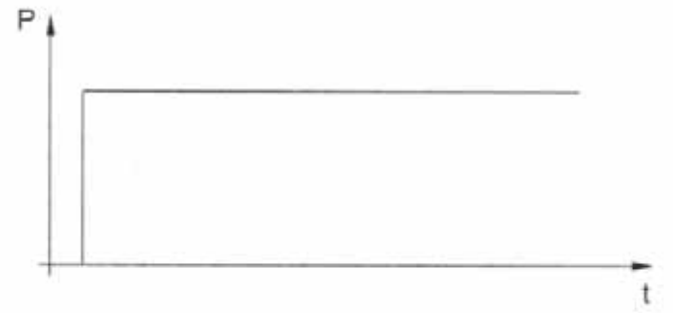
C. 固体激光器的种类

a．红宝石-三能级系统，Cr^{3+}离子，694。3nm 红光
b．YAG-四能级系统，Nd^{3+}离子，1064nm 红外光
c．Nd：玻璃-四能级系统，Nd^{3+}离子，1064nm 红外光
d．全固化激光器

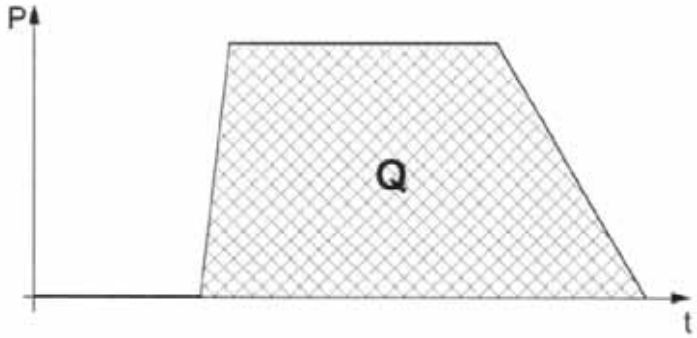
D. 激光器的主要输出参数

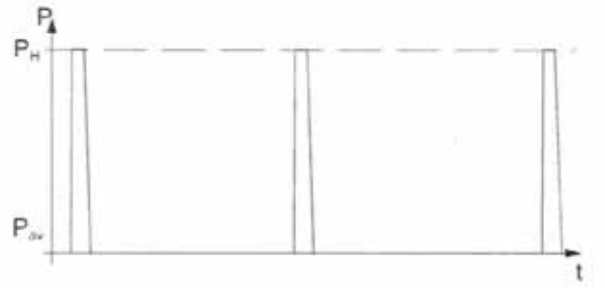
●输出功率/能量

对于连续激光器，输出功率（P）是连续的，其平均功率与峰值功率相同（一般情况下），输出功率的变化，可通过改变氪灯内的电流获得。

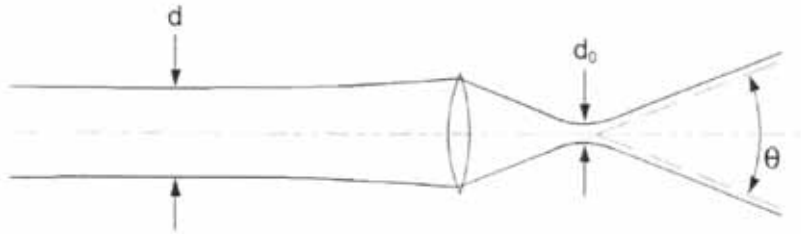


对于脉冲激光器，输出功率是不连续的，常以脉冲能量（Q）表示脉冲的输出；用脉冲峰值功率（P_H）表示脉冲时的最高功率。脉冲能量与脉冲峰值功率之间的关系是：$P_H=Q/\tau_H$ （τ_H=脉冲宽度）。用平均功率（Pav）表示其长时间的输出的平均功率。$Pav=P_H\tau_H fp$（fp 为脉冲重复率）。





- 光束直径（d）腰斑直径（d_0）发散角（θ）



b. 光束质量参数

发散角—近场发散角，远场发散角，当地发散角

M^2

$$M^2=\frac{\text{实际光束的腰斑 X 实际光束的远场发散角}}{\text{基模高斯光束的腰斑 X 基模高斯光束的远场发散角}}$$

光束参数乘积=1/2 发散角 X1/2 光束腰斑

c. 激光束的模式

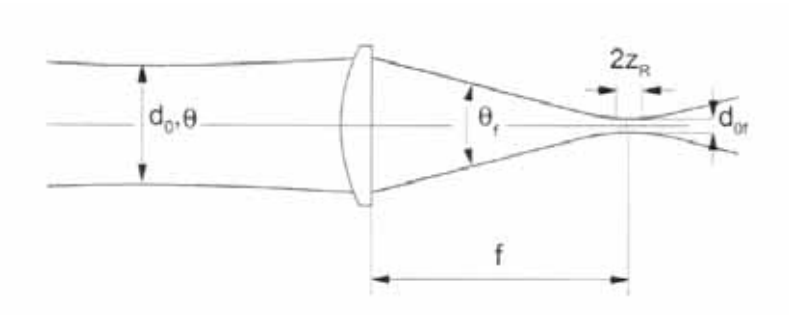
d. 偏振特性

五、聚焦系统

聚焦系统使激光束聚焦至工件上，使工件上获得高的功率密度。聚焦系统一般制成为一个整体，满足设备应用需要。

A．聚焦系统的特征

- 焦距一般为 50－200mm，
- 聚焦镜的直径一般为 40－70mm
- 光束或以直线（0 度）传送，或以 90 度 折射。
- 可配有光学监视装置，也可以不配。
- 聚焦镜可用于焊接、划片、切割、打孔等。
- 都带有保护玻璃镜片。



焦深(Z_R): 聚焦点的大小取决于激光束的发散角θ及聚焦镜的焦距长度f, 在焦平面附近，聚焦点的直径 d_{of} 变化可以忽略不计，在光轴上的这一区域长度称为焦深，用瑞利长度 Z_R 表示。

●$d_{of}=f\theta$　　$Z_R=f^2\theta/d_0=d_{of}/\theta_f$

●Z_R:　瑞利长度　　（mm）

●f ：　聚焦镜的焦距长度　（mm）

●θ　　发散角　　（rad）

●θ_f:　聚焦光束的发散角　（rad）

●d_0:　光束腰斑（聚焦前）直径　（mm）

●d_{0f}:　聚焦点光束直径　（mm）

准直单元

从光纤输出的激光束或从激光器输出的光束是发散的，必须先用准直镜将光束变成平行光束再聚焦至工件上。

● $d_{0f}=(f/f_c).d_k$

●f_c 准直镜的焦距长度

●d_k 光纤的芯径

● 根据成像原理，成像变化率（A）为： A＝f / fc

六、Q 开关的工作原理与结构：

A. 什么是调 Q

Q 为品质因素，用来衡量激光器中光学谐振腔的质量优劣，也是谐振腔内损耗的一种量度。

在激光技术中，品质因素 Q 可表达为：

$$Q=2\pi\nu\cdot\frac{\text{腔内储存的激光能量}}{\text{每秒钟损耗的激光能量}}$$

从以上公式可以看出，Q 值与损耗总是成反比变化的。即损耗大，Q 值低；损耗小，Q 值高。

若在泵浦开始时，使谐振腔的损耗增大，使振荡不能形成，上能级的反转粒子数密度便可大量积累。当积累到最大值时（饱和值），突然使谐振腔的损耗变小，Q 值突增。这时，激光振荡迅速建立，腔内就象雪崩一样以极快的速度建立

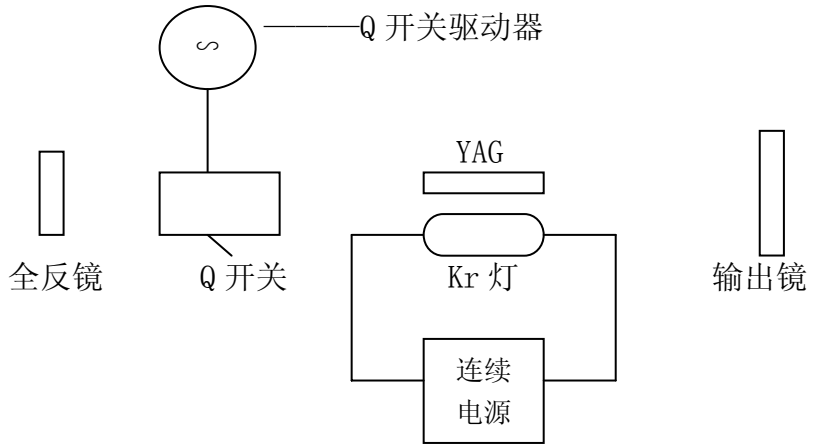
起极强的振荡，在短时间内反转粒子数大量被消耗，转变为腔内的光能量，同时在输出镜处输出一个极强的激光脉冲。输出的脉冲脉宽度（10^{-7}～10^{-11}秒量级）；峰值功率 （10^{3}～10^{11}瓦），通常称这种光脉冲为巨脉冲。

上述调节腔内的损耗实际上就是调节 Q 值，又称为 Q 突变技术或 Q 开关技术。

B. 声光调 Q 的基本原理

声光调 Q 是利用激光通过声光介质中的超声场时产生衍射，使光束偏离出谐振腔，造成谐振腔内损耗增大，Q 值下降，使激光振荡不能形成。若此时突然使超声场消失，衍射效应即刻消失，腔损耗减少，Q 值猛增，激光振荡迅速恢复，其能量以巨脉冲形式输出。

下图即为声光调 Q 激光器装置的示意图。它由连续 YAG 激光器内插入一个声光调 Q 器件组成

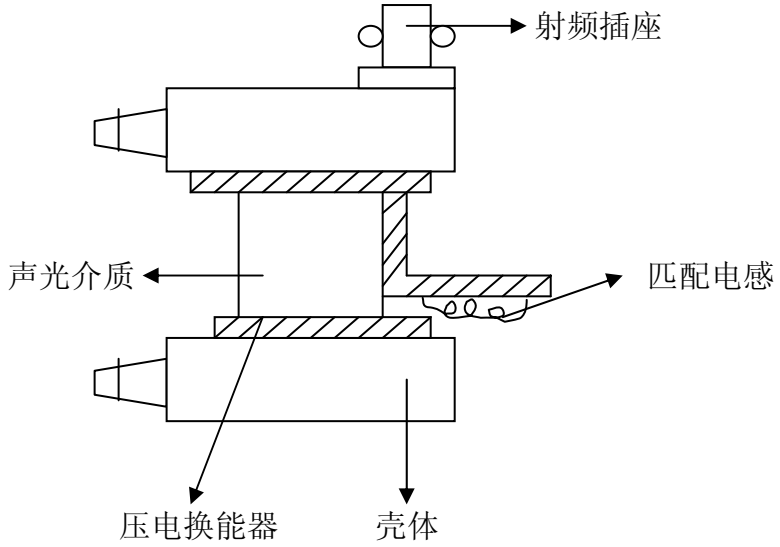


C. 声光调 Q 器件的结构

声光调 Q 器件由两大部分组成：Q 开关组件和 Q 开关驱动器。

1). Q-开关组件

Q-开关组件主要由声光介质、压电换能器、阻抗匹配元件、射频插座和壳体组成。



射频插座将Q开关驱动器的高频电压输送至换能器上；当高频电源加在换能器的两个平板电极上时，换能器在高频电场作用下，将电能转换为机械能，然后机械应力波耦合至其紧贴的声光介质中。换能器常采用X-0° 切割的石英晶体片，属于机电耦合系数大的材料，以提高电声转换效率。

机械应力波耦合至声光介质后，在声光介质中将产生超声波，并以行波方式传播，使声光介质形成相位光栅，谐振腔内光束产生衍射。声光介质常采用熔融石英。它的特征是，对 1064nm 的吸收小，对超声的吸收小，并具有良好的热稳定性能；介质的均匀性好，并有足够大的尺寸，且有高的破坏阈值。为降低 Q-开关的插入损耗，通光面都镀有 1064nm 的增透膜。

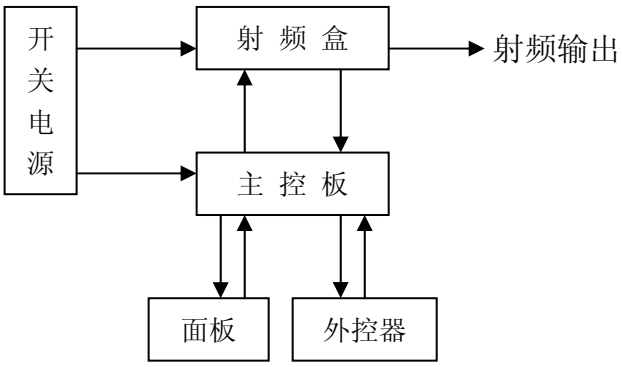
匹配电感的作用是使Q开关组件的总输入阻抗与Q开关驱动器的输出阻抗匹配，以提高高频波的传输效率。

外壳既是对声光器件的保护，也是声光器件的散热器。由于换能器的电声转换过程及超声波被吸收后产生热量，如不及时耗散，则会在声光介质中形成温度梯度场，从而扰乱了超声场的相位光栅，严重时会使器件失去调Q作用，因此器件必须考虑冷却问题。本系统采用水冷却。

2) Q-开关驱动器

Q-开关驱动器是驱动 Q 开关器件工作的专用电源，它根据外部控制信号，将相应的高频信号施加到Q-开关元件上，完成激光有无控制及波形调制。

Q-开关电源由以下五部分组成：



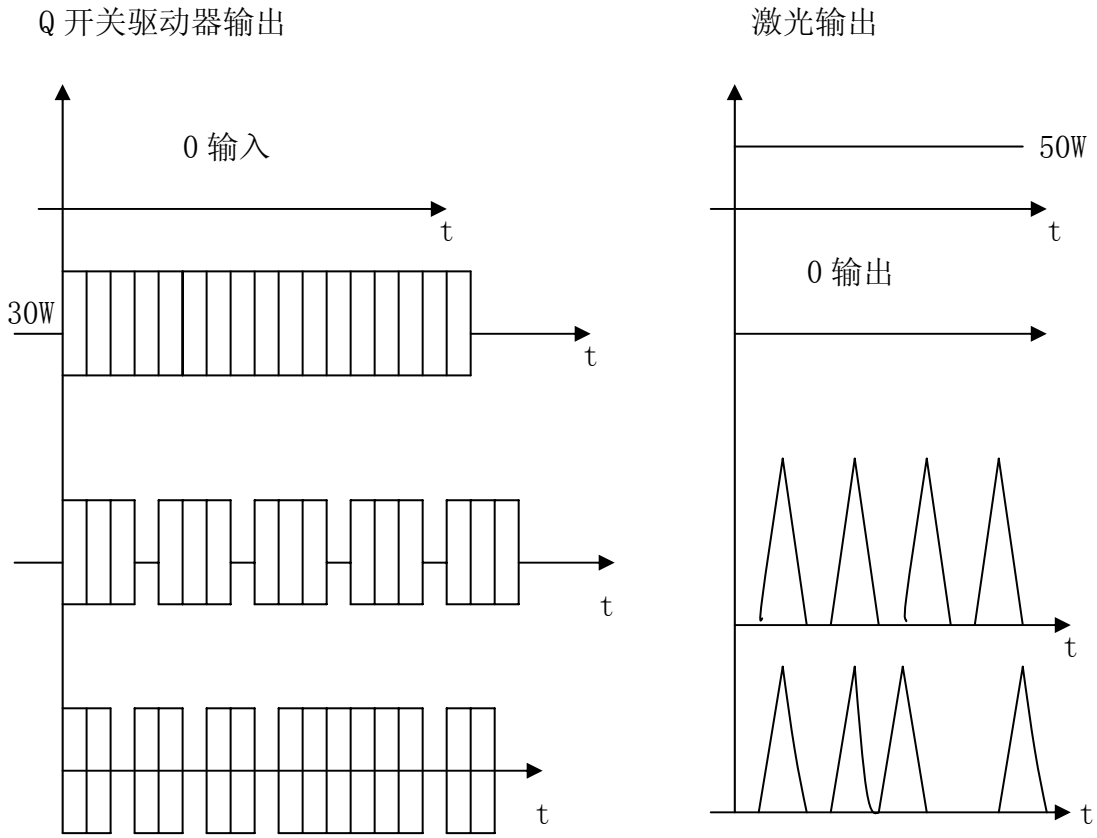
开关电源：将交流 220V 电压变为 8-14V 的输出，输出电压的大小可调节，射频功率可在 30W-50W 之间调节。

射频单元：射频单元密封在一金属盒中，以防止射频干扰泄漏，它产生 27M，或 40M 的射频输出并在主控板的控制下，输出相应的射频包络序列波，从而控制Q开关器件的工作。

注意：必须用 50 欧姆特性阻抗的同轴电缆连接驱动器和Q开关元件。

主控板：是驱动器的控制中枢，包括控制电源、调制脉冲发生器、控制方式及保护逻辑等几部分。它接受来自面板和外控接口的信号，控制和保护射频单元的工作，同时，将驱动器运行的状态信号输入至面板和外控接口。

以下为 Q 开关驱动器的输出与激光输出的对比图：



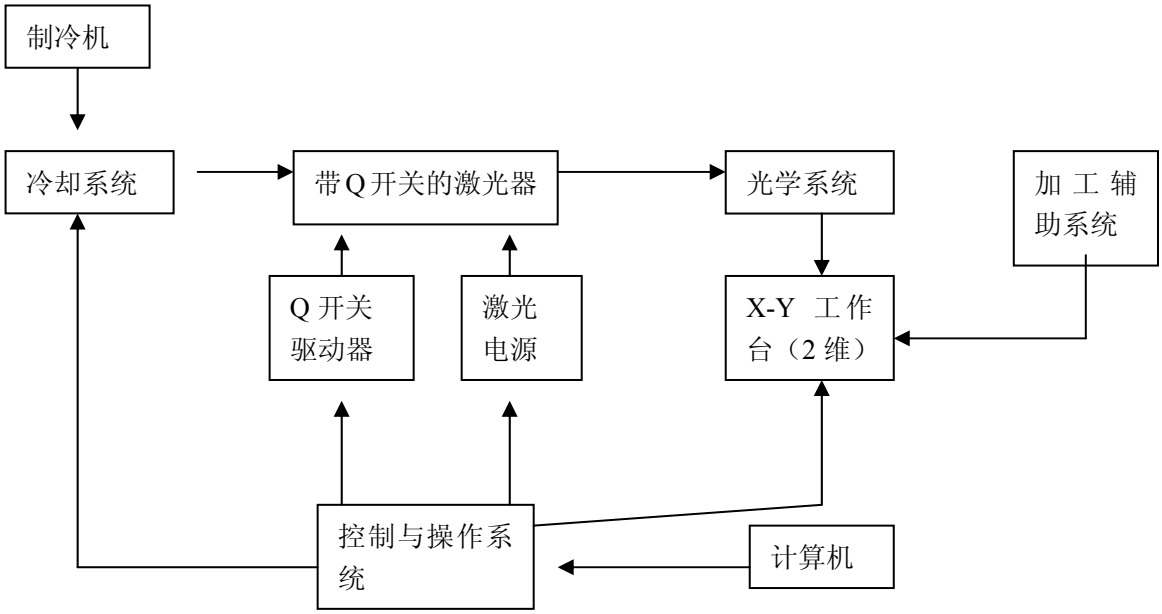
七、激光划片机

A．激光划片机的组成

从设备的外形看，它分为：

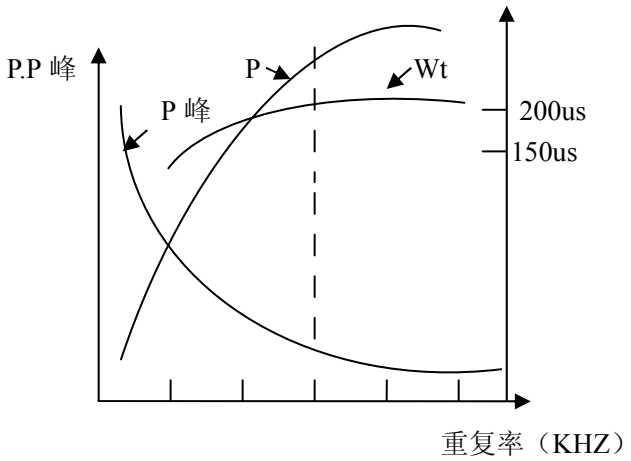
1. 主机柜
2. 电源控制柜
3. 空调室外机
4. 计算机
5. 离心风机
6. 真空泵

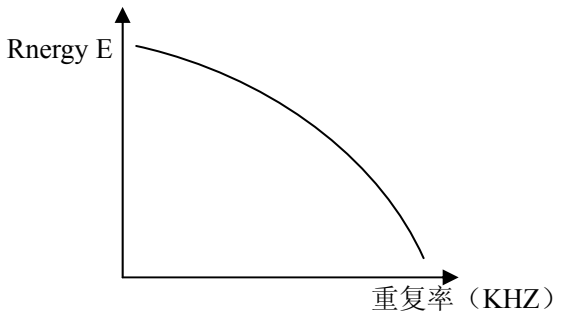
从功能出发：



B．各部件作用

1）带 Q 开关的激光器: 产生带有准连续输出的激光束，其脉冲重复率是可调的，200～50KHZ；在声光调制器中，重复频率的选择是一个很重要的因素，重复频率决定了激光器的输出功率、脉冲宽度与峰值功率。在一个声光 Q 开关的激光器中，其脉冲宽度、峰值功率、平均功率与重复频率的关系如下图所示：





2）激光电源：

激光电源是供给泵浦灯电能的装置，在固体激光器，工作物质依靠光泵浦。在我们的划片机中，采用氪灯泵浦。氪灯属于管壁稳定型大电流弧光放电灯，工作于大电流低电压状态。如我们的灯其工作电压：120—150V，电流 7~30A 左右，其静态电阻约为 4—20Ω 左右，但是灯的动态电阻很小，仅为 0.1~0.3Ω 范围内变化。它意味着灯端电压的微小变化，会引起灯电流的剧烈变化，故在激光电源中，多采用了稳流措施。

为达到高的稳定度，且体积小，电源均采用开关型电源。

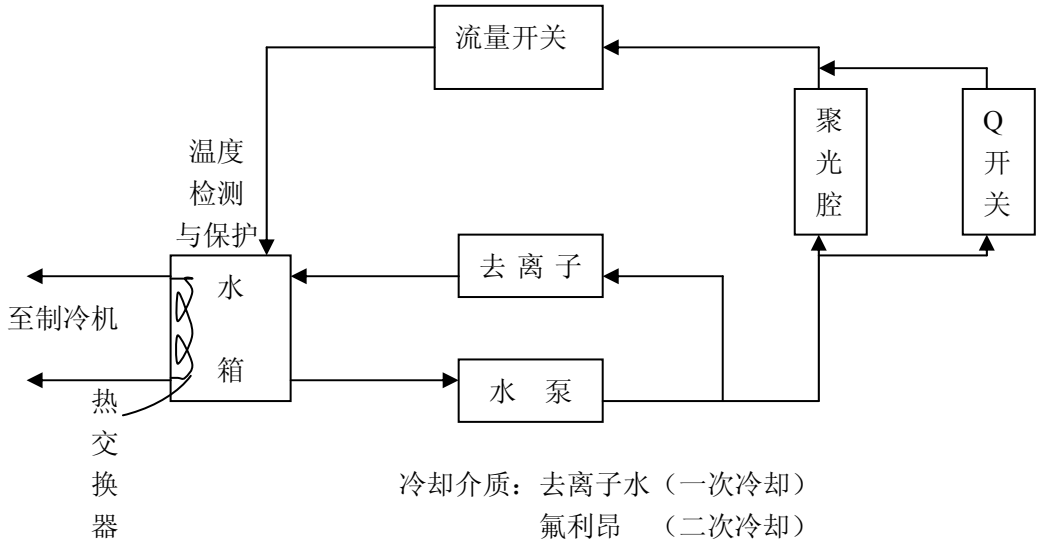
3）Q-开关驱动器：

Q-开关驱动器是驱动 Q-开关元件工作的电源，当 Q 开关电源输出 20—40W 功率频率为 27MHZ 的高频正弦波，光产生衍射，使激光谐振腔 Q 值为零，激光输出关断。当高频正弦波消失，谐振腔有振荡放大的作用，输出连续激光。当高频正弦波受一定频率调制时，激光器输出脉冲激光，其脉冲频率与调制频率相同，输出的平均功率，随脉冲重复率变化；脉冲的峰值功率增加，其增加的值与重复频率有关。最高可达 50KW。

4）冷却系统：

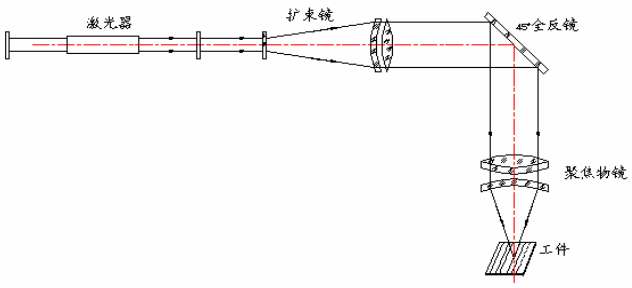
冷却系统是激光器中必不可少的辅助装置，其作用是防止聚光腔，工作物质（YAG 晶体），泵浦灯，Q 开关晶体等元件温升过高，造成器件损坏。

本冷却系统的结构方框图如下：



5）光学系统：

光学系统将激光器输出光束，聚焦成一个很小的光斑，以达到划片目的。光学系统简图



6）工作台：

载工件作一定轨迹运动，满足客户要求。

本工作台由二维组成，可作 X—Y 两维运动。

7）控制系统（带计算机）

控制系统的作用：

①控制工作台，按我们所需要的轨迹运行，且运行速度可调。

②根据划片要求，控制 Q-开关的断-通状态。

8）辅助系统：

①吸盘，它是由真空泵与工作台面组成，在划片期间，工件随工作台运动，但相对工作台不能运动，保证切割质量与精度。

②灰尘收集：排风扇。

C. 常见故障及排除:

1）激光器无输出或激光器输出功率下降

原因:

①. 电源工作是否正常.

②. 泵浦灯工作是否正常，表面是否有污染物,是否到达工作寿命.

③. 聚光腔反射体表面是否清洁光亮.

④. 谐振腔的镜片膜层是否完整清洁.

⑤. 导光系统的镜片及膜层是否完整清洁.

⑥. YAG 棒端面膜层是否完整清洁.

⑦. 谐振腔的调整.

⑧. 谐振腔与光学系统的调整.

⑨. 保护镜片是否完整清洁.

⑩. Q-开关工作是否正常.

处理方法:

①. 清洗可修复的缺陷:

用高纯度的乙醚, 乙醇, 丙酮或乙醚(1)+ 乙醇(1)混合液体进行清洗. 这些液体最好是分析纯等级,也可用化学纯等级. 最好用长纤维的脱脂棉或镜片擦洗纸作为液体的载体轻轻的擦洗表面.

②. 更换不可修复的元件:

受损伤的元件(谐振腔的反射镜,光学元件,YAG棒)若损伤较严重,必须更换; 若损伤的面积与光束的面积比较较小(10%以下),清洗后,仍可使用,但必须做好准备随时更换.

③. 重新调整系统

2). 输出功率正常, 但峰值功率低

原因:

①. Q-开关驱动器工作异常,不能输出所需的功率.

②. Q-开关元件损坏.

③. Q-开关的冷却通道是否正常.

④. Q-开关的频率选择是否正确.

⑤. Q-开关的位置是否正常

处理方法:

①. 用功率计或用上转换片检查Q-开关是否能关断工作电流时激光器的输出功率.

②. 调整 Q-开关的支撑支架的俯仰角与旋转角,直至能使激光器在工作电流时, 输出功率为零(当频率为零时).

③. 若调整Q-开关的支撑支架的俯仰角与旋转角, 不能使激光器在工作电流时, 输出功率为零(当频率为零时).必须检查 Q-开关的各组件工作是否正常.更换不正常的组件.

D. 划片质量及影响因数

1. 光束质量: 这里指的是激光器输出光束的质量. 光束质量越高,划片质量越高.
2. 光学系统镜片的质量: 要求扩束倍率大,但像差要小, 焦距短, 像差也要小, 划片质量好.
3. 焦平面的选择: 多选择焦点在加工面上或略低于加工面.尤其对厚片.
4. 加工参数的选择: 加工不同的材料(单晶, 多晶, 非晶),不同厚度的工件,要选择不同的激光输出参数以及加工参数.包括:输出功率, Q-开关频率, 焦点位置, 加工速度等.
5. 吸盘结构的选择: 加工不同的材料, 吸盘结构不同,有的用平面,有的用带沟槽的平面. 视材料不同设计不同的吸盘.
6. 系统的稳定性: 包括激光器,光学系统的稳定性以及工作台运动的稳定性,平行性等.