

# 碱金属泵浦灯的实验研究

王焕灯 钱玉兰 金庭臻

方无忌 李新娣 于开义

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 实验研究了多晶氧化铝管钾-汞灯、钾-铷灯在重复频率运转条件下泵浦  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  的激光特性。与同类型氙灯进行了比较,在一定功率范围内,钾-汞灯的激光泵浦效率比氙灯高 60%。探讨了碱金属蒸气灯中若干特有的工艺问题,对碱金属灯的进一步工作提出了设想。

## Experimental studies on alkali-metal pumping lamps

Wang Huanden Qian Yulan Jin Tingzhen

Fang Wuji Li Xindi Yu Kaiyi

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

**Abstract:** The potassium-mercury lamps and potassium-rubidium lamps made by PCA tubes used to pump  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  lasers were studied experimentally in repetitive frequency operation and were compared with similar xenon flashlamps. In certain range of electrical input power, the overall laser pumping efficiency of a K-Hg lamp is 60% higher than that of the xenon lamp. Some special technological problems were investigated and the orientation for further study of alkali-metal vapor lamps are presented.

碱金属蒸气放电,是可见和近红外光谱区的一个有效辐射体。当低气压放电时,在可见和近红外区具有很强的共振辐射;当较高气压放电时,光谱具有局部加宽谱带的特性。因而,人们预言<sup>[1]</sup>,合适选择碱金属种类和放电条件,使其辐射谱带落在  $\text{Nd}^{3+}$  的吸收带上,有可能成为  $\text{Nd}^{3+}$  激光器的有效泵浦源。

我们所制作的碱金属蒸气灯,采用  $\phi 7 \times 80$  毫米的多晶氧化铝管和铌帽端封结构,灯内充以碱金属 Na、K、Rb 和 Hg 以及一定气压的起动气体氙(通常为 40 托),灯的排气管同时作碱金属的贮存器,夹封长度约为 1 厘

米。为防止铌金属零件的氧化,灯被真空密封在  $10^{-5}$  托的石英外管内。灯的最后尺寸为  $\phi_{\text{外}} 11.5 \times 220$  毫米,如图 1(a)所示。

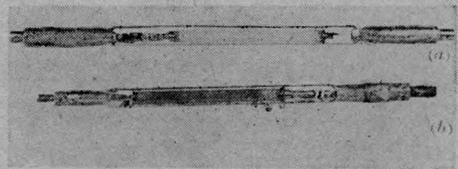


图 1

(a) 多晶氧化铝灯的实物照片

(b) 点燃后的情况

对于多晶氧化铝管碱金属蒸气灯,实验中首先遇到的一个问题,即灯只点几次,闪

收稿日期: 1980年6月16日。

光寿命很短,在几万次闪光之后,灯突然变暗下来,发光颜色由红变成白色或者变成绿色,这表明灯由碱金属放电辐射过渡到汞灯放电辐射。第二个问题是多晶氧化铝灯管严重发黑(见图1(b))。经过分析,我们认为这两个现象和碱金属消失以及碱金属与多晶氧化铝管在高温下的化学反应有关,而与电极溅射关系较少,因为从实验上观察到,灯管发黑是沿整个灯管均匀分布的,而电极溅射发黑应该主要是局限于电极附近的区域,而且实验上对氧化物电极和铯-铷电极进行了比较,从统计结果来看,电极材料对灯发黑没有明显的差别。

关于碱金属的消失,实验上观察到是由两种原因造成的。第一,漏钾(或漏钠、漏铷),即碱金属蒸气在高温工作条件下从玻璃焊料与钨帽封接处泄漏出来,沉积在灯管较冷的部位,如图2所示。第二,碱金属向多晶氧化铝的渗透,[2]中认为碱金属原子渗透到多晶氧化铝管内的深度约为80微米,即相当于管壁厚度的1/10。我们对样品灯内管壁进行了离子探针扫描分析,证明了灯的内管壁渗有碱金属原子,但由于管壁表面不平整,渗透深度不能准确测定。

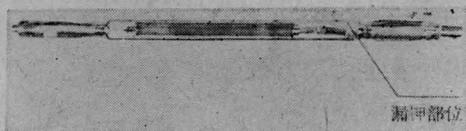
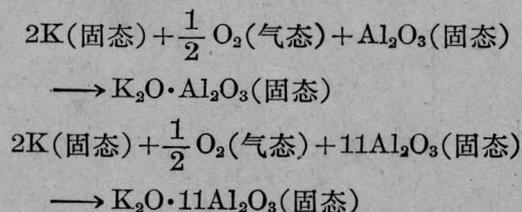


图2 灯内漏碱金属蒸气的部位

碱金属和多晶氧化铝管的化学反应与灯中存在杂质气体有关系<sup>[3]</sup>。尤其是氧气的存在,将使碱金属在高温情况下和 $Al_2O_3$ 迅速起反应,形成 $Al_2O_3$ 的化合物。例如,钾和氧以及和 $Al_2O_3$ 通过如下反应:



将形成 $K_2O \cdot Al_2O_3$ 或 $\beta$ -氧化铝( $K_2O \cdot 11Al_2O_3$ )。这两个反应在碱金属蒸气灯工作温度下都是易于发生的。从我们原来做灯的工艺来看,由于碱金属蒸气灯内填充了K、Na、Rb、Hg之类的混合物,灯管无法进行烘烤和除气处理,特别是K、Na、Rb等是一种良好的吸气剂,并且还有很强的吸水性能,因此,灯内必定存在大量的杂质气体,促使碱金属和氧化铝灯管的反应。针对这种情况,我们改进了制灯工艺,将灯管在 $900^\circ C$ 情况下,事先进行真空处理,去气时间为1~2小时,真空度为 $2 \times 10^{-5}$ 托,并在Ar气保护的气氛下打开灯管,在Ar气保护的气氛中把碱金属填充至灯内,并且迅速接到排气台上。这个程序我们称之为Ar气保护的操作箱工艺,取得了良好的效果;其次改善了灯的外壳封接工艺,以及改变了灯的点燃方式,适当降低了灯的平均功率和峰值功率,使灯的寿命由原来的 $5.0 \times 10^4$ 次提高到 $60 \times 10^4$ 次以上,大大延长了灯的使用寿命。

用所制作的钾-汞灯对 $Nd^{3+}:YAG$ 进行泵浦实验,装置如图3所示。所得到的激光特性实验结果示于图4。

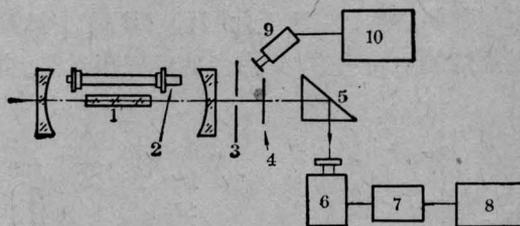


图3 激光泵浦特性的实验装置

- 1—Nd:YAG 激光棒; 2—碱金属蒸气灯;  
3—光阑; 4—滤光片; 5—棱镜; 6—LCA-4  
卡计; 7—量程变换器; 8—AC15/6 检流计;  
9—光探头; 10—JSS-2 测频仪

图4中,曲线上的箭头表示实验点灯的方向,纵座标表示激光输出,横座标代表重复频率点灯的电压。由曲线可以看到,随着输入灯内平均功率的增加,激光输出并非是一条直线,而是一条扭线。对于这条曲线,可作如

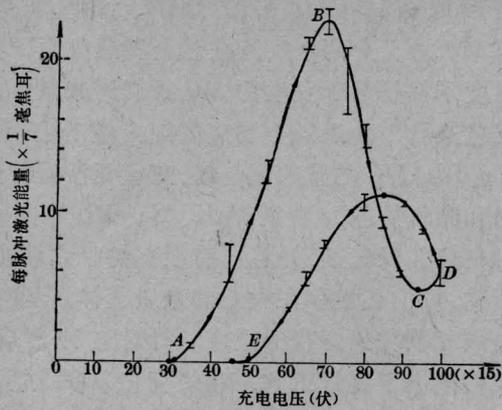


图4 K-Hg 灯泵浦 Nd:YAG 的典型激光输出  
 4-14\* 灯  
 K 2 毫克 Hg 15 毫克 Xe 40 托  
 能源:  
 四节方波网络  
 $C_1=8$  微法,  $L_1=10$  微亨预电离电流 480 毫安  
 重复频率  $f=10$  次/秒  
 曲线中箭头表示点灯方向

下粗略的解释: 开始, 随着进灯功率的增加, 灯的温度逐渐升高, 钾的共振辐射 7665 埃和 7699 埃逐步开始自返和向两翼加宽, 加宽的程度随着进灯功率的增高而变大<sup>[3]</sup>。这个自返加宽的过程正是灯的光谱和 Nd:YAG 两个吸收带 7300~7650 埃和 7900~8230 埃匹配的过程, 也就是激光输出随着进灯功率增加的过程, 相应于曲线的 AB 段。继续提高灯的运转功率, 灯内钾的蒸气压过高, 自

返加宽的谱带偏离了最佳光谱的匹配, 其偏离的程度是随着进灯功率的增加而增加的, 这就是曲线的 BC 段。CD 段可能是电压升到足够高以后, 氙的辐射起作用。至于进灯功率往回下降时的曲线 (DE 段), 光谱辐射与灯的热滞效应有关, 情况变得比较复杂。

关于碱金属蒸气灯这种扭曲的激光泵浦特性, 在 [4] 中也得到了类似的结果。图 5 是 NaI-Hg 灯泵浦 Nd<sup>3+</sup>:YAG 时所得到的的一条实验结果曲线。这条曲线的泵浦机制主要是 Na 的 5890 埃 D 线与 Nd<sup>3+</sup>:YAG 5887 埃窄吸收线的匹配, 曲线随点灯电压的变化过程, 也即是与 5887 埃窄吸收线匹配和偏离的过程。

由上述结果可以看出: 碱金属蒸气灯的激光泵浦特性与一般 Xe、Kr 灯是不同的。为了得到最大的激光输出和最佳的光谱匹配, 灯的运转功率和灯的蒸气压(冷点温度)都要进行必要的控制。一般情况下, 简单地提高灯的运转功率并不能达到增加激光输出的目的。但是, 应当指出, K-Hg 灯的光谱是准连续谱, 即共振线自返加宽后向带光谱过渡, 进灯功率的少量变化并不影响光谱的效率。因此, 如果采取相应措施, 控制冷点温度不随进灯功率而变化, 那末也可能得到激光输出随着进灯功率线性增长的结果。

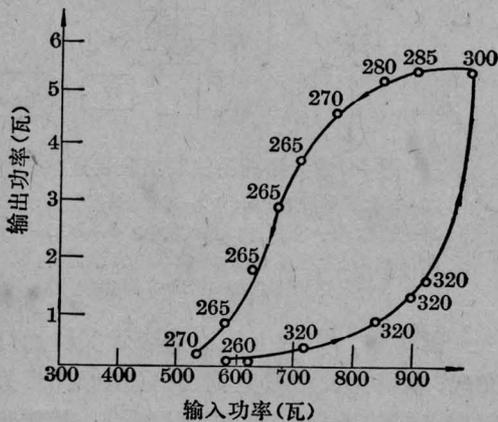


图5 NaI 灯激光泵浦的特性  
 10" 球形聚光器 500 Hz  
 曲线中的数字为点灯电压。

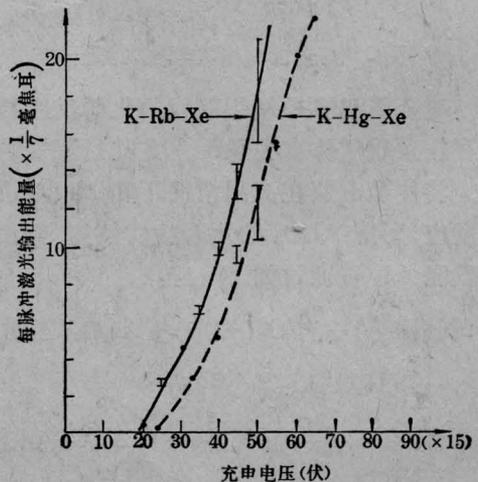


图6 填充种类对激光泵浦效率的影响

表 1 K-Hg 灯和 K-Rb 灯泵阈值的比较

灯号	填充情况				电极种类	阈值参数		
	K(毫克)	Rb(毫克)	Hg(毫克)	Xe(托)		电压(伏)	脉冲能量(焦耳)	平均功率*(瓦)
4-12	2		15	40	Ce-W	30×15	3.24	265.7
4-14	2		15	40	Ce-W	30×	3.24	265.7
4-22	2		15	40	Ce-W	28×	2.82	231.2
4-23	2		15	40	Ce-W	41×	6.05	496.1
D-9-1	2		15	40	氧化物	27×	2.62	214.8
D-9-2	2		15	40	氧化物	25×	2.25	184.5
D-9-3	2		15	40	氧化物	26×	2.43	199.3
D-9-5	4		15	40	氧化物	27×	2.62	214.8
D-9-6	4		15	40	氧化物	22×	1.78	146.0
D-9-7	8		15	40	氧化物	28×	2.82	231.2
D-9-8	8		15	40	氧化物	25×	2.25	184.5
D-9-16	2		15	40	氧化物	25×	2.25	184.5
D-9-27	2		15	40	Ce-W	25×	2.25	184.5
4-8	2	2	0	100	Ce-W	20×	1.44	118.1
4-21	2	2	0	180	Ce-W	20×	1.44	118.1
4-6	2	2	0	100	Ce-W	22×	1.78	146.0
4-7	2	2	0	100	Ce-W	20×	1.44	118.1
D-9-23	2	2	0	40		25×	2.25	184.5
C-8-3	3	3	0	20	Ce-W	24×	2.07	170.0
4-25	2	2	0	40	Ce-W	25×	2.25	184.5
4-27	2	2	0	40	Ce-W	25×	2.25	184.5

\* 标称重复频率  $f=10$  次/秒, 实测重复频率  $f=8.2$  次/秒。

如前所述, 碱金属在可见和近红外区具有很强的共振辐射和谱带辐射, 适当选择碱金属种类或进行适当组合可以使碱金属达到最有效的光谱辐射, 我们选用了 K、K+Rb 等不同碱金属及其不同的填充量进行了实验。图 6 是钾和钾-铷混合物在同样实验条件下激光输出的比较。实线是 K-Rb 灯, 虚线为 K-Hg 灯, 由图可以看到, 钾-铷混合物显示出比钾-汞更为有效的特性, 这是由于钾-铷混合物中铷的 7948 埃的共振辐射迭加在  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  7900~8300 埃这个吸收带的结果。我们从大量 K-Rb 和 K-Hg 灯的实验中, 同时也看到了 K-Rb 灯比 K-Hg 灯具有更低的泵浦阈值。表 1 列出了两种灯阈值特性的比较。对 K-Hg 灯进行了不同钾填充量实验, 图 7 是相同条件下得到的一组实验曲线, 实验表明, 在填充量较少时, 激光输出较大, 灯的输入功率范围变化也可以较宽。

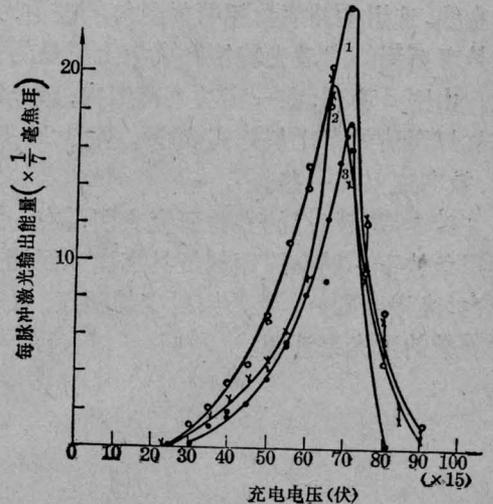


图 7 填充量对激光泵浦特性的影响

1—K 2 毫克、Hg 15 毫克、Xe 40 托  
 2—K 4 毫克、Hg 15 毫克、Xe 40 托  
 3—K 8 毫克、Hg 15 毫克、Xe 40 托  
 能源: 四节方波  $C_1=8$  微法,  $L_1=10$  微亨  
 预电离电流 480 毫安

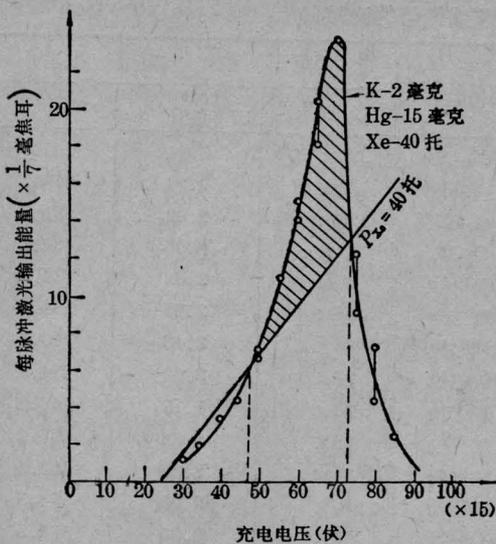


图8 多晶氧化铝Xe灯和K-Hg灯  
泵浦效率的比较

四节方波

$C_1=8$  微法,  $L_1=10$  微亨, 预电离电流 480 毫安  
 $f=10$  次/秒

为了把碱金属灯和Xe灯做比较, 我们做了相同尺寸的多晶氧化铝管的Xe灯。在相同实验条件下测量了各自泵浦激光的特性, 随着功率的升高, 氙灯泵浦激光输出是一条直线。选用多晶氧化铝管做氙灯的理由, 主要是考虑到灯的透光特性和成象上质量的一致。由图8看到, 在一定功率范围内, 碱金属蒸气灯泵浦效率比氙灯高60%。对于K-Rb灯, 效率还要高一些。

碱金属蒸气灯的实验研究表明, 在一定运用条件下, 碱金属蒸气灯具有激光泵浦效率高, 光谱匹配好, 紫外辐射少的特点, 是一种有效的激光泵浦源。

从技术和应用的角度来看, 为了进一步提高碱金属蒸气灯的光泵效率和使灯达到实际使用的寿命, 灯的工艺还需要作重大的改进。1. 用单晶氧化铝管代替多晶氧化铝管, 以便提高管壁材料的透明度, 改善灯棒成像质量和提高有效辐照。采用单晶管, 也可以增加抗碱金属腐蚀的性能, 减少管壁材料在运用过程中的发黑现象。2. 去除石英外管(真空罩), 这不仅可以简化制灯工艺, 降低成本, 而且可以增加灯的功率散耗, 减少灯在运转功率改变时的热阻滞作用, 增加灯在不同尺寸的激光腔中运用的通用性。而灯的真空外管的去除, 要求铌管铌帽涂以高温抗氧化涂层或采用新的高温抗氧化端帽, 这又会涉及到新的工艺和矛盾。3. 为克服高温工作状态下的漏钾、漏铷现象, 需要进一步完善现有封接工艺。4. 采用合适的冷却技术, 严格控制冷点温度, 方法包括在贮存器部位套石英管; 热子加热; 气流吹拂; 预电离电流的控制; 点灯通断方式的改变等等, 以便使灯的蒸气压在不同功率时控制在一个合适的水平上, 保持最佳光谱匹配。

### 参 考 文 献

- [1] Proc. 6th Int. Conf. on Ionization Phenomena in Gases. 1963, vol. 3, p373.
- [2] IEEE. Conf. Record of 1970 Conf. on Electron Devices Techniques, p. 161~164, New York, J. E. Creedon et al.
- [3] AD-13 009 109.
- [4] AD-817 202.