

# 利用光子筛产生局域空心光束

程依光<sup>1,2</sup> 刘俊伯<sup>1,2</sup> 胡 松<sup>1</sup> 何 渝<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所,四川 成都 610209

<sup>2</sup>中国科学院大学,北京 100049

**摘要** 为了寻找一种简单有效的产生局域空心光束的方法,提出了一种利用交错型光子筛产生空心光束的方法。通过光子筛的内部区域和外部区域相消达到轴上光强为零的目的。给出了光子筛的结构和设计参数,对空心光束中心暗斑尺寸和光子筛焦距、环带数、小孔调制系数的关系进行了深入的研究,发现改变焦距和环带数可以得到微米甚至亚微米的中心暗斑的局域空心光束。理论推导和仿真分析验证了方法的可行性,该方法具有结构简单和能产生极小中心暗斑的优点,特别适用于光学镊子、原子冷却等。

**关键词** 衍射;光子筛;局域空心光束;光镊

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0705003

## Generation of Localized Hollow Beams with Photon Sieves

Cheng Yiguang<sup>1,2</sup> Liu Junbo<sup>1,2</sup> Hu Song<sup>1</sup> He Yu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>2</sup>University of Chinese of Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

**Abstract** In order to find a simple and effective method for generation of hollow laser beams, a method of producing hollow beams with the photon sieve is proposed. The light of internal zones and external zones has destructive interference at the center of the focal plane, and hence the localized hollow beam is formed. Research on relationships between the dark spot diameter and focal length, annulus, modulation factor is carried out. Hollow beams with micron and submicron dark spot are obtained with proper focal length and annulus. The method is verified by theoretical derivation and simulation analysis. Results show that it has advantages of simple structure and minimal dark spot, especially suitable for optical tweezers, atom cooling and so on.

**Key words** diffraction; photon sieve; localized hollow beam; optical tweezers

**OCIS codes** 050.1940;050.1970;350.4855

## 1 引 言

局域空心光束是指具有中心暗斑且该中心暗斑在三维空间被光场完全包围的一类特殊光场<sup>[1]</sup>,像一个特殊的“密闭容器”,因此这种光场被称为“光泡”。因其具有特殊的光场分布,在生命科学和纳米科技领域得到了重要的应用,比如激光囚禁微观粒子<sup>[2]</sup>、生物细胞操控<sup>[3]</sup>、原子冷却<sup>[4]</sup>等,一直是一个研究的热点。

传统的产生局域空心光束的方法主要有:1) 相位调制法<sup>[5-7]</sup>,代表方法有采用径向分布的 $\pi$ 位相版、四台阶位相光栅、锥棱镜法,但是这种方法都需要和透镜结合使用,若实现极小的暗斑则需要大数值孔径的透镜,而且位相版的制作也具有相当大的难度;2) 基于高斯光束和拉盖尔高斯光束的干涉<sup>[8]</sup>,这种方法对环境和光源要求比较苛刻,不能灵活使用;3) 采用特殊抽运光束和限制孔径的端面抽运固体激光器<sup>[9]</sup>,这通常比较困难,而且不能灵活地改变光束。此外 Zhao 等<sup>[10]</sup>提出了一种利用径向偏振光束照明的衍射光学元件产生

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61376110)

作者简介: 程依光(1990-),男,博士研究生,主要从事光机设计和衍射光学元件方面的研究。E-mail: cyguang2@163.com

导师简介: 胡 松(1965-),男,博士,研究员,主要从事微电子总体专用设备方面的研究。E-mail: husong@ioe.ac.cn

轴向阵列局域空心光束的方法,但是这种方法需要特殊的偏振照明。

光子筛作为一种新型的衍射元件,具有很强的聚焦能力<sup>[11]</sup>,本文在前期研究的基础上,设计一种特殊的光子筛结构,称为交错型光子筛。并提出了一种基于交错型光子筛的产生局域空心光束的方法,产生的局域空心光束能够具有微米甚至亚微米尺度的中心暗斑,并且该方法结构简单实用,易于阵列化。由于这种空心光束在其焦平面上具有很小尺寸的暗斑尺寸,特别适用于作为光学镊子、原子冷却等。本文分别从原理介绍和仿真分析两个角度,阐述局域空心光束的产生机理及其影响因素,最后展望了这种局域空心光束的应用前景。

## 2 原 理

光子筛由德国科学家 Kipp 等<sup>[12]</sup>于 2001 年首次提出,其采用微纳透光微孔代替波带片中的透光环带,设计更为灵活。和传统的波带片相比,光子筛可以用直径大于对应波带片环带宽度的小孔来代替,在相同最小加工尺寸的情况下,光子筛能够实现更高的分辨力。本文提出的光子筛结构分为两个区域,记为内部区域和外部区域,如图 1 所示,内部区域和外部区域交错,称之为“交错型光子筛”。内部区域第  $n$  个环带的环带半径为  $l_n$ ,

$$l_n = \sqrt{2n\lambda f}, n = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

外部区域第  $n$  个环带的环带半径为  $w_n$ :

$$w_n = \sqrt{(2n+1)\lambda f}, n = m, m+1, \dots, 2m-1, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  是光子筛的设计波长,  $f$  是光子筛的设计焦距,  $m$  为内部区域的环带个数,外部区域和内部区域的环带个数相同。每个环带的小孔直径为:

$$d_n = \frac{1.5\lambda f}{2r_n} (r_n = l_n \text{ or } w_n). \quad (3)$$

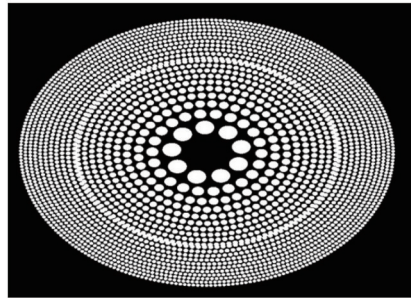


图 1 交错型光子筛结构图

Fig.1 Structure of staggered photon sieve

根据文献[13],当均匀的单位平行单色光入射到光子筛时,由第  $n$  个环带上的小孔在光子筛的焦平面和光轴交点产生的光场为

$$U_n = \frac{2\pi a_n^2}{\lambda f} \exp\left(jk \frac{r_n^2}{2f}\right) \text{Jinc}\left(\frac{ka_n r_n}{f}\right), \quad (4)$$

式中  $k$  是圆波数  $2\pi/\lambda$ ,  $a_n$  是小孔的半径,  $\text{Jinc}(x) = \text{J}_1(x)/x$ ,  $\text{J}_1$  是阶贝塞尔函数,由(3)式可得  $a_n r_n = 0.375\lambda f$ ,为定值。每个环带的小孔数量为:

$$i = \frac{2\pi s}{\arcsin\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)}, 0 < s < 1, \quad (5)$$

式中  $s$  是数量调制系数,用于调制光子筛小孔的疏密。

结合(4)式和(5)式可以得到第  $n$  个环带全部小孔在焦平面和光轴交点产生的光场为:

$$U = \frac{4\pi^2 s}{\lambda f} \exp\left(jk \frac{r_n^2}{2f}\right) \text{Jinc}(0.75\pi) \frac{a_n^2}{\arcsin\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)} = K \frac{a_n^2}{\arcsin\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)}, \quad (6)$$

式中  $K$  是常系数, 当  $n$  在内部区域时  $K$  为正数; 当  $n$  在外部区域时,  $K$  为负数。

对  $\arcsin(2a_n/r_n)$  进行泰勒级数展开,

$$\arcsin\left(\frac{2a_n}{r_n}\right) = 0 + \frac{2a_n}{r_n} + \frac{-2}{3!}\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)^3 + \dots, \quad (7)$$

对于(7)式, 当小孔在第一个环带时即  $n=1$  时, 泰勒级次的三次项相对于一次项为:

$$\frac{-2}{3!}\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)^3 / \frac{2a_n}{r_n} = -0.1875, \quad (8)$$

当小孔在第二个环带时即  $n=2$  时, 泰勒级次的三次项相对于一次项为:

$$\frac{-2}{3!}\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)^3 / \frac{2a_n}{r_n} = -0.0469, \quad (9)$$

当小孔在更高的环带时即  $n>2$  时, 三次项相对于一次项有

$$\left| \frac{-2}{3!}\left(\frac{2a_n}{r_n}\right)^3 / \frac{2a_n}{r_n} \right| \ll 0.1, \quad (10)$$

所以(7)式中的三次项及更高项可以忽略, 这样  $U$  就可以简化为,

$$U = K \frac{a_n^2}{2a_n} = \frac{K}{2} a_n r_n = 0.1875K\lambda f. \quad (11)$$

所以内部区域和外部区域在焦平面和光轴交点上光场相互抵消, 这样就在中心形成了暗斑。相对于交点位置, 在焦平面上的其他区域由于失去了这种对称性, 所以两个区域光场不会相互抵消, 使得这些区域不会形成暗斑, 从而得到局域空心光束。

### 3 仿真分析

#### 3.1 交错型光子筛产生局域空心光束的仿真

利用光子筛产生局域空心光束, 方法比较简单, 只需单色平行光通过设计的交错型光子筛(具体结构见第2节), 即可在焦平面处得到聚焦的空心光斑。下面对交错型光子筛如何调制单色平行照明光进行仿真, 设定光子筛平面坐标  $xoy$ , 接收平面为  $XOY$ , 中心都在光轴上, 接收平面距离为  $q$ , 如图2所示。

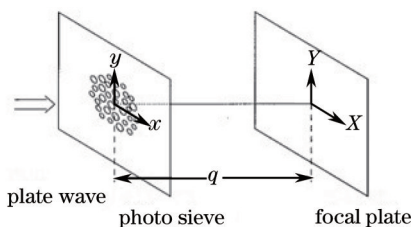


图2 平行光入射, 光子筛平面和接收平面示意图

Fig.2 Schematic view of photon sieve with collimated illumination

根据文献[13], 单个小孔在接收平面上点  $(X, Y)$  产生的光场为  $U_n(X, Y)$ , 小孔的坐标为  $(x_n, y_n)$ 。

$$U_n(X, Y) = 2 \frac{\pi a_n^2}{\lambda q} \exp\left(jk \frac{R^2}{2q}\right) \text{Jinc}\left(\frac{ka_n R}{q}\right), \quad (12)$$

式中  $R = \sqrt{(X - x_n)^2 + (Y - y_n)^2}$ 。

点  $(X, Y)$  上光场是所有小孔作用光场的总和, 即:

$$U(X, Y) = \sum_{n=1}^N U_n(X, Y), \quad (13)$$

$N$  为小孔的总个数。

光强为:

$$I = U^2. \quad (14)$$

设计光子筛的焦距为 $f=10$  mm,设计波长为 632.8 nm,内部区域和外部区域环带数都为 50。得到焦平面上的光强图像如图 3(a)所示,可以看到一个类似“甜甜圈”的光场结构。研究光轴线方向光强发现,在离焦时中心光斑逐渐消失,所以中心暗斑被光场完全包围,形成了典型的局域空心光束,如图 3(b)所示。

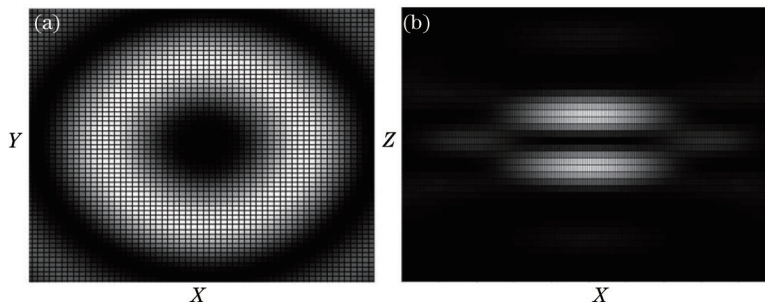


图 3 (a) 焦平面光强; (b) 沿光轴线(Z方向)光强分布

Fig.3 (a) Intensity of the focal plane; (b) intensity in the direction of optic axis(Z)

图 4 显示了交错光子筛和普通光子筛的 X 轴线上归一化光强。为了表征中心暗斑的直径,定义中心暗斑直径为空心光束凹口内侧径向强度分布的半峰全宽(FWHM),可以看到中心暗斑的半高宽约为 2.3  $\mu\text{m}$ ,这和普通光子筛的光斑半高宽基本相当,要略大一些。

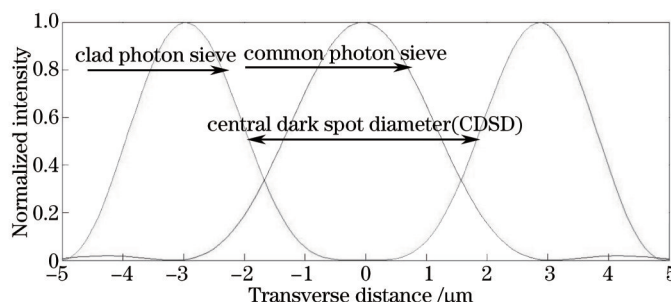


图 4 交错光子筛和普通光子筛的横截面归一化光强曲线

Fig.4 Normalized intensity of the staggered photon sieve and the common photon sieve

### 3.2 影响局域空心光束的因素

设计光子筛的设计参数有焦距 $f$ ,设计波长 $\lambda$ ,环带个数 $m$ ,调制系数 $s$ 。下面分析这些参数对中心暗斑的直径的影响。设计波长根据光源确定,一般不能变化。为了研究焦距 $f$ 和暗斑直径的关系,确定设计波长为 632.8 nm,环带数为 20,焦距从 1 mm 变化到 1000 mm,仿真获得暗斑直径,得到如图 5 所示的关系。可见,设计焦距越短,暗斑越小。确定设计波长为 632.8 nm,焦距 $f=10$  mm,变化环带数 $m$ ,得到暗斑直径和环带数的关系,如图 6 所示。可以得到暗斑直径随着环带数增加而减少的结论。这是因为环带数增加,光子筛数值孔径增大,内部区域和外部区域各自聚焦光斑直径变小,经过相消后空心光束直径也随之变小。

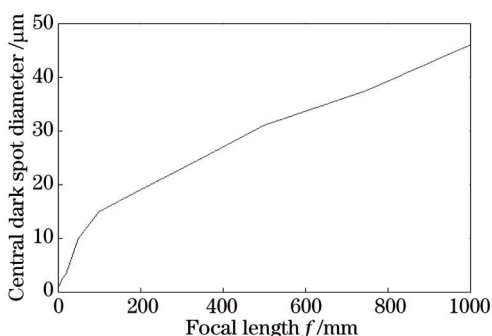


图 5 中心暗斑直径和设计焦距 $f$ 的关系

Fig.5 Relation between the central dark spot diameter and focal length  $f$

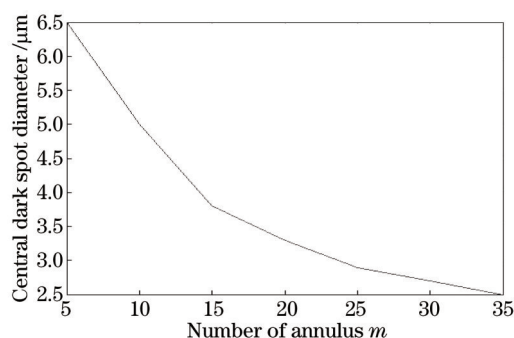


图 6 中心暗斑直径和环带数 $m$ 的关系

Fig.6 Relation between the central dark spot diameter and number of annulus  $m$



$s$  是数量调制系数,用于调制光子筛小孔的疏密,内部区域的调制系数为  $s_1$ ,外部区域的调制系数为  $s_2$ 。当内部和外部区域的调制系数相同时即  $s_1=s_2$ ,无论怎么变化  $s_1$  或  $s_2$  中心暗斑直径都不会变化,这是由于内部区域和外部区域完全相消造成的。当  $s_1$  不等于  $s_2$  时,内部区域和外部区域由于部分相消,轴上光强不为零,会产生有趣的“驼峰”形状。如图 7 所示,  $s_1=0.8$  不变,  $s_2$  从 0.4~0.8,可以发现形成“驼峰”形状,中心暗斑的能量越来越小,光斑尺寸略微变大。因此通过改变数量调制函数可以控制局域空心光束中心暗斑和周围亮环的能量比值。能量比值可以在粒子操控中决定粒子操控力大小<sup>[7,14,15]</sup>,由此可得出结论,交错光子筛形成的局域空心光束在粒子操控中具有很大的灵活性。

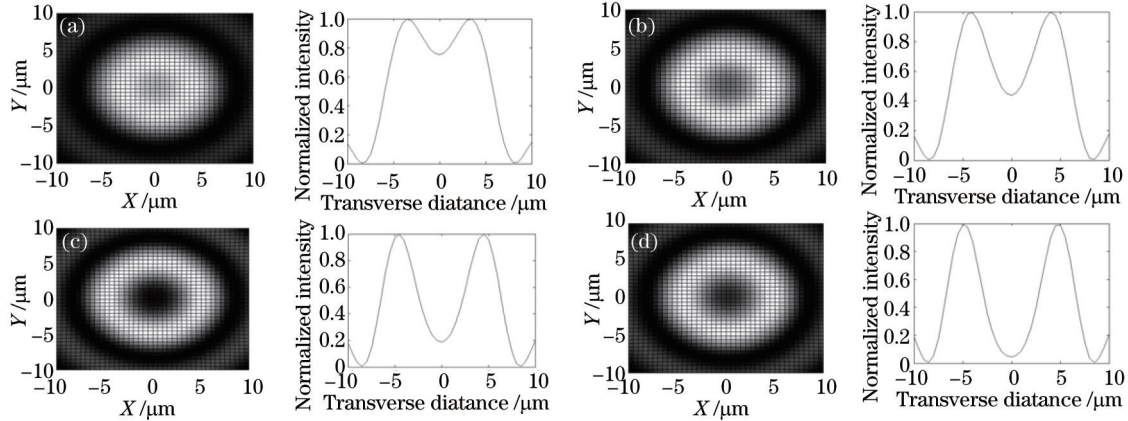


图 7 内部区域和外部区域调制系数不一致产生的“驼峰”光束,焦平面光强和横截面归一化光强曲线。

(a)  $s_1=0.8, s_2=0.4$ ; (b)  $s_1=0.8, s_2=0.5$ ; (c)  $s_1=0.8, s_2=0.6$ ; (d)  $s_1=0.8, s_2=0.7$

Fig.7 Camel-back spot due to difference between the modulation factor of internal zones and external zones. Intensity of focal plane and normalized intensity curve of cross section. (a) $s_1=0.8, s_2=0.4$ ; (b) $s_1=0.8, s_2=0.5$ ; (c)  $s_1=0.8, s_2=0.6$ ; (d)  $s_1=0.8, s_2=0.7$

Ashkni 等<sup>[16]</sup>首先提出利用聚焦高斯激光束作为光镊囚禁溶液中微小粒子。而局域空心光束作为光镊可以解决高斯光束的光学损伤问题<sup>[17]</sup>,所以更适合作为光镊使用。印建平<sup>[18]</sup>证明了蓝失谐的局域空心光束不仅能用于原子的激光囚禁还可以实现原子的激光冷却。交错式光子筛通过内部区域和外部区域通光小孔在轴线上的叠加抵消,在焦平面实现局域空心光束,可以根据需要产生几十微米到亚微米量级的暗斑,增加了粒子囚禁的范围。并且改变光子筛设计参数可以改变囚禁区域的大小和囚禁力,所以交错式光子筛用于粒子囚禁还具有结构简单、实用灵活的优点。

## 4 结 论

设计了一种新型光子筛结构,提出了基于交错型光子筛产生光轴上为暗斑的局域空心光束的方法,并通过原理分析和模拟仿真证明了可行性,是一种简单有效,灵活可控且具有极小尺寸的中心暗斑的空心光束产生方法。仿真研究表明中心暗斑的尺寸和光子筛的设计焦距成正比,和环带数成反比,有助于空心光束的尺寸范围的增加,增加了设计上的灵活性。交错型光子筛结构简单,易于阵列化,产生的局域空心光束可以用于作为光学镊子来囚禁粒子,也可以用于原子冷却,具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Fengtie, Cheng Zhiming, Wang Tao, *et al.*. Analysis of phase on axis of the Bessel beam and self-imaged bottle beam[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0326001.  
吴逢铁,程治明,王 涛,等. 贝塞尔光束和自成像局域空心光束的轴上相位分析[J]. 光学学报, 2013,33(3): 0326001.
- 2 Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, *et al.*. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. Science, 2001, 292 (5518): 912-914.
- 3 MacDonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, *et al.*. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. Science, 2002, 296(5570): 1101-1103.
- 4 Xu P, He X, Wang J, *et al.*. Trapping a single atom in a blue detuned optical bottle beam trap[J]. Opt Lett, 2010, 35(13): 2164-2166.
- 5 Ma Liang, Wu Fengtie. New combined positive for generating bottle beam[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1988-1991.

- 马 亮, 吴逢铁. 新型组合正轴棱锥产生局域空心光束[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1988-1991.
- 6 Du Tuanjie, Wu Fengtie, Wang Tao, *et al.*. Description of interference theory on generated period bottle beam by focus non-diffracting beams[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0908001.
- 杜团结, 吴逢铁, 王 涛, 等. 干涉理论对聚焦无衍射光产生周期局域空心光束的描述[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0908001.
- 7 Chen Liya, Yin Jianping. An improved hollow optical trap for cold atoms (molecules) with phase modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1217-1222.
- 陈丽雅, 印建平. 采用相位调制实现冷原子或冷分子囚禁的改进型空心光阱[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1217-1222.
- 8 Arlt J, Padgett M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam[J]. Opt Lett, 2000, 25(4): 191-193.
- 9 Tai P T, Hsieh W F, Chen C H. Direct generation of optical bottle beams from a tightly focused end-pumped solid-state laser[J]. Opt Express, 2004, 12(24): 5827-5833.
- 10 Zhao Y, Zhan Q, Zhang Y, *et al.*. Creation of a three-dimensional optical chain for controllable particle delivery[J]. Opt Lett, 2005, 30(8): 848-850.
- 11 Tang Yan, Hu Song, Zhao Lixin, *et al.*. Polarization property of photon sieves with high numerical aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 32(12): 1205002.
- 唐 燕, 胡 松, 赵立新, 等. 大数值孔径光子筛偏振特性研究[J]. 光学学报, 2013, 32(12): 1205002.
- 12 Kipp L, Skibowski M, Johnson R L, *et al.*. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves[J]. Nature, 2001, 414(6860): 184-188.
- 13 Cao Q, Jahns J. Focusing analysis of the pinhole photon sieve: individual far-field model[J]. JOSA A, 2002, 19(12): 2387-2393.
- 14 Zhou Yepeng, Ren Hongliang, Wang Juan, *et al.*. Comparative analysis of the trapping force using Laguerre-Gaussian beam and Gaussian beam[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(11): 1300-1304.
- 周业鹏, 任洪亮, 王 娟, 等. 拉盖尔-高斯光束与高斯光束捕获力比较[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1300-1304.
- 15 Du Tuanjie, Wu Fengtie, Wang Tao, *et al.*. Theoretical modulation and experiment on the self-reconstruction of periodic bottle beam[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0114001.
- 杜团结, 吴逢铁, 王 涛, 等. 周期局域空心光束自重建的理论模拟与实验[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0114001.
- 16 Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams[J]. Nature, 1987, 330(6150): 769-771.
- 17 Li Yinmei, Gong Lei, Li Di, *et al.*. Progress in optical tweezers technology [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 101001.
- 李银妹, 龚 雷, 李 迪, 等. 光镊技术的研究现状[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 101001.
- 18 Yin Jianping, Gao Weijian, Xia Yong. Sisyphus cooling of neutral atoms in a single localized hollow beam[J]. Quantum Optics Journal, 2002, 8(B09): 26-26.
- 印建平, 高伟建, 夏 勇. 中性原子在单束局域空心光束中的 Sisyphus 冷却[J]. 量子光学学报, 2002, 8(B09): 26-26.

栏目编辑: 刘丰瑞