

# 环境对激光束变换的理论分析与实验

张国顺 李瑞铭 崔满丰 赵祥明 赵爱国

(天津大学精仪学院激光器件室, 天津 300072)

**摘 要** 介绍一种新型的光学元件, 它可把一束激光变换成一个两维的激光平面。本文用多光束干涉的原理解释了光平面形成的原理, 同时对应用前景及实用情况也作了一些估计。

**关键词** 环境, 光平面, 相干。

## 1 引 言

本文介绍一种新的光学元件——环境。它与各种球面透镜、棱镜的作用不同, 其形状为内外表面都是圆柱形的一段光学玻璃管。激光束垂直于圆柱轴线以一定角度入射时, 它可将激光束变换成一个  $360^\circ$  的激光平面。该光平面与四周光屏相交时, 可得出一条水平亮线。这条水平亮线是由一定间隔的亮点组成。

对此现象的理论与实验分析研究, 最早见于七十年代。文献[1]仅注意到  $180^\circ$  范围内的干涉条纹, 认为此条纹是由于外表面直接反射光与透过环境外壁经内壁反射又透过外壁的光之间发生干涉而产生的。文献[2]的理论分析中将环境简化成薄膜或平行平板。本文用多光束干涉的理论, 对这一光学现象作了初步的解释, 得到了与实验结果基本一致的结论。同时本文对于环境的可能的应用作了一些尝试, 并取得了初步的应用结果。

## 2 理论分析

图 1 表示入射激光束与环境的位置关系。当一束 He-Ne 激光与环境轴线垂直, 但不通过轴线入射时, 通过环境后的一维激光束立刻变换成二维激光平面。在烟雾室内, 光平面清晰可见。光平面与光屏相交时得一条亮线, 仔细观测可知, 亮线是由明暗相间的光点组成。这一光学现象用几何光学的原理可作一些初步的解释<sup>[3]</sup>, 本文尝试用多光束干涉的理论来解释环境的干涉现象。

为使问题简化, 首先假设:

① 环境的几何形状是理想的, 内外圆柱面同心, 半径不变, 不考虑其制作误差。

② 因激光束截面是一个圆, 所以干涉光场实际是一个三维场。现在只考虑平面光场分布即只考虑与环境中心轴线相垂直, 包含光束轴线的平面上的光场分布, 同时又只考虑此平面光场中以环境中心轴为圆心的圆观察屏上的光强及条纹间距。

图 1 中环镜外表面直接反射的光分布的光区称为 O 区, 所有经内壁第一次反射再透出外壁的光所分布的光区称为 I 区, 由此类推有 II 区、III 区、IV 区……等。由图可知某些区之间有一定的重叠。环镜的干涉现象属分振幅干涉, 只是与平行玻璃板的干涉现象不同。入射光束对于环镜的方位不同, 会有不同的干涉花样。环镜的内外径不同, 对光场的分布也有影响。

由于干涉花样是各重叠光区内光束发生干涉而产生的, 因此, 首先确定光区的个数, 即光束的上下边缘光线在环镜中折射、反射、透射出来的光所形成的光区的个数, 再考虑重叠区内某点参与干涉的光的约束条件, 求出光程, 进而得出这些光线之间的光程差。按照光强公式算出各点的相对光强, 并求出各点间距。

在图 2 中, 设光①和光②分别为激光束最外边两条光线,  $Y_1 - Y_2 = H$ ,  $H$  为光束宽度。设  $N_0, N_1, N_2, N_3$  是光①透射、反射的法线组。  $N'_0, N'_1, N'_2, N'_3$  是光②透射、反射的法线组。由于圆环的对称性, 两组法线中每相邻两法线间的夹角是相同的, 设此角为  $\alpha$  和  $\alpha'$ , 由正弦定理及折射定律可得:

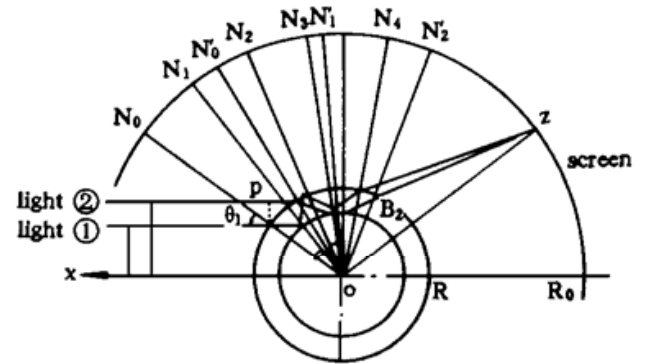
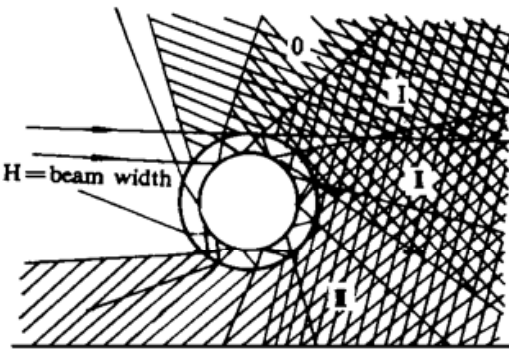


Fig. 1 Relation between laser beam and location of glass ring Fig. 2 Situation of laser beam transmission and reflection

$$\text{对光 ①: } \alpha = \arcsin(Y_1/nr) - \arcsin(Y_1/nR) \tag{1}$$

$$\text{对光 ②: } \alpha' = \arcsin(Y_2/nr) - \arcsin(Y_2/nR) \tag{2}$$

式中  $n$  为玻璃折射率。  $r, R$  分别为环镜的内、外半径。激光束宽度  $H$  内的任一条光线, 只要代入对应的  $Y$  坐标, 就可以确定  $\alpha$  角。

$$\text{设 } [2\pi/2\alpha] = K, \quad [2\pi/2\alpha'] = K'$$

其中  $[ ]$  表示取整数, 说明光①和光②分别在环镜内壁经过了  $K$  和  $K'$  次反射。

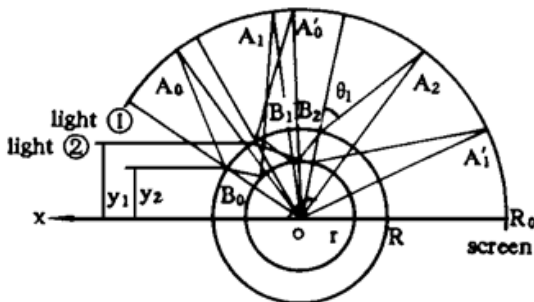


Fig. 3 Laser beam, glass ring and light screen

在图 3 中,  $A_2$  点是光①经内壁两次反射后的出射光与观察屏的交点。  $A_2$  点对圆心的方位角是  $\alpha_v$ 。在  $A_2B_2O$  中, 可求得:

$$\alpha_v = 2 \arcsin(Y_1/R) - \arcsin(Y_1/R_0) + 4 \arcsin(Y_1/nr) - 4 \arcsin(Y_1/nR) \tag{3}$$

经内壁  $N$  次反射后出射光的方位角为  $\alpha_v$

$$\alpha_v = 2 \arcsin(Y_1/R) - \arcsin(Y_1/R_0) + 2N[\arcsin(Y_1/nr) - \arcsin(Y_1/nR)] \tag{4}$$

对光②同理有:  $M$  次反射后

$$\alpha'_v = 2 \arcsin(Y_2/R) - \arcsin(Y_2/R_0) + 2M[\arcsin(Y_2/nr) - \arcsin(Y_2/nR)] \tag{5}$$

由(4)、(5)两式可判定屏上某点所在位置是哪几个区的重叠。参考图 2, 在后面的分析中, 用

$Y_1, Y_2$  表示激光束  $H$  宽度内任意两条光线 ① 和 ② 的坐标。光 ① 和光 ② 经几次反射后, 在屏上相交于一点为  $Z$ 。考虑  $\Delta OB_2Z$  与  $\Delta OB_1Z$  可得光 ①、光 ②、 $OZ$  与  $X$  轴的夹角, 又因两光线相交于一点, 所以夹角相等, 即:

$$4\alpha + 2\theta_1 - \arcsin(Y_1/R_0) = 2\alpha' + 2\theta_1' - \arcsin(Y_2/R_0) \quad (6)$$

将  $\theta_1, \theta_1', \alpha, \alpha'$  表达式代入得

$$\begin{aligned} G(Y_1 \cdot Y_2) &= \arcsin(Y_1/R_0) - \arcsin(Y_2/R_0) - 2\arcsin(Y_1/R) + 2\arcsin(Y_2/R) \\ &\quad - 4\arcsin(Y_1/nr) + 4\arcsin(Y_1/nR) + 2\arcsin(Y_2/nr) - 2\arcsin(Y_2/nR) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式表示两束光发生干涉所必须遵守的约束条件。同时利用几何关系可求出光线 ①、② 到  $Z$  点的光程差  $\Delta$  为

$$\begin{aligned} \Delta &= |S_1 - S_2| = |4nB_0C_0 - 2nB_0C_0' + B_2Z - B_1Z - PB_0'| \\ &= |4nr\sin\alpha\sin\theta_2 - 2nr\sin\alpha'\sin\theta_2' + (RR_0/Y_1)\sin[\theta_1 - \arcsin(Y_1/R_0)] \\ &\quad - (RR_0/Y_2)\sin[\theta_1' - \arcsin(Y_2/R_0)] - R\cos\theta_1 + R\cos\theta_1'| \end{aligned} \quad (8)$$

整理成  $Y_1, Y_2$  的函数形式

$$\begin{aligned} \Delta &= 4[\sqrt{(nR)^2 - Y_1^2} - \sqrt{(nr)^2 - Y_1^2}] \\ &\quad - 2[\sqrt{(nR)^2 - Y_2^2} - \sqrt{(nr)^2 - Y_2^2}] \\ &\quad + [\sqrt{R_0^2 - Y_1^2} - \sqrt{R_0^2 - Y_2^2}] - 2[\sqrt{R^2 - Y_1^2} - \sqrt{R^2 - Y_2^2}] \end{aligned} \quad (9)$$

根据屏上某点的发生干涉的光束之间的光程差就可以求出屏上各点的相对光强。射向环镜的  $q$  条光线, 经环镜有限次反射、透射后在屏上某点的干涉光强为:

$$I = \sum_{n=1}^q \sum_{k=1}^q E_n E_k \exp[i(\delta_n - \delta_k)] \quad (10)$$

式中  $\delta_n - \delta_k = \delta_{nk}$  为相位差, 取实部为

$$I = \sum_{n=1}^q \sum_{k=1}^q E_n E_k \cos \delta_{nk} \quad (11)$$

根据物理光学的原理, 反射光与入射光在特定折射率的条件下会有相位跃变。在考虑了相位跃变之后, 就可以计算出各点的光强。其中已知量是观察屏半径  $R_0 = 2$  m, 环镜外径  $R = 3.5$  mm, 环镜内径  $r = 2.5$  mm, 玻璃折射率  $n = 1.5$ , He-Ne 激光束边缘光线的坐标值  $Y_1 = 2.5$  mm,  $Y_2 = 3.5$  mm 等。

由于观察屏太大 ( $R_0 = 2$  m), 综合利用前述各式来计算屏上各点光强, 计算点取样太密, 将十分繁琐。在不影响问题性质条件下, 将问题简化, 每隔 25 cm 弧长取一个点, 在这个点左右每相邻 1 mm 取 25 点计算光强, 从而描绘出整个圆周上明暗条纹间距的变化规律, 如图 4 所示。

**结 论** 为了验证理论计算的可靠性, 在实验室内实际制作了一个直径 4 m 的圆环形观察屏, 如图 5 所示。采用尺寸接近的环镜 ( $R_2 = 3.4$  mm,  $r = 2.2$  m) 实际测量的曲线如图 6 所示。可以看出与图 4 曲线形状基本一致。曲线中有一个间断区, 理论计算表明这一小段内光

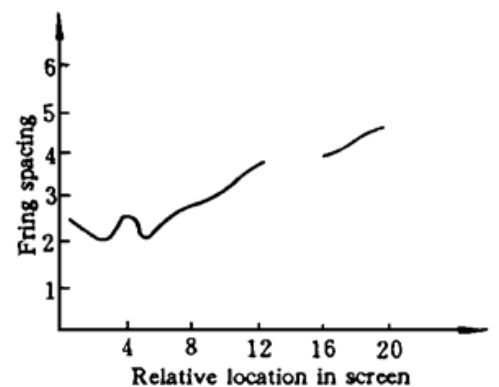


Fig. 4 Calculation curve by computer  
( $R = 3.5$  mm,  $r = 2.5$  mm)

强变化甚小。实验中也观察到这一段是一条连续亮线。理论计算与实验观察基本符合。

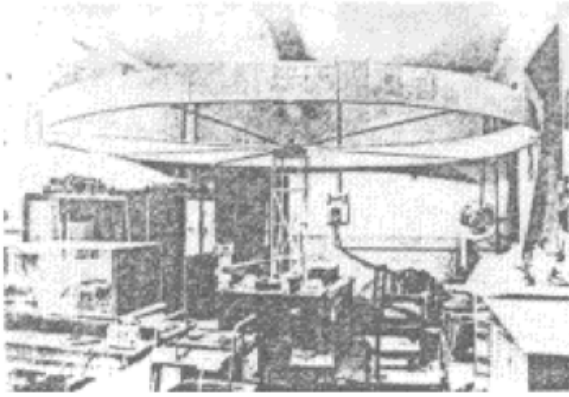


Fig. 5 Experiment apparatus of the light screen,  
( $R_0 = 2$  m)

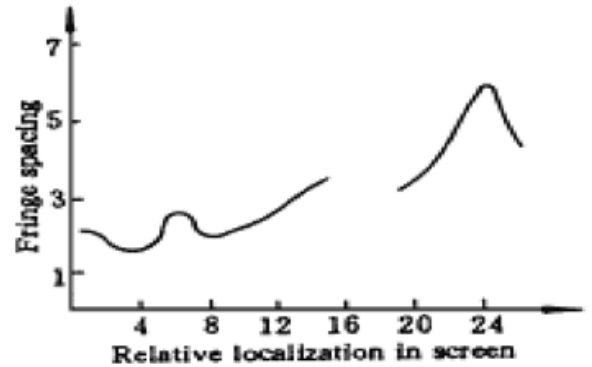


Fig. 6 Experimental curve ( $R = 3.4$  mm,  $r = 2$ .  
2 mm)

环境变换成的两维平面激光在很多领域有可能获得应用。作者已研制成激光平面仪,并取得专利。用 He-Ne 激光束变换成一定精度的激光平面,在建筑、测量、造船行业中可获得应用,作者研制的激光平面仪曾在二滩水电站一百二十分之一地形模型上做过标高测量,受到水利工程人员好评。其次,可见的光平面可用来显示流场。如内燃机气缸内可燃气体混合雾化情况,可用若干个激光平面显示出来,从而进一步改进气缸、喷咀等零部件的设计。还可以做成高速弹道摄影中的光网。当飞行弹体穿过光网时,接收系统会将信号处理,控制摄像系统对高速飞行弹体进行拍照。此外,环境除能把激光束变成激光平面之外,还可变换成螺旋面、螺旋线。可以作为教学演示,也可作为舞台照明,产生艺术效果。显然,环境对激光束的变换,还会有更广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Wieciam H. Southwell, Coherent interference pattern from a cylindrical cylindrical glass tube. *Amer. J. Phys.*, 1973, **41**(2): 284~ 286
- [2] B. B. Lavd, P. L. Sardesal, S. H. Behere, On a demonstration of the interference and coherence of light. *Amer. J. Phys.*, 1973, **41**(5): 720~ 722
- [3] 张国顺,程福安,刘洛等,环境对激光束的变换.天津大学学报,1986, **19**(1): 124~ 128

## The Analysis and Experiment of the Transformation of the Laser Beam from a Glass Ring

Zhang Guoshun    Li Ruiming    Cui Manfeng

Zhao Xiangming    Zhao Aiguo

(Institute of Precision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 30 June 1996, revised 9 September 1996)

**Abstract** A new optical element called Glass Ring is introduced in this paper. It can transform laser beam into a laser beam plane. The mechanism of the laser beam plane forming is explained by the principle of multi-light beams coherent interference. Some application and possible future applications of the glass ring are also introduced.

**Key words** Glass ring, light plane, coherence.