

# 同轴型脉冲氙灯的进展

查 贵 根

(中国科学院上海光机所)

## Progress in coaxial pulsed xenon flashlamps

*Tsa Guigen*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

### Abstract

Development process of coaxial pulsed xenon flashlamps both at home and abroad is reviewed. Configuration, test of performances and results of coaxial pulsed xenon flashlamps and comparison with linear pulsed xenon flashlamps are given.

### 一、国内外有关同轴型 脉冲氙灯发展概述

1963年、1964年美国 Church 和 Lensick 连续报导<sup>[1,2]</sup>了同轴氙灯的研制,并与直管氙灯泵浦进行了比较。1965年日本难波进报导<sup>[3]</sup>用同轴灯泵浦的焊机试制成功,长150~200毫米,输出10~20焦耳,最大输出达100焦耳,效率为4%,这是工业应用较早的报导。1966年美国西屋公司连续发表强而有效的泵浦灯——同轴灯的研制报告<sup>[4,5]</sup>。同年,“国际电子学”杂志报导<sup>[6]</sup>的高能同轴灯泵浦的激光器,采用可拆式、多个钨电极头的同轴灯,弧长900毫米,激光器泵浦阈值为5000焦耳,当输入25000焦耳时,激光输出为1000焦耳,最高效率可达5%。同年,日本已制成效率达5.1%、输出为100焦耳的高能同轴型激光器<sup>[7]</sup>。1967年苏联报导<sup>[8]</sup>定型产品 ИФПП-700 型同轴灯,其正常

工作能量6000焦耳,泵浦 $\phi 14 \times 120$ 毫米的工作物质,并采用漫反射器,文章对过渡玻璃、帽式和铝箔三种封接的同轴灯进行了比较,并对反射层和极限能量的关系进行了研究。同年,美国 Vincent 报导<sup>[9]</sup>采用橡皮或软金属密封的可拆式同轴灯装置,全部放电时间只有45微秒,这就可使整个激光过程在工作物质热畸变尚未开始就完成了。1968年美国 Mastrup<sup>[10]</sup>强调同轴灯在功率器件中的应用,并采用电压压缩将放电箍缩在同轴灯管壁之间,功率密度达 $10^5 \sim 10^6$ 瓦/厘米<sup>2</sup>,等离子体温度可达60,000K,灯阻抗为0.17欧姆,光泵上升前沿为20~200微秒,峰值功率达50~100兆瓦。1970年 Kalinin 发表“同轴灯泵浦固体激光器的效率”的文章<sup>[11]</sup>,对同轴灯泵浦效率进行了理论研究,并给出漫反射系数 $\rho = 0.5, 0.7, 0.9$ 时,不同尺寸灯的效率结果。1972年苏联 Апаньев 报导<sup>[12]</sup>可拆式大能量同轴灯泵浦的激光器,泵浦

收稿日期:1978年11月23日。

$\phi 45 \times 600$  毫米的工作物质时, 获得 1500 焦耳激光输出, 效率达 4.3%, 当输入 17000 焦耳时, 最高效率达 4.5%。同轴脉冲氙灯的研制在国内也是很早的。1963 年中国科学院物理研究所报导采用同轴灯成功地泵浦  $\phi 5 \times 40$  的红宝石激光器<sup>[13]</sup>。1966~1974 年中国科学院上海光机所在高能同轴型激光器上作了不同封接方式、网络匹配、反射层研究、外管材料的选择、总体性能的测试等多项工作, 并取得了一定的成果。1969 年中国科学院物理研究所成功地采用同轴灯泵浦窄带染料激光器<sup>[14]</sup>。1974 年西北工业大学报导同轴灯泵浦的激光器, 输入 1080 焦耳, 效率为 2.8%。同年 Kirsanov 发表<sup>[15]</sup>“脉冲放电负载极限”的文章, 报导了同轴灯极限负载的经验公式。1976 年日本前田三男报导<sup>[16]</sup>同轴灯在染料激光器中的应用。1977 年苏联 Басов 发表“直管灯和同轴灯对染料激光器泵浦比较”的研究报告<sup>[17]</sup>, 给出了染料激光器使用的同轴灯间隙和气压的关系曲线。同年, 苏联 Жолобов 报导<sup>[18]</sup>大功率器件上使用的可拆式同轴灯激光器, 当泵浦  $\phi 45 \times 920$  毫米工作物质, 脉冲宽度为 250 微秒时, 获得激光功率 2.5 兆瓦, 效率 3.3%。1978 年上海复旦大学发表“同轴灯泵浦的染料激光器”研究报告, 采用若丹明 6G 酒精溶液作激活介质, 得到 1 焦耳激光输出, 效率 0.59%。近年, 中国科学院物理研究所也报导了“可拆式同轴闪光灯泵浦的染料激光器”, 泵浦若丹明 6G 染料, 激光输出为 10 焦耳, 效率达 1.3%。

同轴灯是在两支同轴石英管之间放置电极密封而成。它的特点是放电层薄、阻抗小、电流密度大, 有比直管灯上升前沿快得多的发光波形, 在一定的条件下发光比较均匀, 并可产生发散角比较小的激光束, 因此特别适用于高质量的功率器件及要求快速上升前沿的染料激光器。

## 二、同轴灯结构型式和供电回路

### 1. 同轴灯结构型式

图 1 所示的是过渡玻璃封接的同轴灯, 电极头 1~4 个, 灯管外径 50 毫米左右, 由于电极数量有限, 使该类封接的同轴灯放电不很均匀, 一般适用于小器件, 上海复旦大学的染料激光器就是采用该类封接的同轴灯。

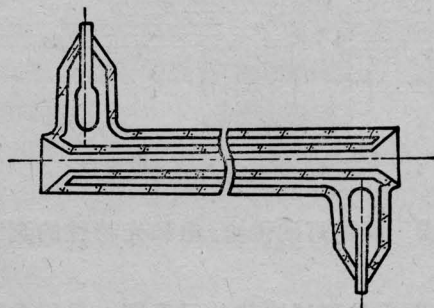


图 1 过渡玻璃封接的同轴灯

图 2 所示的为铝箔封接的同轴灯, 电极数量多, 放电间隙小, 因此比较适用于功率器件。尺寸加大, 封接困难, 且电流密度也受铝箔尺寸限制。

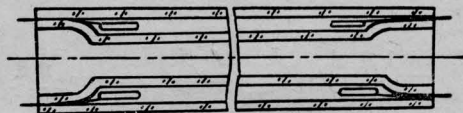


图 2 铝箔封接的同轴灯

图 3 所示的是帽式封接的同轴灯, 电极数量和灯电流不受灯的尺寸和封接方式的限制, 它适用于直径小于 100 毫米的同轴灯, 直径加大, 封接比较困难。

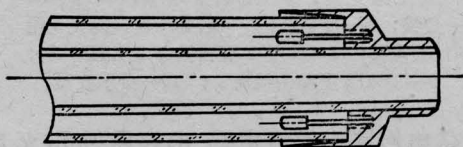


图 3 铜帽封接的同轴灯

图 4 为可拆式同轴灯, 采用橡皮或软金属“O”型环密封, 此封接对损坏元件能进行

更换,比较经济,适用于较大的器件。

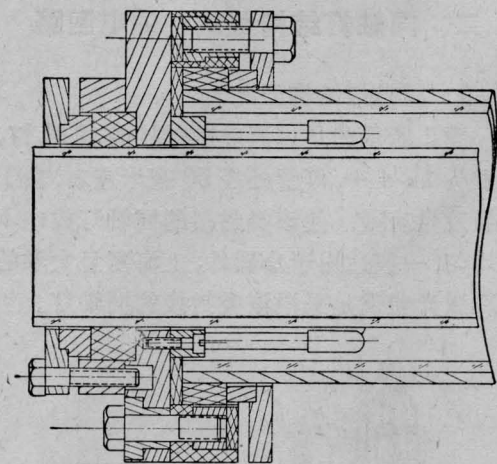


图4 可拆式封接的同轴灯

## 2. 同轴灯的供电、电和光特性的测试方法

图5是测试线路的示意图。采用电阻分压器测放电电压波形;在同轴低感分流器取样放电电流波形;用置于光轴的石墨卡计测灯辐射到内腔的光能量,卡计温度用热偶测量;用铍玻璃棒的荧光测铍吸收带中的光能量;利用灯内腔光轴上设置的反射镜子来判断同轴灯辐射到内腔的照明均匀性。

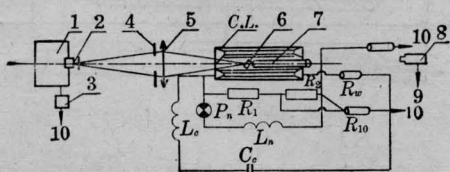


图5 测量示意图

C.L.—同轴灯;  $L_c$ —镇流电感;  $C_e$ —供电电容器组;  $L_n$ —触发高压变压器;  $R_w$ —同轴低感分流器;  $R_1, R_2$ —电阻分压器;  $P_n$ —空气球隙;  $I$ —单色仪;  $2$ —中性滤光片;  $3$ —光电倍增管;  $4$ —光阑;  $5$ —透镜;  $6$ —反射镜;  $7$ —石墨卡计或测荧光用的铍玻璃棒;  $8$ —HW-1型石英窗口热辐射计;  $9$ —AC4/3型冲击检流计;  $10$ —接示波器

供电回路由镇流电感、电容器组和充电电源组成,适当改变单节LC或多节LC仿真网络的电感或电容量,即可改变网络阻抗,达到与灯阻抗匹配或失配。

## 三、同轴灯的放电阻抗和负载特性

### 1. 同轴灯的电特性

同轴灯的电学特性与直管灯几乎一样<sup>[14]</sup>(见图6)。由于同轴灯放电阻抗远小于直管灯,因此,同轴灯的转换效率比直管灯低。直管灯转换效率为70~90%,同轴灯转换效率一般为40%左右,适当改变电感或电容量,可将传输效率提高到60~80%左右。

按图5测量线路测得同轴灯亮度温度和电流密度的关系曲线示于图7,图中电流密度的升高将导致亮度温度的单调上升。当电流密度继续上升,使同轴灯的辐射接近黑体辐射时,亮度温度将趋于饱和。

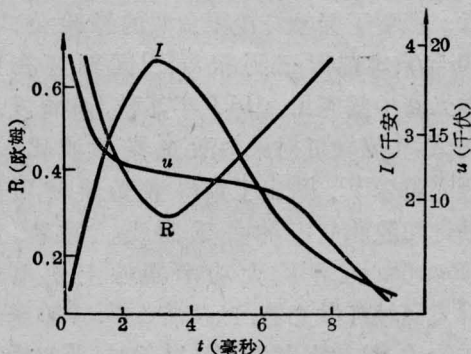


图6 同轴灯的伏安特性曲线和放电特性阻抗曲线

同轴灯:  $\phi_{内} 50 \times 810$  毫米; 间隙  $d=7.5$  毫米;  $P_{X_0}=160$  托

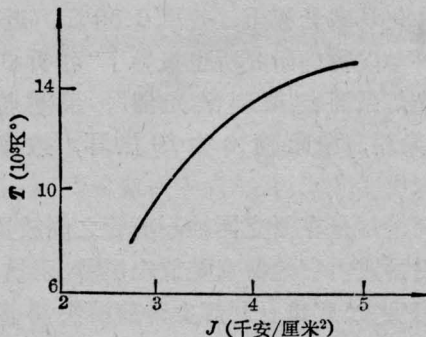


图7 同轴灯亮度温度  $T$  和电流密度的关系曲线<sup>[12]</sup>  
(在  $\lambda=620$  微米;  $\Delta=20$  微米范围内测量)

同轴灯:  $\phi_{内} 70 \times 920$  毫米; 间隙  $d=7.5$  毫米;  $P_{X_0}=70$  托

和直管灯一样,同轴灯的辐射光谱随电流密度而定。

## 2. 同轴灯的极限能量

同轴灯的极限能量取决于管壁材料的强度、灯的几何尺寸和放电回路的参数。一般说来,同轴灯的极限能量随管壁的强度、间隙厚度和弧长的增加而增加,但过分的增加间隙,导致放电不能充满整个沟道,将使效率反而下降。

在不改变灯的电位梯度时,增加回路电容或电感,将导致灯的极限负载增加,这是由增长发光时间、降低灯的峰值功率而换取的。

Кирсанов<sup>[15]</sup>曾对极限负载进行研究,取得了极限负载与间隙厚度关系曲线(图 12)及经验公式:

$$W_{\max} = 3250 \times 2\pi \times (r + r_i) \sqrt{\frac{r - r_i}{r}} l \sqrt{\tau}$$

式中  $W_{\max}$  为同轴灯极限负载,单位为焦耳, $l$  是极间距, $r_i$  及  $r$  分别是内、外管半径,单位是厘米, $\tau$  为闪光时间,单位是秒。以上海光机所的同轴灯为例: $\phi_{\text{外}}50 \times 810$  毫米,间隙  $d=7.5$  毫米,壁厚 2.5 毫米(图 8),实验测得极限负载  $70 \times 10^4$  焦耳。按 Кирсанов 经验公式估算得  $50 \times 10^4$  焦耳,与实验值相比误差小于 30%。

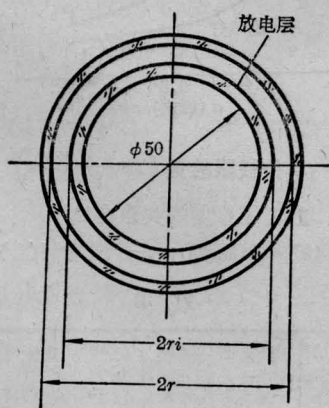


图 8 同轴型脉冲氙灯横截面示意图

## 3. 同轴灯的寿命

对图 8 所示的同轴灯,  $P_{Xe}=160$  托,极

限负载为  $70 \times 10^4$  焦耳,工作在  $30 \times 10^4$  焦耳时,寿命为 200 次左右;而  $\phi_{\text{外}}80 \times 830$  毫米,间隙  $d=21.5$  毫米,  $P_{Xe}=120$  托,极限负载为  $120 \times 10^4$  焦耳的同轴灯,运行在  $70 \times 10^4$  焦耳时,寿命为几十次;难波进<sup>[3]</sup>在小器件上作了实验,当极限能量为 100 焦耳,运行在  $10 \sim 20$  焦耳时,灯寿命为 5000 次。

Goncz<sup>[19]</sup>认为,当直管灯利用系数为 60% 时,寿命为百次左右;利用系数为 40% 时,寿命为千次左右;利用系数为  $10 \sim 20\%$  时,寿命达  $10^5 \sim 10^6$  次。

由于石英管的抗张强度与管径成反比,管径加大,抗张强度反而降低;对于管径较大的同轴灯,封接处的应力要比直管灯大;同时,同轴灯放电时间比较短,放电时产生的冲击波要比相应的直管灯大,因此,同轴灯的外管壁比直管灯更易破坏,因此,同轴灯的寿命比直管灯低些。

## 四、同轴灯工作参数对灯特性的影响

### 1. 氙气压力的影响

初始氙气压力严重地影响灯的极限负载。当同轴灯<sup>[18]</sup>( $\phi_{\text{外}}70 \times 920$  毫米、间隙 5 毫米、壁厚 5 毫米)初始氙压是 250 托、输入  $(7 \sim 8) \times 10^4$  焦耳能量时,灯就要爆炸,而氙压下降到 80 托时,同样这些能量,灯却能正常工作。

图 9 表示用石墨卡计测得的同轴灯光辐射积分输出与氙气压力的关系<sup>[18]</sup>。曲线表明:氙气压力从几十托增加到近百托时,由于光输出迅速增加,同轴灯的辐射效率显著增加。这对于选择同轴灯氙气压力时,意义是很大的。

由图 10 显见,氙气压力变化显然影响灯的放电阻抗。随着氙气压力的增加,内阻升高,放电峰值电流也相应下降。典型数据示于表 1。

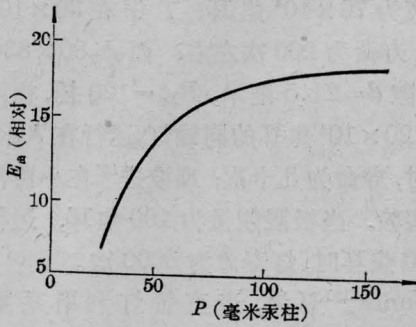


图9 同轴灯光辐射的积分输出和  
氙气压力的关系

同轴灯:  $\phi_{\text{内}}70 \times 920$  毫米,  $d=5$  毫米,  $\delta=5$  毫米;  
放电回路:  $C=3000$  微法,  $L=1$  微亨,  $V=6$  千伏

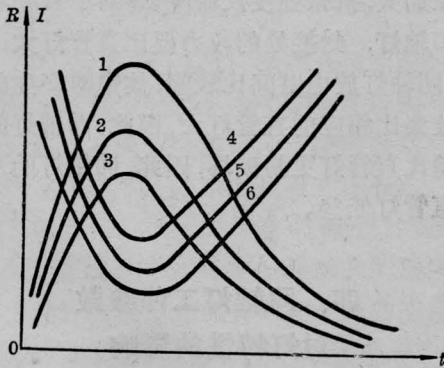


图10 不同氙气压力下同轴灯的阻抗  $R$  和  
灯电流  $I$  与时间的关系曲线

同轴灯:  $\phi_{\text{内}}50 \times 810$  毫米;  $d=7.5$  毫米;  $\delta=5$  毫米  
1— $I$ (120 托); 2— $I$ (160 托); 3— $I$ (250 托);  
4— $R$ (250 托); 5— $R$ (160 托); 6— $R$ (120 托)

表 1

氙气压力 (托)	峰值电流密度 (千安/厘米 <sup>2</sup> )	灯的有效阻尼 (欧姆)
250	32	0.25
160	40	0.20
120	48	0.17

由图 11 看出, 同轴灯发光波形随氙气压力的变化存在着上升时间的最佳值, 而且氙气压力超过该值后, 同轴灯闪光脉冲的上升时间总是小于直管灯。这是由于在相同线长度时, 同轴灯放电阻抗要比直管灯小而造成的。

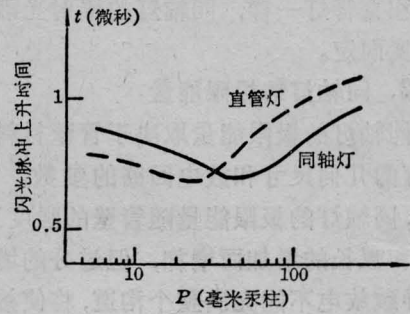


图11 同轴灯闪光上升时间与氙气压力的关系<sup>[16]</sup>

同轴灯:  $\phi_{\text{外}}8.7$  毫米,  $d=1$  毫米; 直管灯  
 $\phi_{\text{外}}5.5$  毫米 泵浦能量:  $W=120$  焦耳;  
放电回路电感尽量小

## 2. 放电层—间隙厚度的影响

放电层对同轴灯的极限负载和光效是有影响的。当点燃线路和其它尺寸不变时, 极限负载随间隙增加而增加, 间隙过大, 极限能量趋于饱和<sup>[15]</sup>(图 12)。实验数据示于表 2。表中 1# 灯和 2# 灯的氙压各为 160 托和 120 托, 引起发光时间相应为 10 毫秒和 8 毫秒, 而氙气压力在 160 托和 120 托之间变化, 极

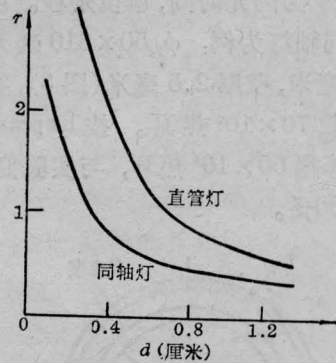


图12 单位极限能量 ( $r = \frac{W_{\text{极限}}}{V\sqrt{\tau}}$ ) 与  
放电层厚度的关系曲线

$V$ —放电层体积(厘米<sup>3</sup>);  $\tau$ —闪光时间(秒)。

表 2

灯号	壁厚 $\delta$ (毫米)	间隙 $d$ (毫米)	弧长 (毫米)	氙气 压力 (托)	发光 时间 (毫秒)	极 限 能 量 (焦耳)
1	5	7.5	810	160	10	$70 \times 10^4$
2	5	21.5	830	120	8	$120 \times 10^4$

限负载变化很小,可不予考虑。而1#和2#灯弧长仅相差2.5%,当间隙变化三倍时,极限能量可以从 $70 \times 10^4$ 增加到 $120 \times 10^4$ 焦耳。

由图12<sup>[15]</sup>可查得一定放电层厚度时同轴灯的极限负载。放电层与辐射效率的关系曲线示于图13,显见,间隙与辐射效率的变化关系极其显著,对一定几何尺寸的同轴灯,存在着最佳间隙厚度,它使光脉冲强度达到最大,辐射效率达到极大。通常在相同线长度、且发光体积相同时,由于同轴灯表面积比直管灯大得多,因此,其辐射效率稍低于直管灯。直管灯辐射效率60~70%;同轴灯为43~64%。

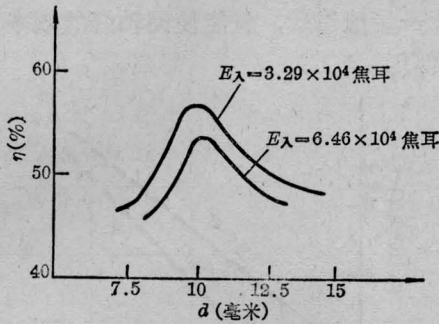


图13 同轴灯放电层厚度与辐射效率的关系曲线

同轴灯:  $\phi_{内} 50 \times 810$  毫米;  $P_{Xe} = 125$  托。  
供电状态:  $C = 10540$  微法;  $L = 150$  微亨。

### 3. 输入电能的影响

不考虑回路传输效率,进灯能量取决于电容器储能。对一定的氙气压力和灯的尺寸,存在着最佳输入电能,超过此能量,灯的发光效率反而下降。这是由于输入电能的增加,导致灯内电能密度升高,使灯的辐射接近于黑体辐射,输入电能继续增加,辐射将不再增加,使效率下降,典型曲线示于图14<sup>[16]</sup>。

### 4. 反射层的影响

图15<sup>[18]</sup>是同轴灯( $\phi_{内} 70 \times 920$  毫米;  $d = 5$  毫米)间隙厚度与亮度的关系曲线。显然,漫反射比无反射层的同轴灯效率可提高1.5~2倍。还可以看出:间隙从5毫米增加到10毫米时,亮度温度将提高2.5倍左右。

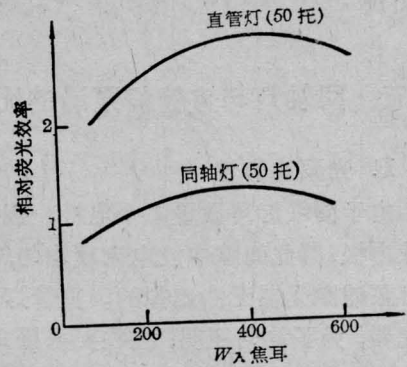


图14 灯的发光效率与输入电能的关系

同轴灯:  $\phi_{内} 8.7$  毫米,  $d = 1$  毫米;  
直管灯:  $\phi_{内} 5.5$  毫米  
(纵轴是发光能量与输入能量之比)

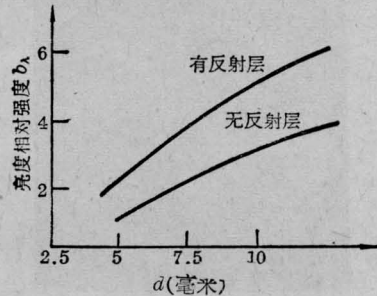


图15 有和没有反射层时,间隙厚度与辐射到同轴灯内腔的亮度温度的关系曲线<sup>[18]</sup>

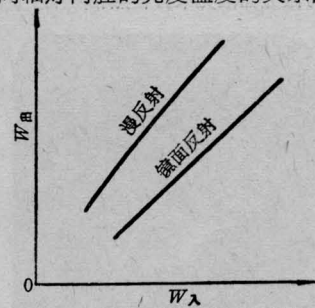


图16 不同反射方式对同轴灯激光器总体输出的影响

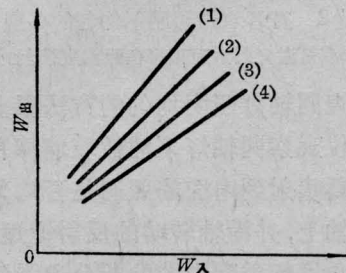


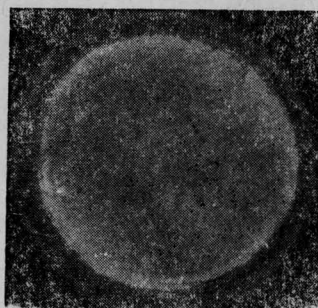
图17 不同反射层材料对同轴灯激光器总体输出的影响

1—烟熏镁条; 2— $MgO_2 + NaSiO_3$  (水玻璃);  
3— $MgO_2 + CaSO_4$  (石膏); 4—填充氧化镁粉末

## 五、同轴灯与直管灯泵浦的比较

### 1. 光泵均匀性

由于同轴灯可设置多个电极,甚至采用环状电极,因此间隙中放电比较均匀,这是直管灯泵浦激光器无法比拟的。直管灯泵浦的激光器,为了均匀照明,往往要采用2~4个灯,即使这样仍存在“多灯效应”。典型的同轴灯均匀照明和直管灯的“多灯效应”见照片1、2。



照片1 同轴灯照明均匀的典型照片  
(同轴灯激光器激光束打在照相黑纸上的光斑)



照片2 直管双灯照明不均匀的典型照片  
(直管双灯激光器激光束打在照相黑纸上的光斑)

检查同轴灯照明均匀的方法很多:用马赫干涉仪观察同轴灯泵浦铍玻璃棒的形变,间接判断辐射到内腔的照明是否均匀;用设置在光轴上,并沿轴转动的反射镜逐点转动,测不同角度辐射到内腔的积分光强度来判断照明均匀与否;而采用激光束打在照相黑纸上,判断照明均匀性是最简单、最直观的方法。

### 2. 同轴灯和直管灯泵浦效率的比较

图18是采用 $\phi_{\text{内}}70 \times 1000$ 毫米, $d=17.5$ 毫米, $P_{\text{Xe}}=120$ 托,外管用熏镁法制成的同轴灯激光器和两支 $\phi_{\text{内}}50 \times 1000$ 毫米, $P_{\text{Xe}}=160$ 托的银聚光筒组成的直管双灯激光器,都对 $\phi 50 \times 1000$ 毫米的铍玻璃棒进行泵浦比较而获得的实验曲线(对于 $\phi_{\text{内}}50 \times 1000$ 毫米的直管灯,当氙气压力为160托及120托时,光效无明显差别)。由图18显见,同轴灯激光器效率为2%,直管灯激光器效率为2.3%。同时还能看到:同轴灯效率的斜率为3%,大于直管灯效率的斜率(2.4%),这充分证实了同轴灯的又一优点:只要同轴灯能量密度大于一定值以后,就能使同轴灯的效率大于直管灯。

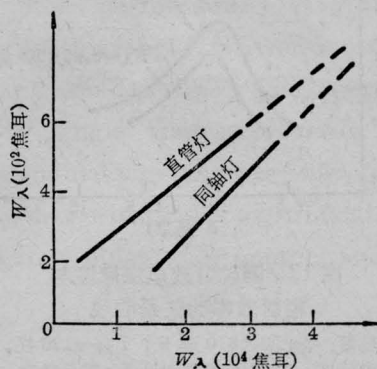


图18 同轴灯和直管灯泵浦的激光器的泵浦效率的比较曲线

## 六、结 论

(1) 利用同轴灯泵浦激光器可减少激光器的组成元件,工作可靠,并有一个坚实的外壳体。

(2) 对于脉宽为几毫秒的同轴灯研究表明,在能量密度较大时,采用同轴灯激光器效率可做到比直管灯高。在脉宽小于1毫秒的大功率器件中,同轴灯激光器效率要比直管灯高2倍左右。在上升时间要求很短的染料激光器中,同轴灯更有使用价值。

(3) 在可见光谱区,用氧化镁粉反射层

比无反射层的同轴灯其等离子温度要高1.5~2倍。而选择最佳间隙厚度时,可使灯的亮度和效率显著提高。

(4) 综合考虑极限能量、上升时间、光效和寿命,同轴灯的初始氙压在较大器件中以80~100托为好。

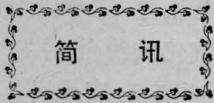
(5) 对于要求高质量激光束的振荡级中,同轴灯前途比直管灯优越。

(6) 若采用荧光溶液转换光谱,那么同轴灯装置要比直管灯更为方便。

(7) 网络匹配工作做得不恰当时,同轴灯回路损耗将大于直管灯。

### 参 考 文 献

- [1] C. H. Church, D. Ryan, J. P. Lensick; *JOSA*, 1963, **53**, No. 4, 514.
- [2] C. H. Church, J. P. Lensick, D. Ryan; *JOSA*, 1964, **54**, No. 4, 563.
- [3] 难波进;《电子技术》1965, **4**, No. 10, 13.
- [4] *Leser Lett.*, 1966, **3**, No. 5, 7~8.
- [5] *SCP & Solid Technol.*, 1966, **9**, No. 3, 50.
- [6] *International Electronics*, 1966, **11**, No. 4, 13~14.
- [7] 《电子杂志》,1966, **11**, No. 5, 538.
- [8] В. П. Кирсанов, С. В. Трошкин; *Светотехника*, 1967, №1, 12.
- [9] E. E. Vincent; U. S. Patent, **3**, 337, 762, 1967. 8. 22.
- [10] F. Mastrup; U. S. Patent, **3**, 387, 227, 1968. 6. 4.
- [11] Yu. A. Kalinin; *Sov. J. Opt. Technol.*, **37**, No. 1, 1970.
- [12] Ю. А. Анапьев; *ОМП*, 1972, №9, 35.
- [13] 《物理通报》,1963, No. 11, 39~42.
- [14] 《激光》,1979, **6**, No. 9, 29.
- [15] U. P. Kirsonov; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1974, **3**, No. 6, 475~477.
- [16] 前田三男ほか,《应用物理》,1976, **45**, No. 6, 534.
- [17] Ю. В. Басов; *ЖПС*, 1977, **26**, №6, 996~999.
- [18] Е. Ф. Жолобов; *Ван. электр.*, 1977, **4**, №1, 122.
- [19] J. H. Gohez, *ISA Transactions*, 1966, **5**, No. 1, 28~36.



## 高质量激光反射镜研制成功

中国科学院上海光机所十室镀膜组经过几年来的努力,在今年“七·一”前夕,已经试制成功用于可见及近红外波段的高质量激光反射镜(硬膜)。

经我所和有关单位反复测定,反射率大多数在99.80%以上,有些已经达到99.9%,光损耗小于0.1%。

经试验,这种激光反射镜能经受520°C温度的烘烤,在水中长期浸泡(或在水中煮沸)后反射率均

保持不变。最近,该反射膜经有关单位用薄膜强度试验机测定,耐磨擦次数比软膜( $ZnS/MgF_2$ )高一个数量级。在大功率脉冲激光作用下,破坏阈值高于 $10^{10}$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。

现经一些激光工作者试用后认为:这种反射镜不但能经受高温和大功率激光的考验,而且激光输出质量也有所提高,值得推广使用。

(中国科学院上海光机所科技处供稿)