

大口径铜蒸气激光器的研究

尹宪华 陶永祥 陈 林 杨天立 施懿范 汤星里

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 研制成一台输出功率为百瓦级的铜蒸气激光器,其放电管长度为 220 cm,内径为 6.5 cm,脉冲重复频率为 5 kHz,最大输出功率为 106 W,效率为 1%。给出了激光输出功率与放电参数的关系,通过与小口径 ($D < 6$ cm) 放电铜蒸气激光器比较,阐述了大口径铜蒸气激光器的一些物理特性。

关键词 铜蒸气激光器,大口径,趋肤效应

1 引 言

发展高功率铜蒸气激光器(输出功率 > 100 W)是实现原子法激光分离铀同位素工程化的关键。设计一台高功率、长寿命的铜蒸气激光器最有效途径是增加激光增益体积,也就是扩大放电管口径和长度。然而,增加长度要受到现有放电开关耐压指标的限制;增大放电管口径则是一种实用方法,但随着放电管口径的增大,趋肤效应变得严重,输入放电管内的能量集中在管壁附近,造成激发不均匀,输出功率和光束质量都下降。作者对这些问题作了研究,提出改善方法。

2 实验结果与讨论

2.1 趋肤效应对输入参数的影响

在大口径脉冲放电装置中,由于趋肤效应使得加在激光管两端的电场沿径向呈指数衰减,轴中心区域激发态粒子下降,造成了沿径向激发不均匀。所以如何提高轴中心区域的输入能量,这是研制大口径放电装置中的一个重要问题。通常提高输入能量的方法有,在保证一定的输入电压条件下 ($E > 80 \sim 90$ V/cm) 提高电容量,或者保持电容量不变,尽可能提高输入电压。对此,我们进行了实验比较,在起始主电容 $C_1 = 8.9$ nF、充电电压为 18 kV 且输出功率为 70 W 的情况下,我们分别取主电容 C_1 值为 8.9 nF 和 10.1 nF,然后在保证输入功率相同条件下,分别提高输入电压,观察输出功率,所得结果如图 1 所示,可见采用小电容的结果优于采用大电容的结果,在采用大电容情况下,当输入功率超过 10 kW 时,输出功率下降,光色偏黄,这些现象可以用趋肤效应来解释,由趋肤效应引起电场衰减的函数可以表示为^[1]

$$E = E_0 \exp(-X/\delta) \quad (1)$$

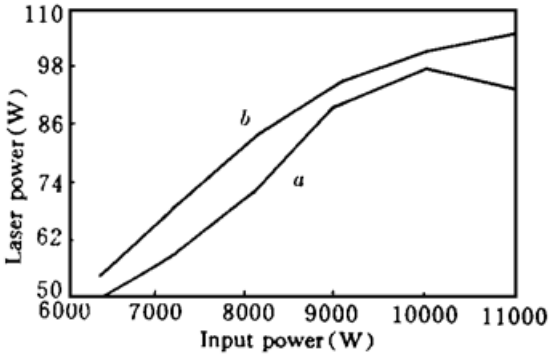


图 1 激光功率随输入功率的变化关系
 Fig. 1 Laser power as a function of input power
 C_2 : 3.7 nF, P. R. F: 5 kHz, D : 6.5 cm
 L : 220 cm, a : C_1 : 10.1 nF, b : C_1 : 8.9 nF

这里 E_0 是管壁处的电场强度, X 是离管壁的距离, δ 是衰减常数, 在我们的实验条件下为 3 cm。所以当电场渗入到管轴, 其强度已是管壁处的 1/3。由于电场衰减, 中心电子温度大大下降。如果用第一种方法来增加输入功率, 由于没有提高电场强度, 大部分输入能量仍然堆积在管壁附近, 只能引起输出功率过早饱和; 而采用第二种方法, 提高了输入电压, 使得管轴附近有更强的电场渗入, 从而改善了输入能量在管壁附近堆积现象。图 2 是在恒定输入电压、改变电容值条件下给出的结果。从图 2 可以看出, 增大电容值虽然能够提高输出功率, 但效率下降很快。根据国外报道的大口径铜蒸气激光器的结果^[1], 也证实了随

着放电管口径增大, 主电容值 C_1 减小, 充电电压增高。这也说明了在大口径脉冲放电条件下, 由于严重的趋肤效应, 采用提高输入电压的方式来增加输入功率比采用增大电容方式更有效。

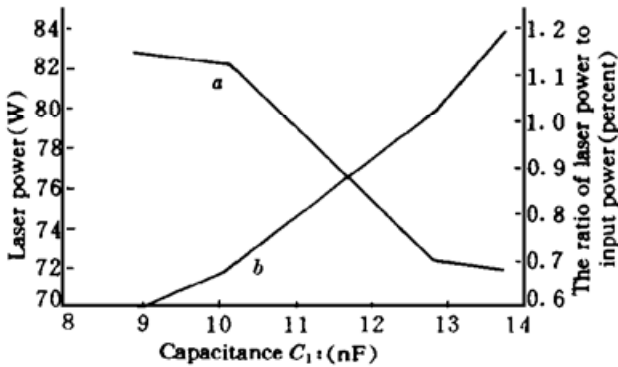


图 2 激光功率及效率与主电容值的关系
 Fig. 2 Laser output and efficiency as a function of capacitance. a : efficiency, b : laser power,
 C_2 : 3.7 nF, Charging voltage: 18 kV

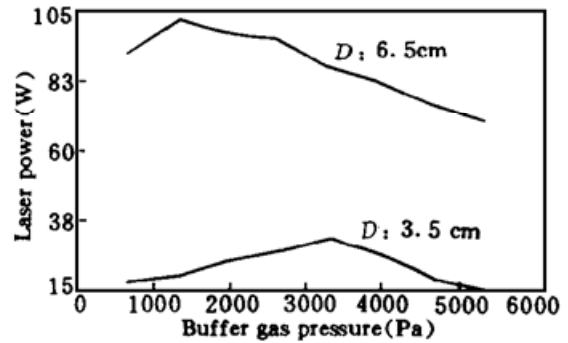


图 3 其它参数不变的条件下激光功率与惰性气体气压的关系
 Fig. 3 Laser power as a function of buffer gas pressure in otherwise optimum conditions

图 3 分别给出了 20 W 和 100 W 铜蒸气激光器输出功率与工作气压的关系。大口径放电条件下最佳工作气压明显偏低, 这也说明了在大口径放电条件下管轴区域电场强度偏低, 为了维持一定的电子温度, 只能降低工作气压。这就是大口径铜蒸气激光器的最佳工作气压值减小的原因。

2.2 放电管直径对最佳输入功率密度的影响

图 4 给出了最佳输入功率密度与放电管直径的关系。理论计算表明, 当输入功率密度和管壁温度一定时, 管轴区域温度随 D 增大而上升。因此, 为了维持铜蒸气最佳工作密度, 最佳输入功率密度必须随放电管直径增加而减小, 过高温会提高激光下能级粒子布居。在小口径放电条件下, 由于管轴到管壁有良好的传热效应, 输入功率密度达 5~6 W/cm³, 而在大口径条件下, 为了防止气体过热, 必须降低输入功率密度。与 $D = 3.5$ cm 放电管相比, $D = 6.5$ cm 放电管的最佳功率密度降低了 2/3。

另外, 输入功率密度越大, 轴中心电子密度越大, 趋肤效应越严重, 总效率降低。

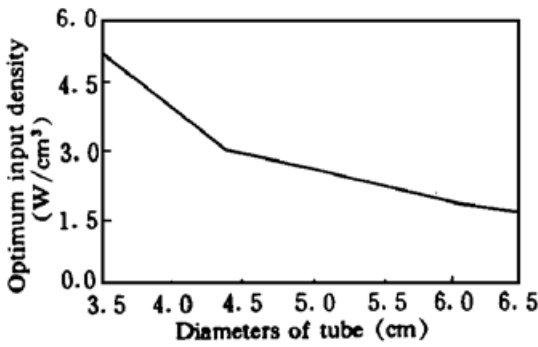


图 4 最佳输入功率密度与放电管内径的关系

Fig. 4 The optimum density of input power as a function of tube diameters

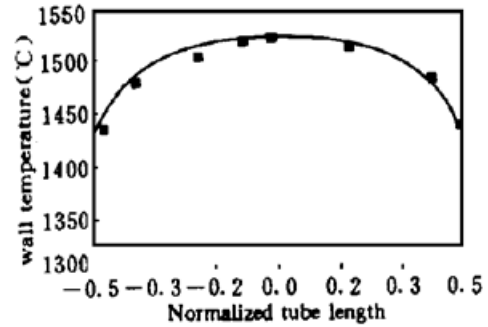


图 5 放电管的轴向温度分布

Fig. 5 Axial temperature distribution of the discharge tube

2.3 铜粒分布与激光输出稳定性

放电管管壁温度分布是该类激光器的一个重要参数。我们用 WDL-3 型光学高温计测得了放电管壁温度分布, 如图 5 所示。发现铜粒所在位置和一次投放量都与激光输出长期稳定性有关。在实验中, 投放铜粒最佳位置处壁温是 1480°C, 其位置距放电管中端 2/3 处, 放在过高温处工作寿命下降, 由于管壁温度分布基本是对称的, 所以只要在管子的对称二点投放铜粒^[2]。铜粒消耗量与输出功率稳定性有关。由于工作期间铜原子随流动氖气排出和向冷端扩散, 一般工作 200 h 后就要重新投放铜粒。每次重新投料后, 输出功率明显增加。因此减少铜源消耗是延长激光器工作寿命的关键。铜原子损耗与气体流量和放电管几何尺寸之比 D/L 成正比, 所以在不影响放电稳定和光束质量的前提下, 尽可能一次投放较多铜, 工作期间尽量减小氖气流量。

2.4 光束结构与光脉宽

图 6 给出了实验得到的光强分布轮廓, 由此可以看出输出光斑为环状, 光强最大位置不是中心, 而是距中心 $\frac{1}{3}R$ 处。这可以从趋肤效应来加以理解, 由于电子温度 T_e 正比于 E/N (E 为电场强度, N 为气体密度), 且放电管内径向电场强度分布与温度分布相反, 而最大粒子数反转空间位置同时受到电场强度分布与温度分布及其它因素的影响, 在我们的实验条件下得到了上述结果。

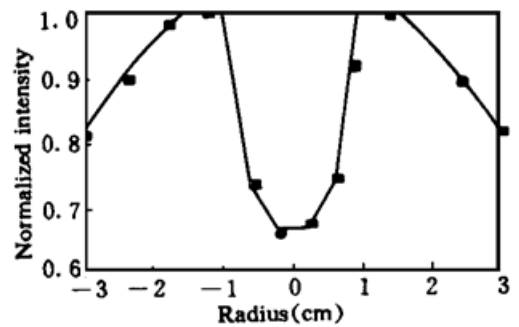


图 6 光束强度的径向分布

Fig. 6 The radial profile of the laser light

另外我们测得光束径向不同位置激光发生的延迟时间, 如图 7 所示。趋肤效应使得电场渗入到管轴需要一段时间, 在渗入过程中, 电场引起了径向不同位置的相继激发, 在径向不同位置, 由于电场强度和温度不一样, 造成了铜原子 2P 和 2D 态密度不一样, 所需的泵浦阈值不一样, 结果沿径向各点位置产生激光的时间、脉宽和强度也不一样。总的激光脉宽约等于粒子数反转时间与电场渗透时间之和^[1], 实验测得大口径放电激光脉宽为 55 ns。根据理论估算, 电场渗透时间为

$$T = 2.7R^2 \tag{2}$$

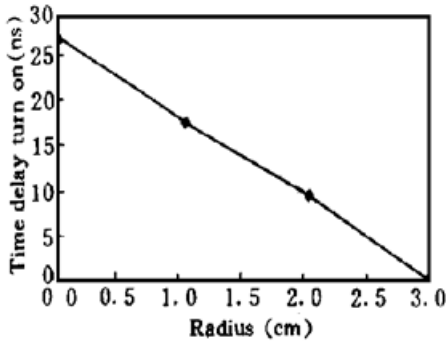


图 7 实验测得的沿光束径向不同位置激光脉冲发生的延迟时间值(激光管内径为 6.5 cm)

Fig. 7 Experimental data for the times at which the laser pulse occurs as a function of the radial position in the 6.5-cm-diam CVL. A time delay of the laser pulse occurrence from nearby the tube wall to the tube center is shown

这里 R 是放电管半径, 可得 $T = 25 \text{ ns}$ 。由此得出实际反转时间为 30 ns , 这一值与测得的 20 W 铜激光脉宽为 $30 \sim 35 \text{ ns}$ 是相符的。大口径铜激光脉宽增大有利于激光放大链工作。实验已证明振荡器光束脉宽增大, 有利于对放大器内功率提取。另外, 激光光子的相干性与光子在腔内振荡次数成正比, 光脉宽增大有助于提高振荡器光束的方向性。我们用 $M = 15$ 非稳腔在百瓦级铜激光器中获得 1 mrad 的发散光束, 而同样在 20 W 铜激光器中只获得 1.2 mrad 的发散光束。

参 考 文 献

- 1 M. J. Kushner. Large-bore copper-vapor laser kinetics and scaling issues. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(6) : 2970
- 2 尹宪华, 梁宝根, 陶永祥 等. 铜蒸气激光器的改进及稳定. 中国激光, 1992, **19**(11) : 808

Study of a Large-bore Copper Vapor Laser

Yin Xianhua Tao Yongxiang Chen Lin Yang Tianli Shi Yifan Tang Xinli
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A large-bore copper vapor laser with a 6.5 cm bore and 220 cm long discharge tube has been developed in this laboratory. A maximum output power of 106 W was achieved. The laser operated at a repetition rate of 5 kHz at the 510.6 nm and 578.2 nm lines of atomic copper. The efficiency reached 1% when the laser operated at the average output power of 95~100 W. Some relations between output power and discharge parameters are presented in this paper. An explanation of the physical characteristics of the large-bore CVL through a comparison of the large-bore CVL to the small-bore CVL is given.

Key words copper vapor laser, large-bore, skin effects