

铜蒸气激光器窗口污染实验研究

雷建求 梁培辉 沈琪敏 陈启婴

吴明红

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

(上海科技大学射线所, 上海 201800)

提要 提出铜蒸气激光器窗口污染主要是由放电管中钨电极的溅射以及金属铜原子的热扩散引起。对 10 W 的国产器件, 当连续运转 100 kWh 后, 窗口透过率由 80% 下降至 65% 左右, 同时用化学方法测得吸附于器件窗片内表面沾污层中钨铜含量比为 3:1。另外, 还讨论了窗口沾污对器件输出功率等因素的影响。最后, 实验采用加长器件阳极端部管长的方式减少沾污, 并得到了实际应用。

关键词 铜蒸气激光器, 窗口沾污, 透过率, 金属膜

1 引 言

铜蒸气激光器凭借其高增益、高重复频率及短脉冲等特性得到了广泛的应用, 如激光光刻、倍频及泵浦染料等。目前, 铜蒸气激光器应用于激光分离同位素工程取得了可喜进展, 在分离的总体装置中, 需要有高平均功率的泵浦光激励数台染料激光器以产生几种不同波长较高功率的光束, 为了提高纯铜蒸气激光的输出功率, 采用振荡放大链结构乃必由之路。

在振荡放大链系统中, 无论是对于作为振荡器还是作为放大器的激光器, 由于电极材料、真空度等客观因素限制, 窗口沾污不可避免, 从而严重影响了器件输出功率, 同时对输出光束的方向性、光波形的稳定性影响较大。因此, 在实际工作中要求输出窗口在长时间运转过程中保持较高的透过率。这就要求尽可能地避免或减少窗口污染, 从而延长器件寿命。早在 70 年代, V. A. Burmakin 等人提出利用足够高的缓冲气体压力, 即在满足 $P_{Ne} = (3.99 \sim 5.32) \times 10^5 \text{ Pa}$ 条件下来防止物质的扩散以保护窗口^[1], 此前 N. Yu. Bakaev 等人也提出将窗口到电极的管子加热到与工作温度一样高来阻止工作物质的向外扩散^[2], 尽管两者效果并不十分理想, 但实验证实了窗口沾污是影响器件寿命的主要原因之一。本文通过实验, 对窗口沾污的成因及所带来的影响进行了讨论, 同时提出加长器件阳极端根部到阳极端窗口距离的方案, 实验结果表明这一结构的改进明显地降低了窗口沾污。

2 器件结构及实验方法

实验用的铜蒸气激光器为国产 10 W 自加热式器件, 重复频率为 6 kHz, 放电管内径 $\phi 26$

mm, 电极间距离为 890 mm, 采用国产 4050A 型闸流管放电, 放电管内充氖气作为缓冲气体并协助放电。器件结构如图 1 所示。器件采用结构较为简单的纵向放电形式, 放电管采用氧化铝陶瓷管, 陶瓷管与外壳钢管间铺一层陶瓷棉用来保温, 并用石英管造成一个真空室以减小热传导来维持足够高的铜原子密度, 放电电极由钼制成。

实验开始前进行反复电加热和抽真空来减少器件内杂质含量, 将石英窗片拆下清洁干净后迅速装回器件, 开始实验记录。将器件阳极端头部的管长加长 250 mm 后, 重复实验比较。实验过程中, 器件以平行平板腔作成振荡器, 器件连续运转一段时间, 用 Ar^+ 激光器的 514.5 nm 线对窗口透过率进行测量(每次测量前器件冷却 5 min)。

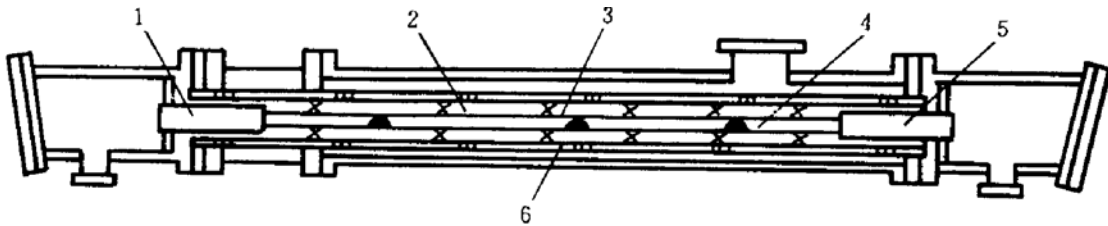


Fig. 1 Schematic diagram of Copper Vapor Laser

1—cathode; 2—heat insulator; 3—quartz tube; 4—laser tube; 5—anode; 6—copper

3 实验结果与讨论

3.1 窗口沾污成因及沾污覆盖层分析

在铜蒸气激光器正常运转(输入电功率 3 kW, 输出功率 5 W 左右, 气压 3.99 kPa) 100 kWh 后, 拆下窗片, 窗片内表面有一明显的黑色(略带红亮)圆形覆盖膜, 直径约 34 mm, 斑的中心处有一分界模糊的黑色圆环, 直径约 26 mm, 且离环愈远覆盖层愈薄, 用原子吸收分光光谱仪对覆盖层进行原子吸收光谱分析, 得出窗片覆盖层主要成分为铜钼两种元素, 覆盖层厚度在 1~2 nm 之间, 钼铜含量比近似为 3:1。由此可知, 铜蒸气激光器窗片沾污主要来自于放电管中作为激活介质的金属铜以及作为放电电极的钼。激光器内激活介质气态铜原子是在高频辐射加热形成的, 放电管内铜原子处于高温状态, 由于扩散及管内径向温度梯度的存在, 当处于高温态的金属铜原子达到温度低得多的窗片时迅速凝聚并吸附在窗片内表面, 且中央处铜原子密度略低于边缘, 与光谱法测量结果一致。另一方面, 受到材料质量及加工精度限制, 钼电极在产生高频电磁辐射的同时, 不可避免地出现电极本身的溅射, 尽管它并不象镀膜过程中离子束溅射那样剧烈, 但本质上它同样具有离子束沉积共性, 即具有高的吸附力和堆积密度且较少杂质污染特性^[3~5], 通常说来, 溅射束流强度分布近似于高斯型, 但由于实验中圆环形电极产生束流同时受到温度场梯度约束及放电管内 Ne 原子的缓冲作用, 因此, 窗片上便出现了分界模糊的黑色环, 环直径正好近似放电电极直径。

如图 2 所示, 器件连续运转 100 kWh 后, 用扩束至 $\phi 20$ mm 的 Ar^+ 激光绿线通过窗片中心进行透过率测量, 结果得出器件总透过率随着工作 kWh(功率时间积)的变化近乎线性地由 80% 下降到 65%。拆下器件两窗片, 分别进行透过率测量, 靠近阳极边头处窗片透过率仅 70%, 而阴极边头处窗片透过率接近 90% 左右, 可知窗口沾污主要来自于阳极端窗片。为此我们将阳极边头部窗口到阳极根部的距离从 150 mm 加长到 400 mm, 同样地连续运转 100 kWh

后,窗口的透过率无明显的下降趋势。实验表明,这一结构的改进大大地改善了窗口的污染状况。

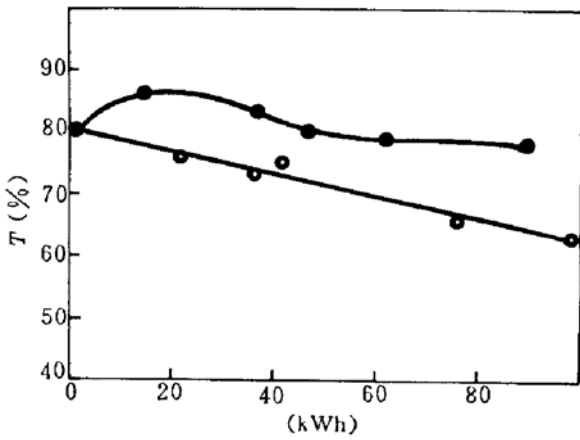


Fig. 2 Experimental curves of the device transmissivity versus operating time

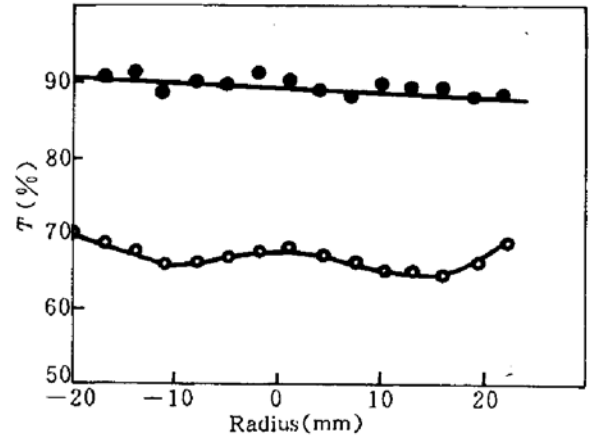


Fig. 3 Experimental curves of each polluted window transmissivity versus the position

通过分光光度计对窗片进行透过率测量,得出窗片不同位置处对应不同的透过率 T ,结果如图 3 所示。与原子吸收分光光度计所测得的覆盖层厚度相比较,对于覆盖层较厚黑环处, T 有极小值,即电极口径对应于两极小透过率间距,采用等效金属膜方法对覆盖层进行膜理论分析^[6],在膜厚度 H 较小($\ll \lambda/4, \lambda$ 为波长)范围内膜反射率 R 与膜厚度 H ($R \sim H$)、膜透过率 T 与膜厚度 H ($T \sim H$) 几乎呈线性下降,对于一层非吸收膜, R 与 T 是膜厚度 H 的周期函数,其周期为一个波长,在光学波长区金属的吸收非常大,以至厚度大大低于 $1/4\lambda$ 时才有透射存在,可见金属膜层对透过率影响很大。图 4 为从理论得到的厚度在 $1 \sim 2 \text{ nm}$ (钼铜含量比为 $3:1$) 金属膜透过率 T 、反射率 R 及吸收率 A 与膜厚度 H 的关系曲线。通过对图 3、图 4 中透过率 T 与膜厚度 H 的关系进行比较,不难看出窗片污染层厚度接近 2 nm ,在测量误差范围内,这与实验中采用原子吸收分光光谱仪所测得的污染层厚度相接近。

3.2 窗片透过率对输出光强的影响

在一定初始条件下,即电路参数、充电电压及放电管中等离子体各参量确定以后,随着器件窗片透过率的变化,腔内峰值光强与腔外输出光峰值光强变化并非一致^[7,8],对腔内峰值光强而言,由于铜蒸气激光器增益比较高,腔内光强很容易饱和,因此,即使经输出窗口耦合输出后损耗很大,但腔内反射光一经放大又使得其光强峰值重新急剧增加,可见腔内峰值光强随窗片透过率的变化(实际上随谐振腔耦合输出损耗变化)并不很明显。另一方面,当腔内光强耦

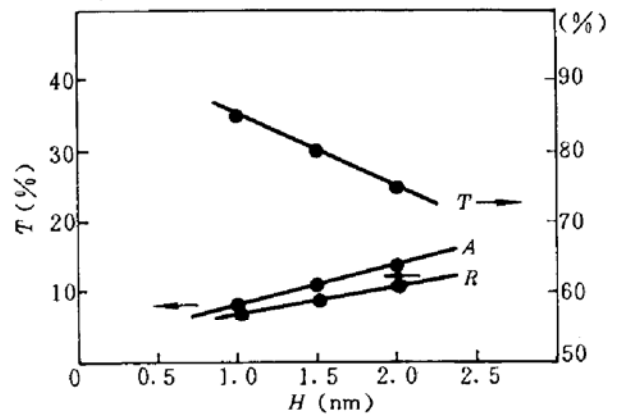


Fig. 4 Theoretical curves of the transmissivity, reflectance and absorbance versus the thickness of the metal film consisting of Mo and Cu of proportion $3:1$

合输出时,不可避免地由于窗口损耗(实际上谐振腔输出耦合损耗)而使得输出光强峰值降低,且输出光强峰值与腔内光强峰值呈线性地变化。由此可见,当器件被用作振荡器时,采取将污染相对较小窗口端作为激光输出端方案可以降低由于窗口污染而带来的激光光强损耗,从而增加输出激光功率。

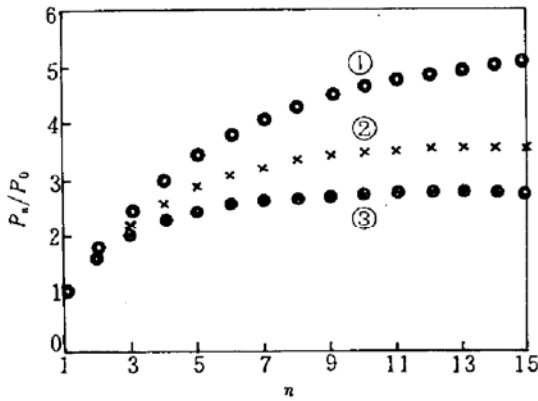


Fig. 5 Theoretical curves of the output power versus the number of amplifiers for different window transmissivities

当透过率 $T = 90\%$ 、 85% 、 80% 时,通过上式计算得到图 5 所示曲线组(图中 ①、②、③ 分别对应透过率 $T = 90\%$ 、 85% 、 80%)。由曲线 ① 可以看到,放大链中前 6 台放大器放大后的输出光在经过 9 台放大器放大后效果仅仅相当于一单台激光器提取的激光输出功率 P_0 。同样曲线 ② 所反映的放大链中后 12 台放大器总放大功率也只有 P_0 。当窗口透过率继续下降至 80% 时,得到结果如曲线 ③ 所示,自放大链中第 4 台放大器开始,以后各放大器几乎没有放大效果,此时窗口损耗与器件增益相接近。由此可见,当窗片透过率为 T 时,即使放大链中器件数目增加,总输出功率最多只能达到 $P_n = P_0/(1 - T^2)$, ($n \rightarrow \infty$),因此在设计放大链中放大器的数目时必需对器件窗口污染问题加以考虑。

通过以上实验分析,窗片透过率很大程度地影响着输出激光特性,窗口污染是器件寿命下降的主要原因之一。由于器件窗口污染主要来自于阳极,因此实验中采取了加长器件阳极头部管长的方案,从而大大地改善了窗口污染。但在有些实验中,当器件长度受到腔长的限制不宜加长时,无论是器件被用作振荡器还是用作放大器,都应该选取污染较少的阴极端作为激光输出端来降低窗口污染所带来的影响。

致谢 本文在实验过程中得到了梁宝根先生及其全组成员大力相助,在此谨表谢意。同时感谢范正修先生在等效金属膜理论计算上给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 V. A. Burmakin et al. . *Sov. J. Quant. Electr.* , 1978, 8(5) : 574
- 2 N. Yu. Bakaev et al. . *Sov. J. Quant. Electr.* , 1982, 12(9) : 1128
- 3 J. A. Paisner. *Appl. Phys.* , 1988, B46 : 253
- 4 H. R. Kaufman. *J. Vac. Sci. Technol.* , 1986, A4 : 764

同样地,器件窗口污染(这里主要指透过率 T 变化)对激光振荡放大链^[9]输出功率影响较大。对于一具有数台激光器的激光放大链来说,窗口透过率 T 变化所带来的影响尤为显著。

设污染后窗片透过率为 T ,每台器件能提取的光功率为 P_0 。放大链注入光功率 P_{in} 较小(P_{in} 满足放大器饱和输出所需注入功率, $P_{in} \ll P_0$), P_1 为 P_{in} 经一台放大器后的功率($P_1 = P_0$), P_2 为 P_{in} 经过两台放大器放大后的功率,则

$$P_2 = (P_0 \cdot T + P_0) \cdot T$$

依此类推,功率为 P_i 的光经过 n 台放大器后,其输出功率变为

$$P_n = P_0 \cdot T^{2n-2} + P_0 \cdot (1 - T^{2n-2})/(1 - T^2)$$

- 5 J. Backer *et al.*. *SPIE, Thin Film Technologies*(3), 1988, 1019 : 32
- 6 M. 波恩, E. 沃耳夫. 《光学原理》下册, 北京: 科学出版社, 1981. 820~842
- 7 A. A. Isaev *et al.*. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1977, 7(2) : 253~254
- 8 D. N. Astadjov *et al.*. *Opt. Commn.*, 1984, 51(2) : 85
- 9 梁培辉 等, 《中国激光》, 激光器件专集, 1990, 17 : 50

Experimental Study on Window Pollution of Copper Vapor Laser

Lei Jianqiu Liang Peihui Shen Qimin Chen Qiying

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Wu Minghong

(Shanghai Applied Radiation Institute, SUST, Shanghai 201800)

Abstract In this paper, the reasons of window pollution are reported, it is mainly deposition coating from the molybdenum electrode spraying and the copper atom spreading. For a domestic 10 W copper vapor laser, after being operated 100 kWh, we measured that the proportion of molybdenum and copper of the coating was about 3:1 by chemical method and the window transmissivity reduced continually from 80% to 65%. In addition, the influence of window pollution on the output power is discussed. At last, the window pollution is reduced by means of prolonging the tube nearby the anode side, and the improving has been used in practice.

Key words copper vapor laser, window pollution, transmissivity, metal film