

激光器的调Q技术原理

北京工业学院 徐荣甫 邓仁亮

众所周知，激光器一般是由工作物质、谐振腔和泵浦源三大部分组成的。以固体激光器为例，工作物质通常是一根晶体棒（或玻璃棒），泵浦源是由聚光器、闪光灯（氙或氪闪光灯等）及其供电电源组成的，谐振腔是由二块介质膜反射镜组成的，其中一块反射镜的反射率为100%，而另一块的反射率一般为50%左右，由于这块反射镜对光有一定的透过率，激光就由此输出。图1示意地说明了固体激光器的组成。

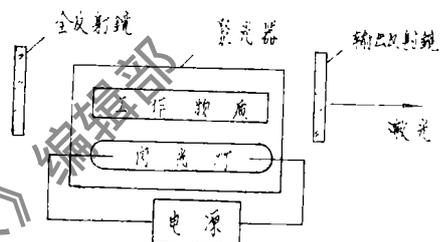


图1 固体激光器的一般组成

只要正确的设计及安装，那么我们就可用这样简单结构的激光器获得激光输出，而且可以获得较大能量的脉冲激光输出。然而，问题在于这种简单激光器输出的激光峰值功率是很低的。

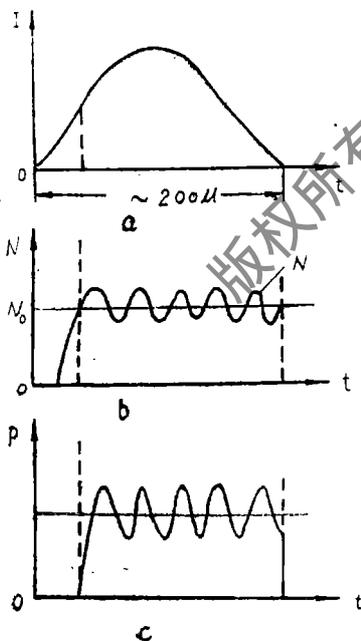


图2 简单激光器形成激光的原理示意图。a) 闪光灯发光波形；b) 工作物质的粒子数反转示意图；c) 激光波形示意图

为了说明上述结论的原因，我们首先来研究一下这种简单结构的激光器是如何形成激光的。我们用图2来加以说明。闪光灯发出一个强的光脉冲，这个光脉冲的持续时间一般为数十至数百微秒，其形状如图2(a)所示。在这个光脉冲泵浦下，处于工作物质基态的粒子被抽运到了工作物质的上能级，经过不断的积聚，有可能会形成激光上能级的粒子数多于激光下能级的粒子数的状态。物理学上称之为形成了“粒子数反转”，在图2(b)中用字母N表示这种反转的建立和变化状况。当工作物质形成了粒子数反转时，就为形成激光这种有特异性能的（单色性好，方向性好等）光创造了前提。当自发辐射的光通过它时，由于感应跃迁便会得到光的增益。但是要真正形成一束激光输出，还必须使激光工作物质的粒子反转数达到一定水平以上才行。这是因为工作物质形成了粒子数反转这只是光通过工作物质时具有增益的一面；另一方面，光在谐振腔内来回反射过程中还有不断遭受损失的一面。这种损耗主要是由于谐振腔中有一块反射镜有一定的透过率而造成的。在增益和损耗的一对矛盾中，激光器至少要达到光在谐振腔中一个来回的行程中增益等于损耗的程度才能有效地形成激光振荡。这与电子学中的自激振荡

类似，只有在振荡回路中正反馈增益至少等于损耗才能有效地建立振荡的道理一样。当光在谐振腔内一个来回的行程中增益等于损耗时，下列等式成立：

$$R e^{2g_0 l} = 1 \quad (1)$$

式中 g_0 为工作物质的增益系数， l 为工作物质的长度， R 为输出反射镜的反射率。欲使激光器能有效地形成激光，激光器必须满足方程（1）

所限定的条件，物理学中把这个限定条件称为“阈值条件”。

由于增益与粒子数反转成正比，在阈值时工作物质的粒子反转数被称为“阈值粒子反转数”，一般用字母 N_0 表示之。这就是说，当工作物质受到光泵泵浦时，粒子反转数逐渐积累增多，当粒子反转数 N 达到 N_0 以上时，便会迅速形成激光，在形成激光的过程中，激光上能级的粒子跃迁到激光下能级，结果粒子反转数便减少下来，低于 N_0 时，激光便会终止，但由于光泵的不断泵浦，粒子反转数又会增多起来，再度超过 N_0 时便又会形成激光。这样，周而复始，在光泵持续泵浦的数百微秒的时间内便会形成数百个激光小脉冲，图2(c)简化地表示了这种情况。根据测量，这些小脉冲的宽度约为1微秒，两个小脉冲之间的间隔时间约为1~2微秒左右。

由于输出的激光能量分散在上百个小脉冲里，所以单位时间内输出的激光能量——激光功率就不可能很高，一般在激光尖峰处的最大功率也只有数千瓦。然而，在一些激光应用中，例如激光测距、激光制导、以及激光雷达等应用中，却往往要求激光脉冲尖峰处的最大功率（称之为峰值功率）要达到兆瓦级（ 10^6 瓦=1兆瓦）以上。峰值功率越高，这类仪器的作用距离也就越远。

那么上述简单激光器应如何改造才能适应这种高功率的要求呢？大家自然会联想到，我们只要设法使上百个激光小脉冲合并为一个，这样就能使激光能量集中在一个极短的时间内释放出来，激光功率自然就能大大增加。

如何实现这种要求呢？这就是本文要重点介绍的调Q技术，为了适应不同类型读者的要求，我们想先用“比喻”的办法来说明这种调Q技术的物理概念。然后，用数学工具加以定

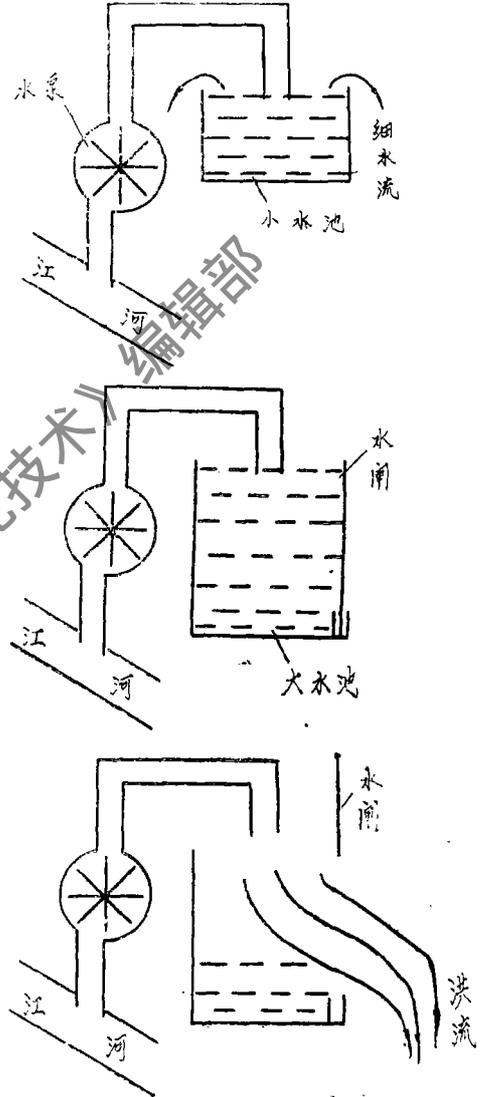


图3 泵浦水池的比喻（示意图）

- a) 小水池情形
- b) 用大水池蓄水
- c) 洪流的形成

量的描述。

根据日常生活的经验，我们知道，假如我们用一台抽水机把水抽到水池中去，如果水池的堤坝很低，则它的蓄水量就很小。用不着多久，水泵就能把水池灌满。若水泵继续工作，水就会从堤坝上溢出来，由于水从堤坝上四处溢流，水的流量很小，如图3(a)所示。但如果我们把水池的堤坝筑得很高，水池的储水量就很大，如图3(b)所示，当抽水机把水池灌满后，我们再把水池堤坝上的水闸顷刻间全部打开，这时自然会出现洪水奔腾而下的壮观场面。无疑，这股集中的水流的流量很大，且用不着多久就能把水池中的水全部放完。在图3(c)中我们形象地表示了这种情况。

激光器的情况在某些物理现象上与此类似，上述简单激光器犹如堤坝很低的水池，当光泵把工作物质下能级的粒子泵浦到激光上能级后，一旦达到上能级的粒子数大于下能级的粒子数，即形成了粒子数反转，此时工作物质就有了光增益，如果光在谐振腔内运行一周的损耗不大，则很易达到产生激光振荡的阈值条件，从而形成激光输出，这就是说激光器产生激光的门槛很低，用不着把下能级粒子泵上去很多，就可形成激光输出，这样的激光自然不会很强。如何才能获得强的光脉冲呢？从“水坝”得到启示，欲得“洪流”首先必须把水蓄起来；对激光器而言，就是首先得让激光上能级积累很多的粒子数。其次，犹如顷刻间全部把水闸打开一样，我们必须设法让激光上能级上的粒子全部同时迅速地跃迁下来。

利用调Q技术可以圆满地完成上述两方面的任务。我们首先来解释一下有关Q值的含义，在无线电技术里，大家把一个电学的谐振回路的品质因素叫做Q值，它表征着一个回路的电能损耗情况，损耗越小，则此回路的性能——品质也就越好。激光技术引用了这一技术用语，用以表征激光器的谐振腔的光能损耗情况，其定义为：

$$Q = 2\pi\nu \frac{\text{储存在腔内的能量}}{\text{每秒损耗的能量}}$$

式中 ν 是谐振腔内振荡的激光频率，所以 $2\pi\nu$ 也就是腔的谐振圆频率。

由于谐振腔的损耗越大，激光器的阈值越高，反之亦然。所以Q值是用以描述谐振腔实现激光振荡“难易”程度的一个指标。

那么什么叫调Q呢？根据需要规律地变化谐振腔的Q值叫做调Q。

下面我们再来介绍调Q的具体方法及通过调Q可以获得高功率激光脉冲的道理。

如图4所示，我们设法在一个简单激光谐振腔内加入一个开关（称之为Q开关），随着

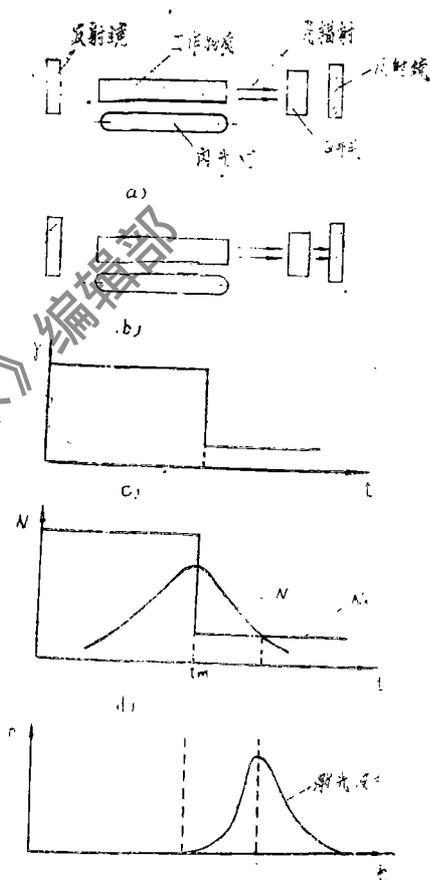


图4 调Q原理图

- a) 关闭状态
- b) 开放状态
- c) 谐振腔损耗情况
- d) 粒子数反转情况
- e) 激光脉冲的形成

Q 开关处于“开”、“关”二种不同的状态，相应地谐振腔的损耗就有“低”和“高”两种情况，激光器的阈值也就有“低”和“高”两种状况。在图 4(a)中表示了 Q 开关处于关闭状态时，自工作物质发出的光将通不过开关，相应于这种状态，谐振腔的损耗 γ 值很高。自然，与之对应的谐振腔的阈值粒子反转数 N_0 也就很高。由于此时形不成激光，泵浦到上能级的粒子得以保存和积累起来，当光泵继续泵浦时，激光上能级上积聚的粒子数越来越多。为了获得强的激光脉冲，我们希望上能级的粒子积累的越多越好，但是这种积累的时间有一定限度，这是因为粒子在激光上能级只能停留一定的时期，即它有一定的寿命（称之为荧光寿命）。光泵发出的光脉冲到达后期功率很低，如果此时激光器的自发辐射损失已增大到超过继续积累所能得到的实际收益时，应当立即停止继续积累，即当激光上能级的粒子数积累到最大值时（图 4 中的 t_0 时刻）应立即设法使 Q 开关打开，此时，工作物质发出的光将无阻拦地通过开关，相应地谐振腔的损耗 γ 降到极低，此时的阈值粒子反转数也就极低。由于激光上下能级的粒子反转数远大于（一般为数倍）阈值粒子反转数，所以工作物质的光增益很高。此时，工作物质激光上、下能级间的偶然的自发辐射，在谐振腔内便会滚雪球似地迅速增长，从而能极快地把上能级的粒子数很快的几乎全部感应跃迁下来，结果形成一束持续时间极短的（约 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ 秒量级）强激光脉冲，此脉冲光强一般可达数兆瓦以上。图 4(e) 示意地表示了激光脉冲的形状。

理论上，我们可以用数学工具来描述调 Q 形成激光巨脉冲的过程。激光器工作时，最主要的过程是受激辐射。在形成激光的过程中，设工作物质的增益系数为 g_0 ，由激光原理可知， g_0 与粒子反转数及受激辐射截面成正比，所以光子在谐振腔内一个单程的放大量是：

$$\phi g_0 l = N \sigma l \phi \quad (2)$$

式中 ϕ 是谐振腔内的光子数密度； l 是工作物质的长度； σ 是工作物质的受激辐射截面。

因为该放大量是在单程渡越时间 $t = L/C$ 内进行的，所以单位时间内增加的光子数密度为：

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\sigma cl}{L} N \phi \quad (3)$$

式中 L 为谐振腔的长度； C 为光速。

由于损耗的存在，与此同时，单位时间内腔中光子数的衰减量为：

$$\frac{\gamma \phi}{t} = \frac{C\gamma}{L} \phi \quad (4)$$

式中 γ 是谐振腔的单程损耗，它与部分反射镜的反射率和 Q 开关的形式及其制作质量等有关。

综合 (3)、(4) 我们可以得出单位时间内光子数密度的变化量 $\frac{d\phi}{dt}$ 为：

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\sigma cl}{L} N \phi - \frac{C\gamma}{L} \phi \quad (5)$$

对三能级系统，或在四能级系统中，若激光下能级的弛豫时间比激光形成的时间还长的话，那么，每产生一个光子，相应于上能级的粒子数每减少一个，下能级粒子数增加一个，所以

反转粒子数减少二个。因此，在受激辐射过程中，单位时间内减少的反转粒子数 $\frac{dN}{dt}$ 为：

$$\frac{dN}{dt} = -2 \frac{\sigma C l}{L} N \phi \quad (6)$$

(5) 和 (6) 就是我们欲建立的 Q 开关激光器的速率方程。由于这两个微分方程中都含有双变量 N 、 ϕ ，所以得不到明确的解析解。但是可用逐次逼近法求得精确的数值，或在某些近似条件下，求出近似解。

Q 开关的种类较多，主要有利用电光效应的电光 Q 开关；利用棱镜全反射原理的机械转镜 Q 开关；利用染料的饱和和吸收原理的可饱和和吸收 Q 开关；利用电学控制全反射的受抑全内反射 Q 开关以及利用声光效应的 Q 开关等等，图 5 示意地表示了上述五种 Q 开关的原理结构。目前已投入实用的有机械转镜 Q 开关、电光 Q 开关和染料 Q 开关等三种。在单次及低重复率激光输出的应用中，由于染料 Q 开关有重量轻、体积小以及价格便宜等突出的优点，因此获得了广泛的应用。而对于要求高重复率激光输出、对激光输出要进行编码以及要求输出更高功率激光的场合，目前常采用电光 Q 开关。由于机械转镜调 Q 装置的体积及重量较大，输出激光束的光轴有扫描运动，以及有电机的噪声干扰等缺点，目前已逐渐被淘汰，所以下面我们将只专文介绍电光 Q 开关和染料 Q 开关的具体原理及构造。

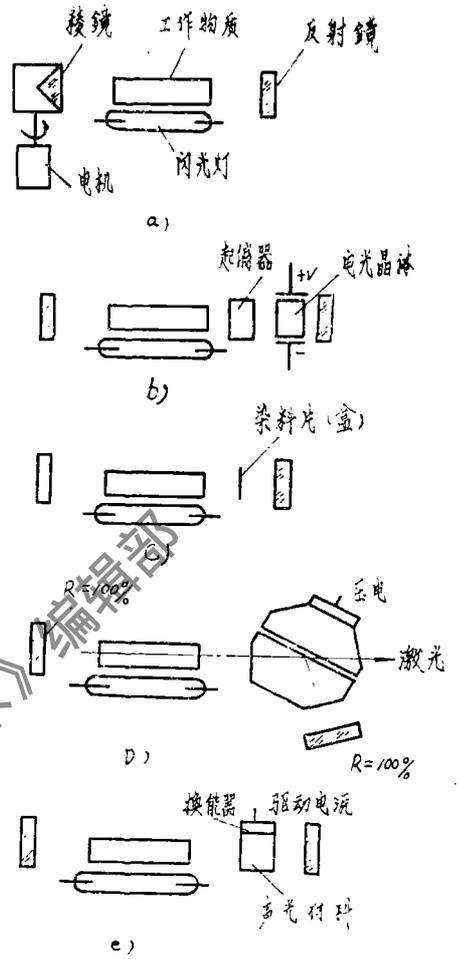


图 5 五种主要的调 Q 原理装置示意图
 a) 转镜调 Q
 b) 电光调 Q
 c) 染料调 Q
 d) 受抑全内反射调 Q 原理图
 e) 声光调 Q