

60 W 铜蒸气激光器的研究

陈林 陶永祥 尹宪华 崔健力 梁宝根

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 报道了输出功率最高达 62 W, 效率为 1.0% 的铜蒸气激光器。并对激光器的性能进行了分析测量。

关键词 铜蒸气激光器, 氧化铝陶瓷纤维棉

1 引言

铜蒸气激光器因其高重复频率、短脉宽、可见光波段而得到广泛应用。尤其是在激光同位素分离上的应用而得到快速发展。国外高功率铜蒸气激光大都是在口径器件上获得的^[1~3]。国内因受氢闸流管性能等条件的限制, 单台器件输出功率停滞在 20 W 水平上^[4]。而激光同位素分离则需要更高功率的激光器, 因此我们根据现有条件, 设计了一台输出功率最高达 62 W 的器件, 并对其性能进行了分析测量。

2 激光器设计考虑

2.1 闸流管工作条件的改善

我们使用的北京 1412 所 4050A 型氢闸流管, 一般可稳定工作在 5~6 kW, 个别性能较好的可以工作在 6~7 kW, 但不能长时间工作, 常会发生“连通”现象。这是由于国内生产的管子是为雷达设计的, 频率特性较差。为此我们用磁饱和电感代替线性电感作充电电感, 这种电感未饱和时, L 值很大, 能使电源和闸流管隔离足够长的时间, 增加了闸流管的消电离时间, 使闸流管可稳定工作在 6.5 kW 的水平。另外, 在高功率输入的情况下, 闸流管上负压很高, 有时可达 3~4 kV, 常会导致电路的不稳定。国产闸流管的阳极是一平板而不是空心阳极, 当负压很高时, 由于阳极钨材料发射能力差, 阳极溅射严重, 溅射出来的钨会附着在陶瓷内表面, 使闸流管的耐压下降。为此, 我们在闸流管上并联一个反向硅堆(30 kV, 2 A)和一个电阻(50 Ω , 100 W), 并放置油箱中。这样, 负压消除了, 且延长了闸流管的寿命。

2.2 放电管尺寸的选择

根据我们以前的实验结果, 放电管口径为 $\phi 25$, $\phi 34$, $\phi 44$ mm 所需输入功率密度^[5]分别为 5.0, 3.7, 3.0 W/cm²。美国器件口径为 $\phi 60$, $\phi 70$ mm, 所需输入功率密度^[2]为 1.85, 1.57 W/cm²。

cm^3 。在输入功率为 6.5 kW 条件下,我们选择口径为 $\phi 48 \text{ mm}$ 放电管,其输入功率密度达 2.5 W/cm^3 ,放电管长度为 145 cm。

2.3 保温层厚度估算

在输入功率为 6.5 kW、放电管尺寸为 $\phi 48 \times 1450 \text{ mm}$ 的选定情况下,为使放电管管壁温度达到 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$,氧化铝纤维层厚度必须适当。陶瓷管热量损耗由三部分组成:圆柱体周围的热导损耗,每单位长度上损耗用 W_{cyl} 表示;圆柱体两端的热导损耗,是指经激光管两端横截面,特别是放电陶瓷管的两个端面的传热,用 W_{sph} 表示;通过两端的热辐射损耗是指陶瓷管通过石英窗口向外辐射的热量,用 W 表示^[6],分别为

$$W_{\text{cyl}} = 2\pi[\alpha(T_2^2 - T_1^2) + 2\beta(T_2 - T_1)]/[2\ln(b/a)] \quad (1)$$

$$W_{\text{sph}}/(W_{\text{cyl}} \cdot 1) = 2ab\ln(b/a)/l(b-a) \quad (2)$$

$$W = 2s \varepsilon \sigma T^4 \cdot \delta \quad (3)$$

$$K = 2T + \beta \quad (4)$$

K 为导热系数,对我们用的陶瓷棉,我们取 $\alpha = 4.0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{K}^{-2}/\text{m}$ 和 $\beta = 2.05 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}/\text{m}$ 。(2)式中,因 W_{sph} 和 W_{cyl} 二者量纲不同,所以式中分母乘以 1 m,使二者量纲一致。 T_2 为陶瓷管外壁温度, T_1 为石英管的温度, a 为陶瓷管半径, b 为石英管内径, l 为陶瓷管长度, ε 为陶瓷管黑体辐射系数, σ 为辐射常数, s 为辐射面积,近似取电极内表面积,即为从两端石英窗口往里看时的等效面积, δ 为陶瓷管两端对石英窗口的立体角和整个辐射立体角的比值。

电源输入的 6.5 kW 功率经电路上闸流管功耗、电磁波辐射、放电电路元件阻抗功耗及放电时电子激发原子到上能级功耗等,约剩下 80% 耦合进入放电管。激光管两端面热导损耗及通过石英窗口的辐射损耗又要占去约 15%,实际通过圆柱体周围的热导损耗 $W_{\text{cyl}} \approx 6.5 \times 80\% \times 85\% = 4.42 \text{ kW}$ 。把 $W_{\text{cyl}} = 4.42 \text{ kW}$, $T_1 = 423 \text{ K}$, $T_2 = 1758 \text{ K}$, $a = 2.75 \text{ cm}$ 代入(1)式,可得 $b \approx 6.6 \text{ cm}$ 。再根据 10, 20 W 激光器的保温层厚度,确定保温层厚度为 4 cm。

3 激光器的结构

激光器的结构如图 1 所示。放电管用 $\phi 48 \times 1450 \text{ mm}$ 高纯氧化铝管,电极用钼材料。因激光器所需工作温度为 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,所以在陶瓷管外包上氧化铝纤维棉,用以隔热。铜块置于放电管两端,绝热层外为一石英管,石英管外为一不锈钢水冷套。谐振腔由曲率半径为 5 m,口径为 $\phi 100 \text{ mm}$ 的全反凹镜和 $\phi 100 \text{ mm}$ 平板组成。储能电容为 7 nf,锐化电容为 2 nf,氦气作缓冲气体。

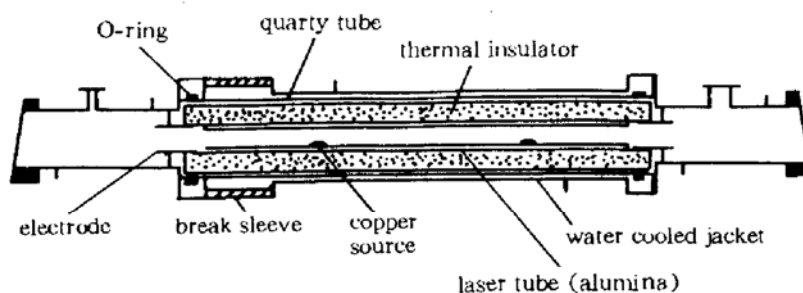


Fig. 1 Schematic diagram of the CVL head

4 实验结果与分析

4.1 平均输出功率与输入功率的关系

测量的输入功率与输出功率的关系示于图 2。当输入功率低于 4 kW 时,输出激光很弱,这是由于放电管未达到所需工作温度。随着输入功率的增大,管壁温度上升,铜蒸气密度增加,另外随着激光管两端电压增大,电子温度上升,对激发上能级有利,激光的输出功率随着增大。当输入功率为 6.5 kW 时,输出获得最大。进一步增加输入功率,输出功率下降的主要原因是,放电管超过最佳工作温度,铜原子密度增加,其弹性碰撞截面亦随之增大,使峰值电子温度下降,铜原子激发到上能级的几率下降,而激发到下能级的几率上升。

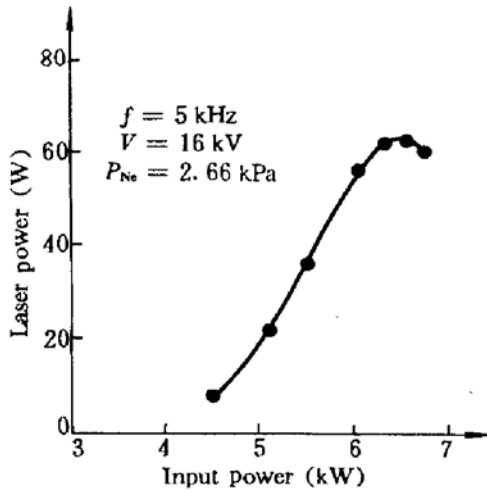


Fig. 2 Laser power as a function of the input power

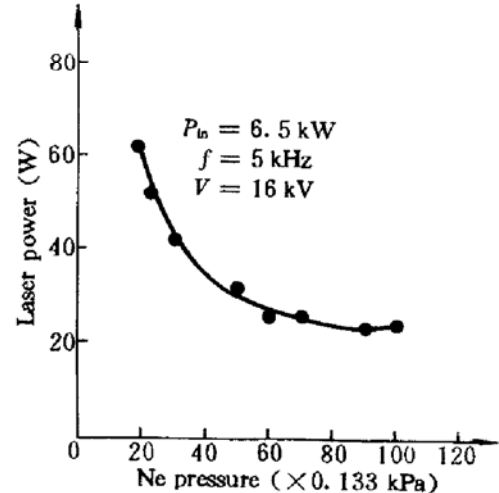


Fig. 3 Laser power as a function of the Ne pressure

4.2 输出功率与氖气气压的关系

当激光器输入功率控制在 6.5 kW,改变缓冲气体气压,我们发现气压偏低对输出是有利的。实验曲线如图 3 所示。Ne 气压增加,使 Ne 与电子碰撞的几率增加而导致电子温度下降。此外,Ne 气压增加,还使放电电流脉冲的峰值降低,宽度增大,电子密度上升,这也将导致等离子体柱内的超弹性碰撞速率增大,初始亚稳态原子密度增加,这也是激光输出功率下降的一个原因。但并不是氖气气压越低越好,气压太低,电极容易“打火”,放电易出现不稳定,激光输出也会不稳定。

4.3 输出功率与工作频率的关系

当输入功率为 5.6 kW, Ne 气压为 2.66 kPa 时,工作频率由 3 kHz 调到 10 kHz,输出功率起初随频率的增加而增加,当超过 5.5 kHz 时,又开始下降(见图 4)。当频率较低时,单个脉冲能量虽大,但乘积较小。当频率增大时,激光下能级亚稳态密度随着增加,导致单个激光脉冲能量下降。另外一个重要原因是,当频率增加时,工作电流必然增加,在一定的输入功率下,工作电压必然下降,也将导致单个脉冲能量下降。在整个过程中,存在着一个最佳频率,在该频率下,激光平均输出功率最大。

4.4 真空度对输出功率的影响

国外同类器件,抽真空一般只用机械泵,而我们以前都是机械泵加扩散泵,真空度抽得较高。为了了解真空度对输出功率的影响情况,我们比较了低、高真空两种情况下输出功率之间的差异。实测曲线如图 5 所示。刚出光时略有差异,过 2~3 h 后基本趋于一致。由此可见,起始器件真空度抽得太高意义不大,关键要提高器件的密封性能,降低慢性漏气,同时工作一段

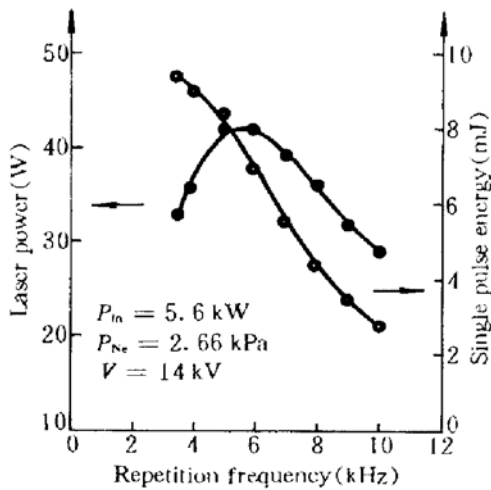


Fig. 4 Laser output power and single pulse energy as a function of the repetition rate

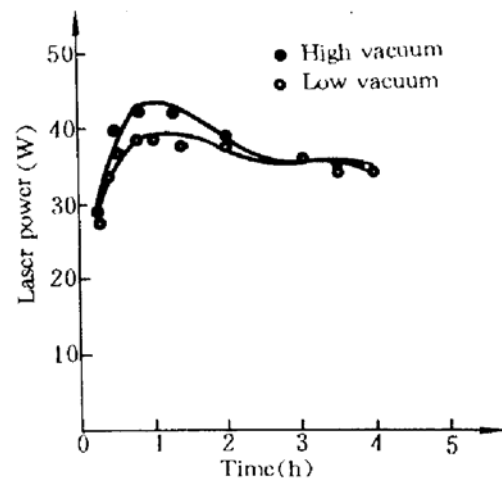


Fig. 5 Laser power as a function of working time

时间流动一下氦气。

致谢 在本实验过程中,得到了汤星里研究员的关心和指导,在数据处理方面,得到雷建求、余勤跃等同志的帮助,在此表示诚挚的感谢。

参 考 文 献

- 1 B. E. Warner, M. J. Kushner. Controlling kinetic parameters of 100 W large-bore copper vapor laser. in CLEOS, 26~28 Feb. 1980, Digest of Technical papers (*Opt. Soc. of Am.*, Wash. D. C.), 1980. 90
- 2 M. J. Kushner, B. E. Warner. Laser-bore copper vapor lasers. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(6): 2970
- 3 Nobutada Aoki, Hironobu Kimura, Chikara Konagai *et al.*. High-power copper vapor laser development. *SPIE*, 1991, 1412: 2~11
- 4 梁宝根, 方无忌, 张斌元 等. 20 W 放电自加热式铜蒸气激光器. *中国激光*, 1986, 13(6): 334
- 5 梁宝根, 陶永祥, 尹宪华 等. $\phi 60$ mm 大口径铜蒸气激光器光束“黑心”问题的研究. *中国激光* (激光器专集), 1990, 增刊: 38
- 6 Stefano Cavaliere, Roberto Pini, Renzo Salimbeni *et al.*. Analysis, design and construction of copper vapor laser system. *Laser and Particle Beams*, 1989, 7(2): 333

Study of 60 W Copper Vapor Lasers

Chen Lin Tao Yongxiang Yin Xianhua Cui Jianli Liang Baogen

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

Abstract A high power copper vapor laser is reported. Its maximum output power is 62 W with an efficiency of 1.0%. Performances of the device are measured and discussed.

Key words copper vapor laser, aluminium oxide ceramic fiber