

碱金属蒸气泵浦灯

于开义 王焕灯 方无忌 钱玉兰 李新娣 金庭臻

(中国科学院上海光机所)

提 要

本文介绍了用作光泵的碱金属蒸气灯的运行特性。实验表明,灯的输入功率,汞和碱金属及稀有气体的填充量,聚光腔的几何尺寸和热传导状况,运转方式(脉冲或连续)等等因素,直接影响灯的辐射光谱能量分布。在一定输入功率范围内,碱金属蒸气灯的辐射效率比同类尺寸的氙灯高一倍左右,激光总体效率比氙灯高20%左右。

一、引 言

固体激光器的光泵光源主要是氙灯、氩灯及碘钨灯等。它们的主要优点是亮度高,制作简单,使用方便;缺点是光电转换效率低,辐射光谱与工作物质的泵浦吸收带匹配不好,无用辐射所占的比例较大,它们对激光器有严重的损害(如紫外线对工作物质的损害,热效应对激光束输出质量的影响)^[1,2]。

为克服上述缺点,人们对光泵光源作过如下的几种改进和探讨:

1. 液体或固体的滤光或荧光转换。如灯的管壁掺杂^[3],或镀介质膜^[4];灯管外或工作物质外面加掺杂的石英、玻璃等滤光片^[5]或加滤光液体^[6]。

2. 聚光腔的选择反射。在聚光腔上镀以只反射有用辐射,而吸收无用辐射的介质膜^[7]。

3. 灯内掺杂。掺汞、稀土元素、碱金属及其化合物,使灯的辐射谱与工作物质泵浦吸收带匹配得好一些。

灯内掺杂时,既要考虑光谱匹配得好,又要考虑电光转换效率高。由于Nd³⁺:YAG和Nd³⁺玻璃的主要泵浦吸收带在5000~

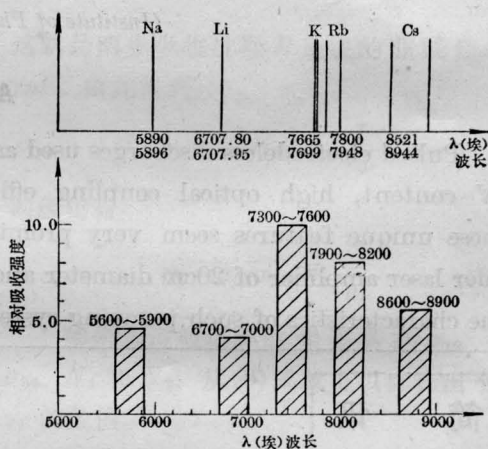


图1 碱金属共振线与Nd:YAG主要吸收带的波长分布示意图

9000埃范围内,而碱金属的共振辐射波长也正好在此范围内,如图1所示;另一方面,共振辐射的电光转换效率高。因此可以预料,填充碱金属的灯对泵浦效率的提高是有利的。

表1列出了几种光源对Nd³⁺:YAG和Nd³⁺玻璃泵浦时的效率^[8]。可以看到,碱金属蒸气灯的效率最高。

收稿日期:1979年7月12日。

表1 几种光源光泵效率的比较

	脉冲氙灯	脉冲氙灯	连续氙灯	碘钨灯	钾汞灯
运转状态	1200 安培/厘米 ² 5750 瓦/厘米 ²	1200 安培/厘米 ² 5200 瓦/厘米 ²	250 安培/厘米 ² 550 瓦/厘米 ²	3200 K 228 瓦/厘米 ²	100 瓦/厘米 ²
Nd:YAG	2.1	2.5	4.6	3.9	9.0
钕玻璃	4.2	4.0		6.2	11.7

二、碱金属蒸气灯的放电机理

碱金属蒸气灯的放电管内充以碱金属、汞及惰性气体。光辐射主要由碱原子产生；汞用以维持必要的管压降；氙等惰性气体作为启动气体。

1. 碱金属原子共振线的自反转加宽

碱金属原子共振线是由第一激发态 $^2P_{1/2, 3/2}$ 向基态 $^2S_{1/2}$ 跃迁产生的。低气压放电管的辐射呈分离的双线；当温度升高时，气压也随之升高，使双线增宽并连成一片；当气压继续升高时，则产生自吸收，使共振辐射分为两个“翼”，如图2所示^[7]，随着气压升高（主要因温度升高），多普勒增宽、压力加宽等越加严重，同时放电管的径向温度梯度也越大，管壁附近基态原子密度较管子中心部分的原子密度大，因此共振辐射的吸收也大，这样只有远离共振线波长的辐射才得以“逃出”管外，形成自反转加宽。这种加宽的辐射遍

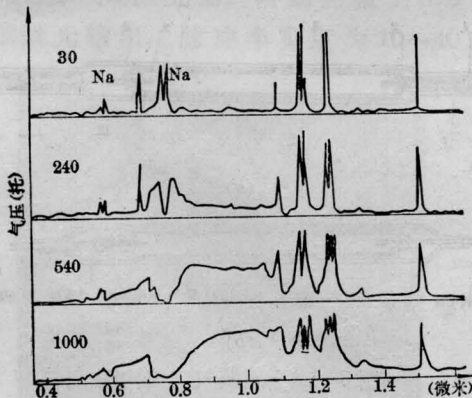


图2 钾蒸气放电管($\phi 7$ 毫米, PCA管, 6A)辐射谱随气压变化的分布情况

及在共振线两侧约数百埃甚至上千埃的范围内。只要适当控制放电的条件(温度和气压)就可使灯的放电辐射能量分布在激光工作物质的有用泵浦带内。

2. 汞和惰性气体的作用

汞和惰性气体的第一激发电位都比碱金属原子的高，甚至也高于碱金属原子的电离电位(钠除外)，所以在碱金属原子大量存在的情况下，放电管内的汞和惰性气体不是主要的发光元素。

放电管内的汞使电子的碰撞频率增加，而导致碱金属原子的激发几率大大地增加，显著地提高了放电辐射效率。汞对灯的功率影响极大，汞量不足，灯管压降过低，使灯的功率无法提高；汞量过多，管压降过高，使灯运转不稳定，以致熄弧。合适的掺汞量对灯的输入功率是一个决定性的因素。

汞的另一个重要作用是使碱金属蒸气灯的辐射谱的长波一翼加宽。这是由于在高压金属蒸气放电里，一个受激碱原子与两个汞原子间的三体碰撞形成了 ΔHg^* 准分子(A为碱原子元素符号)，其辐射极大值使自反转共振加宽的长波一翼变得更宽^[10]。

惰性气体的作用是在金属尚未气化时使灯预先点燃，把金属加热后气化形成蒸气放电。当选用热导率小的氙作启动气体时，灯的热传导损失可以减少，辐射效率亦可以提高。

3. 碱金属蒸气灯内气体的热力学状态方程

一般惰性气体放电灯的原子密度为常

数,其气压为

$$p = nkT \quad (1)$$

其中 n 为原子密度, k 为玻尔兹曼常数, T 为气体的绝对温度。

通常在碱金属蒸气灯内,存有液相和汽相的金属(是过饱和的填充),这种两相共存状态的气压 P 是温度 T 的复杂函数^[11]:

$$\lg P = K - \frac{1}{2} \lg T - \frac{C}{T} \quad (2)$$

(适用 200~1200 K)

式中 K 、 C 是与元素有关的常数, T 为冷点温度。

由此可见气压和温度是呈指数关系的,所以当温度稍有变化,金属蒸气的压力将有很大的变化,原子密度也跟着变化,这样导致放电辐射光谱变化极大。灯内掺入的汞和碱金属的熔点不同,即使是同样的温度变化,所引起的分蒸气压的变化也是不同的,这对光谱分布有直接影响。有人^[7]曾对高压钠蒸气放电的电弧模型进行研究,发现,若展宽的蓝翼和红翼的带宽分别为 $\Delta\nu_B$ 和 $\Delta\nu_R$,则有

$$\Delta\nu_B = \frac{3}{4} \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^3 A n_0 \quad (3)$$

$$\Delta\nu_R = \frac{3}{4} \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^3 A n_0 (1 + \delta p_{Hg}^2 / p_{Na}) \quad (4)$$

式中 λ_0 为中心波长, n_0 为基态原子密度, A 为跃迁几率, p_{Hg} 和 p_{Na} 分别为汞和钠的分蒸气压, δ 为由实验确定的常数。由此可知,碱金属蒸气灯的光谱分布跟基态碱金属原子的密度、灯的运转温度有密切关系。

三、制灯工艺

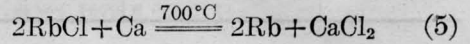
由于碱金属极强的化学活泼性及其在高温时的强腐蚀性,所以整个灯的制作工艺涉及的问题较多。现将整个过程简要介绍如下。

1. 碱金属的制备、提纯和分装

填充灯用的碱金属可以直接采用市场出售的纯碱金属,但一般由于浸在油内保存,故

要经多次清洗、去油后,再在真空系统中蒸馏提纯。最后分装在耐碱腐蚀的金属细管内或抗碱玻璃细管内。也可以将提纯的碱金属根据需要做成一定配比的汞齐后再分装。

对于市场上买不到的碱金属,则可根据其化学性质通过化学反应制备,例如铷,可以由下面的化学反应制出:



2. 灯的封接工艺

碱金属蒸气灯的结构如图3所示。灯的内管是由耐碱腐蚀的高纯半透明氧化铝管、铌端帽、铌排气管等材料组成,它们要经专门的电真空清洁处理后使用。

高纯氧化铝管是放电管的主要部分;铌端帽与氧化铝管间用高温抗碱玻璃焊料封接。电极固定在铌端帽上。铌排气管与铌端帽间用钛焊料封接。真空排气后将惰性气体和碱金属等填充灯内,然后在铌排气管上夹封,同时形成一个以剩余的约1厘米长的铌排气管做成的碱金属存贮库。这样内灯管就做成了。

为防止灯运转在高温时铌管易氧化,将灯的内管封在真空的石英管内。采用通常的铝箔气泡封接法就可以达到要求。也可以用高温玻璃焊料的封接方法。灯内管与石英外管间的弹性连接对灯的寿命影响极大,我们采用“W”形钼带来连接(见图3)。

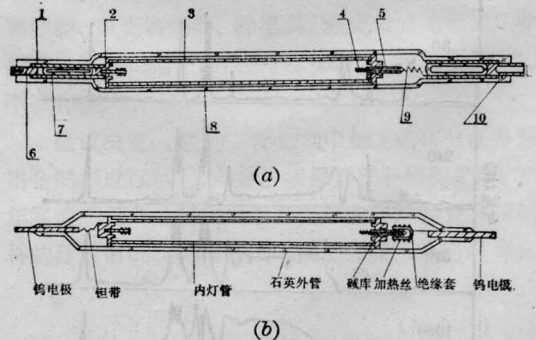


图3 碱金属蒸气灯结构图

- 1—铝箔; 2—铌帽; 3—氧化铝管; 4—电极;
5—铌管; 6—钼棒; 7—石英气泡; 8—石英管;
9—钼带; 10—钼棒

另外,当需要提高冷端(碱金属存储库)以控制辐射光谱的分布时,可以在内灯管的氦排气管上套上一个加热体,然后再装入外石英管内真空密封(见图3(b))。

四、实验和结果

1. 光谱能量分布的测量

我们用光电法,即单色仪分光,光电倍增管接收和自动平衡记录仪记录的方法,对灯的辐射谱能量分布进行了测量,波长范围为5700埃到9000埃。入射和出射狭缝宽为0.10毫米,分辨率为从5700埃的10埃至9000埃的60埃左右。然后用钨带灯定标,得出灯的相对光谱能量分布。

现举出几组实验结果简介如下。

(1) 图4表示钾汞灯随输入功率的增加,其展宽的两翼峰间距 $\Delta\lambda$ 变宽。这说明功率增加时,自返转加宽严重,从而使灯的光谱分布变化。在碱金属蒸气灯工作时,必须严格考虑输入功率对光谱分布的这种影响,而不能象氙灯或氩灯那样可以在一个较宽的功率范围内使用。

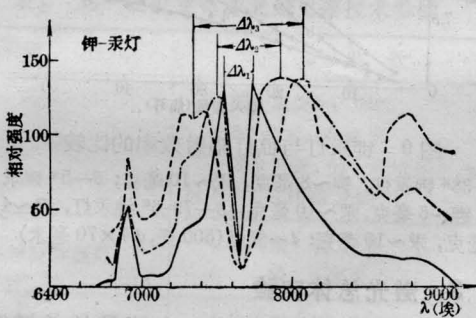


图4 碱金属蒸气灯共振线自返转加宽与输入功率的关系

实线为输入功率322瓦, $\Delta\lambda_1=190$ 埃;点划线为输入功率574瓦, $\Delta\lambda_2=400$ 埃;虚线为输入功率805瓦, $\Delta\lambda_3=760$ 埃

(2) 碱金属蒸气灯在激光聚光腔内和腔外运转时,光谱分布差别较大,如图5所示。这说明灯周围的热分布及热传导状况对辐射谱有很大影响。在寻找灯的最佳填充量以得到最合适的辐射谱分布时必须结合具体的激

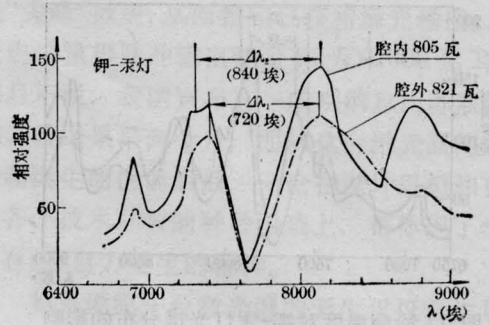


图5 钾-汞灯在聚光腔内和腔外运转时的光谱变化

光聚光腔来研究。而氙灯或氩灯的腔内外光谱变化没有这样显著。

(3) 表2表示,掺汞量同为12毫克而掺钾量不同的钾汞灯,当其输入功率基本同时,其峰间距 $\Delta\lambda$ 也基本一样。这说明加热和热传导情况一样时,冷点温度一样,不管钾量大多少(只要大于饱和填充量),其蒸气压是一样的,所以 $\Delta\lambda$ 相同。

(4) 碱金属蒸气灯的冷点温度对光谱的决定性影响不仅由表2可以看出,而且从图6上也可以看出:这儿温度是用WSH型红外双波长测温仪通过无接触测量得到的;26#灯的输入功率比35#灯小一倍,掺钾量也少得多,但由于26#灯的冷端温度高,所以26#灯的光谱分布中峰间距 $\Delta\lambda$ 也大。这说明,当灯在工作时自然加热的冷点温度偏高或偏低,都会破坏最佳光谱的分布,这时则可采用控制冷点温度的附加装置来获得最佳光谱输出。

(5) 从图6上可以看到脉冲运转时的碱金属蒸气灯的光谱在8800埃附近还有一个较强的峰,在连续运转时没有这个峰。这是

表2 掺汞量为12毫克的几种钾汞灯的 $\Delta\lambda$ 值

灯号	掺钾量(毫克)	灯输入功率(瓦)	$\Delta\lambda$ (Å)
911	7.0	288	600
926	10.0	276	570
913	11.2	270	600
906	12.9	264	600

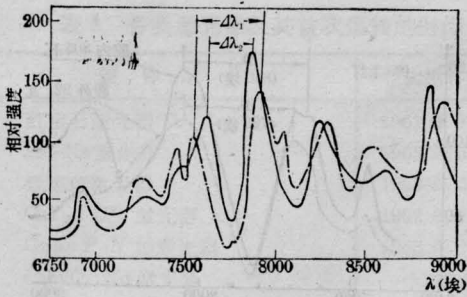


图6 冷端温度对钾-汞灯光谱分布的影响

点划线为26#钾汞灯,钾~2毫克,汞~10毫克。输入功率58瓦,冷端温度620°C, $\Delta\lambda_1 \sim 300$ 埃;实线为35#钾汞灯,钾~8毫克,汞~10毫克,输入功率116瓦,冷端温度590°C, $\Delta\lambda_2 \sim 180$ 埃

由于脉冲运转时的电位梯度较连续运转时大(脉冲的峰电压1千伏左右,而连续运转时电压仅为二百伏左右),所以电子有足够的能量使高激发电位的氙也被激发发光。这个峰正好落在Nd:YAG的8800埃至9000埃的吸收带内。

(6) 图7和图8是15毫米厚的钽玻璃板对35#钾汞灯和氙灯的辐射吸收情况的比较。可以定性地看出,钾汞灯比氙灯有更好的光谱匹配。

由以上实验可以看出,输入功率,冷点温度,聚光腔的几何尺寸,灯周围的热传导状

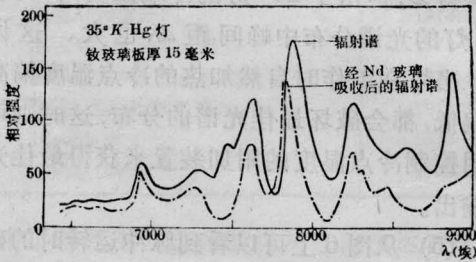


图7 钽玻璃对钾汞灯辐射的吸收

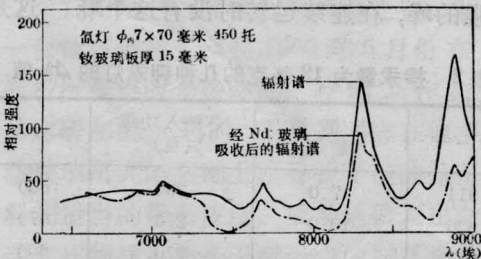


图8 钽玻璃对氙灯辐射的吸收

况,运转方式等等因素对光谱分布有很大影响。当我们寻找最佳填充量时,必须考虑这些因素,而这些因素之间也是相互制约的,所有这些因素中,灯的冷点温度是最关键的。

通过大量实验,得到我们装置所用的碱金属蒸气灯的最佳填充量为: $\phi 5.4 \times 80$ 毫米内管的灯掺钾量为2~4毫克;汞的量在脉冲灯里为15毫克左右,在连续灯里为10毫克左右。

2. 辐射效率的测量

我们采用真空热电偶测量了重复频率运转的碱金属蒸气灯的电光转换效率,并与同尺寸的氙灯进行了比较。结果如图9所示,输入功率自100瓦起,辐射效率随着掺钾量的增加而增加。氙灯的效率为40%左右,而钾汞灯则为60~85%;这主要是由于碱金属原子的共振辐射使钾汞灯的电光转换效率必然高于氙灯。

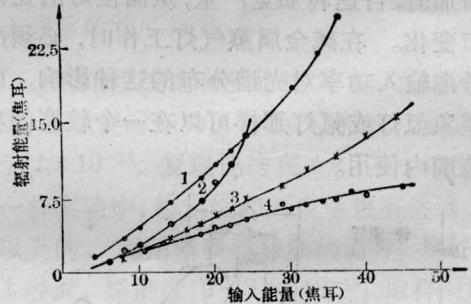


图9 钾汞灯与氙灯辐射效率的比较

1—38#钾汞灯,钾~8毫克,汞~10毫克;2—5#钾汞灯,钾~6毫克,汞~10毫克;3—79-6#钾汞灯,钾~4毫克,汞~10毫克;4—氙灯(500托, $\phi 7 \times 70$ 毫米)

3. 激光总体实验

为比较光泵效率,用一个简易的单椭圆聚光腔做总体实验。先后用钾铷灯、钾汞灯、钾铷汞灯、钠铷汞灯泵浦Nd:YAG均获得激光输出。碱金属蒸气灯光泵激光输出特性如图10所示;随着输入功率增加,激光输出达到一个极大值,然后逐渐衰减为零。这与惰性气体灯完全不同。从图10的实验曲线上可以看到,在输入功率小于400瓦范围内,钾汞灯的效率比氙灯高约20%。

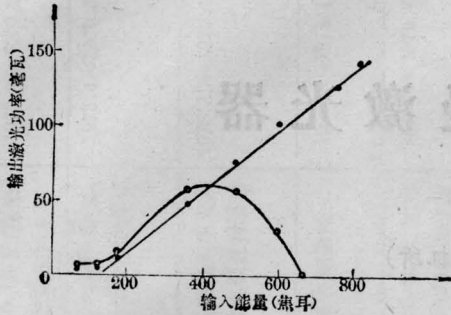


图10 钾汞灯与氙灯泵浦 Nd:YAG 的效率比较

考虑半透明陶瓷管的透过率仅为73%左右,而且这种陶瓷管是一种漫反射体,使灯的有效放电弧柱变粗(即陶瓷管的外径7毫米左右),而实际的弧柱直径仅为2~3毫米,这等于降低了弧表面亮度和在棒上的照度,使灯的效率下降。预计换用单晶宝石管后(透过率90%左右),激光总体效率会有明显提高。

总之,碱金属蒸气灯的光电转换效率高;光谱分布与Nd:YAG吸收带匹配得较好,无用辐射少;不用水冷,也不必加滤光液,简化了总体装置。但是,碱金属蒸气灯的制作工艺复杂,功率变化范围小,运用条件苛刻,这些都是该灯的限制性。

对于一些固体激光工作物质,包括新型激光材料,利用碱金属蒸气灯的选择辐射进行光泵效率的研究是十分有价值的。在一些要求高效率、小体积、重量轻的固体激光器的应用中,这种灯是十分有效的^[12,13]。

参 考 文 献

- [1] M. J. Weber *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**, 342.
- [2] C. J. Kennedy; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**, No. 2, 91.
- [3] AD-755400.
- [4] С. А. Баранов; *Кван. электрон.*, 1978, **5**, № 1, 174~176.
- [5] Г. П. Старостина; *ОМП*, 1974, №1, 43.
- [6] W. W. Morey; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**, No. 10, 818.
- [7] J. D. Barry; *Opt. and Laser Technology*, 1977, October, 267.
- [8] F. W. Quelle; Proc. 303, 4th DOD Laser Conf. (San Diego, Calif, Jan. 1970).
- [9] K. Schmidt; Proc. 6th Int. Conf. on Ionization Phenomena in Gases. Vol. 3, p. 323, Paris, 1963.
- [10] John F. Waymouth; *Journal of IES*, April 1977, p. 131.
- [11] 卡普卓夫:“气体与真空中的电现象”(中译本),1958年, p. 736.
- [12] AD-755213.
- [13] J. D. Barry; *Proc. IEEE*, 1978, **66**, No. 3, 319.

Alkali metal vapor pumping lamps

Yu Kaiyi Wang Huanden Fang Wuji Qian yulan Li Xindi Jin Tingzhen

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

Abstract

Operation characteristics of alkali metal vapor lamps are described. Experiments show that the factors such as input power of lamps, filling quantity of mercury, alkali metals and noble gases, geometrical size and thermal conductivity of the condenser, and operation modes (Pulsed or CW) have direct influences on the distribution of the radiation energy for the lamps. The radiation efficiency for alkali metal lamps is one time higher and the over all laser efficiency is 20% higher than that of the xenon lamps with same size.