

实现双半高斯空心光束宽度半径比调谐范围为 0.1~1 的技术研究

肖崇溧¹ 万春明¹ 董 渊¹ 刘旭东² 宋业英¹

(¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022
² 国家汽车零部件产品质量监督检验中心, 吉林 长春 130022)

摘要 提出了一种利用改进型的卡塞格林光学系统(反射式正圆锥镜和球面反射镜相结合的光学系统)来产生一种光强分布特殊的空心激光束(双半高斯空心激光束)的新方案。详细分析了正圆锥镜的锥角、高斯光束的张角、球面反射镜的曲率半径等因素对该光学系统的球差以及宽度半径比的影响。通过对上述参数的调整,可以很容易获得宽度半径比的可控范围为 0.1~1 的双半高斯空心激光束。测试结果验证了由该系统所产生的空心光束确属于双半高斯空心光束范畴。

关键词 激光光学;改进型的卡塞格林光学系统;双半高斯空心激光束;宽度半径比

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0514001

Research on the Formation Scheme of Double Half-Gaussian Hollow Beams with the Ratio of Ring Width to Radius Being 0.1~1

Xiao Chongli¹ Wan Chunming¹ Dong Yuan¹ Liu Xudong² Song Yeying¹

(¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² National Automotive Parts Product Quality Supervision and Inspection Center, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A new scheme which can generate special intensity distribution hollow laser beams-double half-Gaussian hollow beams by modified Cassegrain optical system is presented, and the optical system is composed of reflecting positive conic mirror and spheric reflector. The factors such as conic angle of positive conic mirror, the divergence angle of Gaussian beams and the ature radius of spherical reflector, which influence on the ratio of ring width to radius and spherical aberration, are analyzed in detail. By adjusting the above parameters, the double half-Gaussian hollow beams with the ratio of ring width to radius being 0.1~1 can be easily obtained. And the experimental results show that the hollow beams which are generated by the modified Cassegrain optical system is double half-Gaussian hollow beams. The research provides the theory of generating the double half-Gaussian hollow beams with the ratio of ring width to radius being 0.1~1 and establishes solid foundation in the fields of scanning image and communication.

Key words laser optics; modified Cassegrain optical system; double half-Gaussian hollow laser beams; ratio of ring width to radius

OCIS codes 140.0140; 140.3298; 080.0080; 080.1005

1 引 言

随着空心激光技术在生物学、激光加工和原子冷却等方面的广泛应用^[1~4],人们已经利用透射式、衍射式等研制出了各种光强分布形式不同的空心光束^[5~10]。但是,目前得到的空心光束(如利用圆锥透镜实现)在径向上的光强分布的共同点都是从光

环到中心光强逐渐减弱,呈渐变式分布。理论上,只有空心光束中心上的一点光强才为零。也就是说,从空心光束的内边缘到光环的中心,光强分布存在着严重的托尾现象而导致了“空心不空”,而产生该种现象的原因人们并不十分清楚。另外,目前还没有关于控制空心光束宽度半径比的报导。针对上述

收稿日期: 2010-08-18; **收到修改稿日期**: 2010-10-28

作者简介: 肖崇溧(1982—),女,博士研究生,讲师,主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: xiaocl@mail.jlste.com.cn

导师简介: 万春明(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: wcm@cust.deu.cn(通信联系人)

问题,本文提出了利用一种改进型的卡塞格林光学系统(反射式圆锥镜和球面反射镜相结合的光学系统)来产生一种光强分布特殊的空心激光束(双半高斯空心激光束)。关于双半高斯空心激光束的定义、数学描述以及该种空心光束的传输特性已有详尽的描述^[11]。分析了各种因素对该光学系统的球差以及空心光束的宽度半径比的影响,并给出了各种关系曲线。研究表明利用反射式正圆锥镜和球面反射镜相结合的光学系统可以很容易地获得宽度半径比的调谐范围为 0.1~1 的双半高斯空心激光束。通过本论文的研究,将为产生不同宽度半径比的空心光束提供理论依据。

2 双半高斯空心光束形成方案的物理描述

反射式正圆锥镜与球面反射镜的组合光学系统如图 1 所示。该光学系统可以看成是卡塞格林光学系统的一种改进,即把原卡塞格林系统的副镜改为球面反射镜 L_2 ,把主镜改为反射式正圆锥镜 L_1 ,并且把该系统倒用。由光源发射的一束实心基模高斯激光经透镜 L_3 聚焦后变成发散的光束(1 为实心高斯光束的中心光线,2 为实心基模高斯光束的边缘光线)经过球面反射镜 L_2 中心的小孔后入射到反射式正圆锥镜 L_1 ,实心基模高斯激光束从中心轴线 1 一分为二,变成了发散的空心环状光束入射到球面反射镜的内表面,经再次反射后变成会聚的空心光束。若该系统有球差 δL 存在,则空心光束在光轴上会聚成一条焦线段 OO' 。并且在 O 点之前的某个空间位置,空心光束的内外光线出现了交点 A, A' 。随着 δL 的减小, A, A', O, O' 四点将趋近于光轴上的某一点;当 $\delta L = 0$ 时,上述 4 点重合,此时的空心光束质量较好,便于后续的光学系统对其实施有效控制。在 O' 点后又形成发散的空心光束,此时,空心光束的内光线仍为 1 光线,边缘光线仍为 2 光线,但是上、下边缘的光线互相调换,形成对偶;光线 1 和 2 之间为半个高斯光束,从垂轴截面来看整个截面光环呈现出双半高斯分布特性。因此,双半高斯空

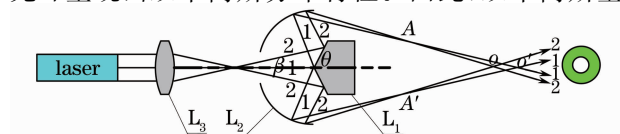


图 1 反射式正圆锥镜与球面反射镜的组合光学系统
Fig. 1 Optical system of reflection-type conic mirror and spherical mirror

心激光束是由分光对偶反射式光学系统对实心高斯激光束经过分光、对偶后形成的。

分析可知,影响球差 δL 大小的主要因素有球面反射镜的曲率半径 R 、正轴棱锥的半锥角 θ 、球面反射镜的曲率中心与正轴棱锥锥尖的间隔 l 以及入射光的发散角 β 等参数。把球差与上述参数表示成函数的形式为: $\delta L = \delta L(R, \theta, l, \beta)$ 。由此可见,当反射式正圆锥镜和球面反射镜组合成光学系统时,为了得到较好质量($\delta L = 0$)的空心光束,以便为后续的变焦光学系统能够更好的控制空心光束,该系统的参数 R, θ, l, β 等参数的选取并不是任意的,而是存在一种严格的相互制约关系,为了寻求使 $\delta L = 0$ 的最优解,将采用几何光线追迹和计算机模拟仿真相结合的方法。

3 数学模型的建立

3.1 实心基模高斯激光束中心光线的追迹

以分光对偶反射式光学系统的对称面(即 xoy 面)为考察面建立直角坐标系如图 2 所示。

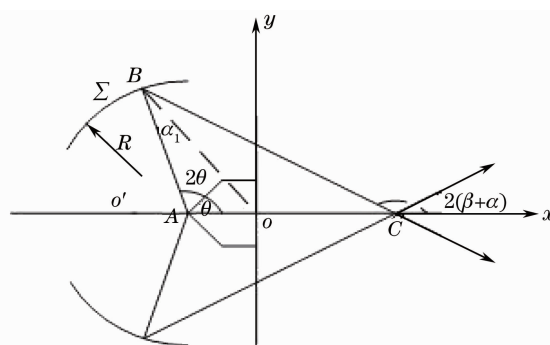


图 2 分光对偶反射式光学系统中心光线传播过程
Fig. 2 Propagation of central ray in light splitting dual reflection-type optical system

设原点位于球面对偶反射镜 Σ 球心 $o(0, 0)$ 处,则球面对偶反射镜在 xoy 平面的轨迹方程为

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (1)$$

式中 R 为球面对偶反射镜 Σ 的半径。分光圆锥的对称轴线位于 x 轴上,锥尖 A 处的坐标为 $(l - R/2, 0)$ (l 为 A 点距球面对偶反射镜 Σ 焦点 o' 的距离),几何关系如图 2 所示。

设 B 为实心基模高斯激光束中心入射光线经分光圆锥反射后与 Σ 的交点,其坐标为 (x_B, y_B) ,则 B 点方程满足

$$x_B^2 + y_B^2 = R^2. \quad (2)$$

直线 AB 的方程为

$$y_B = \left[x_B - \left(l - \frac{R}{2} \right) \right] \tan(2\theta), \quad (3)$$

式中 θ 为圆锥锥角的一半。

在 $\triangle OAB$ 中, 设 $\angle ABO$ 为 α_1 , 运用正弦定理有

$$\frac{R}{\sin 2\theta} = \frac{\frac{R}{2} - l}{\sin \alpha_1}, \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{\left(\frac{R}{2} - l\right) \sin 2\theta}{R}. \quad (5)$$

设 C 点为实心基模高斯激光束中心光线经球面对偶反射镜反射后与 x 轴的交点, 则直线 BC 的方程为

$$y = (x - x_B) \tan 2(\theta + \alpha_1) + y_B. \quad (6)$$

令(6)式中 $y = 0$, 则 $C(x_C, 0)$ 中的 x_C 满足

$$(x_C - x_B) \tan 2(\theta + \alpha_1) + y_B = 0. \quad (7)$$

3.2 实心基模高斯激光束边缘光线的追迹

由于整个系统具有轴对称性, 只对实心基模高斯激光束的一条边缘光线在分光对偶反射式光学系统中传播过程进行了光线追迹, 如图3所示。

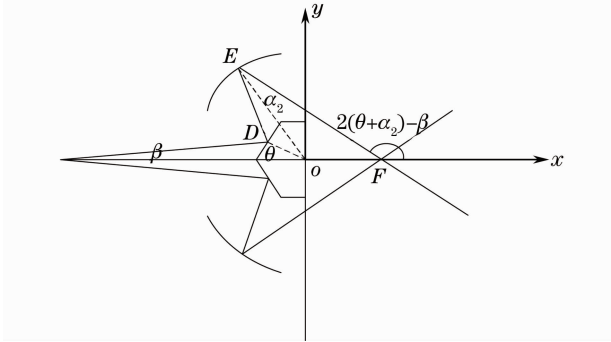


图3 分光对偶反射式系统边缘光线传播过程

Fig. 3 Propagation of edge ray in light splitting dual reflection-type optical system

图3中 β 为基模高斯激光束的发散角的一半, D 点为边缘光线与分光圆锥表面的交点, 设 D 点坐标为 $D(x_D, d)$, 其中:

$$x_D = \left(l + \frac{d}{\tan \theta}\right) - \frac{R}{2}. \quad (8)$$

设 E 点为边缘光线经分光圆锥反射后与球面对偶反射镜 Σ 的交点, 则 $E(x_E, y_E)$ 同时满足

$$x_E^2 + y_E^2 = R^2, \quad (9)$$

$$y_E = (x - x_D) \tan(2\theta - \beta) + d. \quad (10)$$

在 $\triangle ODE$, 设 $\angle DEO$ 为 α_2 , 运用正弦定理有

$$\frac{R}{\sin(2\theta - \beta)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{R}{2} - l - \frac{d}{\tan \theta}\right)^2 + d^2}}{\sin \alpha_2}, \quad (11)$$

则

$$\alpha_2 =$$

$$\arcsin \frac{\left[\sqrt{\left(\frac{R}{2} - l - \frac{d}{\tan \theta}\right)^2 + d^2} \sin(2\theta - \beta)\right]}{R}.$$

$$(12)$$

设 F 点为边缘光线经球面对偶反射镜反射后与 x 轴的交点, 则直线 EF 的方程为

$$y = (x - x_E) \tan[2(\theta + \alpha_2) - \beta] + y_E. \quad (13)$$

令(13)式中 $y = 0$, 则 $F(x_F, 0)$ 中的 x_F 满足

$$(x_F - x_E) \tan[2(\theta + \alpha_2) - \beta] + y_E = 0. \quad (14)$$

综上所述, 即可求出满足不等式 $|x_F - x_C| \leq \epsilon$ (ϵ 为一常数) 条件时的 θ, R, l 值。令 $\epsilon = 0$, 即可使入射到系统中的实心激光束经过两次反射后在主光轴上会聚到一点。

4 影响球差和相对光环宽度的因素分析

根据上面所建立的数学模型, 在球面反射镜的曲率中心与正轴棱锥锥尖的间隔 l 为定值的条件下, 得到的球差 δL 和光环的外内半径的比值 a 随着球面反射镜的曲率半径 R 、正轴棱锥的半锥角 θ 以及入射光的发散角 β 等参数的变化规律曲线如图4~6所示。

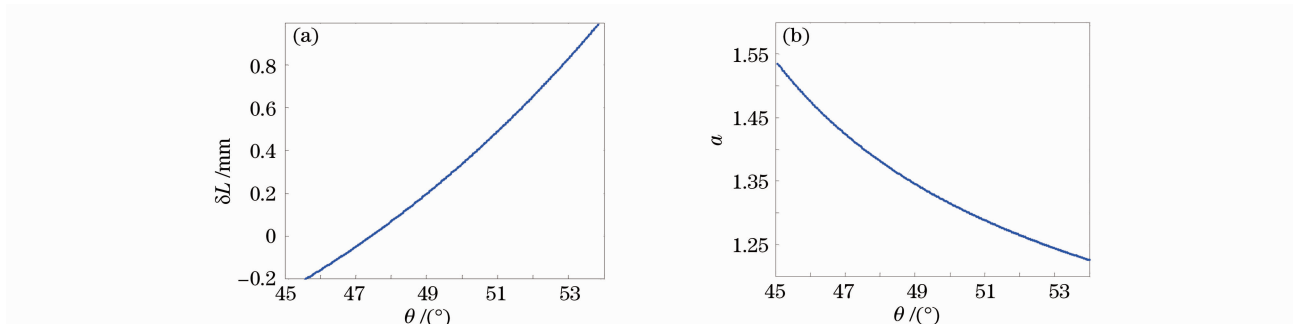


图4 光学系统的球差及外径与内径的比值随着正轴棱锥半锥角 θ 的变化规律 ($l = 5 \text{ mm}, R = 20 \text{ mm}, d = 3 \text{ mm}, \beta = 3.14^\circ$)

Fig. 4 Spherical aberration and ratio of inner diameter and outer of optical system change curve with half conic angle θ of positive conic mirror ($l = 5 \text{ mm}, R = 20 \text{ mm}, d = 3 \text{ mm}, \beta = 3.14^\circ$)

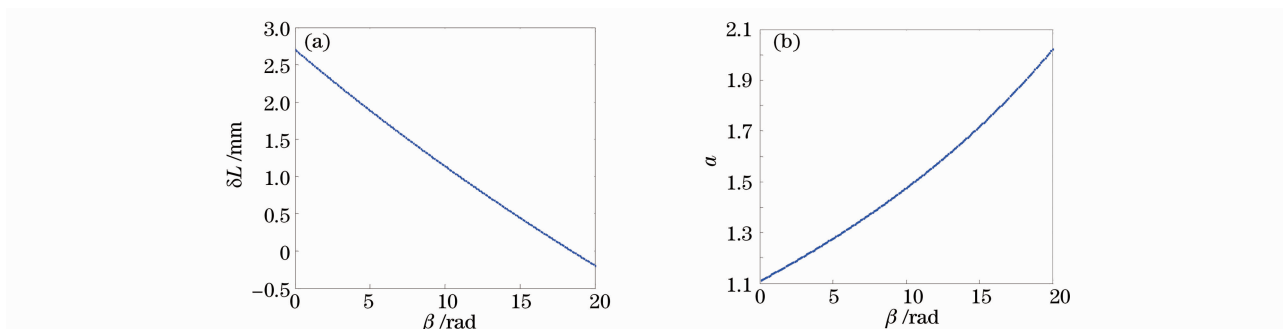


图 5 光学系统的球差及外径与内径的比值随着高斯光束的张角 β 的变化规律($l=5\text{ mm}, R=20\text{ mm}, d=3\text{ mm}, \theta=60^\circ$)

Fig. 5 Spherical aberration and ratio of inner diameter and outer of optical system change curve with field angle β of Gaussian beam($l=5\text{ mm}, R=20\text{ mm}, d=3\text{ mm}, \theta=60^\circ$)

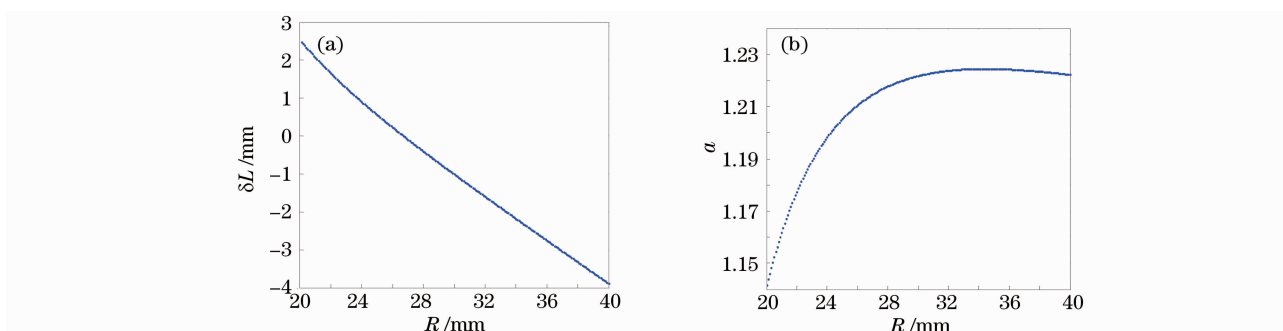


图 6 光学系统的球差及外径与内径的比值随着球面反射镜的曲率半径 R 的变化规律($l=5\text{ mm}, d=3\text{ mm}, \beta=3.14^\circ, \theta=60^\circ$)

Fig. 6 Spherical aberration and ratio of inner diameter and outer of optical system change curve with curvature radius R of spherical mirror($l=5\text{ mm}, d=3\text{ mm}, \beta=3.14^\circ, \theta=60^\circ$)

可以看出,光学系统球差的绝对值随着正轴棱锥半锥角 θ 的增加呈现出先减小再增加的变化规律,外径与内径的比值则随着 θ 的增加而减小,同时,宽度半径比也呈现出递减的变化规律;光学系统球差的绝对值随着高斯光束的张角 β 的增加也呈现出先减小再增加的变化规律,与图 4 中的变化规律相比,球差 δL 的数值则是逐渐减小的。当 $\beta=18^\circ$ 时, $\delta L=0$ 。外径与内径的比值则随着 θ 的增加而增加,同时,宽度半径比也呈现出递增的变化规律;光学系统的球差和外径与内径的比值随着 R 的变化

规律与图 5 中的几乎相同,但是当 $R \geq 30\text{ mm}$ 时,宽度半径比随着 R 的变化率则趋于平缓。另外球差的变化范围较大;由于外径与内径的比值范围在 1.1~2 之间变动,则宽度半径比的变化范围在 0.1~1 之间变动。因此,可以通过对正轴棱锥半锥角 θ 、高斯光束的张角 β 、球面反射镜的曲率半径 R 的调整,获得宽度半径比的变化范围为 0.1~1 的双半高斯空心光束。

为了进一步研究各种参数之间的数值关系,研究了不同 d 值时的情况。

表 1 锥面上的入射高度 $d=1\text{ mm}$ 时的系统参数

Table 1 System parameters when height of incidence $d=1\text{ mm}$

| Number of groups | Divergence angle of beams β / rad | Conic angle of positive conic mirror $2\theta / (^\circ)$ | Curvature radius of spherical reflector R / mm | Ratio of ring width to radius W_{RR} | Spherical aberration δL |
|------------------|--|---|---|---|---------------------------------|
| 1 | 0.001 | 120 | 20 | 0.1032 | -0.4366 |
| 2 | 0.001 | 126 | 20 | 0.0932 | -0.0620 |
| 3 | 0.0175 | 126 | 20 | 0.1212 | -0.2083 |
| 4 | 0.0349 | 126 | 20 | 0.1529 | -0.3528 |
| 5 | 0.0524 | 126 | 20 | 0.1854 | -0.4958 |
| 6 | 0.0524 | 126 | 20 | 0.1752 | -0.0540 |
| 7 | 0.0698 | 132 | 20 | 0.2090 | -0.2096 |
| 8 | 0.0873 | 132 | 20 | 0.2436 | -0.3635 |
| 9 | 0.1222 | 138 | 20 | 0.3134 | -0.1520 |
| 10 | 0.3196 | 138 | 20 | 0.3617 | -0.3158 |

从表 1,2 中可以看出,各种数据之间并没有明显的函数关系,因此只能利用数值求解的方法来研究该种光学系统的特性;与平行入射光束相比,当入射光束为发散的高斯光束时,在合理优化分光对偶

反射式光学系统内部之间结构参数的前提下,在减小系统球差的同时双半高斯空心光束的宽度半径比得到了极大的提高,最大值可以达到 1.0。

表 2 当锥面上的入射高度 $d=4$ mm 时的系统参数Table 2 System parameters when height of incidence $d=4$ mm

| Number of groups | Divergence angle of beams β /rad | Conic angle of positive conic mirror 2θ /($^{\circ}$) | Curvature radius of spherical reflector R /mm | Ratio of ring width to radius W_{RR} | Spherical aberration δL |
|------------------|--|--|---|--|---------------------------------|
| 1 | 0.2269 | 108 | 20 | 0.8288 | -0.3076 |
| 2 | 0.2443 | 108 | 20 | 0.8963 | -0.4723 |
| 3 | 0.2618 | 108 | 20 | 0.9681 | -0.6346 |
| 4 | 0.2618 | 114 | 20 | 0.8140 | -0.0219 |
| 5 | 0.2793 | 108 | 20 | 1.0445 | -0.7944 |
| 6 | 0.2793 | 114 | 20 | 0.8747 | -0.2053 |
| 7 | 0.2969 | 114 | 20 | 0.9386 | -0.3858 |
| 8 | 0.3142 | 114 | 20 | 1.0060 | -0.5635 |
| 9 | 0.3316 | 132 | 20 | 0.9231 | -0.3752 |
| 10 | 0.3196 | 150 | 40 | 0.6034 | -0.2933 |

5 双半高斯空心光束的获得及其光强分布测试

由上面的计算仿真,我们根据所选取的实验装

置的参数 $\theta=60^{\circ}$, $R=20$ mm, $l=4.5$ mm, 并通过调节 β 值以实现获得不同的 d 值, 在实验上获得具有不同宽度半径比的空心光环如图 7 所示。

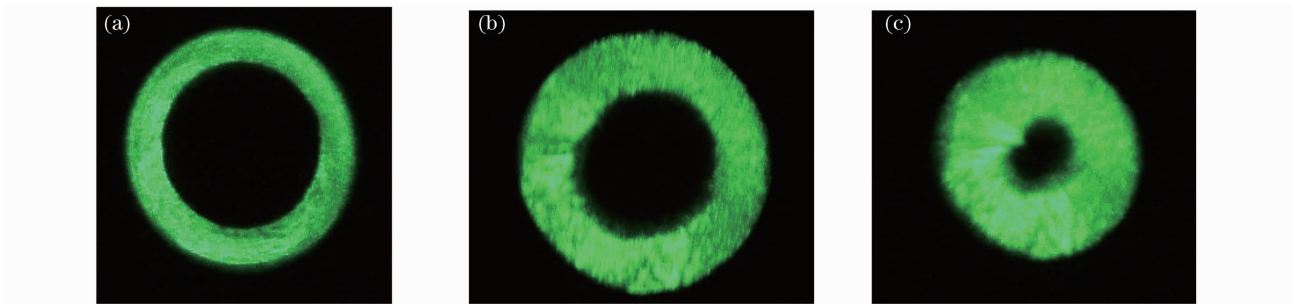


图 7 实验上获得的不同宽度半径比的空心光环

Fig. 7 Hollow halo of different radius ratio obtained in experiment

为了证实所获得的空心光束为双半高斯空心光束,利用 Matlab 软件编制的程序对图 7(a)的径向

光强分布进行了分析,其分析结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,在实验上所获得的空心光束属于双半高斯空心光束类型。

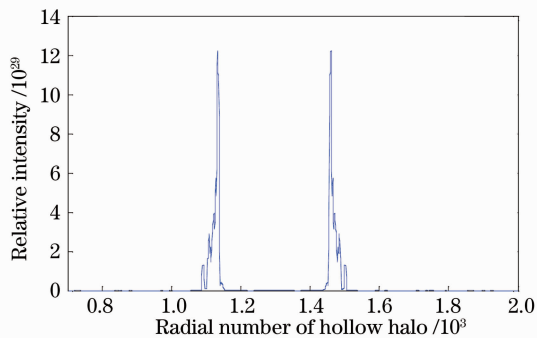


图 8 空心光环的径向光强分布

Fig. 8 Distribution of radial light intensity of hollow halo

6 结 论

提出了利用反射式圆锥镜和球面反射镜相结合的光学系统来产生双半高斯空心激光束。通过计算仿真研究,分析了正轴棱锥半锥角 θ 、高斯光束的张角 β 、球面反射镜的曲率半径 R 等因素对该光学系统的球差、光环的外径与空心光束内径比值以及宽度半径比的影响,并从它们的变化规律曲线中可以看出通过对 θ, β, R 等参数的设定,利用反射式圆锥镜和球面反射镜相结合的光学系统可以很容易的获

得宽度半径比的调谐范围为 0.1~1 的双半高斯空心激光束。另外,实验上的测试结果也验证了由该系统所产生的空心光束确属于双半高斯空心光束范畴。通过本论文的研究,将为产生不同宽度半径比的空心光束提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Zhu Jiangfeng, Wei Zhiyi, Wang Peng. Experimental study on generation of high energy few cycle pulses with hollow fiber filled with neon[J]. *Sci. China Ser. G.*, 2008, **5**(51): 507~511
- 2 Yin Jianping, Gao Weijian, Zhu Yifu. Generation of dark hollow beams and their applications [J]. *Proc. Opt.*, 2003, (44): 119~204
- 3 Cai Yangjian, Lu Xuanhui, Lin Qiang. Hollow Gaussian beams and their propagation properties [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 1084~1086
- 4 Cai Yangjian, Lin Qiang. Hollow elliptical Gaussian beam and its propagation through aligned and misaligned paraxial optical systems[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**: 1058~1065
- 5 Wang Xiao, Michael G. Littman. Laser cavity for generation of variable-radius rings of light [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10): 767~768
- 6 R. M. Herman, T. A. Wiggins. Production and uses of diffractionless beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**: 932~942
- 7 S. Lee Hee, B. W. Stewart, K. Choi *et al.*. Holographic nondiverging hollow beam [J]. *Phys. Rev.*, 1994, **A49**: 4922~4927
- 8 Carl Paterson, Robin Smith. Higher-order Bessel waves produced by axion-type computer-generated holograms [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **124**(2): 121~130
- 9 M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. E. L. O. van der Veen *et al.*. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Opt. Commun.*, 1994, **96**: 123~132
- 10 Ning Guobing, Liang Zhu. Dynamic laser outer conical refraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1399~1403
宁国斌, 梁 柱. 激光动态外锥折射实验研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1399~1403
- 11 Dong Yuan, Zhang Xihe, Ning Guobin *et al.*. The research of propagation characteristic and formation of double half-Gaussian hollow beams [J]. *Science in China Series G-Physics and Astronomy*, 2009, **6**(52): 832~837
董 渊, 张喜和, 宁国斌等. 双半高斯空心光束的传输特性及其形成研究[J]. *中国科学(G辑:物理学 力学 天文学)*, 2009, **6**(52): 832~837