

气动激光窗口的光束传输特性

程祖海 岳超瑜 李再光

(华中工学院激光所)

提要: 本文分析和实验研究了 HAW 型气动激光窗口所形成的小孔光阑效应和类透镜效应对光束传输的影响, 阐明了在高功率气体激光器中使用气动激光窗口的优越性。

Beam transmitting characteristics of an aerodynamic laser window

Cheng Zuhai, Yue Chaoyu, Li Zaiguang

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Abstract: The small aperture effect and the lens-like effect formed by model HAW aerodynamic laser window are analysed and studied experimentally, and the advantages making use of the aerodynamic laser window in high power gas laser are described.

一、HAW 型气动激光窗口的结构特点

常用的晶体透射窗口在输出高功率激光时, 由于窗口的基体材料, 特别是膜层对光的吸收结果, 导致输出光束在不同功率输出时有不同的热焦距, 甚至产生炸裂现象, 破坏激光器的正常工作。气动激光窗口采用折射率接近于 1、对 CO_2 激光吸收极小的气体作为窗口就不存在这些问题, 窗口的使用寿命难题也得到了根本的解决。

HAW 型抽气式气动激光窗口* 主要由前后两个喷嘴和一个抽气腔所组成。在气动窗口与共焦非稳腔 45° 侧向输出耦合镜之间装有一真空阀门。气动窗口工作时, 打开真空阀门, 从非稳腔输出的高功率激光束经预

聚焦后通过前后两个喷嘴和抽气腔直接射入大气, 同时大气也经由特殊设计的主喷嘴进入抽气腔由真空泵抽走。在精心设计气动窗口结构和正确选择抽气腔压力的前提下, 可实现以空气为密封介质, 达到隔离激光腔内外压差的真空密封目的。在激光器全封闭(即不向激光器腔内补充激光工作气体)的条件下, 在激光器不放电时, 激光器腔内工作气体中氦气的外漏率为 0.14%/小时, 通过气动窗口进入到激光器中的氧气增加率为 0.045%/小时; 当激光器放电, 且有二千瓦功率输出时, 激光器内工作气体中氦气的外漏率仍维持在 0.14%/小时左右, 而腔内氧气成分的增加率, 由于漏入的氧气与激光器

收稿日期: 1985 年 12 月 23 日。

* 1985 年 11 月 15 日该气动激光窗口在保加利亚举行的世界青年发明家科技成果展览会上获金质奖章。

放电过程中离解出的 CO 和 NO 等气体的复合作用而较之不放电时略有降低。在一般情况下,当激光器腔内氧气的含量增加到 2% 时,对于横流电激励 CO₂ 激光器的输出特性及稳定性无明显的影响。由此可以得出,对于一个腔内贮气体积为 2m³ 的 CO₂ 激光器,使用本文提出的 HAW 型气动窗口,可使该激光器一次充气连续封闭工作 50 小时以上。

二、小孔光阑效应的影响

为了降低真空泵的抽速和运行成本,一般总希望气动窗口的通光孔径尽量减小。如图 1 所示,当气动窗口与共焦非稳腔配用时,由于从共焦非稳腔中输出的是中空平行环状光束,经预聚焦镜 M₄ 聚焦后,在焦平面附近(气动窗口抽气腔内)的远场光斑强度分布是一中心为一亮点的夫琅和费衍射图样^[4]。我们用计算机分别计算了 M=1.4、1.8、2.0、2.5 和 ∞ 几种 M 数的共焦非稳腔输出环状光束远场相对能量分布和归一化积分功率百分比,其结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, M 数越大,即输出光束环带面积与空心面积比越大,在焦平面上主瓣功率和前几级旁瓣内的功率所占总功率的百分比也越大,高次

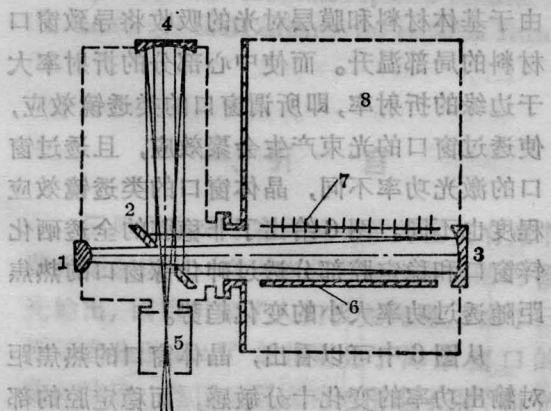


图 1 HAW 型气动窗口与共焦非稳腔连接示意图

- 1—凸面腔镜; 2—45° 耦合镜; 3—凹面腔镜;
- 4—预聚焦镜; 5—HAW 窗口; 6—阳极;
- 7—阴极; 8—激光器

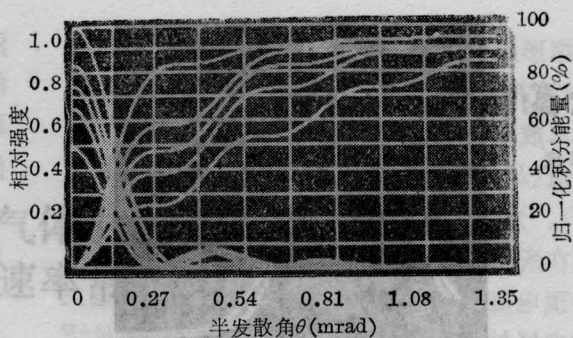


图 2 不同 M 数的环状输出光泵远场相对强度及其积分能量分布(曲线由下而上 M=1.4、1.8、2.0、2.5、∞)

旁瓣所占百分比功率急剧衰减。兼顾到降低真空泵抽速和运行成本等因素, HAW 型气动激光窗口最小通光孔径设计原则是保证顺利通过 96% 以上激光总功率。只要适当加强窗口的冷却措施,气动窗口的小孔光阑效应对输出激光功率和窗口使用寿命均没有多大的影响。

三、类透镜效应的实验研究

HAW 型气动激光窗口的类透镜效应主要产生于与大气相连的超音速扩张主喷嘴。在超音速喷嘴中,气流速度随喷管面积比的增大而增大,而气流的静压、温度和密度则随面积比的增大而减小。因此,沿光束的出射方向,气动窗口的气体密度将不断变化。这种变化包括在轴线上密度的不断上升和沿径向密度的不断下降,这两种变化的总趋势都将导致出射光束产生会聚效应,且后者比前者要严重得多。

考虑到气动窗口的真空密封稳定性和类透镜效应是仅由窗口本身的结构和流场分布所决定,而与通过窗口的激光功率大小无关,我们在研究气动窗口的类透镜效应时,可以避免高功率激光在操作和防护上的麻烦,用小功率 CO₂ 管和氦-氖管来模拟代之。图 3(a)、(b) 分别为 He-Ne 激光束通过 HAW 窗口,在气动激光窗口运行和气动窗口不运

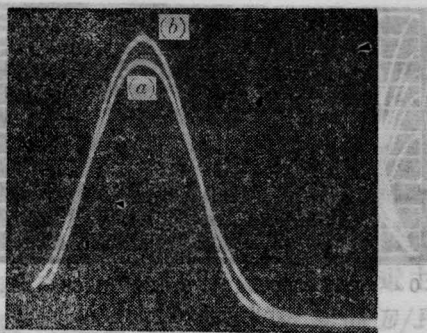


图3 He-Ne 光束通过气动窗口的会聚效应
(a) 气动窗口未运行; (b) 气动窗口运行

行时光束横向强度分布和光斑直径的变化。

从图3可以清楚地看出,气动窗口流场对He-Ne光束有轻微的会聚作用,其表现为光斑直径变小和中心强度增加,但光强的横向分布仍保持高斯光束的特征。我们采用图4所示的曝光显示装置,直接测试了He-Ne光束和CO₂光束通过气动窗口后会聚角 θ 的大小。对于CO₂激光,在感光屏4处放置热敏纸屏,对于He-Ne激光,我们用去掉镜头的照相机,用B门控制在底片上直接曝光。图5(a)、(b)分别表示在距气动窗口6.95 m处He-Ne光和CO₂光通过气动窗口后光束直径的变化大小。

由于CO₂激光的波长较长,折射率较小,因此从曝光光斑上难以测量出气动窗口对其

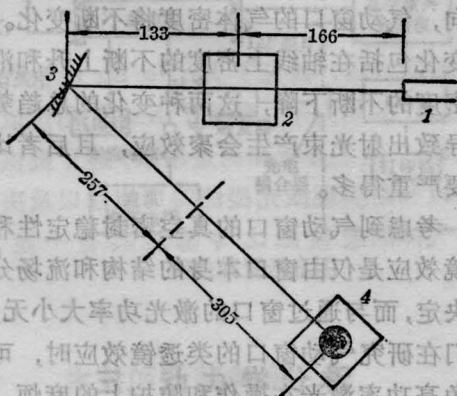
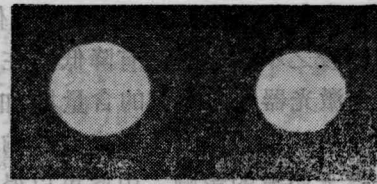
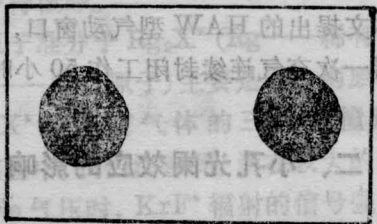


图4 曝光显示法测量气动窗口会聚效应装置原理图

1—光源; 2—HAW窗口; 3—反射镜;
4—感光屏(照相机或热敏纸)



(a) He-Ne 激光



(b) CO₂ 激光

图5 光束通过气动窗口后的光束直径变化

曝光距离: 6.95 m; 比例: 1:1;
曝光时间: (a) 1/1000s; (b) 15s;
左边: 气动窗口未工作;
右边: 气动窗口工作

会聚效应的大小。而对于波长较短的He-Ne激光则较明显看出这种会聚效应。计算结果表明,气动激光窗口对He-Ne激光的会聚半角 θ 约为0.18mrad。

四、与固体窗口的性能比较

任何晶体材料对CO₂激光的吸收系数都远大于空气。当高功率激光透过晶体窗口时,由于基体材料和膜层对光的吸收将导致窗口材料的局部温升。而使中心部分的折射率大于边缘的折射率,即所谓窗口的类透镜效应,使透过窗口的光束产生会聚效应,且透过窗口的激光功率不同,晶体窗口的类透镜效应程度也不同。图6给出了非稳腔的全透硒化锌窗口和稳定腔部分透过硫化镓窗口的热焦距随透过功率大小的变化趋势。

从图6中可以看出,晶体窗口的热焦距对输出功率的变化十分敏感,而稳定腔的部分透射窗口比非稳腔全透窗口的类透镜效应和热焦距变化更为严重,这种变化的类透镜效应和热焦距对激光的各种应用十分不利。

气动激光窗口虽然也存在轻微类透镜

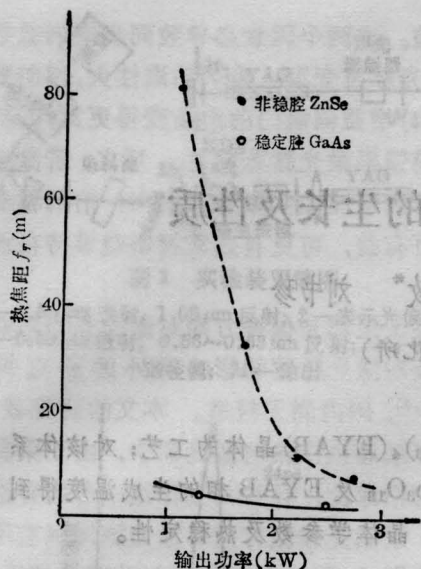


图6 固体窗口的热焦距与输出功率关系
虚线:非稳腔 ZnSe 窗片;实线:稳定腔 GaAs 窗片

效应,但气动窗口的类透镜效应只与窗口的结构和流场分布有关,而与通过窗口的激光功率大小无关。设通过气动窗口的激光功率为 10 kW,经 $f=500$ mm 的预聚焦镜聚焦后通过气动窗口。在聚焦光斑焦平面附近(气动窗口抽气腔内),光束的能量密度很高,将导致气体温度的升高,其变化量为:

$$\Delta T = \frac{q}{C_p} = \frac{q}{\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot R} \quad (1)$$

式中 γ 为空气的比热比, R 为空气气体常数, q 为每摩尔空气分子吸收的热能:

$$q = \alpha I t \quad (2)$$

式中 α 为空气的吸收系数, I 为光强, t 为光束与空气的作用时间。

空气对 $10.6 \mu\text{m}$ 激光的吸收主要是 CO_2 分子和 H_2O 分子。设空气的温度为 300 K,相对湿度为 80%,利用文献 [2] 所给出的

H_2O 分子和 CO_2 分子的吸收系数公式可以得到空气的吸收系数为:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{空气}} &\approx \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{CO}_2} \\ &= 8.2 \times 10^{-7} + 4.5 \times 10^{-6} \\ &= 5.3 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

假设输出激光全部能量都集中在光斑直径为 1 mm 的圆域内,当输出功率为 10 kW 时,焦斑平均光强 $I = 3.14 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。实际上,由于远场光斑的衍射分布影响,焦斑内平均光强应小于此数值。在气动窗口中,焦点位于超音速气流中,气流的速度大于 340 m/s,光与气流场的作用长度约为 40 mm,则光束与空气分子的作用时间为:

$$t = \frac{L}{V} \leq 1.18 \times 10^{-4} \text{ s} \quad (4)$$

通过(1)式可以求得:

$$\Delta T = \frac{\alpha I t}{\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot R} = 1.51 \text{ K} \quad (5)$$

上式表明,由于空气分子对光的吸收所产生的气体升温仅为 1.51 度,显然这种微量升温对气动窗口类透镜效应的影响完全可以忽略。因而气动窗口的类透镜效应仅由窗口结构和流场分布所唯一确定,它不会随通过窗口的激光功率大小的变化而变化,等效于一个固定焦距的凸透镜,可以采用外光路光学元件来完全补偿。这是晶体窗口,特别是在高功率输出的晶体窗口所无法比拟的优点。

参 考 文 献

- [1] 李再光等;《中国激光》,1985, 12, No. 8, 459.
- [2] W. W. Duley; "CO₂ Laser Effects and Applications". Academic press., New York, 1976, p. 354.