

文章编号: 0253-2239(2010)s100404

被均匀光墙包围的微小三维暗斑的形成

张耀举¹ 王燕燕¹ 石天真¹ 方朝龙¹ Taikei Suyama²

(¹温州大学物理与电子信息学院, 浙江温州 325035)
(²熊本大学科技研究院, 熊本 860-8555, 日本)

摘要 具有高度均匀的光墙的三维暗斑对于诸如三维暗斑显微和三维暗斑俘获等方面的应用具有很强的研究价值。提出了一种产生在各个方向被光均匀包围的三维暗斑的新方法。在该方法中,一束双环形状的径向偏振光和一束单环形状的角向偏振光被非相干地叠加到一起形成复合光束。当两个光束具有适当的强度比时,复合光束聚焦后可以产生一个被均匀光墙包围的三维暗斑。和单一一束双环形状的径向偏振光聚焦的结果相比,聚焦复合光束所产生的三维暗斑的光墙的均匀度可以被提高 2 倍以上。

关键词 物理光学;三维暗斑;偏振光;显微

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201030.s100404

Formation of a Small Three-Dimensional Dark Spot with a High Uniform Light Wall

Zhang Yaoju¹ Wang Yanyan¹ Shi Tianzhen¹ Fang Chaolong¹ Taikei Suyama²

(¹College of Physics and Electronic Information, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)
(²Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan)

Abstract The three-dimensional (3D) dark with high uniform light wall is very useful for many applications such as 3D dark spot microscopy and 3D dark spot trap. A new method is proposed to generate a 3D dark spot surrounded by uniform light at all directions. In this method, a double-ring-shaped radially polarized beam and a single-ring-shaped azimuthally polarized beam are incoherently superimposed. When two component beams of the composite beam have a proper intensity ratio, a 3D dark spot with high uniform light wall can be generated by focusing the composite beam. Compared with the result obtained from a single double-ring-shaped radially polarized beam focusing, the uniformity of the light wall surrounding the 3D dark spot obtained from the superimposed beam focusing can be increased twice or more.

Key words physical optics; 3D dark spot; polarization; microscopy

OCIS codes 180.6900; 260.5430

1 引 言

在各个方向被光墙包围的三维暗斑在许多光学领域都有应用。例如,它可以应用在暗斑俘获原子^[1~3]或者作为超分辨荧光显微中的擦写光束^[4~7]。有许多产生三维暗斑的方法,其中一些方法是用几个不同侧面的光共同作用而产生三维暗斑。吴逢铁等^[8]利用轴锥锥产生的两束贝塞耳光相干实现局域空心光束,但是三维暗斑的体积非常大,

不适合暗斑显微与俘获。另一些方法是使用常规的光学偏振片或者光学全息来产生二维暗斑。产生三维暗斑的一个简单的方法是使用双环形径向偏振光束(R-TEM₁₁^{*})^[9]。R-TEM₁₁^{*}光束具有一些奇异特性。最近,利用R-TEM₁₁^{*}光束提高了近场光存储系统的焦深^[10,11],分析了应用这种光束俘获折射率比周围环境的折射率大的粒子的原理^[8]。然而,R-TEM₁₁^{*}束方法产生的暗斑有一个严重缺点就是包围

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(60777005)资助课题。

作者简介: 张耀举(1960—),男,博士,教授,主要从事光学显微和激光束的传输与变换等方面的研究。

E-mail: zhangyaoju@sohu.com

暗斑的光墙相当不均匀,最小强度是在光线子午面内的对角线方向,它比光轴方向的强度小得多^[9]。相似的现象在两个不同束腰的高斯光束干涉法所产生的三维暗斑^[2]和在圆形相位板方法所产生的暗斑中也存在^[12,13]。如果用这样的光束作为超分辨荧光显微镜的擦写光束,那么擦写束的功率不可能增加到在对角线方向感应出有效的荧光消耗而不在光轴方向引起光损伤。因此,对角线方向上的超分辨因子是相当低的。另外,在暗斑俘获原子和生物粒子当中,俘获深度是由光墙上的最小光强所决定。因此,当激光功率一定时,包围暗斑的、高度不均匀的光墙将减小俘获深度。

本文提出了一个新颖的方法来使用一个双环形径向偏振光与一个单环形角向偏振光进行非相干叠加,产生一个小的三维暗斑,并且使包围这个暗斑的光墙**的强度非常均匀**。

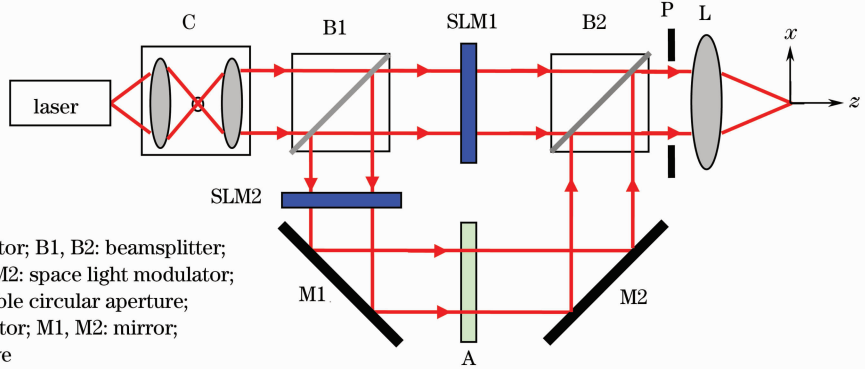


图1 产生三维暗斑的光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of optical system used for generating a 3D dark

3 矢量衍射理论

由于聚焦透镜 L 具有高的数值孔径,所以聚焦场的计算必须用矢量衍射理论而不能用标量衍射理论。依照矢量衍射理论,当图 2(a)所示的双环形径向偏振光入射到物镜上时,在焦区的电场可以被表达为^[15]

$$E_r^d(r, z) = \eta_d \int_0^\alpha \sqrt{\cos \theta} A_1(\theta) \sin 2\theta J_1(kr \sin \theta) \times \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (1)$$

$$E_z^d(r, z) = 2i\eta_d \int_0^\alpha \sqrt{\cos \theta} A_1(\theta) \sin^2 \theta J_0(kr \sin \theta) \times \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi n/\lambda$ 是在折射率为 n 的浸没液体中的波数, J_n 是第 n 阶,第一类贝塞尔函数。 (r, φ, z) 是圆

2 光学系统的建立

图 1 是产生三维暗斑的光学系统的示意图。准直器 C 将来自激光器的光转变成线性偏振的平行光。空间光调制器 SLM1 和 SLM2 起偏振光转换作用,它们将由分束器 B1 所分出的两束线偏振光分别转换成双环形径向偏振光(R-TEM₁₁^{*})和单环形角向偏振光(A-TEM₀₁^{*})。利用石英晶体的旋光效应也可以制作偏振光转换器^[14]。B2 将径向偏振光和角向偏振光非相干地迭加到一起。复合光束被高数值孔径透镜聚焦。调节圆形孔径 P 的半径可以改变对光束的截断参数,调节衰减器 A 可以改变径向偏振光和角向偏振光的强度之比,这对于形成一个理想的三维暗斑是非常重要的。

柱坐标,坐标原点位于物镜 L 的几何焦点,光轴沿着 z 轴方向。 η_d 是与 R-TEM₁₁^{*} 光束的振幅有关的常数, $A_1(\theta)$ 表示该光束在焦区的振幅分布。那么,聚焦之后的 R-TEM₁₁^{*} 束的归一化强度可以被写为

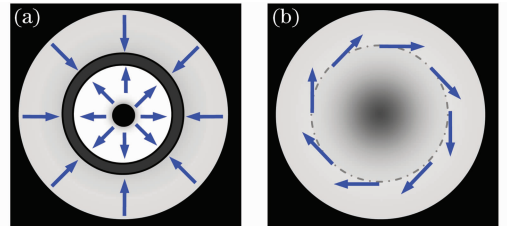


图2 瞬时偏振。(a)一个双环形状的径向偏振光束, (b)一个单环形状的角向偏振光束

Fig. 2 Instantaneous polarization states. (a) A double-ring-shaped radially polarized beam, (b) a single-ring-shaped azimuthally polarized beam

$$I_d = [|E_r^d(r, z)|^2 + |E_z^d(r, z)|^2] / [|E_r^d(r, z)|^2 + |E_z^d(r, z)|^2]_{\max}. \quad (3)$$

相似地, 当图 2(b) 所示的单环形角向偏振光入射到物镜上时, 在焦区的电场可以被表达为^[15]

$$E_\varphi^s(r, z) = 2\eta_s \int_0^\alpha \sqrt{\cos \theta} A_0(\theta) \sin \theta J_1(kr \sin \theta) \times \exp(ikz \cos \theta) d\theta. \quad (4)$$

式中 η_s 是与 A-TEM₀₁^{*} 束的振幅有关的常数。A₀(θ) 表示该光束入射的振幅分布。那么, 聚焦之后的 A-TEM₀₁^{*} 束的归一化强度可以被写为

$$I_s = |E_\varphi^s(r, z)|^2 / |E_\varphi^s(r, z)|^2_{\max}. \quad (5)$$

A_p(θ) 代表在物镜出射光瞳处的振幅分布, 可以表达为^[10]

$$A_p(\theta) = \frac{\beta \sin \theta}{\sin \alpha} \exp \left[- \left(\frac{\beta \sin \theta}{\sin \alpha} \right)^2 \right] L_p^1 \left[2 \left(\frac{\beta \sin \theta}{\sin \alpha} \right)^2 \right],$$

$p = 0 \text{ and } 1,$ (6)

式中 L_p^1 是具有 $p+1$ 个环的缔合拉盖尔多项式。 $\beta = R/w$ 称为截断参数, 其中 w 是高斯束腰, R 是插入在物镜前面的环形孔径 P 的半径。对于双环形经向偏振光束 β 应该大于 1。因为, 如果 $\beta < 1$, 在外环里的光将完全被 P 锁住。

从上面的公式中立即可以发现, 无论是对于 R-TEM₁₁^{*} 光束, 还是对于 A-TEM₀₁^{*} 光束, 在焦区的光强分布是关于光轴旋转对成的。对于图 1 的系统, 聚焦的复合光束的归一化强度可以写作为

$$I = (\xi I_s + I_d) / (\xi I_s + I_d)_{\max}, \quad (7)$$

式中 ξ 代表聚焦的 A-TEM₀₁^{*} 束的最大强度与聚焦的 R-TEM₁₁^{*} 束的最大强度之比, 下标 max 表示取极大值。 ξ 的变化可以通过调节图 1 中的衰减器 A 来实现。

4 计算结果

图 3 显示出了对于几种不同入射光束、在焦区附近 $x-z$ 平面里的归一化光强分布。在计算中, 假设物镜右面的空间充满折射率为 $n=1.515$ 的油, 激光波长为 $\lambda = 599 \text{ nm}$, 系统的数值孔径为 $NA = 1.48$, 截断参数 $\beta = 1.3$ ^[9]。从图 3(b) 中可以看出, 聚焦单一一个单环形角向偏振光束可以产生一个细的中空光束但不能产生一个三维暗斑。尽管聚焦单一一个双环形径向偏振光束可以产生一个三维暗斑, 但是包围暗斑的光墙是相当不均匀的, 沿着光轴方向光墙强度远大于子午面内对角线方向上的强度[图 3(a)]。如果包围三维暗斑的光墙均匀度 U 被定义为在光墙中的最大强度与最小强度之比, 那么在图 3(a) 中, $U = 0.355$ 。如果截断参数 β 的值偏离 1.3, 那么 U 将进一步减小。为了克服使用单一一个 R-TEM₁₁^{*} 束聚焦时所产生的三维暗斑的光墙不均匀的缺点, 构建图 1 所示的光学系统, 在 R-TEM₁₁^{*} 光束的基础上叠加了一个 A-TEM₀₁^{*} 光束, 聚焦结果如图 3(c) 和 (d) 所示。图 3(c) 中, $\xi = 1$, 在这种情况下, 光墙均匀度为 $U = 0.71$, 这个均匀度值是图 3(a) 的均匀度值的 2 倍。在对于 R-TEM₁₁^{*} 和 A-TEM₀₁^{*} 束叠加的一些优化计算之后发现, 当

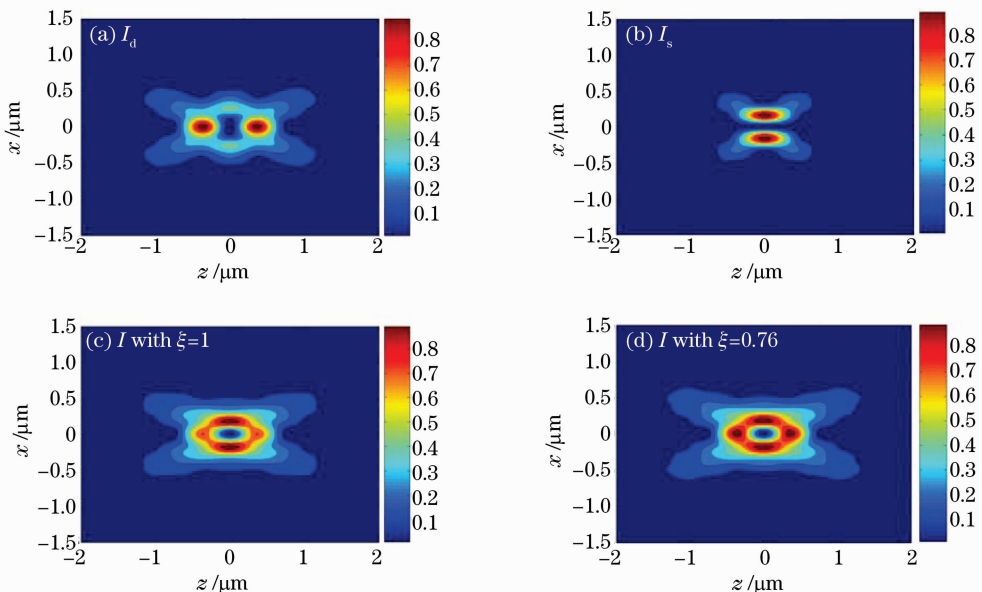


图 3 对于几种不同的入射光束, 在焦区 $x-z$ 平面的归一化光强分布

Fig. 3 Normalized intensity distributions in the $x-z$ plane in the focal region for several different incident beams

$\xi=0.76$ 时,包围三维暗斑的光墙最均匀, U 达到了 0.79。

5 结 论

尽管一个高度聚焦的双环形径向偏振光束可以产生三维暗斑,但是包围三维暗斑的光墙是相当不均匀的。对此,新发展出一个产生被高度均匀的光墙所包围的三维暗斑的新方法,其实质是将由一个双环形径向偏振光束和一个单环形角向偏振光束非相干叠加而组成复合光束,然后经高数值孔径透镜聚焦。用矢量衍射理论计算了衍射场的光强分布,发现使用复合光束可以形成一个被光均匀包围的三维暗斑,其光墙均匀度比单一一个双环形径向偏振光所形成的暗斑的光墙均匀度大两倍甚至更多。

参 考 文 献

- 1 A. Kaplan, N. Friedman, N. Davidson. Optimized single-beam dark optical trap[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(6): 1233~1238
- 2 L. Isenhower, W. Williams, A. Dally *et al.*. Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1159~1161
- 3 Y. Zhang, B. Ding, T. Suyama. Trapping two types of particles using a double-ring-shaped radially polarized beam[J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(2): 023831-5
- 4 T. Watanabe, Y. Iketaki, T. Omatsu *et al.*. Two-point-separation in super-resolution fluorescence microscope based on

- up-conversion fluorescence depletion technique [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3271~3276
- 5 S. W. Hell. Far-field optical nanoscopy[J]. *Science*, 2007, **316**(5828): 1153~1158
- 6 J. Keller, A. Schönle, S. W. Hell. Efficient fluorescence inhibition patterns for RESOLFT microscopy[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3361~3371
- 7 B. Harke, J. Keller, C. K. Ullal *et al.*. Resolution scaling in STED microscopy[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 4154~4162
- 8 Wu Fengtie, Liu Bin, Lu Wenhe *et al.*. Experiment study on bottle beam generated by interfering besell beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2899~2901
- 吴逢铁, 刘 彬, 卢文和 等. 贝塞耳光束相干产生局域空心光束的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2899~2901
- 9 Y. Kozawa, S. Sato. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 820~822
- 10 Y. Zhang, J. Bai. Improving the recording ability of a near-field optical storage system by higher-order radially polarized beams [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3698~3706
- 11 Y. Zhang, Y. Okuno, X. Xu. Theoretical study of optical recording with a solid immersion lens illuminated by focused double-ring-shaped radially polarized beam[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(23): 4481~4485
- 12 R. Ozeri, L. Khaykovich, N. Davidson. Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap[J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(3): R1750~R1753
- 13 N. Bokor, N. Davidson. Tight parabolic dark spot with high numerical aperture focusing with a circular π phase plate[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(2): 145~150
- 14 Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Generation and focusing property with high-numerical aperture lens of vectorial polarized beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 129~133
- 张艳丽, 李小燕, 朱健强. 矢量偏振光束的产生及其高数值孔径聚焦性质[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 129~133
- 15 K. S. Youngworth, T. G. Brown. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(2): 77~87