

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0441

高数值孔径下高斯光束超分辨技术

王伟

(安徽工业大学 数理学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要:利用矢量衍射理论,研究了高数值孔径下高斯光束的超分辨特性,对可以实现超分辨的二环和三环相位结构进行了优化求解,分析了环带半径和相位变化对超分辨性能的影响规律,给出了优化方法和优化结果. 研究表明:当和平面波照明具有相同的旁瓣比时,使用高斯光束照明仍然可以实现光学超分辨;采用二环相位结构时,内环半径的控制比较关键,相位的微小改变对超分辨性能的影响不大,二环相位结构具有加工容差大的优点;三环相位结构在相同旁瓣比的情况下能够达到较大的压缩比和较小的主瓣峰值强度,三环结构的半径和相位的改变对超分辨性能的影响较大,其加工容差要小于二环相位结构;无论二环或三环相位结构,若提高压缩比,必然会引起主瓣峰值强度降低和旁瓣比增大. 该研究为高数值孔径下,高斯光束照明时,超分辨光瞳滤波器的优化设计提供了一种新方法.

关键词:超分辨;高斯光束;高数值孔径;相位光瞳滤波器

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0441-6

Superresolution Technology of Gaussian Beam under High Numerical Aperture

WANG Wei

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

Abstract: Using vector diffraction theory, the superresolution properties of Gaussian beam are studied under high numerical aperture. The two and three rings phase structures, which can realize superresolution, are solved and optimized. The variety regularities of superresolution properties are analyzed with the changing of radius and phase. The methods and solutions of optimization are also given. The results show that superresolution can be get with the same side lobe at illumination of plane wave, when using the Gaussian beam illumination. The inner radius is crucial when using two ring phase structure and the property of superresolution has little change with tiny phase changing. Two ring phase structures have the advantages of machining tolerances. Three ring phase structures can get larger compression ratio and small peak intensity of the main lobe with the same side lobe. The changing of radius and phase has important influence on the performance of superresolution. The machining tolerance is smaller than that of two ring phase structure. For both two and three ring phase structure, the increase of compression ratio will inevitably cause the decrease of main lobe peak intensity and the increasing of the sidelobe ratio. This research provides a new method for the design of superresolution pupil filter with Gaussian beam illumination under high numerical aperture.

Key words: Superresolution; Gaussian beam; High numerical aperture; Phase pupil

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11204004, 11204005, 51202005)和安徽工业大学青年教师科研基金(No. QZ201017)资助

作者:王伟(1978—),男,副教授,博士,主要研究方向为衍射光学和微纳光学. Email:weiw978@ahut.edu.cn

收稿日期:2012-11-19;录用日期:2013-01-22

0 引言

Toraldo di Francia 在 1952 年首次对光学超分辨进行了理论研究^[1], 由于光学超分辨技术在光存储、光学操纵、高分辨率光刻、激光共焦显微成像等领域中有重要的应用价值^[2-4], 人们对如何实现光学超分辨进行了大量的研究, 如利用光瞳滤波器调制波前实现光斑的压缩^[5-7], 利用径向偏振光得到小于线偏振的压缩光斑等^[8-9]. 其中相位型光瞳滤波器具有能量利用率高、体积小、重量轻、可以利用成熟的微电子工艺制作的优点, 日益受到研究人员的重视^[10-11]. 在分析超分辨时, 通常认为入射光波为理想的平面波. 研究发现, 当采用平面波照明时, 在实现主瓣压缩的同时, 会有主瓣峰值强度的降低和旁瓣强度的增大, 而旁瓣强度的增大会给光学系统带来附加的噪音, 影响光学系统的性能. 而现在很多光学系统, 如光存储、激光加工和激光共焦显微术等技术中, 使用了激光器作为光源并且使用了高数值孔径物镜. 在高数值孔径下, 会聚光束表现出了许多独特的性质, 其光束的传播行为不同于低数值孔径下的光束传播行为^[12-14], 并且激光器发出的光束都是基模高斯光束, 在高数值孔径下, 把高斯光束近似为平面波分析其传播行为会产生较大的误差. 因此, 研究高数值孔径下的高斯光束的传播有重要的实际意义. 据我们所知, 基于高斯光束照明, 高数值孔径下的超分辨光瞳滤波器研究尚没有文献报道.

本文通过分析高数值孔径下高斯光束的聚焦效应, 研究通过相位光瞳滤波器实现超分辨的方法, 给出了具体设计方法和实现超分辨的二环和三环相位结构, 分析了影响超分辨性能的各种因素.

1 理论分析

根据 Richards 和 Wolf 的矢量衍射理论^[15], 如图 1 所示, 当一个沿 x 方向偏振的高斯光束入射到无球差的高数值孔径物镜上时, 焦点 $P(x, y, z)$ 点附近的电场分布可以表示为

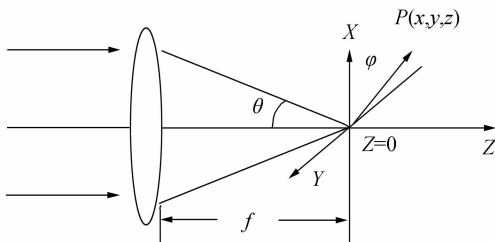


图 1 线偏振入射光聚焦时, 焦点附近光强计算
Fig. 1 The focusing of a linear polarized incident light

$$E_x(r, z, \varphi) = -i(I_0 + I_2 \cos 2\varphi)$$

$$E_y(r, z, \varphi) = -iI_2 \sin 2\varphi \quad (1)$$

$$E_z(r, z, \varphi) = -2I_1 \cos \varphi$$

式中

$$I_0(r, z) = \int_0^\alpha t(\theta) l_0(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin \theta (1 + \cos \theta) \times J_0(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta \quad (2)$$

$$I_1(r, z) = \int_0^\alpha t(\theta) l_0(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin^2 \theta \times J_1(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta \quad (3)$$

$$I_2(r, z) = \int_0^\alpha t(\theta) l_0(\theta) \sqrt{\cos \theta} \sin \theta (1 - \cos \theta) \times J_2(kr \sin \theta) \exp(ikz \cos \theta) d\theta \quad (4)$$

λ 为介质中的波长, z 和 r 分别是轴向和径向坐标. 最大孔径角 $\alpha = \arcsin(\text{NA}/n)$, NA 是透镜的数值孔径, n 为介质的折射率. φ 表示入射光的偏振方向和子午平面的夹角. $t(\theta)$ 是空间相位传递函数, $l_0(\theta)$ 描述入射光场的振幅分布, 当入射光为平面波时, $l_0(\theta)$ 可设为单位振幅, 当入射光为沿 X 方向偏振的高斯光束时, $l_0(\theta)$ 可表示为^[16-17]

$$l_0(\theta) = \exp \left[- \left(\frac{\beta \sin \theta}{\sin \alpha} \right)^2 \right] \quad (5)$$

当入射高斯光束的束腰恰好充满物镜前表面时, $\beta = 1$.

环带相位型光瞳滤波器的结构如图 2, 环带归一化半径分别用 r_1, r_2, r_3 表示, 相位调制深度分别用 ϕ_1, ϕ_2 来表示. 环带越多, 光瞳滤波器设计的自由度越大. 本文分别对二环和三环的相位结构进行了优化分析, 当使用二环相位光瞳滤波器时, 归一化半径为 $r_1 < r_2 = 1$, 相位调制深度为 $\phi, 0$. 使用三环相位光瞳滤波器时, 归一化半径为 $r_1 < r_2 < r_3 = 1$, 相位调制深度 $\phi_1 = \pi, \phi_2 = 0$. 表征超分辨性能的指标分别用第一零点比 G 、斯塔尔比 S 和最大旁瓣强度比 M 表示. G 表示光强为第一极小时对应的光斑半径和艾里斑为第一极小时的光斑半径之比; S 表示超分辨光斑的峰值强度和艾里斑的峰值强度之比; M 表示旁瓣的峰值强度和中心主瓣的峰值强度之比.

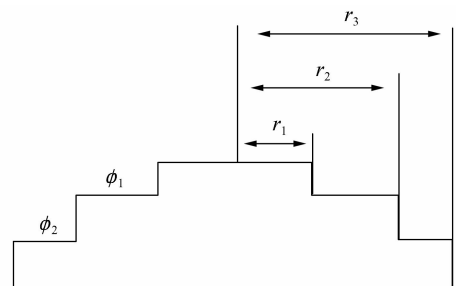
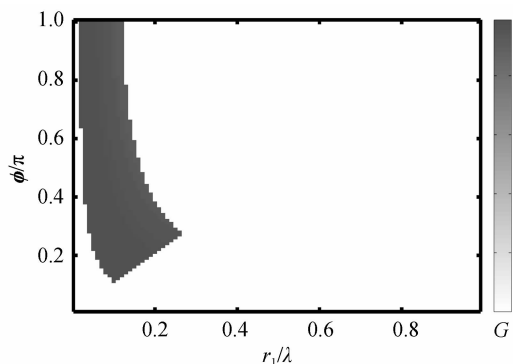


图 2 三环相位型光瞳滤波器
Fig. 2 Three ring annular phase pupil filter

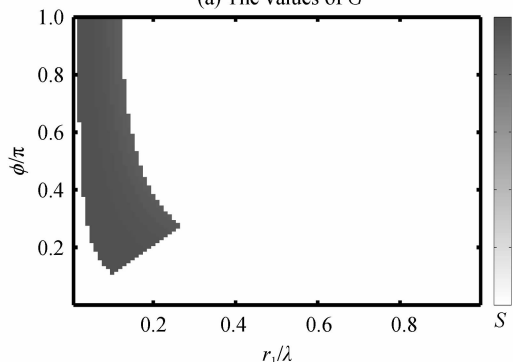
在设计超分辨光瞳滤波器时,总是希望在保持较小 G 值的同时有较大的 S 值和较小的 M 值. 当采用平面波照明时,由式(1)~(4)可以计算出最大旁瓣强度比 $M=0.014$, M 值的增大会给光学系统产生附加噪音,影响光学系统的性能. 研究和平面波照明具有相同 M 值时,如何控制 G 和 S 的值有更重要的实际意义. 由于平面波照明时 $M=0.014$, 因此,可以认为当 $M<0.015$ 时,光瞳滤波器的加入不会对光学系统产生实际影响. 本文主要研究在高斯光束照明、 $M<0.015$ 时,如何使用二环和三环相位结构实现横向超分辨. 优化设计时,首先根据式(1)~(4)数值计算不同的归一化半径 r 和相位调制深度 ϕ 时的焦点附近的光强分布,然后计算出不同结构下的 G 、 M 和 S 值,通过设定不同的 G 、 M 和 S 值,搜索满足要求的环带相位结构,搜索时优先设定 $M<0.015$. 数值计算时,物镜数值孔径 $NA=0.85$, 归一化半径 r 和相位调制深度 ϕ 的步长间隔分别取 0.01 和 0.01π .

2 结果与讨论

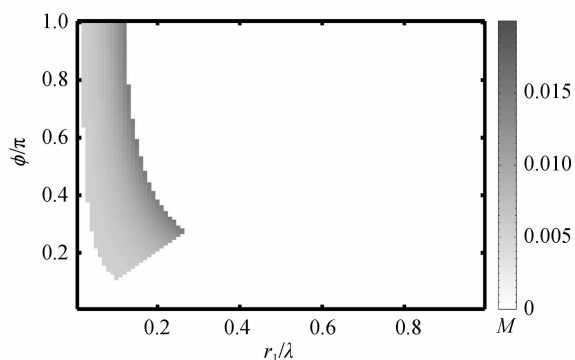
二环相位结构置于数值为 0.85 的物镜前时,改变归一化半径 r 和相位调制深度 ϕ 的值,步长间隔分别取 0.01 和 0.01π ,利用式(1)~(4)数值计算出焦点附近的光强分布,然后分别计算出对应不同归一化半径 r 和相位调制深度 ϕ 的 G 、 M 和 S 的值. 搜索时设定 $M<0.015$, $S>0$, $G<1$, 用全局搜索算法寻找满足条件的结构,对应 G 、 S 和 M 的值分别如图 3.



(a) The values of G



(b) The values of S



(c) The values of M

图 3 满足 $M<0.015$, $S>0$, $G<1$ 时, r_1 和 ϕ 取不同值时, G 、 S 和 M 的值

Fig. 3 The values of G 、 S and M with different r_1 and ϕ at the definition

从图 3 中 G 、 S 和 M 值的变化可以看出,若要在 $M<0.015$ 时实现横向超分辨, G 的最小值为 0.916 ; S 的最小值为 0.91 . 分析数据变化可以看出,当 G 值减小时, M 的值会增大,而 S 的值会减小,这说明利用二环结构实现横向超分辨时会导致旁瓣强度的增大和中心主瓣峰值强度的降低,这种变化趋势和平面波照明时是一致的. 从图 3(a)中可以进一步搜索出满足 $G=0.916$ 的结构,如表 1 所示. 图 4 示出了当 $r_1=0.12$, $\phi=0.9\pi$ 时的横向光强分布图,实黑线表示未加光瞳滤波器时焦平面上的横向光强分布,用点标记的虚黑线表示了加入光瞳滤波器后的横向光强分布. 从图中可以看出,加入光瞳滤波器后产生了较好的超分辨效果.

表 1 满足 $G=0.916$ 的结构

Table 1 The structures with $G=0.916$

r_1	$\phi(\pi)$	G	S	M
0.16	$\phi=0.53$	0.916	0.917	$M=0.0146$
0.15	$0.58 \leq \phi \leq 0.59$	0.916	$0.91 < S < 0.92$	$0.014 < M < 0.015$
0.14	$0.63 \leq \phi \leq 0.66$	0.916	$0.91 < S < 0.92$	$0.014 < M < 0.015$
0.13	$0.71 \leq \phi \leq 0.78$	0.916	$0.91 < S < 0.92$	$0.014 < M < 0.015$
0.12	$0.83 \leq \phi \leq 1$	0.916	$0.91 < S < 0.92$	$0.014 < M < 0.015$

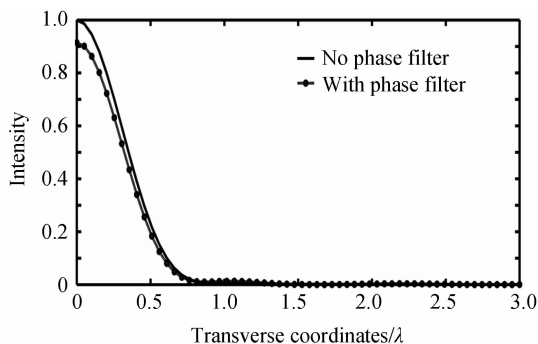


图 4 $r_1=0.12$, $\phi=0.9\pi$ 时, 横向光强分布

Fig. 4 Transverse intensity distribution with $r_1=0.12$ and $\phi=0.9\pi$

从表 1 中可以看出,如果需要在保持较小旁瓣

比的同时实现横向超分辨,内环半径的控制非常关键.通过数值模拟发现,内环半径的改变对 G 、 S 、 M 值的影响较大,如当 $r_1=0.13$, $\phi=0.9\pi$ 时, $G=0.905$, $S=0.90$, $M=0.016$,此时对超分辨性能影响不大,但当 $r_1=0.15$, $\phi=0.9\pi$ 时, $G=0.884$, $S=0.869$, $M=0.021$,此时导致主瓣强度降低,同时旁瓣强度急剧增大,对其它结构分析也可以得出相似的结论.相位的改变对超分辨性能的影响较小,特别是 $r_1=0.12$ 时,当相位调制深度在 $0.83\pi\leq\phi\leq\pi$ 之间时, G 、 S 和 M 值几乎没有变化.由于这种相位型光瞳滤波器采用微加工工艺制作^[18-19],环带半径的加工准确度取决于光刻掩模板的加工准确度和对准准确度,相位调制深度取决于刻蚀速率和刻蚀时间的控制.刻蚀深度的控制是二元微光学元件的主要加工难度之一,无论是湿法刻蚀还是干法刻蚀,现在都还很难精确地控制刻蚀深度,而这种二环结构恰好具有相位加工容差大的特点,因此这种二环相位结构具有独特的易于加工的优点.文献[13]报导了加入相位光瞳滤波器后会有焦移现象,我们采用文献[13]的方法,计算轴向光强分布,发现加入表1所示的二环光瞳滤波器后焦移量很小.当 $r_1=0.16$, $\phi=0.53\pi$ 时,焦移量最大,焦点左移 0.06λ ,特别当 $r_1=0.12$, $0.85\pi\leq\phi\leq\pi$ 时,没有焦移现象.

若需要进一步减小 G 值,则会引起旁瓣强度 M 的增大和主瓣峰值强度的 S 降低.利用同样的算法可以得到满足不同要求的结构,如当 $M=0.032$ 时, G 可达到 0.84 , $S=0.81$,此时 $r_1=0.18$, $0.99\pi\leq\phi\leq 1.0\pi$;当 $M=0.05$ 时, G 可达到 0.80 , $S=0.73$,此时 $r_1=0.22$, $0.88\pi\leq\phi\leq 0.89\pi$.实际使用时,应根据实际使用环境,合理的选择 G 、 S 、和 M 值.

采用三环相位光瞳滤波器也可以实现横向超分辨,同样对高斯光束照明下的三环相位光瞳滤波器进行了数值模拟分析.三环归一化半径分别为 r_1 , r_2 , $r_3=1$, r_1 , r_2 的步长间隔都取 0.01 ,相位调制深度为 0 , ϕ , 0 ,且 $\phi=\pi$.计算时先根据式(1)~(4)计算出在不同归一化半径下焦点附近的光强分布,然后计算不同 r_1 , r_2 时对应的 G 、 S 和 M 值,设定 G 、 M 和 S 值的边界条件,全局搜索满足条件的三环相位结构.同样设定 $M<0.015$, $S>0$, $G<1$,满足此条件的三环结构和相应 G 、 S 和 M 值的变化分别如图5(a)、(b)、(c)所示.

从图5中可以看出,使用三环相位结构在旁瓣比小于 0.015 时,也可以实现横向超分辨.对 G 值进行分析发现,其最小可达到 0.895 ,满足此要求的

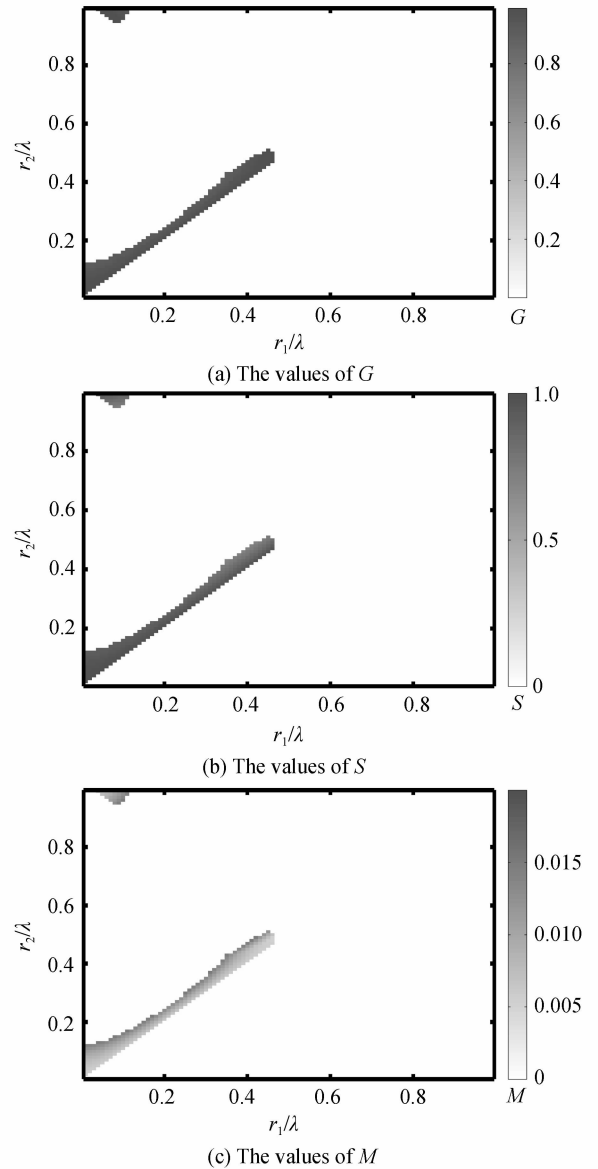


图5 满足 $M<0.015$, $S>0$, $G<1$ 时, r_1 和 r_2 取不同值时, G 、 S 和 M 的值

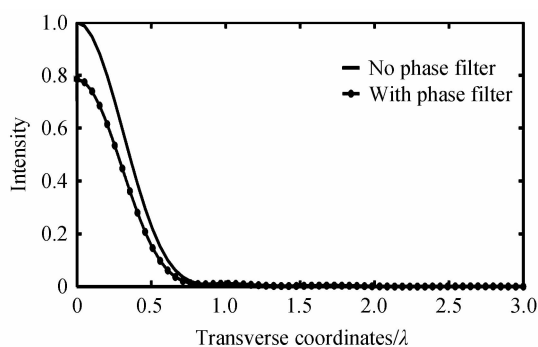
Fig. 5 The values of G 、 S and M with different r_1 and r_2 at the definition of $M<0.015$, $S>0$, $G<1$

三环结构如表2.从表2中可以看出,这三种结构 G 和 M 的值相差很小,当 $r_1=0.31$, $r_2=0.37$ 时,对应的 S 值最大,超分辨的效果最好,此时,对应横向光强分布如图6所示,其中实黑线表示未加光瞳滤波器时焦平面上的横向光强分布,用点标记的虚黑线表示了加入光瞳滤波器后的横向光强分布图.

表2 满足 $G=0.895$ 的结构

Table 2 The structures with $G=0.895$

r_1	r_2	G	S	M
0.31	0.37	0.895	0.785	0.014 7
0.34	0.41	0.895	0.735	0.014 2
0.35	0.43	0.895	0.692	0.014 6

图6 $r_1=0.31, r_2=0.37$ 时, 横向光强分布图Fig. 6 Transverse intensity distribution with $r_1=0.31$ and $r_2=0.37$

从表1和表2的数据对比中可以看出,两者 M 值相差很小,表1中的 G 值和 S 值均要大于表2中的 G 值和 S 值. 可以分析出,在保持旁瓣强度不变的情况下,采用三环 π 相位结构虽然能够减小 G 值,但同时也带来 S 值的减小. 对半径 r_1, r_2 和相位调制深度 ϕ 的变化对超分辨性能的影响进行数值计算,以 $r_1=0.31, r_2=0.37$ 为例,当相位不变, r_1, r_2 分别改变 0.02 时,对应的 G, S, M 值如表3. 半径不变,相位 ϕ 改变时,对应的 G, S, M 值如表4.

表3 r_1, r_2 改变时,对应的 G, S, M 值Table 3 The values of G, S, M with different r_1 and r_2

r_1	r_2	ϕ	G	S	M
0.29	0.37	π	0.863	0.725	0.020 8
0.31	0.39	π	0.874	0.714	0.018 9
0.31	0.35	π	0.926	0.857	0.011 0
0.33	0.37	π	0.937	0.851	0.010 3

表4 相位 ϕ 改变时,对应的 G, S, M 值Table 4 The values of G, S, M with different ϕ

r_1	r_2	ϕ	G	S	M
0.31	0.37	0.9π	0.905	0.790	0.014 4
0.31	0.37	0.8π	0.905	0.806	0.013 6
0.31	0.37	0.7π	0.926	0.829	0.012 3
0.31	0.37	0.6π	0.937	0.859	0.010 9
0.31	0.37	0.5π	0.958	0.893	0.009 4

从表3可以看出,减小 r_1 或者增大 r_2 , 即当三环的相位调制区域扩大时,会引起 M 值的增大, G 值和 S 值的减小; 当增大 r_1 或者减小 r_2 , 即当三环的相位调制区域减小时,会引起 G 值、 S 值的增大以及 M 值的减小. 从表4可以看出,当半径不变,相位调制深度改变时,会引起 G, S 值的增大和 M 值的减小. 比较后会发现,半径的改变对超分辨性能的影响要大于相位改变的影响. 同样采用文献[13]的方法对轴向光强的影响进行分析,没有发现表2、表3和表4所示的结构有焦移现象. 由于三环相位光瞳滤波器的相位调制深度加工容差要小于二环相位光瞳滤波器,因此,制作此类三环相位光瞳滤波器时,

需要精确地控制半径和刻蚀深度,加工准确度要高于二环相位结构.

进一步分析发现,若要进一步提高压缩比,则会引起旁瓣强度 M 的增大和主瓣峰值强度 S 的降低. 如当 $M=0.029 0$ 时, $G=0.842, S=0.765$, 此时 $r_1=0.19, r_2=0.28, \phi=\pi$. 当 $M=0.038 5$ 时, $G=0.800, S=0.614$, 此时 $r_1=0.26, r_2=0.38, \phi=\pi$. 和二环结构对比会发现,达到相同的 G 值时,三环相位结构的 M 值要小于二环结构,而 S 值也要小于二环结构.

3 结论

利用矢量衍射理论,研究了高数值孔径下,高斯光束照明时,焦点区域的光强分布特性,优化求解了利用二环和三环相位光瞳滤波器实现超分辨的具体结构,分析比较了归一化半径和相位调制深度对超分辨性能的影响规律. 经过研究发现,在保持和平面波照明时相同旁瓣比的情况下,即当 $M < 0.015$ 时,采用高斯光束照明,利用二环或三环相位结构调制波前的方法能够实现横向超分辨. 在相同旁瓣比的情况下,二环结构有较大的 G 值和 S 值,内环半径的改变对超分辨性能的影响较大,制作时,需精确控制内环半径的大小,而相位的微小改变对超分辨性能的影响不大,二环相位结构具有相位加工容差大的优点;三环相位结构在相同旁瓣比的情况下能够产生较大的压缩比,但同时也有较小的 S 值,同时三环结构的半径和相位调制深度的改变对超分辨性能的影响较大,其加工准确度要高于二环相位结构.

参考文献

- [1] FRANCIA G T D. Super-gain antennas and optical resolving power[J]. *Supplemento Al Volume IX, Serie IX Del Nuovo Cimento*, 1952, **3**: 426-438.
- [2] SALES T R M, MORRIS G H. Diffractive superresolution elements [J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1997, **14**(7): 1637-1646.
- [3] LUO H X, ZHOU C H. Comparison of superresolution effects with annular phase and amplitude filters[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(34): 6242-6247.
- [4] LIU H T, YAN Y B, JIN G F. Design and experimental test of diffractive superresolution elements [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(1): 95-99.
- [5] NAN Yu-jie, ZHU Hua-feng, XU Dan, et al. Optimization design of two-zone complex-amplitude superresolution pupil filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(sup. 1): 41-45.
南玉杰,朱化凤,徐丹,等. 两区复振幅光瞳滤波器的优化设计研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(增刊): 41-45.
- [6] GUO Shu-wen, GUO Han-ming, ZHUANG Song-lin. One-dimensional transverse superresolution achieved by three-zone dissymmetrical pupil filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2221-2226.
郭舒文,郭汉明,庄松林. 非对称三区光瞳滤波器实现一维横向超分辨[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2221-2226.

- [7] ZHU Hua-feng, XU Dan, WANG Xiumin, *et al.* Design and study of achromatic phase-only superresolving pupil filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0522001.
朱化凤,徐丹,王秀民,等.消色差相位型超分辨光瞳滤波器的设计研究[J].*光学学报*,2012,**32**(5):0522001.
- [8] WANG H F, SHI L P, LUKYANCHUK B, *et al.* Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**: 501-505.
- [9] CHENG Kan, TAN Qiao-feng, ZHOU Zhe-hai, *et al.* Design of three-dimensional superresolution diffractive optical elements for radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3295-3299.
程侃,谭峭峰,周哲海,等.径向偏振光三维超分辨衍射光学元件设计[J].*光学学报*,2010,**30**(11):3295-3299.
- [10] LIU L, DIAZ F, WANG L, *et al.* Superresolution along extended depth of focus with binary-phase filters for the Gaussian beam[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 2008, **25**(8): 2095-2101.
- [11] SHEPPARD C J R, CHOUDHURY A. Annular pupils, radial polarization, and superresolution[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(22): 4322-4327.
- [12] JABBOUR T G, KUEBLER S M. Vector diffraction analysis of high numerical aperture focused beams modified by two- and three-zone annular multi-phase plates [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(3): 1033-1043.
- [13] WANG Wei, ZHOU Chang-he, YU Jun-jie. Transverse superresolution and extended axial focal depth realized by three-zone annular phase pupil filter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2): 024201.
王伟,周常河,余俊杰.三环位相型光瞳滤波器的横向超分辨与轴向焦深扩展[J].*物理学报*,2011,**60**(2):024201.
- [14] CHANG Qiang, YANG Yan-fang, HE Ying, *et al.* Focusing features of concentric three-ring non-uniform mixing polarization vector beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0626001.
常强,杨艳芳,何英,等.三环非均匀混合偏振同轴矢量光束的聚焦特性[J].*光学学报*,2012,**32**(6):0626001.
- [15] RICHARDS B, WOLF E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1959, **253**: 358-379.
- [16] YEW E Y S, SHEPPARD C J R. Sheppard. Tight focusing of radially polarized Gaussian and Bessel-Gauss beams[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(23): 3417-3419.
- [17] YAN S H, YAO B L. Accurate description of a radially polarized Gaussian beam[J]. *Physical Review A*, 2008, **77**(2): 023827.
- [18] YU J J, ZHOU C H, JIA W, *et al.* Three-dimensional dammann array[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(10): 1619-1630.
- [19] WANG Wei, ZHOU Chang-he. High-fidelity replication technology of polymer micro structure diffraction gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(10): 1363-1366.
王伟,周常河.高准确度微结构聚合物光栅的复制技术[J].*中国激光*,2007,**34**(10):1363-1366.