

文章编号: 0258-702X(2002)01-0016-05

自由旋气动窗口的类透镜效应研究

刘天华¹, 姜宗福¹, 李文煜¹, 王云萍^{1, 2}, 刘泽金¹, 赵伊君¹

(¹国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073; ²北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

提要 对高能激光器自由旋气动窗口工作射流的类透镜效应进行了研究。从实验上研究沿自由旋气动窗口射流方向上不可避免类透镜效应的特性, 然后采用几何矩阵光学的原理, 从理论上对自由旋气动窗口的类透镜效应进行详细的分析计算。最后, 分析讨论类透镜效应对自由旋气动窗口的设计所带来的限制条件。

关键词 高能激光器, 自由旋气动窗口, 光束质量, 类透镜效应, 矩阵光学, 大尺度波前畸变

中图分类号 TN 243, TN 248.2 **文献标识码** A

Study on the Effect of Similar Lens of Free-vortex Aerodynamic Window

LIU Tian-hua¹, JIANG Zong-fu¹, LI Wen-yu¹,
WANG Yun-ping^{1, 2}, LIU Ze-jin¹, ZHAO Yi-jun¹

(¹*School of Science of National University of Defense and Technology, Changsha 410073*)
(²*Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094*)

Abstract This paper studies the effects of lens-like effect of the free-vortex aerodynamic window (FADW) of high energy lasers. First the properties of inevitable lens-like effect of FADW are studied experimentally. And then it gives the detailed description using the principle of matrix optics theoretically. At last the limit conditions of the FADW design originated from lens-like effect are discussed and analyzed.

Key words high power laser, free-vortex aerodynamic window (FADW), beam quality, lens-like effect, matrix optics, large-scale wavefront aberration

自由旋气动窗口是高能激光器传统的晶体输出窗口的有效替代手段之一, 属于激光器第二代输出窗口。它能够有效地解决由于晶体窗口对光辐射不可避免的部分吸收作用所导致的激光器输出功率和输出激光光束质量进一步提高的瓶颈问题, 使高能激光器大功率或超大功率应用成为可能^[1, 2]。

通过设计自由旋气动窗口的非对称 Laval 喷管, 使压缩气体经过 Laval 喷管后的自由射流满足自由旋流动的特性, 并使其内外两侧压力分别与激光器腔压和外界环境压强相等, 从而使自由射流成为一个具有一定压力梯度的气幕, 起到密封激光器的作用, 保证高能激光器的正常工作, 文献[1]给出了自由旋气动窗口工作原理。强激光的输出要穿过气动窗口的自由旋射流, 因此气动窗口不可避免地将会

在一定程度上影响到输出激光的光束质量。因此, 气动窗口的设计要尽量减小它对输出激光光束质量的影响。文献[1, 2]分别采用 CO₂ 和 He-Ne 激光对已有自由旋气动窗口的一些光学特性进行了研究。本文在此基础上, 采用文献[2]所用的远场法, 用 He-Ne 激光研究自由旋气动窗口的自由射流所产生的类透镜效应。并利用矩阵光学原理对自由旋气动窗口的类透镜效应进行理论分析。同时分析透镜效应对气动窗口的设计所带来的限制条件, 为自由旋气动窗口进一步的设计提供理论和实验依据。

1 实验原理及结果分析

1.1 实验原理

收稿日期 2000-10-09; 收到修改稿日期 2000-12-27

作者简介 刘天华(1974.11—), 男, 河南商丘人, 在读博士, 目前主要从事激光器件及相关技术, 激光传输及气动光学等方面的研究工作。E-mail: liu.th@263.net

利用远场法对自由旋气动窗口的偏转、抖动及远场光斑分布等一些光学特性进行了比较详细的实验和理论分析研究,可以从总体上了解自由旋气动窗口的光束质量,并为以后的进一步研究工作奠定了基础^[2]。实验还发现自由旋气动窗口对透过的激光束存在一定的扩束现象,本文在文献[2]工作的基

础上对其进行更深入的实验研究,并给出详细的理论分析和计算。图1为本实验的原理图,经过扩束的 He-Ne 激光通过自由旋气动窗口,把去掉物镜的 CCD 相机放在会聚透镜 L 的焦点附近,使远场聚焦光斑直接打在 CCD 像面元上,然后经由图像采集系统将光斑图样输出到计算机,进行相应数据处理。

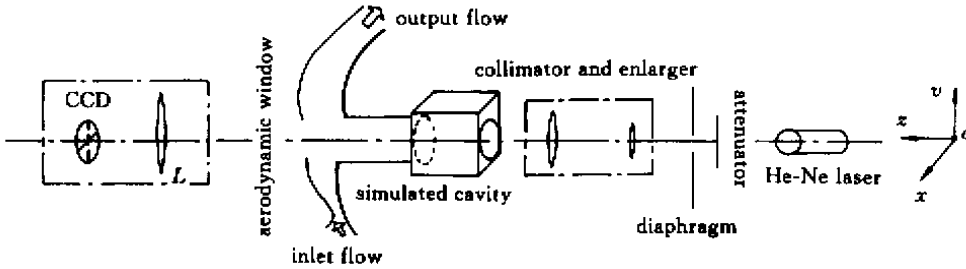


图1 自由旋气动窗口光学特性实验基本原理图

Fig.1 Principle schematic of the experiment on optical properties of FADW

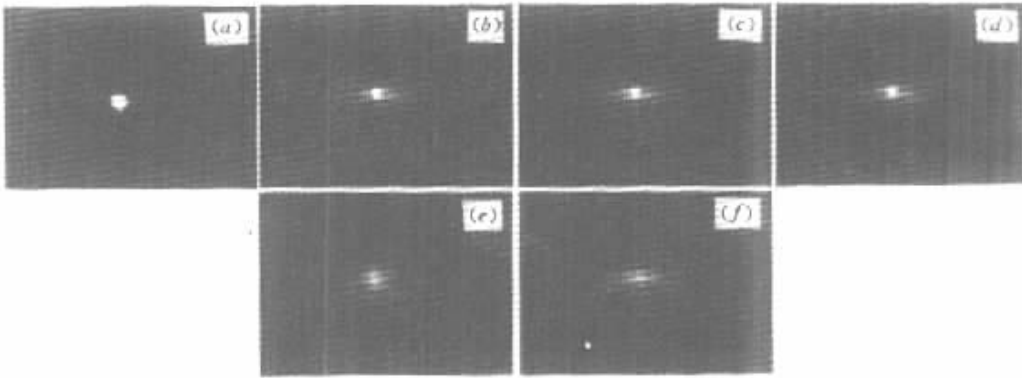


图2 透过自由旋气动窗口的 He-Ne 激光远场聚焦光斑图

Fig.2 Far-field converged beacon of He-Ne laser through the FADW

(a) no flow ; (b) $p_0 = 10 \text{ atm}, 1 \text{ s}$; (c) $p_0 = 10 \text{ atm}, 2 \text{ s}$; (d) $p_0 = 10 \text{ atm}, 3 \text{ s}$; (e) $p_0 = 5.84 \text{ atm}, 2 \text{ s}$; (f) $p_0 = 13 \text{ atm}, 2 \text{ s}$

1.2 实验结果分析

本实验所用的气动窗口仍为文献[2]改装后的 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 自由旋气动窗口,而其他有关的实验器材的选取也基本不变。实验时气动窗口持续 3 s 的工作时间,而我们测量了供气总压在 $3 \sim 13 \text{ atm}$ 内的数十种不同的工作情况,图2给出的是本文重点引述的几种情况下的远场光斑图。其中(a)为气动窗口没有工作时的原始光斑图,(b)~(d)为气动窗口工作在入口供气总压为 $p_0 = 10 \text{ atm}$ 第 1, 2, 3 秒时的光斑图,而(e)(f)分别为气动窗口工作在入口供气总压 p_0 为 5.84 和 13 atm 时第 2 秒的情况。

文献[2]定义了自由旋气动窗口的相对光束质量 β 因子的概念,它能直接反映气动窗口为透过其激光输出通道的激光束所带来的发散程度的大小,

β 因子越小说明气动窗口对激光束的影响也越小,反之亦然。因此 β 因子是描述激光束扩展的最直接的参量,可以利用二阶矩法对各种工作情况下的气动窗口沿射流方向上的 β 因子进行计算,研究其扩展情况,分析其类透镜效应。图3给出了气动窗口工作在几种不同的入口供气总压时 β 因子随时间的变化曲线,图4为气动窗口稳定工作在第 2 秒时 β 因子随入口供气总压的变化曲线。

从图3和图4可以看出,自由旋气动窗口工作时,沿着气动窗口自由射流方向,会对激光的输出带来一定的扩展。当气动窗口供气总压偏离设计状态较远时,扩展的程度也较大;而在其设计状态下(本文所研究的气动窗口的设计供气总压在 $8 \sim 12 \text{ atm}$ 之间),对 β 因子的影响也很小,在气动窗口稳定工

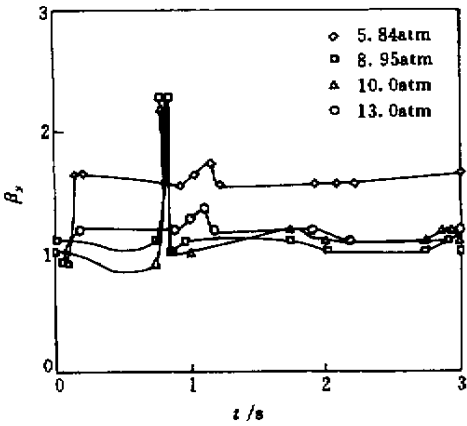


图3 几种不同供气总压下 β 因子随时间的变化曲线
Fig.3 Curve of factor β with the time for different p_0

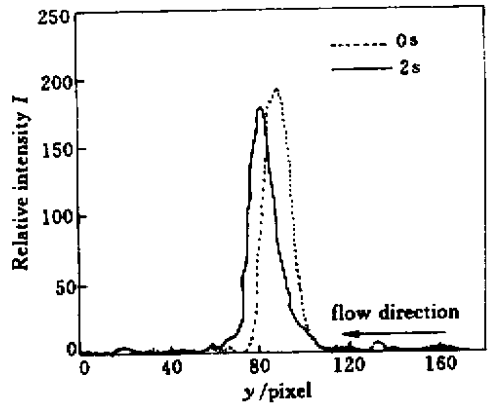


图5 当 $p_0 = 10 \text{ atm}$ 时光斑中心处沿气动窗口射流方向的相对光强分布曲线

Fig.5 Distribution of the relative laser intensity at the circle of the beam facula in the flow direction for $p_0 = 10 \text{ atm}$

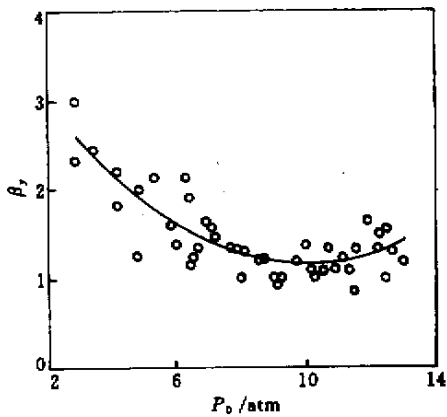


图4 第2秒时 β 因子随不同供气总压的变化
Fig.4 Variety of β with different p_0 at the 2nd sec

作以后 β 因子基本上在 1.2 以下。从图中还可以看到,气动窗口工作在 0.7 s 附近时, β 因子的值却有个突变,这可能和气动窗口启动时在激光输出通道上所产生的十分复杂的非定常流动有关,有关自由旋气动窗口自由射流的进一步实验和理论研究还需要深入开展。从图 4 还可以看出,随着入口供气总压的逐步增加,气动窗口的 β 因子会逐渐减小,而当超过其设计总压以后 β 因子又略有升高,可能是因为总压升高以后在气动窗口喷管出口形成复杂的波系有关。

为了更好地了解自由旋气动窗口对透过激光束光学性质的影响,图 5 给出了远场光斑中心处沿气动窗口射流方向的功率密度分布曲线。由图 5 明显可以看出,气动窗口在稳定工作时,透过的激光束会沿着射流方向产生一定的偏折,同时中心强度下降,

光束有一定的扩展。

分析可知,对沿气动窗口射流方向 β 因子的影响主要是由与空气交界的边界层和射流本身的类透镜效应所致^[2]。而事实上,根据自由射流与空气所产生的边界层的特性可知,边界层的存在主要导致激光束光轴的偏折和激光光束波前的小尺度畸变。由于自由旋气动窗口的工作气体射流是一段弧形射流,同时具有一定的压力梯度和密度梯度,因此沿着激光输出的方向,会有一定的折射率梯度^[1],进而表现为一定的类透镜效应。因此在激光束输出的方向,气动窗口自由射流的透镜效应,是使透过的激光束产生一定扩散效应的主要因素。

2 自由旋气动窗口类透镜效应的理论分析

2.1 理论分析

自由旋气动窗口的射流是具有一定曲率分布的自由旋涡的一部分^[1]。而根据激光束输出的方向性,可以只考虑沿激光束出射方向的射流部分,即图 6 中 (b) 区域所示部分。由几何光学可以将具有透镜效应的区域分为三部分,即图 6 中的 (a) (b) (c), 分别为低压 (激光腔压) 射流和高压 (环境大气压) 部分。而 (a) (c) 两部分为折射率均匀的区域。不妨设区域 (a) (b) (c) 及总等效类透镜焦距分别为 f_a f_b f_c f_Σ , 则根据矩阵光学的原理^[3]有

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_\Sigma} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_c} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_b} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_a} & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ -\frac{1}{f_a} & -\frac{1}{f_b} & -\frac{1}{f_c} \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

于是有(2)式成立

$$\frac{1}{f_\Sigma} = \frac{1}{f_a} + \frac{1}{f_b} + \frac{1}{f_c} \quad (2)$$

另外,由几何光学很容易就可得到(a)(c)两部分的等效透镜焦距 f_a, f_c 的表达式

$$\frac{1}{f_a} = \frac{n_a - 1}{R_1}, \quad \frac{1}{f_c} = \frac{n_c - 1}{-R_2} \quad (3)$$

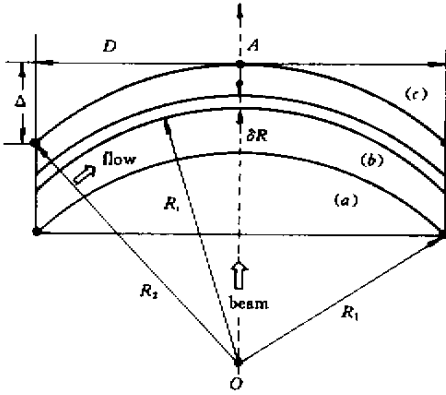


图 6 自由旋气动的射流示意图

Fig.6 Diagram of the free-vortex jet of FADW

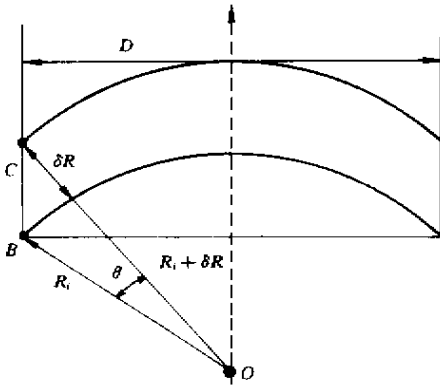


图 7 delta R 环围区域放大示意图

Fig.7 Enlarged diagram of the scope delta R in Fig.6

其中 n_a, n_c 分别为其折射率,由于 $n_a, n_c > 1$,由(3)式可知(a)表现为凸透镜效应,而(c)则表现为发散凹透镜效应。因此求 f_Σ 的关键就在于求 f_b 。由于射流的折射率和密度是射流半径的函数,因此求 f_b 时可沿着自由射流曲率半径方向将(b)区域进行圆环划分,见图6。由式(1)则有

$$\frac{1}{f_b} = \sum_i \frac{1}{f_i} \quad (4)$$

其中 i 为分割区域序数。图7为将由 δR 所环围的圆

环区域放大后的示意图,由其几何关系可知

$$\overline{BC}^2 - \delta R^2 = 2R_i(R_i + \delta R)(1 - \cos\theta) > 0 \quad (5)$$

因此当 δR 足够小时,分割区域 i 为等效发散透镜,并有

$$\frac{1}{f_i} = \frac{(n_i - 1)\delta R}{-R_i^2} \quad (6)$$

这样就可以求得

$$\frac{1}{f_b} = \sum_{\delta R \rightarrow 0} \frac{1}{f_i} = \sum_{\delta R \rightarrow 0} \frac{(n_i - 1)\delta R}{-R_i^2} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{n(R) - 1}{-R^2} dR \quad (7)$$

另外根据气动原理有

$$\begin{cases} n(R) - 1 = A\alpha(R) \\ \alpha(\lambda) = \rho^* \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \\ vR = \text{const} \\ \lambda = v/a^* = \frac{C}{R} \end{cases} \quad (8)$$

其中 A 为空气的折射率系数, $\alpha(R)$ 为半径为 R 处的射流密度, ρ^* 为滞止密度, a^* 为滞止声速, v 为 R 处的射流速度, γ 为比热比, C 为常数。因此可得

$$n(R) - 1 = A\rho^* \left[1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \left(\frac{C}{R}\right)^2\right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (9)$$

由(7)式和(9)式可以看出,对 R 的积分并不好求解。但是,由于用气动窗口的自由射流的密度和折射率沿着半径方向是连续变化的,因此作为近似可以对(7)式进行适当的简化

$$\begin{cases} \frac{1}{f_b} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{n(R) - 1}{-R^2} dR = (\hat{n} - 1) \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{-R^2} \\ \hat{n} \approx \frac{n(R_2) + n(R_1)}{2} \end{cases} \quad (10)$$

因此有

$$\frac{1}{f_b} = \frac{[n(R_1) + n(R_2) - 2](R_2 - R_1)}{-R_1 R_2} \quad (11)$$

这样对于特定的自由旋气动窗口来说,由(2)(3)和(11)式就可以求出气动窗口总的等效透镜焦距了。

由于在文中不能给出本文所研究的气动窗口的具体参数,并与实验进行比较,因此,为了从总体上把握三个部分类透镜效应的大小,作为例子本文给出一个合理的自由旋气动窗口的假设参数,并对三者之间的比例关系进行估算。假设气动窗口的密封压比为20,而内外半径之比为1.35,计算则有

$$\left| \frac{1}{f_a} \right| : \left| \frac{1}{f_b} \right| : \left| \frac{1}{f_c} \right| \approx 0.067 : 0.31 : 1 \quad (12)$$

于是有

$$\frac{1}{f_{\Sigma}} = (-0.067 + 0.31 + 1) \frac{1}{f_c} \approx 1.24 \frac{1}{f_c} \quad (13)$$

从上面的分析计算可以看出,自由旋气动窗口所产生的类透镜效应各分量中,工作射流本身并不是起主导作用的,而主要是由气动窗口射流外侧的曲率半径所致,也可以认为是图6中的外侧环境大气(c)部分所致。同时,由于外侧高压部分具有发散凹透镜的性质,因此对于整个自由旋气动窗口来说,它所具有的类透镜效应同样也是发散透镜的作用。它是自由旋气动窗口所固有的特性,不可能完全消除,但是,在设计中可以根据要求而尽量减小它所带来的负面影响。而且在强激光的远场应用时,可以采用自适应光学系统,对其进行波前校正,以保证输出强激光的光束质量。

2.2 类透镜效应对自由旋气动窗口设计的影响

自由旋气动窗口在实际工作时,其自由射流是一个十分复杂的流动,特别是在稍微偏离理想设计状态时,会有边界层、各种复杂的激波或膨胀波系的产生,所有这些对输出激光束的光束质量都会产生一定的影响,而且对于前面所述的类透镜效应也会变得复杂起来。但是,对于诸如边界层等真实流场对激光束光束质量的影响一般都是非定常的,是随机的。因此在设计气动窗口或对其进行实验研究之前,是无法确定的。所以采取一些简化的手段和理想设计计算对自由旋涡气动窗口的工程化设计来说是十分必要的,前文对自由旋气动窗口的类透镜效应分析就可以为设计自由旋气动窗口提供直接的参考依据。

自由旋气动窗口除了要能够起到密封作用以外,还必须能够保证一定的光束质量的要求。对于给定要求的密封压比来说,可以有不同的自由旋气动窗口来实现,选取不同的射流半径^[4]。但是,由(3)(13)式可以看出,具有不同半径自由射流的气动窗口对光束质量的大尺度光束畸变所带来的影响是不同的。因此,满足一定要求的光束质量成为气动窗口设计的又一个限制条件,使气动窗口自由射流半径的选择和设计不再无章可循。

如图6所示,如果要求气动窗口的最大光波前畸变小于 $\lambda/15$,则必须有下式成立^[5]

$$\Delta \leq \frac{\lambda}{15} \frac{1}{n_c - 1} \quad (14)$$

于是有

$$R_2^2 \geq \left(\frac{D}{2}\right)^2 + (R_2 - \Delta_{\max})^2 \quad (15)$$

即

$$R_2 \geq \frac{D^2}{8\Delta_{\max}} + \frac{\Delta_{\max}}{2} \quad (16)$$

这样就可以优选 R_2 ,进而设计计算自由旋气动窗口的其他参数了。

3 结 论

本文首先从实验上对高能激光器自由旋气动窗口的类透镜效应进行了深入研究,然后采用矩阵光学的原理,从理论上对自由旋气动窗口的类透镜效应进行了详细的分析计算,研究表明自由旋气动窗口的类透镜效应主要是由气动窗口射流外侧的曲率半径所致,即图6中的外侧环境大气(c)部分所致,会对透过激光束带来一定的扩展。并分析讨论了自由旋气动窗口的类透镜效应对自由旋气动窗口的设计所带来的限制条件,从而为自由旋气动窗口的进一步设计工作提供了新的依据,同时也为自由旋气动窗口光束质量的实验研究提供了思路。

光束质量是一项十分重要的气动窗口性能指标,远场法测量简单直接,但它只能反映大尺度的光束畸变和一些较为宏观的光学特性。而关于气动窗口对激光束波前随时间的变化及其空间分布的影响,需要采用干涉法进行研究,比如剪切干涉法、哈特曼波前传感器等。

参 考 文 献

- 1 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Wei Chenghua *et al.*. Design principle of the free-vortex aerodynamic window and an experimental study on its running properties [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(1) 23~27 (in Chinese)
- 2 Liu Tianhua, Li Wenyu, Jiang Zongfu *et al.*. Study on the optical properties of free-vortex aerodynamic window using far-field method [J]. *High Power Lasers and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2001, **13**(1) 9~14 (in Chinese)
- 3 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. Chengdu: Press of Sichuan Univ., 1992
- 4 Liu Tianhua, Tang Rongqi. Ideal calculation of supersonic nozzle of free-vortex aerodynamic window. Zhang Shouqi, Proceeding of the 8th Annual Meeting of Physics Gasdynamics Branch Committee of Chinese Aerodynamics Committee: Study and Application of Multi-phase Detonation [C]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1999. 188~194
- 5 Li Xiaotong. *Geometric Optics and Optical Design* [M]. Hangzhou: Press of Zhejiang Univ., 1997