

示能量范围内的运转次数与总次数之比,统计总次数 29 次。由图可见,能量在 130~170 焦耳范围内的次数占运转总次数的 80%。实验所用的窗口锗片与图 8 相同。

激光能量是用口径  $\phi 110$  毫米的炭斗作接收器测量的。把四层不同规格的金属丝网固定在一起加在炭斗前作衰减器,其透射率用本器件直接进行标定。

### (2) 激光功率

测量了激光能量在 100~200 焦耳范围内的输出激光波形,图 10 是一张典型的示波器照片。实验所用的  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2=1:2:3$ ,总气压是 720 托; $E/P=5.4$  伏/厘米·托;激光输出能量为 150 焦耳。接收器是通光孔径  $\phi 25$  毫米的光子牵引探测器,其输出阻抗为 50 欧姆;示波器型号 SS-1101,测量时进入探测器的能量 40 焦耳。图中第一个尖峰是增益开关引起的,其半宽度约小于 0.5 微秒,峰值功率大于 60 兆瓦,次级最大的平均功率约 30 兆瓦,激光波形全宽度约 8 微秒。测量表明,当激光能量增加到约 200 焦耳时,波形

全宽度约 10 微秒。

### (3) 激光方向性

使用  $R=10$  米镀金铜反射镜和全光斑输出的平板锗单晶作窗口组成了稳定谐振

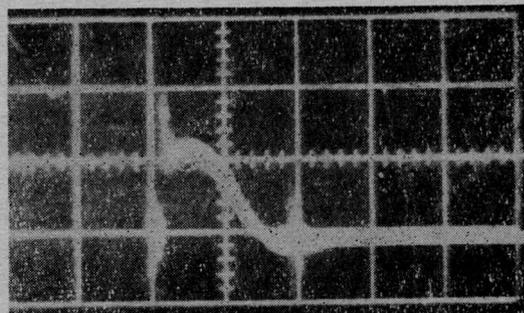


图 10 激光输出功率波形 横轴 5 微秒/大格;纵轴 0.2 伏/大格,器件气压 720 托;比份  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:2:3$ ;输出能量水平 150 焦耳; $E/P=5.4$  伏/厘米·托。

腔,腔间距 1.3 米。用  $R=3$  米反射镜的焦面光斑法测得激光束全宽度是 20~25 毫米。束宽较大的主要原因估计是高阶模振荡引起的。

## 普通直管氙灯泵浦的有机染料激光器

四川大学物理系光学教研室

### 提 要

用普通直管氙灯及普通高压脉冲电容器构成泵浦回路,研究了有机染料若丹明 6G、若丹明 B 在乙醇溶液中的激光振荡。实验中着重于研究影响激光效率及能量输出的基本因素,并作了相应的分析。

### 一、引 言

在目前的有机染料溶液激光器研究工作中,用闪光灯去激发是其一条重要的泵浦途径。随着研究工作的深入,闪光灯泵浦的染

料激光器正从难向易发展,而且有可能做成高能的调频激光器<sup>[1~3]</sup>。关于这类器件的特殊性及前景问题,我们已作专门分析<sup>[4]</sup>,并对其有关的一些问题进行了初步的实验研究。

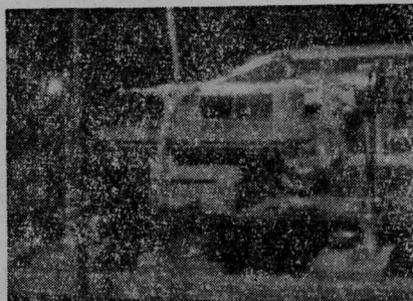
在这类器件的初期研制工作中,为克服

染料分子三重态的不良影响,对闪光灯及放电回路有着较为苛刻的要求,往往应用特殊结构的快速闪光灯和低电感的高压脉冲电容。随着研究工作的深入发展,这种状况正在逐步改变。在我们的工作中,应用普通直管氙灯及普通高压脉冲电容器构成的一般放电回路,研究了若丹明 6G、若丹明 B 在乙醇溶液中的激光振荡。实验工作主要着眼于研究影响激光输出及效率的基本因素。本文中报导了我们的实验情况,并作了相应的初步分析。

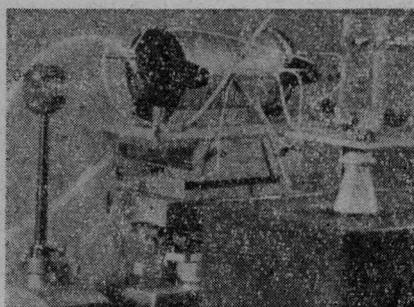
## 二、实验方案的基本考虑及实验装置

为了在较为简便的泵浦条件下,在有机染料溶液中产生较强的激光,在实验方案上作了如下基本考虑:首先在染料的选择上,选用了国际上使用较多的若丹明 6G、若丹明 B 染料。它们在乙醇溶液中有较大的增益,分别在黄色和红色区域的几百埃范围内可调频,并利用大气条件下溶解的氧就可有效地猝灭其三重态的影响。由于闪光灯泵浦的染料管一般较长,溶液折射率的不均匀性,将对激光器的工作带来较大影响。在猝灭了三重态影响的情况下,热引起的折射率不均匀性,将会成为染料激光器工作过程中的重要问题。为了尽可能削弱闪光灯泵浦的不均匀性所造成的影响,一方面要求染料管的直径不宜太大,另一方面要求有较为均匀的泵浦光源及聚光装置。显然,在紧耦合的聚光结构中,应采用双灯串联,与染料管对称配置。染料的光化学不稳定性,是目前染料激光器的另一个严重问题,它主要是由 2500 埃以下的紫外光所引起的。为减弱这种不稳定性,采用玻璃管作染料管,而且管壁厚些为好。由于若丹明 6G、若丹明 B 乙醇溶液的主泵浦吸收带,分别处于 4500~5500 埃、5000~6000 埃区域,故玻璃管对紫外光的吸收不会对泵

浦染料带来影响。厚壁玻璃管除了可更有效吸收紫外光外,还可增大细管中染料溶液对泵光的吸收效率。



(a)



(b)

图1 闪光灯泵浦染料激光器装置  
a—紧耦合泵浦装置; b—单圆柱泵浦装置

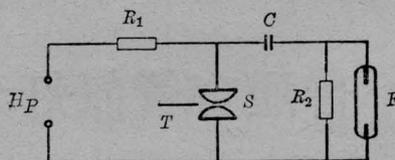


图2 闪光灯泵浦回路

F—闪光灯; C—储能电容; S—火花隙; T—触发器;  $H_P$ —高压电源(15千伏);  $R_1$ —高压限流电阻;  $R_2$ —高压充电电阻

在我们的实验中试验了两种类型的泵浦装置:一种是用两个普通直管氙灯串联,相对于染料管对称配置,用紧耦合聚光结构。灯的型号为 MX10-100,其外径为 10 毫米,放电弧长为 100 毫米。染料管是装配式结构,两端有金属头以固定窗片和安放染料溶液出入嘴。为与闪光灯相匹配,染料管由内径为 4 毫米,外径为 10 毫米的玻管作成,有效光照长度为 100 毫米;另一种装置用一个

MX14-160 型的直管氙灯,用单椭圆柱聚光结构。染料管内径为 4 毫米,有效光照长度为 140 毫米。在两种装置中,通过在放电回路中与氙灯串联火花隙来控制工作电压,并用一个 2 微法、15 千伏的普通高压脉冲电容储能。用宽带反射镜作成外腔式结构。在紧耦合泵浦装置中,泵浦光脉冲宽度约 30 微秒,单椭圆柱泵浦装置中,泵光脉冲宽度约 10 微秒。

### 三、实验结果及分析

研究闪光灯泵浦染料激光器的主要着眼点,不仅在于装置紧凑和操作简便,更重要的是希望得到大的可调频的激光输出。作为第一步工作,我们主要研究影响激光输出及效率的基本因素。

#### 1. 激光振荡的一般性质

实验表明,在我们的实验装置中,激光振荡性质随实验条件而有较大改变,尤其是由陈旧染料与新鲜染料所配溶液在性能上有较大差别。

在闪光灯泵浦的情况下,若丹明 B 可产生 6000~6400 埃范围的红光,中心波长在 6200 埃附近;若丹明 6G 可产生 5700~6100 埃范围的黄光,中心波长在 5900 埃附近。由于我们用的是 5600~6500 埃范围的宽带反射镜,故改变染料的浓度、溶剂及腔 Q 值时,所产生的激光颜色有明显变化。浓度增加时,振荡波长向长波方向移动。

在我们的装置中,对若丹明 6G、若丹明 B 的乙醇溶液(浓度为  $2 \times 10^{-4}$  克分子/升)而言,输出镜透射率为 20% 时,振荡阈值一般在 36 焦耳以下。

有机激光染料溶液的光学均匀性虽然较好,但由于闪光灯泵浦的不均匀性及溶液对光吸收的不均匀性所带来的热影响,会使其折射率产生非均匀变化,加之染料管较长,造成所产生的激光有较大的发散度,一般大

于 5 毫弧度。由于染料溶液对泵光的吸收系数大,激光增益也很高,染料管边缘部分总是先达到阈值,加之闪光灯相对于染料管是对称配置,故阈值附近的近场光样近似为圆环状。在染料浓度高时,这个现象更为明显。即使在高于阈值时,光斑边缘部分是个较强的环,如图 3 所示。



图 3 闪光灯泵浦染料激光器的近场光样

产生激光的效率,是我们关心的主要问题。在我们现有条件所决定的简单和较小的实验装置中,利用浓度为  $2 \times 10^{-4}$  克分子/升的若丹明 6G 乙醇溶液,在紧耦合聚光条件下,输入 100 焦耳的电能时,激光输出效率为 0.05%。在一些因素改进之后,效率提高到千分之几,看来是不会太困难的,详情见后面的分析。若丹明 B 染料本身的增益比若丹明 6G 低,在我们的实验中其效率为后者的一半左右。

在两种装置中,激光脉冲宽度约 6 微秒。

#### 2. 影响激光效率的因素

对于这个问题,我们作了如下几方面的研究:

##### (1) 染料的影响

染料分子是激光染料溶液的发光中心,它的好坏对激光性能有着重大的影响。实验表明,不同质量的同种染料配成相同的溶液时,性能有着较大的差别。例如,放了几年的陈旧若丹明 6G、若丹明 B 染料在乙醇中配成溶液时,同相同浓度的新鲜染料相比,振荡阈值有数量级的差别,而且稳定性极差,如表 1 所示。

应说明的是,我们所使用的染料是市售的一般试剂染料,均未再纯化。它们含杂质的情况是不清楚的,未同再纯化过的染料作

表 1 紧耦合泵浦装置中新旧染料对比

染料 ( $2 \times 10^{-4}$ 克分子/ 升的乙醇溶液)	振荡阈值 (输出镜反射率 为 85%)	激光输出 (输入 100 焦耳)
陈旧的若丹明 6G (出厂 10 年以上)	大于 200 焦耳	0
新鲜的若丹明 6G	小于 36 焦耳	~50 毫焦耳
陈旧的若丹明 B (出厂 5 年以上)	大于 140 焦耳	0
新鲜的若丹明 B	~36 焦耳	~20 毫焦耳

比较。上表中所用的新旧染料为不同厂家所出,除了出厂期相差很久外,含杂质的情况的差别是不清楚的。只是从总的效果来看,差别很大。

### (2) 染料浓度的影响

实验表明,染料浓度对激光效率有较大影响,存在着最佳浓度问题。它的数值同装置的几何结构、泵浦的强弱、谐振腔  $Q$  值的大小等因素有关。

图 4 示出了紧耦合泵浦装置中,在相同实验条件下,改变若丹明 6G 乙醇溶液浓度的效率曲线。从图上可看出,染料浓度一定时,激光输出随泵浦能量增加而增加,逐渐出现饱和趋势。出现这种情况,可能是由于泵浦能量增大时染料管中溶液对光泵的吸收逐渐达到饱和及泵浦的热影响加剧等因素产生的;从图上也可看出,泵浦能量一定时,激光输出最初随染料浓度增加而增加,达到一定浓度值后,再增大浓度时,反使激光输出降低,即存在最佳浓度。从图上可看出,最佳浓度随泵浦能量增大而降低,如泵浦能量为 120 焦耳左右时,它为  $1.5 \times 10^{-4}$  克分子/升,而泵浦能量为 80 焦耳左右时,它为  $2.5 \times 10^{-4}$  克分子/升。

关于最佳浓度问题,可作如下定性分析:在泵浦能量一定时,从极低的浓度出发,当染料分子的浓度增加时,被管中的染料溶液所吸收的光泵起初随浓度增加而增加,从而导致激光输出相应增加。当浓度增到某一定值时,管中溶液对泵光的吸收达到了饱和。进一步增大浓度不会改变管中溶液所吸收的泵

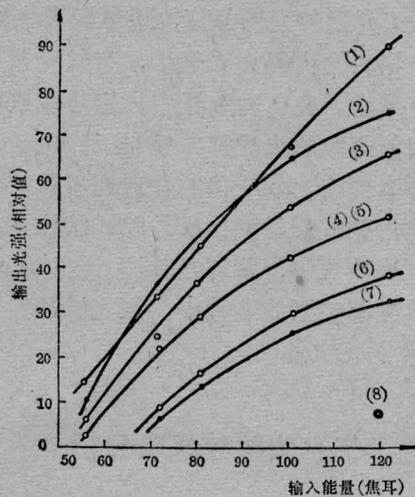


图 4 紧耦合泵浦装置中,改变若丹明 6G 乙醇溶液的染料浓度(克分子/升)时的效率曲线,输出镜的透射率为 20%。

- (1)— $1.5 \times 10^{-4}$ , (2)— $2.5 \times 10^{-4}$ , (3)— $1 \times 10^{-4}$ ,  
(4)、(5)— $6 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ , (6)— $3 \times 10^{-5}$ ,  
(7)— $1 \times 10^{-3}$ , (8)— $1 \times 10^{-5}$

光总量,因而不会引起激光输出再增大。相反地,它会导致吸收泵光的饱和区域向管壁靠近,集中到更小的区域中,从而造成泵浦期间溶液的热不均匀性增大。更重要的是,再增大浓度时,由于染料分子间产生缔合群,或由于受激染料分子在分子间产生能量的共振转移,都会对发光造成所谓浓度猝灭现象,导致激光输出的下降。关于最佳染料浓度随泵能的增大而降低问题,也可从浓度增大时的吸收饱和、浓度猝灭、热引起的不均匀性增大等方面因素来解释。

### (3) 氧气分子的影响

对若丹明 6G、若丹明 B 染料而言,氧气分子是其很好的三重态猝灭剂。在大气条件下所配制的溶液中,已经含有被空气中的氧所饱和的氧气分子。为确定氧气分子所起作用的情况,我们作了如下两方面的实验:

一是将被空气中氧所饱和的若丹明 6G、若丹明 B 的乙醇溶液,在 200 毫升容积的储液池中,以流速为 1 升/分的氮气流起气泡式充氮 10 分钟时,由于溶液中的氧气分子被氮气

流“洗掉”，两种溶液的激光输出都大大变弱，如图 5 所示。

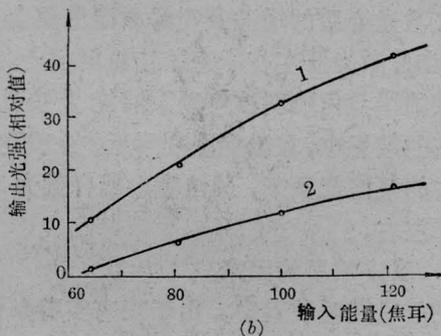
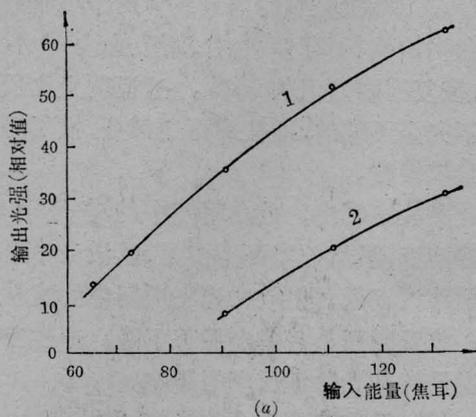


图 5 在紧耦合装置中，对若丹明 6G(a)、若丹明 B(b)的乙醇溶液( $2 \times 10^{-4}$  克分子/升)，以 1 升/分的氮气流将大气条件下饱和的氧“洗掉”时，激光输出的变化。曲线 1 是大气中氧饱和情况；曲线 2 为充氮 10 分钟后的情况

另一实验是，将 200 毫升被大气中氧所饱和的若丹明 6G 乙醇溶液，以 1 升/分流速的氧气流在储液池中起泡式充氧，使其含氧量增加。实验表明，在我们的具体条件下，充氧时间为 1 分钟时，溶液的激光输出无变化。此后随充氧时间加长而逐渐使激光输出降低，充氧 14 分钟时激光输出降低 1 倍左右。将这种充氧溶液在空气中放几小时，使其同大气中的氧达到新的平衡时，激光输出又恢复到未充氧前的情况。实验中也发现，将新配好的溶液在空气中放几个小时后，激光输出有所增加，如图 6 所示。这种情况，可能与

大气中的氧在新配溶液中的溶解状况或氧分子同染料分子的作用情况的变化有关。

在我们的两种实验装置中，反复实验均发现上述情况。我们认为，对我们所使用的实验装置而言，看来若丹明 6G、若丹明 B 的乙醇溶液被空气中的氧所饱和时，情况已经比较好了。再充少量的氧可能有好处，但充过量的氧是不利的，因为氧分子不仅猝灭三重态，而且也会猝灭单态，所以有个适量问题。当然，不同实验条件下，对充氧的要求会是不一样的。

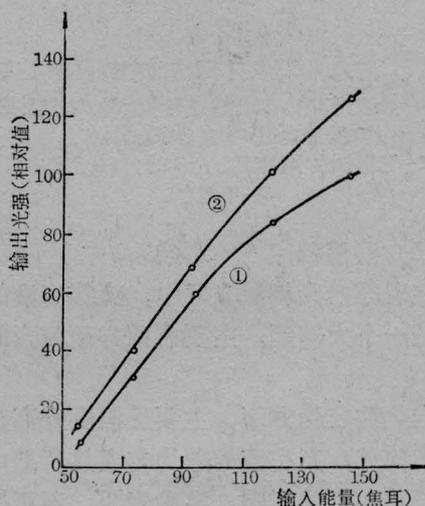


图 6 新配染料溶液在空气中放几小时后输出特性的变化

(单椭圆柱聚光结构，浓度为  $1 \times 10^{-4}$  克分子/升的若丹明 6G 乙醇溶液，输出镜透射系数为 20%)。曲线①为刚配制的染料溶液，曲线②为在空气中放置几小时后的染料溶液

#### (4) 溶剂的影响

染料分子的光学性质，同其周围环境即溶剂及其他杂质有密切关系。在紧耦合泵浦装置中，我们试验了若丹明 6G 在甲醇、乙醇、乙醇加水的混合剂中，在相同浓度下的效率曲线，如图 7 所示。从中可看出，乙醇溶液的阈值最低。甲醇溶液阈值比前者稍高，但斜率大。在乙醇与水(体积为 3:1)的混合溶剂中阈值最高，斜率处于前二者之间。由于甲醇有毒性，故使用上不太适当，而在乙醇与

水的混合溶剂中,从总体效率来看它比不上乙醇溶液。

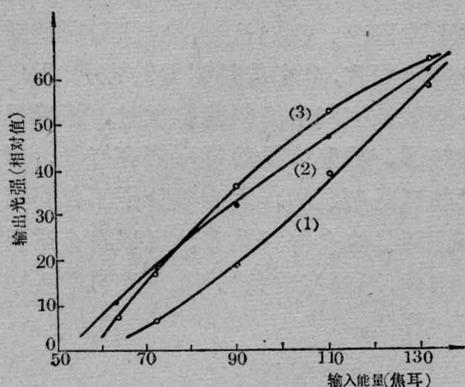


图7 若丹明6G在不同溶剂中的效率曲线  
(紧耦合聚光结构,输出镜透射率为20%,染料浓度为 $2 \times 10^{-4}$ 克分子/升),  
1—乙醇加水(体积比为3:1); 2—乙醇中;  
3—甲醇中

### (5) 溶液稳定性的影响

在现今的染料激光器中,染料溶液的稳定性是一个大问题,主要有两方面因素的影响:

在热稳定性方面,主要受温度升高产生的温度猝灭,及溶液的非均匀变热所造成折射率不均匀性的影响。实验表明,不更换染料管中的溶液时,在紧耦合泵浦装置中,即使以1分钟或几分钟间隔重复泵浦,激光输出会大大降低,光束发散度大大增加。对放置很久的陈旧溶液而言,这个问题更为严重。实验也表明,在乙醇中若丹明6G的热稳定性比若丹明B好。这是因为若丹明6G在乙醇中的荧光量子效率为85~95%,并且同温度无关,它对泵光吸收的绝对值也不受温度影响。而若丹明B在乙醇中荧光量子效率为40%左右,并且随温度升高而降低。

在光化学稳定性方面,主要受紫外光的影响。在我们的紧耦合装置中的实验表明,不更换染料管中的溶液时,在100焦耳的泵浦能量下,经过100次照射后,新配的若丹明6G乙醇溶液( $2 \times 10^{-4}$ 克分子/升)的激光输

出降低到初始值的10%。实验是在溶液充分冷却,排除了热影响的情况下进行的。上述经过100次光照的溶液放了两个小时后恢复到初始值的25%左右。经过约20小时后,恢复到初始值的75%。这说明光化反应是不完全可逆的,即使那可逆部分,恢复时间也是较慢的。

实验中看出,放在暗室中的若丹明6G乙醇溶液,虽然放了两个多月,其激光输出与新配溶液接近,但放在光亮房间中的这种溶液,放置时间久后输出显著下降。产生上述情况显然是光化学反应的影响。

### (6) 最佳输出耦合的影响

在激光介质的增益及腔的非输出耦合损耗一定时,激光器存在一个最佳输出耦合。染料溶液的增益由染料浓度及泵浦能量决定。在我们的装置中,在最佳浓度附近,在100焦耳左右的泵浦能量下,最佳输出耦合值为15~20%左右。

## 3. 改进效率的因素

在前述实验装置中,由于现有实验条件所限制,还存在一些影响激光效率的因素。在进一步改进之后,将激光效率提高到0.1%以上,看来是不太困难的。

### (1) 改进氙灯的参数

我们所用的氙灯是固体激光器用的普通直管氙灯,工作电压一般在1000~1500伏左右,此时在可见光区域才有较高的发光效率。而我们的装置中,工作电压高达上万伏,其紫外光的成分太多,与若丹明6G、若丹明B在可见光区域的主吸收带匹配不好。为提高效率,需要适当增高工作气压,提高其在染料泵浦带中的发光效率。此外,氙灯电极的抗溅射性能也有待改进。

### (2) 改进实验装置

在我们所使用的装配式染料管中,两端的非光照区太长(3厘米左右),这会对激光造成自吸收损耗。谐振腔内的各种非输出耦合损耗也太大,在进一步改善有关元件的质

量之后,增大输出也是有潜力的。在我们的单椭圆聚光结构中,由于现有的氙灯直径大而染料管细,相互匹配不好,也是影响效率的一个因素。当然,若是采用同轴型的快速闪光灯及低电感的高压电容束压缩泵浦上升及持续时间,无疑将很有利于提高效率。

### (3) 使用高质量染料

实验中发现染料质量不同时,激光输出有很大差别。若使用新鲜的高纯度染料,将会有利于激光输出的提高。

## 四、结 束 语

实验表明,只要选择质量较好的若丹明6G、若丹明B染料,在合适的工作条件下,用普通直管氙灯及高压脉冲电容所构成的泵浦回路,能在黄色和红色区域中产生较强激光。在一些实验条件改进之后,有可能得到接近

一般固体激光器的效率。由于染料溶液是液态介质,工作条件的灵活性较大,影响发光的因素也很多,所以有许多问题待进一步系统研究。

最后要指出的是,在我们的工作中也看到,用泵浦红宝石及钽玻璃的普通实验装置,即在低电压、大电容的长脉冲放电情况下,只要条件适当,也能产生较强激光。有关问题,将另作分析研究。

## 参 考 资 料

- [1] P. P. Sorokin, *et al*; *J. Chem. Phys.* 1968, **48**, p. 4276.
- [2] B. B. Snavely, *Proc. IEEE.*, 1969, **57**, p. 1374.
- [3] F. P. Schäfer, *laser handbook*, **1**, F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois, Ed. pp. 369~423.
- [4] 闪染,“闪光灯泵浦染料激光器的基本分析”,待发表(四川大学物理系)

(上接第44页)

橡皮塞12,并将其上皮翻到水冷套铜头外(从图示虚线位置翻至实线位置)。橡皮塞的A部与水冷套铜头密封接触;B部与棒套管密封接触,而B部位于水冷套铜头外面。因此,橡皮塞的A部直径可稍大于水冷套铜头内径;B部直径可稍小于棒套管的外径。这样,既提高了水密性能,也不会因在水冷套铜头内的橡皮塞内外部分都压得过紧而造成装拆困难。

这种结构的特点是不用粘结剂,因而不需要固化时间,故更换激光棒与水冷套都十分迅速方便,也避免了因粘结剂污染而造成棒的损坏,适合于如激光打孔机等定型器件使用。根据我们两年多的使用情况来看,只要安装正确,结构未出现过漏水,在浓度0.5%的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液中浸泡的橡皮元件也未老化。此结构所使用的橡皮塞,由我组根据激光棒的尺寸设计模具,在橡胶厂压制成的。模

具结构十分简单,材料为45#钢,普通车床即可加工。

在使用过程中也发现了一些问题:

1. 此结构零件较多,体积较大,对一根 $\phi 8$ 毫米直径的激光棒,水冷管的最大外径为 $\phi 25$ 毫米左右,因此,单椭圆聚光腔的焦点间距大于25毫米,聚光腔尺寸也变大了。

2. 由于封装占去棒的部分大约在15~20毫米的范围内,一根长185毫米的激光棒,被氙灯辐照的有效长度则只有165~170毫米左右,因而器件效率降低,故这种结构只适用于棒较长的器件。

3. 因橡皮在挤压时有微小蠕变,故用橡皮塞支撑激光棒,其长期稳定性不及刚性支撑的棒。

4. 由于结构的零件是对特定规格的激光棒设计的,因此不大适合规格较多的实验室器件。