

# 用于产生空心焦场的二元环带相位板

王伟\*, 吴建光, 莫绪涛, 黄仙山

安徽工业大学数理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032

**摘要** 基于标量衍射理论, 利用相干叠加的方法, 研究了可以产生空心焦场的二元环带相位板。推导了各环带半径应满足的解析表达式, 通过数值计算研究了环带半径对空心焦场的影响规律。研究表明, 在焦平面上, 相位板环带半径对旁瓣比和最大光强比的影响较大, 对空心焦场半径的影响较小, 增加环带数能够减小旁瓣比, 增大最大光强比。在轴向上, 环带数增加并不能增大最大光强比, 环带数和环带半径对旁瓣比和最大光强比的影响较大。对于二元环带相位结构, 旁瓣比和最大光强比仅取决于环带半径, 和数值孔径无关; 在焦面上, 空心焦场半径和数值孔径成反比, 在轴向上, 空心焦场半径和数值孔径的平方成反比。

**关键词** 衍射; 二元光学; 空心焦场; 环带相位板

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.070501

## Binary Annular Phase Plate Used to Generate Hollow Focal Field

Wang Wei\*, Wu Jianguang, Mo Xutao, Huang Xianshan

School of Mathematics and Physics, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

**Abstract** Based on the scalar diffraction theory, a binary annular phase plate is studied by means of the coherent superposition method, which is used for the generation of a hollow focal field. The analytical expression of the radius for each ring is derived. The influence law of the ring radius on the hollow focal field is also investigated by the numerical calculation method. The research results show that, in the focal plane, the ring radius of this phase plate has a great influence on the side lobe ratio and the maximum light intensity ratio, but has a little influence on the radius of the hollow focal field. The increase in the number of rings reduces the side lobe ratio, but increases the maximum light intensity ratio. In contrast, in the axial direction, the increase in the number of rings cannot increase the maximum light intensity ratio. Both the number of rings and the ring radius have relatively great influence on the side lobe ratio and the maximum light intensity ratio. For a binary annular phase structure, the side lobe ratio and the maximum light intensity ratio only depend on the ring radius and are independent of numerical aperture. In the focal plane, the radius of the hollow focal field is inversely proportional to the numerical aperture. In the axial direction, the radius of the hollow focal field is inversely proportional to the square of numerical aperture.

**Key words** diffraction; binary optics; hollow focal field; annular phase plate

**OCIS codes** 050.1970; 050.1380; 260.5430; 230.3990

## 1 引言

空心焦场是指焦点处光强度为零, 四周围绕着高强度光场的光学围笼, 当轴向一段范围内中心都为暗场时可称为空心光束。空心焦场在光学捕获、光学成像和光学伪装等领域具有重要应用价值, 如

在光学操纵中可用于捕获低折射率的微粒<sup>[1-2]</sup>, 在超分辨荧光显微镜中可用作擦除光<sup>[3-4]</sup>。

近年来, 随着激光技术的发展, 空心焦场的产生和应用受到广泛关注, 刘双龙等<sup>[5]</sup>分析了相干拉曼散射显微镜中空心焦场的产生和应用, Peng 等<sup>[6]</sup>利用方位偏振光产生的空心焦场捕获了低折射率的微

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-10-24; 录用日期: 2018-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(11204004, 11504003, 11474003)、同济大学教育部先进微结构材料重点实验室开放课题(2016)

\* E-mail: weiw978@ahut.edu.cn

粒, Xue 等<sup>[7]</sup>研究了方位偏振光聚焦系统产生的空心焦场在荧光显微镜中的应用。目前, 产生空心焦场的方法主要有轴棱镜法<sup>[8]</sup>、光纤法<sup>[9]</sup>、特殊偏振光合成法<sup>[10]</sup>和衍射光学元件法等<sup>[11-12]</sup>。其中, 衍射光学元件法具有光路简单, 体积小和重量轻的特点, 日益受到学者们的重视<sup>[13-14]</sup>。

本文利用标量衍射理论, 研究了通过二元环带相位板产生空心焦场的方法, 利用相干叠加的方法得到环带相位板的各环带半径的解析关系式, 然后利用梯度迭代算法搜索得到不同环带数目的最优值, 分别分析了轴向和焦平面上空心焦场的环带半径、最大光强比和旁瓣比的变化规律, 利用数值拟合得到了空心焦场半径与物镜数值孔径之间的关系。

## 2 理论分析

根据标量衍射理论, 物镜焦点附近光场的计算式为<sup>[15]</sup>

$$U(v, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v\rho) \exp(iu\rho^2/2) \rho d\rho, \quad (1)$$

式中  $P(\rho)$  为光瞳函数的复振幅透过率,  $\rho$  为环带半径,  $J_0(\cdot)$  代表零阶贝塞尔函数,  $v$  和  $u$  分别为径向和轴向光学坐标, 表达式分别为

$$v = kNAr, \quad (2)$$

$$u = k(NA)^2 z, \quad (3)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $NA$  为数值孔径,  $\lambda$  为光波波长,  $r$  和  $z$  分别为径向和轴向坐标, 如图 1 所示, 图中  $F$  点焦点,  $P$  点为焦点附近的考察点。

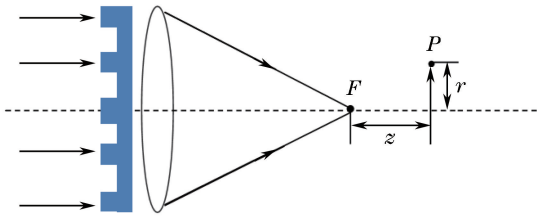


图 1 焦场计算示意图

Fig. 1 Schematic for calculation of focal field

二元环带相位板广泛应用于光学超分辨和光束整形等领域<sup>[16-17]</sup>, 二元环带相位板的光瞳函数可以

表示为

$$P(\rho) = \begin{cases} 1, & 0 < \rho < \rho_1 \\ \exp(i\varphi), & \rho_1 \leq \rho < \rho_2 \\ 1, & \rho_2 \leq \rho < \rho_3 \\ \vdots \\ \exp(i\varphi), & \rho_{j-1} \leq \rho < \rho_j \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\rho_j$  为第  $j$  个环带半径,  $j$  为正整数,  $\varphi$  为调制相位, 通常为了不产生焦移, 取  $\varphi = \pi$ 。为了产生空心光束, 将焦点处光强置为零, 由(1)式得:

$$U(0, 0) = 2 \int_0^1 P(\rho) \rho d\rho. \quad (5)$$

假定单位振幅平面波入射, 则  $P(\rho) = \exp(i\varphi)$ , ( $\varphi = 0$  或  $\pi$ ), 那么第  $j$  个环带孔径在焦点处复振幅可以表示为

$$U_j(0, 0) = 2 \exp(i\varphi) \int_{\rho_{j-1}}^{\rho_j} \rho d\rho = \exp(i\varphi) (\rho_j^2 - \rho_{j-1}^2). \quad (6)$$

对于多个环带结构的光瞳滤波器, 焦点处的复振幅可看作多个环带在焦点处复振幅的叠加, 对于二区相位结构, 设  $\varphi = \pi$ , 焦点处复振幅为

$$U_2(0, 0) = \rho_1^2 + (\rho_2^2 - \rho_1^2) \exp(i\varphi) = \rho_1^2 - (\rho_2^2 - \rho_1^2), \quad (7)$$

对于空心焦场,  $U(0, 0) = 0$ , 将最大半径归一化, 即  $\rho_2 = 1$ , 可求出

$$\rho_1 = \sqrt{2}/2, \quad (8)$$

这与文献[18]报道的二环结果一致。对于三环及以上的  $\pi$  相位结构, 同样可求出产生空心焦场时各环带半径应满足的关系, 如表 1 所示。

表 1 产生空心焦场时各环带半径

Table 1 Radius of each ring when generating hollow focal field

Number of rings	Relation among normalized ring radii
2	$2\rho_1^2 - 1 = 0$
3	$2(\rho_1^2 - \rho_2^2) + 1 = 0$
4	$2(\rho_1^2 - \rho_2^2 + \rho_3^2) - 1 = 0$
5	$2(\rho_1^2 - \rho_2^2 + \rho_3^2 - \rho_4^2) + 1 = 0$
6	$2(\rho_1^2 - \rho_2^2 + \rho_3^2 - \rho_4^2 + \rho_5^2) - 1 = 0$

将表 1 结果可以归纳为

$$U(0, 0) = \begin{cases} 2(\rho_1^2 - \rho_2^2 + \rho_3^2 - \rho_4^2 + \dots + \rho_{j-2}^2 - \rho_{j-1}^2) + 1, & j \text{ is odd} \\ 2(\rho_1^2 - \rho_2^2 + \rho_3^2 - \dots - \rho_{j-2}^2 + \rho_{j-1}^2) - 1, & j \text{ is even} \end{cases} \quad (9)$$

因此, 要设计产生空心焦场的任意环带  $\pi$  相位板, 可从(9)式中求出相应的环带半径, (9)式只满足

焦点处光强为零, 对于空心焦场的半径、光强分布和旁瓣大小等光学特性没有给出具体关系, 还需求解

(1)式,通过优化搜索算法寻找合适的结构。通过数值解法分析环带半径变化时空心焦场的变化规律可以利用梯度迭代算法<sup>[19]</sup>,将最大半径归一化,先设定第环带半径变化范围,相邻两个环带半径间隔设置为0.01,最靠近外环的半径利用(9)式求出,利用(1)式求解光强分布,然后求出每个结构对应的最大光强、最大旁瓣强度和半径等特征值,通过设定特征值的阈值条件,得到与之相对应的环带结构。

### 3 结果分析与讨论

为了表征空心焦场的光强分布特性,利用参考文献[17]中的超分辨位相板的定义方法。引入空心焦场半径 $R$ 、最大光强比 $S$ 和旁瓣比 $M$ 作为评价参数。 $R$ 定义为焦点到最大光强点的距离; $S$ 定义为空心焦场最大光强和爱里斑中心最大光强的比值; $M$ 定义为旁瓣最大光强和空心焦场最大光强的比值。计算时,数值孔径取0.2,利用梯度迭代算法分别计算焦平面与轴向的光强分布,得到不同环带结构下 $R$ 、 $S$ 和 $M$ ,分析环带半径对三者影响。

#### 3.1 焦面光强分析

对于二环结构,由于其环带半径 $\rho_1 = 0.707$ 唯一,由(1)式可求出 $R = 2.864\lambda$ , $M = 0.286$ , $S = 0.108$ ,其在焦平面上的一维光强分布如图2所示。

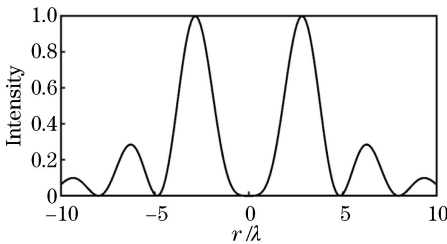


图2 二环焦面光强分布

Fig. 2 Light intensity distribution in focal plane for two-ring structure

采用三环及以上的结构,由于各个环带之间的干涉作用,能量会重新分配, $R$ 、 $M$ 和 $S$ 随着环带半径的改变而变化。实际应用时,对于单环衍射场,希望 $M$ 较小, $S$ 较大,对三环结构进行迭代计算,设定 $M < 0.3$ 可以得到满足条件的三环结构(对 $R$ 和 $S$ 不做限制)。分析数据发现,三环结构可以产生两种半径的空心光束,一种 $R$ 为 $5.4\lambda \sim 5.7\lambda$ ,另一种 $R$ 为 $2.8\lambda \sim 3.0\lambda$ 。当 $R$ 为 $5.4\lambda \sim 5.7\lambda$ 时, $S$ 变化较小,其值为 $0.61 \sim 0.65$ , $M$ 存在一个极小值;同样, $R$ 为 $2.8\lambda \sim 3.0\lambda$ , $S$ 变化较小,但数值较大, $M$ 也存在一个极小值,相应的结果如表2所示,其在焦平面上的光强分布如图3所示。

表2 优化后的三环结构

Table 2 Optimized three-ring structure

$\rho_1$	$\rho_2$	$R/\lambda$	$S$	$M$
0.35	0.789	5.649	0.065	0.208
0.69	0.988	2.92	0.098	0.288
0.01	0.707	2.845	0.108	0.287

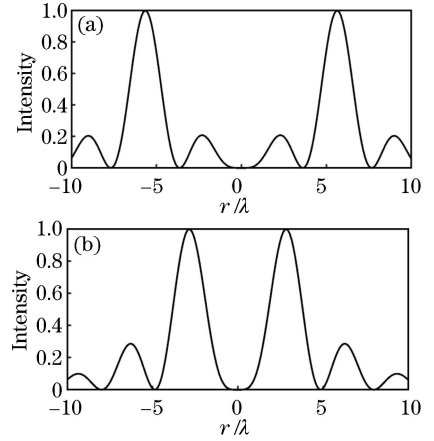


图3 三环焦面光强分布。(a)  $R = 5.65\lambda$ ; (b)  $R = 2.85\lambda$

Fig. 3 Light intensity distributions in focal plane for three-ring structure. (a)  $R = 5.65\lambda$ ; (b)  $R = 2.85\lambda$

和二环结构进行比较可以发现,图3(b)和图2非常相似,而且 $R$ 、 $M$ 和 $S$ 也差别不大,分析原因可发现,此时三环对应的结构和二环结构非常接近,如表2优化后的三环结构中 $\rho_1 = 0.01$ , $\rho_2 = 0.707$ ,由于第一环带非常小,对光场的调制作用很弱,因此结果和二环结构相近。图3(a)中 $R$ 较大,此时最大值出现在干涉第二主极大处,而在图3(b)和图2中,最大值出现在干涉第一主极大处。

分析4环结构可以发现,增加环带数可以减小 $M$ 。搜索时设定 $M < 0.2$ ,此时,环带半径对 $R$ 影响较小, $R$ 为 $2.8\lambda \sim 3.1\lambda$ ,与2环和3环在干涉第一主极大处形成的空心光束半径差别不大,但对 $M$ 和 $S$ 影响较大。当 $M < 0.2$ 时,四环结构 $S$ 为 $0.04 \sim 0.09$ , $S$ 增大会引起 $M$ 相应增大,存在几个最优结构, $S$ 较大时,对应 $M$ 的极小值,具体数值如表3所示。和2环和3环的优化结构进行比较,可以发现,在半径 $R$ 差别不大的情况下,4环结构能够显著的降低 $M$ ,但同时 $S$ 也有所减小。

表3 优化后的四环结构

Table 3 Optimized four-ring structure

$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$R/\lambda$	$S$	$M$
0.6	0.73	0.82	2.88	0.07	0.12
0.58	0.69	0.80	2.84	0.07	0.12
0.57	0.70	0.816	2.88	0.065	0.12
0.55	0.65	0.787	2.84	0.07	0.11

计算 5 环结构时,设定  $M < 0.2$  和  $S > 0.05$ 。通过分析发现,5 环结构和 3 环结构类似,能够产生两种半径的空心焦场,一种  $R$  为  $5.4\lambda \sim 5.6\lambda$ ,另一种为  $2.8\lambda \sim 3.1\lambda$ ,其最大值分别位于干涉第二主极大和第一主极大处。当  $R$  为  $5.4\lambda \sim 5.6\lambda$  时, $S$  为  $0.05 \sim 0.06$ , $M$  为  $0.15 \sim 0.20$ ;而  $R$  为  $2.8\lambda \sim 3.1\lambda$  时, $S$  为  $0.05 \sim 0.08$ , $M$  为  $0.11 \sim 0.20$ 。同样,增大  $S$  会使得  $M$  增大,存在最优的结构,可在  $S$  较大时,使得  $M$  极小,如表 4 所示。可以看出,5 环和 3 环结构都可以产生两种  $R$  的空心焦场,5 环结构可以得到更小的  $M$ ,同时  $S$  略有降低。5 环结构和 4 环结构比较,在相同的  $R$  下, $M$  相差不大,而 4 环结构的  $S$  更大。

表 4 优化后的 5 环结构

Table 4 Optimized five-ring structure

$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$R/\lambda$	$S$	$M$
0.36	0.68	0.72	0.828	5.52	0.05	0.15
0.54	0.64	0.76	0.98	3.01	0.060	0.11
0.55	0.66	0.77	0.98	3.01	0.059	0.10
0.56	0.67	0.78	0.98	2.91	0.064	0.11

对于 6 环结构,在与 5 环结构相同的限制条件下进行优化搜索。分析结果发现,6 环结构和 2 环、4 环结构类似,只能产生一种半径的空心焦场,其  $R$  为  $2.7\lambda \sim 3.1\lambda$ ,但是 6 环结构对应的解更多。和 4 环结构相比较,6 环结构能够略微增大  $S$ ,但  $M$  变化不大, $R$  也变化不大。同样, $S$  增大会使得  $M$  增大,存在最优的结构,可在  $S$  较大时,使得  $M$  极小,如表 5 所示。

表 5 优化后的 6 环结构

Table 5 Optimized six-ring structure

$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$R/\lambda$	$S$	$M$
0.40	0.41	0.60	0.73	0.83	2.91	0.066	0.10
0.39	0.40	0.58	0.69	0.80	2.81	0.066	0.10
0.49	0.50	0.60	0.71	0.81	2.91	0.071	0.11
0.50	0.51	0.61	0.73	0.82	2.91	0.071	0.11

分析 2 环到 6 环的计算结果可以发现,环带数增加能够显著减小  $M$ ,但并没有使得  $S$  明显增强。在  $M < 0.3$  时,空心焦场环带半径和相位板环带数目的奇偶性有关。偶数环带只能产生一种半径的空心焦场, $R$  为  $2.8\lambda \sim 3.1\lambda$ ,最大光强在干涉第一主极大处;奇数环带能够产生两种半径的空心焦场, $R$  分别为  $5.4\lambda \sim 5.6\lambda$  和  $2.8\lambda \sim 3.1\lambda$ ,其最大光强分别位于干涉第二主极大和第一主极大处。不同环带结构焦平面上的一维光强分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着环带的增加,旁瓣的数目增加, $M$  降低是

由于第一旁瓣的能量转移到其他旁瓣,并没有转移到主瓣,进而导致  $S$  没有增大。

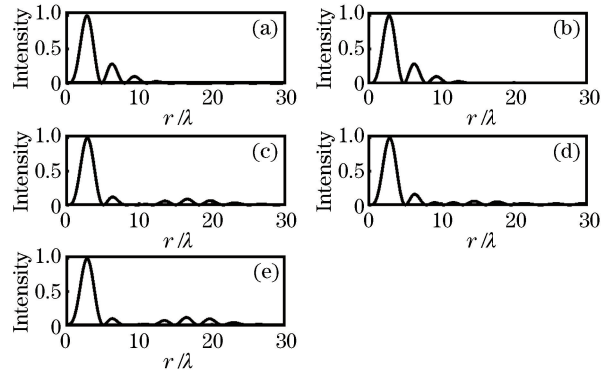


图 4 不同环带结构的焦面光强分布。

(a) 2 环;(b) 3 环;(c) 4 环;(d) 5 环

Fig. 4 Light intensity distributions in focal plane for different ring structures. (a) 2-ring; (b) 3-ring;

(c) 4-ring; (d) 5-ring; (e) 6-ring

为了确定物镜数值孔径对空心焦场特性的影响,分别选取 2 环到 6 环的优化结构,研究  $NA$  从 0.1 增大到 0.6 时  $R$ 、 $S$ 、 $M$  的变化规律,以 4 环和 5 环结构为例,三者随  $NA$  的变化曲线如图 5 所示。

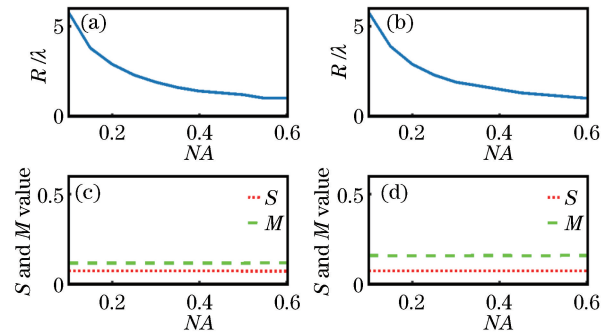


图 5 焦面上  $R$ 、 $M$  和  $S$  随  $NA$  的变化。(a) 4 环  $R$  值;

(b) 5 环  $R$  值;(c) 4 环  $S$ 、 $M$  值;(d) 5 环  $S$ 、 $M$  值

Fig. 5  $R$ ,  $M$ ,  $S$  in focal plane versus  $NA$ . (a)  $R$  value for 4-ring; (b)  $R$  value for 5-ring; (c)  $S$  and  $M$  values for 4-ring; (d)  $S$  and  $M$  values for 5-ring

图 5 中对应的 4 环结构参数为  $\rho_1 = 0.60$ ,  $\rho_2 = 0.73$ ,  $\rho_3 = 0.82$ , 5 环结构参数为  $\rho_1 = 0.57$ ,  $\rho_2 = 0.65$ ,  $\rho_3 = 0.76$ ,  $\rho_4 = 0.99$ 。可以看出, $S$  和  $M$  值不随  $NA$  的改变而变化, $R$  值随  $NA$  的增加而减小。通过拟合  $R$  曲线,可以得到  $R$  和  $NA$  的关系:

$$R = m\lambda / (NA). \quad (10)$$

图 5 (a) 和图 5 (b) 中  $m$  分别为 0.5768 和 0.5856。分析其他环带结构也能得出相同结论,即  $R$  和  $NA$  成反比, $m$  和具体的结构参数有关,而  $S$  和  $M$  值不随  $NA$  变化,均为常数。

### 3.2 轴向光强分析

入射波前的调制不仅可以改变焦面光强分布,也会影响子午面内的光强分布,可以形成多焦点、长焦深等光学现象。(1)式中,令 $\nu=0$ ,则可利用数值积分求出轴向上的光强分布。计算时直接利用优化焦面结构得到的环带相位板结构数据,计算轴向的光强分布。由于希望得到和焦面相似的光强分布,即中心光场为零,四周围绕高强度的光场,因此,和焦面类似,同样采用 $R$ 、 $S$ 、 $M$ 值表征轴向上空心焦场的特性。通过设定 $R$ 、 $S$ 、 $M$ 的阈值,可以搜索得到满足要求的结构数据。图6给出了2~6环不同结构调制下轴向的光强分布,其对应的相位板结构参数如表6所示,对应轴向上 $M$ 取最小值的情况。从图6可以看出,改变各个环带的面积,由于环带之间的干涉作用,在焦点处光强为0,传播一段

表6 图6中对应的环带半径和 $R$ 、 $S$ 、 $M$ 值

Table 6 Ring radii and  $R$ ,  $S$ ,  $M$  values corresponding to Fig. 6

Number of rings	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$R/\lambda$	$S$	$M$
2	0.707					37.046	0.525	0.088
3	0.01	0.707				37.036	0.525	0.088
4	0.59	0.65	0.758			35.034	0.392	0.153
5	0.56	0.62	0.73	0.981		38.037	0.332	0.174
6	0.5	0.54	0.69	0.73	0.774	35.284	0.376	0.079

分析计算结果可知,环带数目对 $R$ 值影响较小,偶数环带相位板只能产生一种 $R$ 值,约为 $35\lambda$ ,奇数环带相位板能产生两种 $R$ 值,约为 $37\lambda\sim 51\lambda$ 。

相位板的环带数目和环带半径对 $S$ 和 $M$ 的影响较大, $M$ 值增大伴随 $S$ 值减小,环带数增加并不能增大 $S$ 值,但轴向 $S$ 值要远大于焦面 $S$ 值。焦面上 $M$ 取极值时对应的环带结构和轴向取极值时对应的环带结构并不一致,即当焦面上 $M$ 取极小值时,轴向上 $M$ 并非极小值。如表5所示的6环结构中,当 $\rho_1=0.49, \rho_2=0.50, \rho_3=0.60, \rho_4=0.71, \rho_5=0.81$ 时,轴向的 $R=32.53\lambda, S=0.2714, M=0.6131$ ,可见焦面 $M$ 取极小值时,轴向 $M$ 并非极小值。研究发现,当焦面 $M$ 限定一个极大值时,在轴向上 $M$ 存在一个极小值,对应 $S$ 取得最大值,如对于4环结构,当焦面 $M<0.2$ 时,在轴向上, $S$ 最大值为0.392, $M$ 最小值为0.153。轴向上,二环结构的 $S$ 取极大值时, $M$ 取得较小值,增加环带数目, $S$ 不会增大,反而会减小,同时 $M$ 会增大,虽然6环结构的 $M$ 比2环结构略小,但其 $S$ 要比2环结构小很多。

为了确定数值孔径对轴向光束的影响,以4环和5环结构为例,结合表6研究 $NA$ 从0.1增大到

距离后,轴向光强达到峰值,具有较小的 $M$ 值<sup>[18]</sup>。

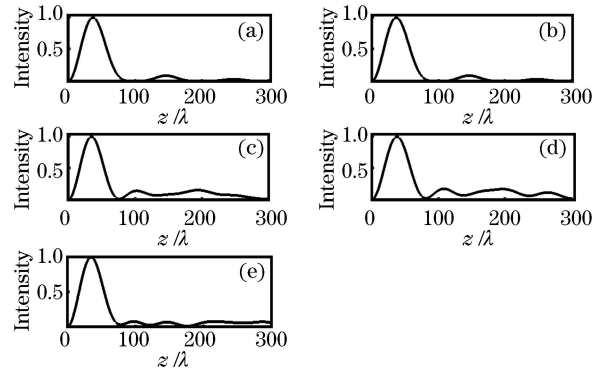


图6 不同环带对应的轴向光强分布。

(a) 2环;(b) 3环;(c) 4环;(d) 5环;(e) 6环

Fig. 6 Light intensity distributions in axial direction for different ring structures. (a) 2-ring; (b) 3-ring; (c) 4-ring; (d) 5-ring; (e) 6-ring

0.6时 $R$ 、 $S$ 、 $M$ 的变化规律,其变化规律如图7所示。

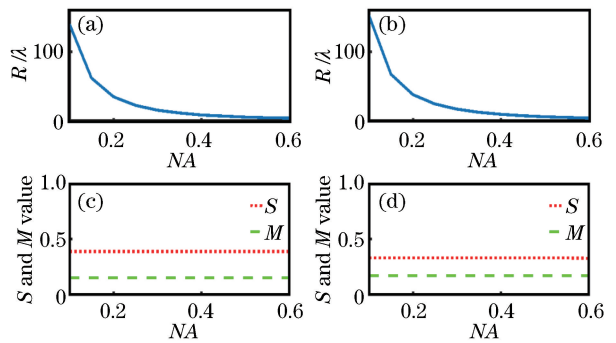


图7 轴向上 $R$ 、 $M$ 和 $S$ 随 $NA$ 的变化。(a) 4环 $R$ 值;(b) 5环 $R$ 值;(c) 4环 $S$ 、 $M$ 值;(d) 5环 $S$ 、 $M$ 值

Fig. 7  $R$ ,  $M$ ,  $S$  in axial direction versus  $NA$ . (a)  $R$  value for 4-ring; (b)  $R$  value for 5-ring; (c)  $S$  and  $M$  values for 4-ring; (d)  $S$  and  $M$  values for 5-ring

可以看出, $R$ 、 $M$ 和 $S$ 值的变化规律和焦面上的变化规律相似, $R$ 值随 $NA$ 的增加而减小,而 $S$ 和 $M$ 值不随 $NA$ 变化,均为常量。通过拟合 $R$ 曲线,可以得到 $R$ 和 $NA$ 的关系:

$$R = m\lambda / (NA)^2, \quad (11)$$

对应图7(a)和(b)中 $m$ 分别为1.393和1.515。

## 4 结 论

利用环带二元相位板对入射光场相位进行调制,可在焦点区域形成多种新颖光束,经过理论推导得到了焦点光场与相位板环带半径的解析表达式,分析了相位板环带半径对空心焦场  $R$ 、 $S$  和  $M$  值的影响规律。研究表明,增加相位板环带数目,并不能提高轴向上和焦平面上的  $S$  值,但可以降低焦面上的  $M$  值,空心焦场的  $R$  和相位板环带数目的奇偶性有关,并受相位板环带半径的影响。对于环带二元相位板结构,焦面上的  $R$  和数值孔径成反比,轴向上的  $R$  和数值孔径的平方成反比,而  $S$  和  $M$  和数值孔径无关。

## 参 考 文 献

- [1] Xu H F, Zhang W J, Qu J, *et al.* Optical trapping Rayleigh dielectric particles with focused partially coherent dark hollow beams[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(21): 1839-1848.
- [2] Kuga T, Torii Y, Shiokawa N, *et al.* Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(25): 4713-4716.
- [3] Liu H L, Lü Y F, Xia J, *et al.* Flat-topped vortex hollow beam and its propagation properties [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(7): 075606.
- [4] Khonina S N, Golub I. Engineering the smallest 3D symmetrical bright and dark focal spots[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(10): 2029-2033.
- [5] Liu S L, Liu W, Chen D N, *et al.* Generation of dark hollow beams used in sub-diffraction-limit imaging in coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 214601.  
刘双龙, 刘伟, 陈丹妮, 等. 超衍射极限相干反斯托克斯拉曼散射显微成像技术中空光束的形成[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 214601.
- [6] Peng F, Yao B L, Yan S H, *et al.* Trapping of low-refractive-index particles with azimuthally polarized beam[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(12): 2242-2247.
- [7] Xue Y, Kuang C F, Li S, *et al.* Sharper fluorescent super-resolution spot generated by azimuthally polarized beam in STED microscopy [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17653-17666.
- [8] Lin J H, Wei M D, Liang H H, *et al.* Generation of supercontinuum bottle beam using an axicon [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 2940-2946.
- [9] Chen Y H, Yan L, Rishøj L, *et al.* Dynamically tunable optical bottles from an optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3327-3329.
- [10] Zeng T T, Ding J P. Three-dimensional multiple optical cages formed by focusing double-ring shaped radially and azimuthally polarized beams[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(3): 031405.
- [11] Wang H F, Gan F X. Phase-shifting apodizers for increasing focal depth[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(25): 5263-5266.
- [12] Chen G J, Zhou Q Q, Ji X M, *et al.* Generation of the tunable vector ellipse hollow beam by using linearly polarized light beams [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 083701.  
陈国钧, 周巧巧, 纪宪明, 等. 用线偏振光产生可调矢量椭圆空心光束 [J]. *物理学报*, 2014, 63(8): 083701.
- [13] Lin J, Chen R, Yu H C, *et al.* Generation of hollow beam with radially polarized vortex beam and complex amplitude filter[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(7): 1395-1400.
- [14] Chen G J, Zhou Q Q, Ji X M, *et al.* Study on high-numerical-aperture-focused characteristics of vector beam produced by  $\pi$  phase plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1226001.  
陈国钧, 周巧巧, 纪宪明, 等.  $\pi$  相位板产生矢量光束的高数值孔径聚焦特性研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1226001.
- [15] de Juana D M, Oti J E, Canales V F, *et al.* Design of superresolving continuous phase filters[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 607-609.
- [16] Cai X M, Zhao J Y, Tong H, *et al.* Study on high-numerical-aperture-focused characteristics by  $\pi$  phase diaphragm modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0526001.  
蔡勋明, 赵晶云, 童红, 等.  $\pi$  相位光阑调制的高数值孔径聚焦特性研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0526001.
- [17] Sales T R M, Morris G M. Diffractive superresolution elements [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(7): 1637-1646.
- [18] Bokor N, Davidson N. Tight parabolic dark spot with high numerical aperture focusing with a circular  $\pi$  phase plate[J]. *Optics Communications*, 2007, 270(2): 145-150.
- [19] Zhou C H, Jia J, Liu L R. Circular Dammann grating [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2174-2176.