

## Q 开关激光器的实验

### 1. 引 言

激光技术目前正在飞跃发展。以红宝石激光器的成功作为开端,从紫外到亚毫米波的很多频率上都发现激射作用。

激光的特点是,具有单色性和高的亮度温度,这种特点对于特别高分辨率的光谱学极其有利。还有,用 Q 开关法,能得到非常高的功率。用这种 Q 开关激光器,就实际应用来说,在物性研究方面促成了非线性光学这个新领域的产生。另外, Q 开关技术还被广泛地应用在等离子体的产生、加热、诊断等方面。

本文主要叙述 Q 开关激光器的实验问题以及把它应用在线性光学——特别是受激散射的实验方面——的问题,仅供刚刚着手这方面研究以及应用这一技术的读者参考。

### 2. Q 开关激光器

激光器发生振荡所需要的最低的激发原子数  $n_{\text{阈}}$  为

$$n_{\text{阈}} = (n_2 - n_1)_{\text{最小}} = \frac{2\pi}{\lambda\sigma Q} \quad (1)$$

此处  $\lambda$  是波长,  $\sigma$  是吸收截面,  $Q$  是谐振腔的品质因数。当使谐振腔的  $Q$  值发生急剧变化时,能够得到峰值很高的激光功率。这种方法称为 Q 开关法,根据这种方法得到的具有高峰值的光脉冲,称为巨脉冲。

谐振腔的  $Q$  值在低状态时,与在高状态相比较,要求  $n_{\text{阈}}$  高,这样,激光器发生振荡就困难,因此被抽运的大量原子都贮存在激发能级上。此时,如急剧提高  $Q$  值,

大量的激发原子一起落在低能级上,引起激光器的振荡。这时,容易得到宽度在  $10^{-7}$  秒以下、功率为兆瓦数量级的脉冲。根据这种方法,可能得到 100 兆瓦以上的功率。

到目前为止,作为实验上的 Q 开关有以下几种方法:

(1) 使用电光、磁光效应的方法(克尔盒、普克尔盒、法拉弟盒);

(2) 机械方法(转动的削波器、转镜、转动棱镜);

(3) 使用可饱和吸收体以及可饱和反射镜的方法(染料溶液、染料玻璃、半导体反射镜);

(4) 用超声波使光偏转的方法;

(5) 使用薄膜的方法;

(6) 使工作物质本身的  $Q$  值发生变化的方法(在工作物质棒上直接加电场、磁场以及超声波的方法)。

下面陈述其中最常应用的克尔盒、转镜、转动棱镜以及使用染料的 Q 开关法的实验问题。

#### 2.1. 使用克尔盒的 Q 开关法<sup>[1]</sup>

使用克尔盒的装置如图 1 所示。在电场中放置的各向同性介质,能使自己成为光轴平行于电场方向的单轴晶体。此即克尔效应。在克尔盒内,电场方向的偏振光和与其相垂直的偏振光的速度不同,当它们通过路程  $l$  后,发生位相差:

$$\delta = 2\pi B l E^2 \quad (2)$$

此处  $E$  是电场强度,  $B$  是克尔常数。作为克尔常数大的物质,以硝基苯为最佳。输出的激光是线偏振光,它的  $\vec{E}$  矢量垂直于红宝石

晶体的 C 轴面。

如图 1 那样, 在  $\lambda$  射光的偏振方向和电场的方向成  $45^\circ$  时, 在盒上加上产生位相差  $\Delta = \pi/2$  的电压  $V_{\lambda/4}$ ,  $\lambda$  射光通过克尔盒后被反射, 再一次通过克尔盒到达工作物质时, 偏振面转了  $90^\circ$ 。因此, 妨碍了谐振腔中的光的再生作用。发生完全线偏振光输出的  $90^\circ$  红宝石(即晶轴与工作物质棒的轴成直角切割的红宝石)不需要起偏振器。因而, 如果把加在克尔盒上的电场急速取去, 就进行了 Q 值从低状态向高状态的开关。另外, 为了在加上电场时得到巨脉冲, 需在谐振腔内插入  $1/4$  波长片。对于硝基苯, 电压  $V_{\lambda/4}$  为

$$V_{\lambda/4} = 2.5 \times 10^4 \times de^{1/2} \quad (\text{伏}) \quad (3)$$

此处  $d$  和  $e$  分别是电极间隔和盒的长度。为了对这样的电压保持绝缘, 使用的硝基苯必须是特别精制的, 高纯度的。这时为了彻底地消除不纯, 采用蒸馏法。但是, 物理学工作者对于精制是不太注意的, 恐怕一开头就会弄脏试料, 特在此加以提醒<sup>[9]</sup>。克尔盒可以在  $10^{-9}$  秒数量级的时间内进行开关, 所以它具有非常高速的 Q 开关的特点。

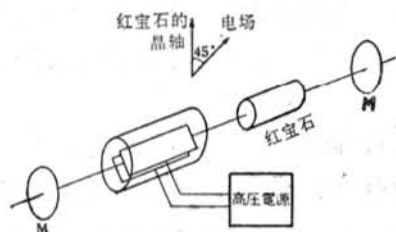


图 1 使用克尔盒的 Q 开关激光器的原理图。

这种克尔盒的方法, 适用于对巨脉冲作时间控制的场合, 这时, 从克尔盒开启起, 到激光光升到顶峰为止, 约需 200 毫微秒, 这是要注意的。这个上升时间, 因激光器以及具体条件而异。把两个激光器振荡起来, 使它们在 10 毫微秒以下的误差范围内同时振荡, 是不容易的。然而, 在激光器的起振

上, 比用其它现象来同步仍要容易得多。

此外, 硝基苯有强的喇曼活性, 容易引起受激喇曼散射。所以在输出上, 除激光外, 喇曼-斯托克斯成分还常常以很强的相干成分混在其中。这样, 在受激喇曼散射被很强烈地激发起来的场合, 谐振腔的损耗变得非常大, 激光器的输出功率饱和, 不能期望更大的输出功率。使用克尔盒的 Q 开关, 为了得到大功率的巨脉冲, 必须用尽可能短的克尔盒(5 厘米以下), 以防止引起强的受激喇曼散射。用短克尔盒, 在防止激光自聚焦方面也是有效的。

普克尔盒同样可用作 Q 开关。美帝科拉德公司出售使用普克尔盒的 Q 开关激光器, 雷瑟恩公司对钕铝石榴石:  $\text{Nd}^{3+}$  激光器用普克尔盒作连续的 Q 开关, 周期是 30~50 赫, 得到了 5~8 兆瓦的输出功率(波长 1.06 微米)。

## 2.2 机械方法

使用转动棱镜的 Q 开关是最简便而又有效的方法。如图 2 所示, 把高速转动的全反射棱镜或平面镜作为谐振腔一端的反射镜。当转动的反射面与另一端的固定反射镜成为平行时, Q 值变高, 得到巨脉冲。在使用直角棱镜的场合, 轴稍有倾斜是没有关系的, 且因光仍然回到入射方向上, 故调整容易。比较容易得到的转子的转动速度是: 电动机最大为 ~500 转, 空气透平为 ~1000 转。虽则如此, 得到宽度为 30 毫微秒的数十兆瓦的功率是没有多大困难的。其关键问题是使棱镜中心的棱准确地与工作物质棒的中心重合, 所以, 必须正确决定转动棱镜的高度, 才能得到好的结果。

这种转速的 Q 开关与克尔盒相比, 要慢得多, 所以要设法缩短开关时间。最简单的是如图 3 所示的转动的全反射棱镜和固定反

射镜并用的方法。使用这种方法,有效转数比图 2 的情形约增加一倍。此外,曾<sup>[2]</sup>用陆末-盖革板上的全反射来加速开关速度。与前者比较,这种方法给出快速的 Q 开关速度,但具有加长谐振腔的长度的缺点。

也有的是把染料与转动棱镜、转镜同时并用。同时使用染料,优点是能消除输出的多模性,使频宽变窄。

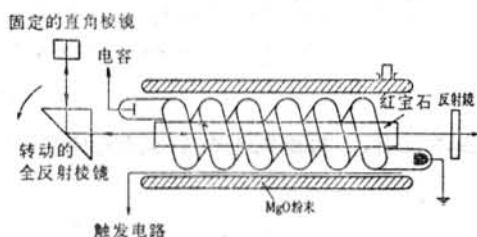


图 2 转镜式 Q 开关激光器。

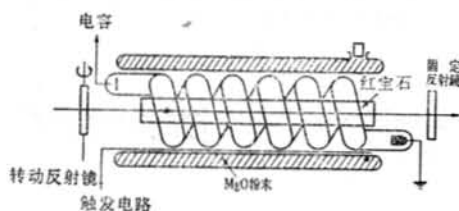


图 3 使用转动棱镜和固定棱镜加速 Q 开关速度的 Q 开关激光器。

### 2.3 可饱和染料<sup>[3,4]</sup>

可饱和染料,作为简单的 Q 开关法已被广泛应用。这种染料吸收光后被激发,达到介稳三重态,入射数十仟瓦的强光,基态分子已减得很小,故不再存在太大的吸收。对各种染料来说,从光的入射停止到再开始吸收的吸收回复时间——即介稳态寿命——是非常不同的。例如,在红宝石 Q 开关中经常用隐菁,约为 4 毫微秒,金属酞菁约 1 微秒<sup>[5]</sup>。所使用的是这些染料分别在酒精、氯萘等中的稀薄溶液。此外,在市场上出售含有可饱和染料的玻璃以及对光强而言透过率能变化的中性滤光片等等,都是方便的东西。

在谐振腔内插入这种可饱和吸收体,最

初由于吸收体吸收光,谐振腔的 Q 值低,随着强抽运的进行,可饱和吸收体吸收从工作物质棒发出的强荧光,发生吸收饱和后,损耗就没有了。与此同时,由于谐振腔的反馈,受激发射加强。于是,在染料的饱和和受激发射之间建立起正反馈,而产生巨脉冲。

这样,使用染料的 Q 开关法所产生的巨脉冲的振荡模的数目,自然被限制了,光谱宽度也就变窄<sup>[4]</sup>。Sooy 对此现象的说明如下<sup>[6]</sup>,因为染料从吸收脉冲上升到 Q 值升高为止的时间是长的,只要增益上有微小差别,振荡的模和不振荡的模就被分开了。

同样,使用染料 Q 开关的场合,输出的激光光束断面在强度上是不均匀的。特别是,在强的部分上通常呈现丝状。还有,如下文中 4.3 节所述,发生自锁效应时,输出被  $C/2L$  调制<sup>[7]</sup>。这种现象,在饱和染料的恢复时间比光子在谐振腔中往返时间短的场合容易发生。如果光很强,染料的透过率变好,光的放大作用增高,就愈来愈有激射作用,把光加强的能力变大;在相反的情形,变小,所以在光强弱上受到强烈的调制。在这种情形,引起了光子的密度调制,如果把它与速调管中的电子密度调制情形相比拟,这是很易理解的。

图 4 是使用隐菁的甲醇溶液情形的输出,重复频率大致为  $C/2L=161.4$  兆赫<sup>[4]</sup>。对于这种调制度,随着工作物质与吸收盒两端之间离开的距离的增加而加大。

作红宝石 Q 开关的有代表性的染料,如表 1 所示。使用分散在固体中的染料,得到与使用染料溶液时相同程度的功率。

此外,把名为 3.3'-二乙基-9.11; 15, 17-双新戊二烯-硫杂五羧花青碘化物的染料,用作 Nd 玻璃激光器的 Q 开关,已有成功的报导<sup>[8]</sup>。

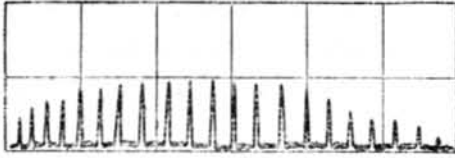


图 4 发生自锁模的 Q 开关激光器输出的例子。L=92.9 厘米；20 毫微秒/分度（取自 Mocker 和 Collins 的结果）<sup>[7]</sup>。

把染料的溶液作 Q 开关，在实际进行的场合要注意的是，用尽量长的盒（5 厘米—10 厘米），最好是把充满稀释的染料溶液放入谐振腔中，这种溶液对激光波长有 50% 左右的吸收浓度。如前所述，在使用染料 Q 开关的场合，振荡输出成为丝状，加之很易得到大的峰值功率，所以输出强功率时要注意红宝石的破损。

表 1 Q 开关用的几种染料

染 料	溶 媒	吸收峰 (微米)
1.1'-二乙基, 4.4'-羰菁(隐菁)	甲醇	704
1.1'-二乙基, 1.1'-二溴 2.2' 羰菁	甲醇	690
金属酞菁	1-氯萘	699
氯·铝·酞菁	1-氯萘	693.5
钒酞菁	1-氯萘	698
钒酞菁	硝基苯	695.5

同时并用转动棱镜和可饱和染料是有效的。例如，下边记录的是笔者所进行的实验结果。由于使用了染料，比起单独使用转动棱镜，在输出的峰值上虽没有很大的改善，但光脉冲的宽度减少一半（ $\leq 10$  毫微秒）。实验装置如图 5 所示，使用 9.5 毫米  $\times$  10 厘米的日本产的红宝石，把玻璃的模选择器作为反射镜，用转动棱镜进行 Q 开关。把金属酞菁溶在氯萘中作为染料，对于激光，最初的透过率约为 60%。对于这种情形，因为输出功率对染料的浓度有锐敏的依赖关系，必须适当地选择浓度。还要根据红宝石的质

量，固定反射镜的反射率等来改变染料的浓度，使之最合适。图 6 表示实验结果的一个例子。在图上画出了输入能量与输出功率的峰值，脉冲宽度的关系曲线。功率到 50 兆瓦以上时，氯萘稍稍着有茶色，移动盒的位置，使用数十次是不成问题的。

上面的实验，用的不是最好的红宝石，也没有根据最大输出功率来选择最合适的输出端反射镜的反射率，其目的仅仅是研究染料的作用。使用钒酞菁的苯溶液作为染料较好，它具有较好的特性。如果对上列几个方面选择适当，可能得到更高的输出功率。

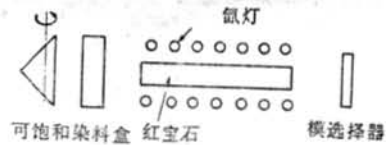


图 5 同时使用转动棱镜和染料的 Q 开关激光器。

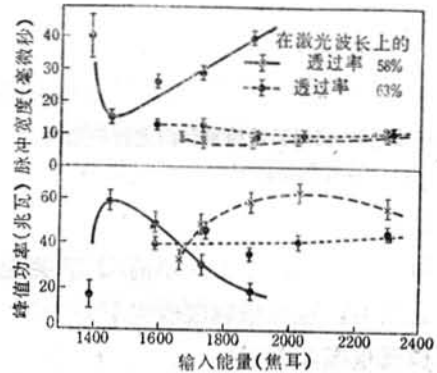


图 6 同时使用染料和转动棱镜的 Q 开关激光器特性的一个例子。

### 3. 输出的测量方法

因为 Q 开关激光器的输出是具有约  $10^{-8}$  秒宽度的，数兆瓦以上峰值的脉冲，在它的波形的正确测量上，要有些熟练的技巧。如后面所述，在发生锁模的场合，输出是半宽度为  $2 \times 10^{-10}$  秒的重复脉冲，所以它的波形测量非常困难。还有，对这种相干强

光总功率和峰值功率的绝对测量上，也要特别费心。

### 3.1 输出波形的测量

一般是用光电倍增管作光探测器，如后面所述，对于这样强的光，使用光电管和半导体二极管也是方便的。

工作不细心的人把激光器的输出直接送入这些探测器的事情，也是有的。要特别考虑到这样强的光会使光电表面的性质发生变化，还有由于饱和而发生波形的极大的畸变，都使得与真实值相差甚远。

用滤光片能把光很好地衰减。特别是市场出售的中性玻璃滤光片，透过率能从  $10^{-4}$  变到  $1/2$ ，对于弱光的衰减是方便的。但是，因为 Q 开关激光器的输出很强，要直接使用这种滤光片，就有破损的危险，而使标定的衰减率发生变化。

于是，在 Q 开关激光器输出的测量上，图 7 所示的方法是最合适的。也就是说，将输出的一部分在玻璃等物上反射，然后再入射到反射率高的  $\text{CaCO}_3$  或  $\text{MgO}$  的漫射面上。离这种漫射面的适当距离上放置探测器，以便检测散射光。

这样，增加或减少漫射面和探测器之间的距离，就能够调节入射到探测器中的光

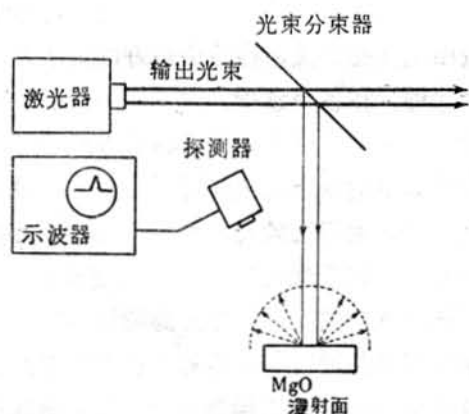


图 7 Q 开关激光器输出波形的测量方法。

量。在探测器的正前方，还可以使用中性能滤光片。在这种情形，如果已知探测器的灵敏度，就可能进行一定精度的绝对测量。但是，在中性滤光片的使用上要注意。滤光片的衰减率，在视感度高的波长范围内，具有好的平滑的波长特性，而在广阔的波长范围上，却有很大的凹凸不平。所以，事前必须在使用的波长上进行标定。

下面叙述关于探测器的使用问题。其中头一点，就是对于一定类型的探测器，必须注意它的饱和电流。例如，光电倍增管的饱和电流，通常为  $50 \sim 100$  微安。所以，对于  $100$  欧姆的负载，未饱和时取得的最大输出，不超过  $5 \sim 10$  毫伏。显然，我们希望在负载上引入更大的阻抗，但由于测量的是  $10^{-8}$  量级的光脉冲，必须要求与连接示波器的电缆的阻抗相匹配。所以，负载的大小限制在  $50 \sim 100$  欧姆。

另一方面，对于所用的示波器要能够在  $100$  兆赫的带宽内触发扫描，而且还必须使示波管屏上的光斑明亮。对于这样宽带的示波器来说，因为放大器的灵敏度通常是小的，为了得到足够大的波形便于观察， $5 \sim 10$  毫伏输出就显得太小了。这时，如果不使用阴极跟随器，就将被人认为不熟练的实验工作者。图 8 表示出这种电路的一个例子。

但是，实际上，在波形的十分准确的观察上，带宽为  $100$  兆赫的示波器是不够的。

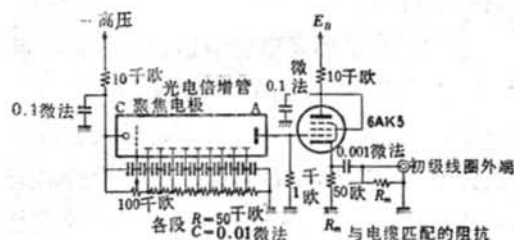


图 8 连结前置放大器的、测量光脉冲用的光电倍增管线路图的一例。

为了对波形进行更正确的研究, 总得借助于行波示波器(因为单扫描, 不用取样示波器)。带宽为 1000 兆赫的 519 型示波器, 就是一个例子。在这种情形下, 产生的新问题是示波器的灵敏度过低。519 型的灵敏度, 不超过 10 伏/厘米, 所以要用饱和电流为 1 安培的探测器。

合乎这种目的是阻挡层形光电管。这是在平板形状的金属阴极前面, 放置与其平行的平面状金属网眼作为阳极的光电管。入射光通过阳极的网眼到达阴极。因为电子的运动距离是一定的, 所以具有良好的高频特性。由于有效面积大, 故饱和电流高。

图 9 是使用这种光电管的测量装置的原理图。图上的电容  $C_1$ , 是放置在光电管近处的电流源,  $C_1$  的容量十分大, 它所贮存的电量应远大于测量一次脉冲时流过光电管的全部电量。这是因为与直流测量时不同, 电源的阻抗非要极低才行。使用光电管时采用自动稳压的高稳定性电源, 或者以负压供电, 通常被认为是画蛇添足之举。与光电倍增管不同, 光电二极管的灵敏度与电压无关(饱和电流与所加的电压有关), 所以高稳定电源不是必需的。其次, 象图上那样, 阳极供给正电压, 就可以方便的从阴极直接取出信号。此外, 光电管要求电源供给的平均电流是很少的。特别是, 如果注意到和电缆的连结方法, 用阻挡层形光电管测量, 得到的最高频率可达 1000 兆赫。

这种阻挡层形光电管最适合于测量巨脉冲。它在 0.35 微米到 1.13 微米的广阔波长范围上, 具有很平滑的灵敏度, 最大的峰值电流为 0.12 安培, 非常容易使用。上升时间为 4 毫微秒, 这是相当高的数值了, 缺点是下降时间为 15 毫微秒, 稍长了一些。但是曝光面积小, 只不过 0.073 厘米<sup>2</sup>。就是说,

在测量弱激光时, 直接入射是不合适的, 要接收从漫射面上反射来的散射光。

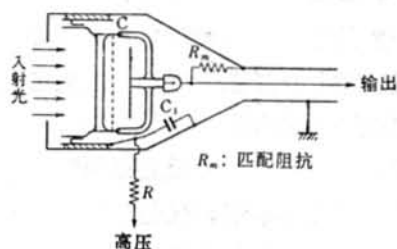


图 9 阻挡层形光电管的使用例子。

### 3.2 输出功率的测量

上述两种探测器, 都是很稳定的, 在作粗糙的测量时, 利用分附于每一只阻挡层形光电管的特性表或者对于 SD100, 使用它的平均灵敏度曲线, 就能测量出某种量级的输出功率。各个 SD100 的灵敏度, 彼此相差在 10% 以内。

如果要求 5% 以内的精确度, 每次测量都要校准, 校准的标准至今尚未确立, 但使用热量计是最适当的。原理是简单的, 放置两个相同的吸收盒, 一个作测量用, 另一个作为基准, 放置在同样的环境中, 当激光脉冲入射在一个盒子上时, 测量两个盒的温差的变化。用硫酸铜溶液作吸收剂, 它的吸收率高, 稳定度也高, 所以最合适。为了测量温差, 把热敏电阻封入两个盒, 用交流电桥测量阻抗变化方法, 能给出最好的灵敏度。

此外, 在各个盒中, 封入用不受硫酸铜腐蚀的聚四氟乙烯复盖的镍铬合金线, 对测量用的盒中的镍铬合金线通上已知的电量, 使之放电, 如果比较光入射后温度的上升, 就能够用零位法进行测量。

激光脉冲使盒的温度升高的同时, 必须考虑盒因放热而冷却。冷却速度愈慢愈好。在这种情形, 用苯乙烯等质量良好的绝缘材料绝热, 但别忘了热敏电阻和镍铬合金线的

接头上的热传导损失。

在这种场合,因为入射光而使盒的一部分加热,由于对流作用,使盒的各处温度相同,它与指数关系的冷却作用迭加,使两个盒的温差时间变化是拖着长尾巴的山形曲线。这时如果以上述的零位法,求出获得相似的温度曲线的电量,则可以不管各种不明确的数据(诸如盒的热容量,热损耗的比例等等),而得到精度很好的测量值。为此,要把交流电桥的不平衡输出进行位相检波,最好用接收器记录下来。如能对这种方法作进一步留意,并加上玻璃窗反射的修正值,对激光功率的测量就能具有1%以上的精度。

#### 4. Q开关激光器模的控制

下面谈谈Q开关激光器的高级技术。以前曾说过,Q开关激光器的输出,一般含有很多横模和纵模,光束的角发散约为 $10^{-2}$ 弧度,光谱宽度为 $1\text{厘米}^{-1}$ 左右。对于这样不纯的输出,只能用于单纯需要能量的一些粗糙的场合。所以,要控制激光的模,在单一横模和单一频率上得到高功率,这是要紧的事情。

##### 4.1 横模的控制

在限制横模方面,最好是把谐振腔加长,插入适当的光栏。但是,由于这时激光的有效面积变小,不能抑制住总输出功率的降低。通常宁可增加输出密度,聚焦的结果使辐射密度显著变大。另外,谐振腔长度的增加与脉冲宽度的扩展是成比例的,对于2米左右的谐振腔,很难得到宽度在100毫微秒以下的脉冲。

用这种方法,对于直径10毫米左右的红宝石激光器, $0.5\sim 1\times 10^{-3}$ 弧度总输出的角发散,是不难得到的。但是,红宝石的质量必须均匀。

掺 $\text{Nd}^{3+}$ 钇铝石榴石激光器,由于抽运效率高,在常温下得到1~2瓦的连续输出功率是不困难的。对于直径为3毫米左右的棒,能够得到单一的横模振荡。但是,此种晶体质量好的很少。

##### 4.2 单频振荡

用蓝宝石和玻璃标准具作模选择器,如果在操作上留意的话,能够比较容易的获得单频振荡。无论是把标准具作为一端的反射面也好,还是把两个标准具平行放置构成并列的标准具也好。为简捷地得到10~20兆瓦的单频输出,最好用使用染料的Q开关。用转动棱镜也能得到高功率的单频输出。这时,对红宝石的质量,必须要严格挑选。

##### 4.3 模的同步

激光器的振荡输出,对应于单一的横模振荡,还常常有彼此相距 $\Delta\nu = C/2L$ 频率的轴向模振荡。这些模的间隔,由于工作物质的饱和效应而在 $C/2L$ 附近发生不规则的变化,为了消除这种变化,要用所谓模同步技术。

模同步,用一句话来说,就是使用内部调制元件,以等于模间隔的频率对光束进行调制。研究最简单的调幅情形,由于 $1/\Delta\nu = 2L/C$ 恰等于光子在谐振腔中往返的时间,故振荡的振幅,在谐振腔中形成驻波。在这种状态,邻近模的振荡频率与本身的边频相合,导致极强的相互耦合。

其结果,输出成为重复频率是 $C/2L$ 的脉冲,脉冲的半宽度 $\tau$ ,在参加结合的模的数目 $N$ 愈多时就愈窄,当 $N \gg 1$ 时, $\tau$ 为<sup>[10]</sup>

$$\tau = 2L/CN \quad (4)$$

故输出功率的峰值极高。对于通常的红宝石激光器,这种脉冲的宽度约为 $2 \times 10^{-10}$ 秒。

对于使用可饱和染料的Q开关激光器,由于光束的强弱受到染料本身极强的调制,

因此很自然地,其内有很多同步的模。这叫自身模同步,特别是谐振腔的长度长, $C/2L$ 成为 500 兆赫以下时,容易发生。方法是,把染料盒放得尽量靠近长谐振腔的高反射率的反射镜,最好能适当的控制浓度。这时,把工作物质棒放在谐振腔的另一反射镜附近。由于不连续振荡,不能直接进行频率分析,用行波示波器和阻挡层形光电管观察波形,如果成为尖锐的脉冲,这就表明有自同步作用发生。另外,把这种脉冲波形进行精确的观测,能够知道是由多少个模结合起来发生的互锁效应。对这种情形,前面所讲的关于波形观测的注意问题仍适用。但是,要把宽为 0.2 毫微秒的脉冲波形,准确地用触发扫描来观察把 1000 兆赫的行波示波器和阻挡层形光电管结合起来使用是不够的。何况在这种目的上,使用通常的光电倍增管的读者也是有的。

具有对特别高的频率响应的光电倍增管,是有光电阴极的行波管。还没有见到市场上出售的适当的产品,在实验室,已制出有 35 千兆赫响应的产品。而制造通常的行波管的公司往往认为将阴极改成光电阴极是很省钱的事情。

这样,倘若得到了高频用的光电倍增管,而单扫描的示波器的响应如果仅仅是 1000 兆赫,在发生锁模的激光器的输出波形的观测上恐怕也是不充分的。但,反之,很明显,如果 Q 开关输出是以适当的重复周期有规则的被取出,采用采样示波器,到数千兆赫的观测是可能的。

至于实行模同步的激光器的应用,则有着种种设想,作为一个直接的例子是作高速照相的照明用。对于 2 米左右长的谐振腔,脉冲间隔为 13 毫微秒,而且由于每个脉冲都非常短,有每秒 7,500 万次的令人惊异的

速度,与适当形式的照相机并用,能够延长到 5~10 次的摄影。利用相干的性质,全光照相的高速摄影也是可能的。对于这种场合,因为脉冲宽度短,在作实验方案时,要注意输出已成为 10 厘米左右的短波束。

## 5. 光学谐波的产生方法

因为激光器的输出具有相干的高密度,能够得到过去想象不到的高辐射密度。在这样高的辐射密度作用下,在物质和光的相互作用上要表现出各种非线性现象,研究这些现象的性质就是所谓非线性光学,这是新产生的领域,已成为十分活跃的研究对象。

这种非线性现象,最盛行的是设法作为新技术加以应用。其中最具有代表性的是:把红色的红宝石激光变成紫外光以及由 1.06 微米的红外激光变成 0.53 微米绿光的、实际上有用的光学谐波发生法,下面仅就这方面的技术问题作一简单的介绍。对于二次谐波效率最高的非线性材料,现在知道得比较多一些。

作为效率高的非线性材料,已经知道的有 KDP、ADP、 $\text{LiNbO}_3$ 、钛酸钡(单晶)等。 $\text{LiNbO}_3$  的特征是:不仅非线性光学系数大,而且由于各向异性大,在广阔的波长范围上均能满足匹配条件,所以是非常良好的非线性材料。

目前,在日本实际上是用 KDP 和 ADP 产生二次谐波。这两种材料都有一些吸湿性,在温度高的场所使用时,应该注意。把它们按适当的角度切割并进行光学研磨,如果要把入射光入射的好,不要忘了匹配条件。也就是,入射光的波矢量  $\vec{K}_1$  和二次谐波的波矢量  $\vec{K}_2$ , 对于进行方向,必须满足下列条件

$$2\vec{K}_1 = \vec{K}_2 \quad (5)$$

通常的固体,因为有散射,在  $2\omega_1 = \omega_2$  的



情形, 条件(5)不被满足。于是, 利用各向异性。取 $\vec{K}_1, \vec{K}_2$ 中的一个为寻常光, 另一个为非常光, 若和晶轴成适当的角度, 上述条件就能够满足。

因此, 为了高效率地产生二次谐波, 必须正确选择晶体的方向。在产生红宝石激光的二次谐波情形, 满足匹配条件的方向是, 对光轴而言, KDP的 $\theta = 52^\circ \pm 2^\circ, \phi = 45^\circ$ 。

图10表示晶体的方向和二次谐波产生效率关系的测量例子<sup>[11]</sup>。特别要注意对于晶体的方向是如何的灵敏。实际上, 必须使用能够微调角度的支架, 以便进行充分的调节。例如, 最好应用晶体分析的测角器。使用Q开关激光器产生二次谐波的效率是很高的, 已达到10~20%, 对于连续振荡的固体和气体激光器, 一直都比这个值低。作为经验公式, 对于LiNbO<sub>3</sub>, 入射1.06微米的光, 产生连续的0.53微米光的情形, 二次谐波的功率 $P_2$ , 大概的数量级是

$$P_2 \sim 10^{-5} P_1^2 \quad (6)$$

基波的功率 $P_1$ 以瓦为单位。 $P_1 \sim 1$ 瓦时, 二次谐波为10微瓦左右, 如用10瓦左右的基波功率, 可能得到1毫瓦左右的二次谐波。

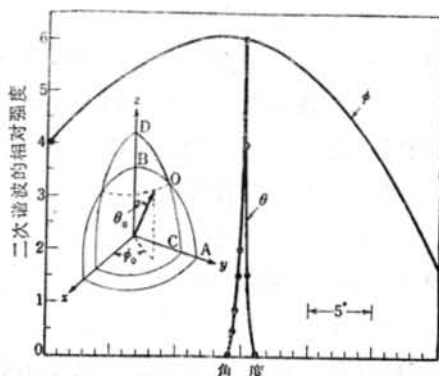


图10 使用KDP时, 红宝石激光的二次谐波产生效率与晶体的角度关系。  
(引自Maker等人的文献<sup>[11]</sup>)

## 6. 结 束 语

以上所介绍的, 是以笔者所在的研究室积累的经验为基础的Q开关激光器的情况。最近, 把量子电子学的技术用来作为广泛的物性研究的手段, 其势方兴未艾。希望此处所公开的技术, 能够为这种目的多少起些作用。

## 参考文献(共11篇, 略)

译自《物性》, 1967, 8, №2, 35~46

## 1967年物理领域中有关激光的研究情况

在《日本物理学会誌》1968年第2期上, 以“1967年各类专题的研究概况”为题, 介绍了去年日本及其它国家研究工作的进展情况; 今摘录其中有关激光方面的部分资料。

1967年, 日本在物理学量子电子学部分的专业会议上的报告数减少了很多, 而在应用物理学会及通讯学会上的报告则大大增加。究其原因, 一方面是因为前者对报告的要求较过去更为严格, 而另一方面, 则是由于激光本身所特有的大部分现象业已得到一

定程度的阐明。从物理学角度来看, 量子电子学在急剧地发展之后, 已有相当稳固的基础, 而相应的, 在应用物理及通讯方面的工作大大增加了。上述报告数的消长, 可能给人这样一种启示: 1968年将是量子电子学的研究接近于转折点的时刻了。今后, 有关物理方面的量子电子学的研究工作应朝什么方向进行, 这是摆在每个研究工作者面前的重大问题。看来, 如何把激光的特性很巧妙地应用到物理研究的各个领域, 将是今后