

艾里激光束理论及应用的最新进展

徐佳 刘娟 谢敬辉 王涌天

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 无衍射激光束及其相关理论是近年来光学研究领域重要的课题之一,其中艾里激光束是近两年来备受关注的新型无衍射激光束之一。简要介绍了艾里激光束研究的最新进展,阐述了产生艾里激光束的基本原理、实现方法,并着重介绍了艾里激光束所具有的3个奇异特性:自由加速、无衍射及自愈,最后对艾里激光束的应用进行了概述与展望。

关键词 衍射;艾里激光束;自由加速;无衍射;自愈

中图分类号 O436.1; O438.2

OCIS 050.1940 350.5500

文献标识码 A

Reviews of Recent Researches on Airy Beams

Xu Jia Liu Juan Xie Jinghui Wang Yongtian

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The theory and application of nondiffraction beams is one of the most important topics in various optical fields, where the Airy beams appear as a new member of nondiffraction beams family in very recent years. The latest research on Airy beams is introduced, including the principle and three singularities: free acceleration, nondiffraction and self-healing. The promising applications of Airy beams are summarized as well.

Key words diffraction; Airy beams; free acceleration; nondiffraction; self-healing

1 引言

衍射是波动的基本现象,光波传播时的电场和磁场服从基本的波动方程,波动方程存在着无衍射模的解。光波在传播过程中始终保持不变被认为是无衍射光束,无衍射波最典型的例子是贝塞尔光束。1979年,M. V. Berry等^[1]在量子力学的背景下,理论上推出薛定谔方程具有无衍射的艾里波包的解,该波包具有自由加速的特性。2007年Georgios A. Siviloglou等^[2]首先研究了有限能量的加速艾里激光束,并首次观察到艾里激光束的实验结果^[3],实验验证了艾里激光束具有不同寻常的特点,能保持长距离无衍射^[4,5]传播,并具有自由加速的特性。

艾里激光束具有非常诱人的3大特性:在传播过程中自由加速(或横向加速),类似于重力作用下弹丸运动的弹道;在传播过程中近似保持无衍射;在传播过程中具有自愈的特性^[6,7]。本文介绍了艾里激光束的基本理论和性质,并对最新研究的进展和应用^[8]进行了概述与展望。

2 艾里激光束的理论和特点

2.1 艾里激光束的理论

一维情况下衍射傍轴方程为

收稿日期:2010-01-31;收到修改稿日期:2010-04-09

基金项目:国家973计划(2006CB302901)和教育部创新团队(IRT0606)资助课题。

作者简介:徐佳(1986—),男,硕士研究生,主要从事新型光束、光镊、衍射光学元件等方面的研究。

E-mail: 524777338@qq.com

导师简介:刘娟(1970—),女,博士,教授,主要从事微纳光学元件设计及应用等方面的研究。E-mail: juanliu@bit.edu.cn (通信联系人)

本文彩色效果详见光学期刊网(www.opticsjournal.net)相关文献。

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = 0, \quad (1)$$

式中 $s = x/x_0$ 为一个无量纲横向坐标, x_0 为归一化坐标, $\xi = z/(kx_0^2)$ 为归一化传播距离, k 为光波的波数。

当研究有限能量艾里激光束的特性时, 必须考虑其截断窗口的指数衰减

$$\phi(s, \xi = 0) = \text{Ai}(s) \exp(as), \quad (2)$$

式中 $\text{Ai}(s)$ 为艾里函数, 截断孔径函数 $a > 0$ 。图 1(a) 描绘了艾里激光束在 $z=0$ 平面的实场分布, 图 1(b) 为相应的强度^[2]。可以看到艾里函数截面主分支衰减得非常快, 因此可用有限能量艾里激光束来近似无穷能量的理想艾里激光束。

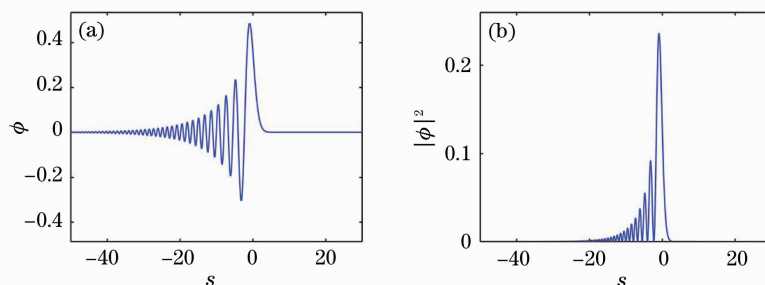


图 1 艾里激光束的场分布(a)和对应强度(b)分布

Fig. 1 (a) Amplitude and (b) intensity distributions of Airy beams

有限能量艾里激光束在自由空间中传输到任意距离处的场分布为

$$\phi(\xi, s) = \text{Ai}[s - (\xi/2)^2 + ia\xi] \exp[as - (a\xi^2/2) - i(\xi^3/12) + i(a^2\xi/2) + i(s\xi/2)], \quad (3)$$

由于艾里激光束的傅里叶频谱在一维空间中为

$$\Phi_0(x) = \exp(-ax^2) \exp\left[\frac{i}{3}(x^3 - 3a^2x - ia^3)\right], \quad (4)$$

因此实验上对有限能量艾里激光束的传播特性的观察可采用高斯光束通过立方相位的调制, 再经过傅里叶透镜即可实现。一般采用相位型空间光调制器或相位掩模板来调制相位, 所加载相位如图 2 所示, 图 2(a) 和(b)分别对应于生成一维和二维艾里激光束的相位掩模板^[3]。艾里激光束在传输过程中内部拓扑结构基本不变, 如图 3 所示, 图 3(a) 为在 $z=0$ 平面, 图 3(b) 为传播在 $z=50$ cm 平面的光场分布^[2]。

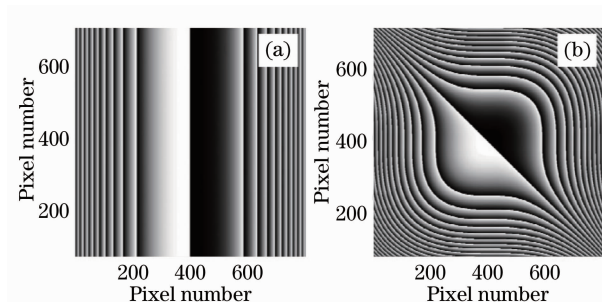


图 2 艾里激光束的相位掩模板

Fig. 2 Phase mask to produce Airy beams

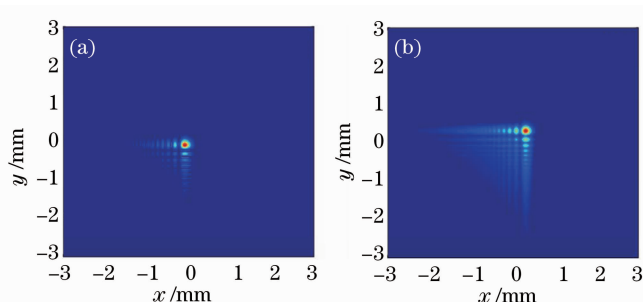


图 3 (a) $z=0$ 和(b) $z=50$ cm 艾里激光束的光场分布图

Fig. 3 Optical field distributions of Airy beams in different distances (a) $z=0$ cm and (b) $z=50$ cm

2.2 艾里激光束的特点

2.2.1 自由加速特性

由于艾里激光束的非对称光场分布特点, 其在自由空间中传输时能够自由弯曲, 类似于粒子在重力场作用下受到重力作用而产生抛物线型轨迹, 因此得名“自由加速”。艾里激光束在自由空间传播的自由加速轨迹如图 4 所示^[3], 即艾里激光束随着传播距离的增加, 其主瓣不是沿直线传输, 而是由于具有类似于垂直于传输方向的加速度而导致运动轨迹弯曲^[3]。

2.2.2 无衍射特性

由于理想艾里激光束包含无限能量,从理论上讲在传输过程中是无衍射的,但是限于实际应用的需要,有限能量的艾里激光束更具有实用意义。有限能量的艾里激光束被发现具有抵制衍射的特征,即主瓣尺寸在传输过程中基本不变。图 5(a)~(c)分别显示了相应艾里激光束在 $z=0, 10, 20$ cm 的强度分布。正如预期的那样,光束主光斑尺寸保持不变,艾里激光束的主瓣宽度(含超过 70% 的总能量)经过距离约 25 cm 仍然几乎不变。实验结果如图 5(d)~(f)所示,与理论预期值一致。同样情况下高斯光束将衍射至少 6~7 倍,如图 5(g)和(h)所示^[3]。值得指出的是,这种情况发生在自由空间,且不是非线性光学现象。

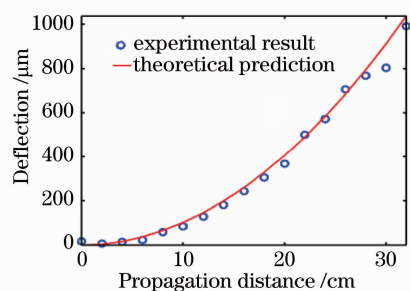


图 4 艾里激光束传播距离与自由加速弯曲距离的关系曲线

Fig. 4 Deflection of Airy beams as a function of propagation distance

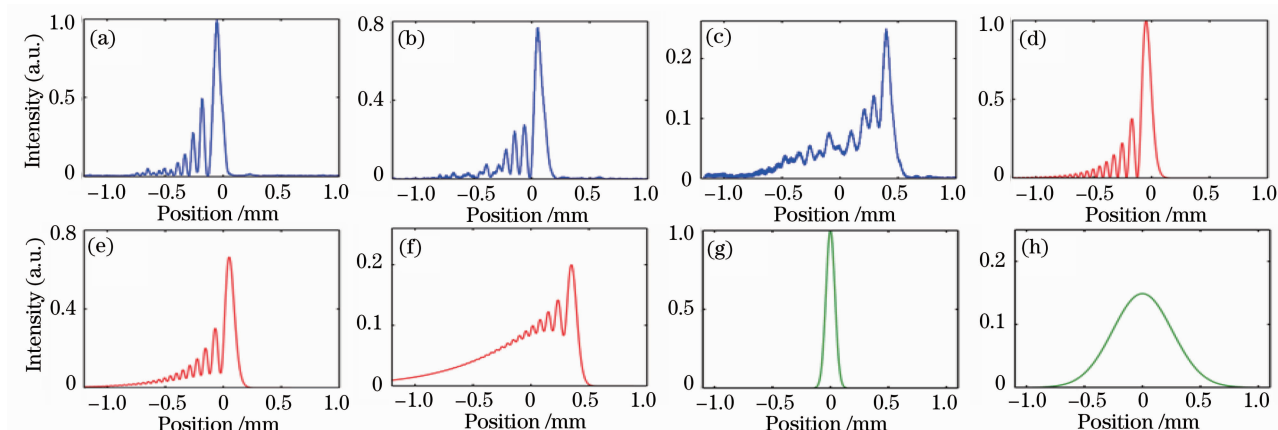


图 5 不同距离下艾里激光束的数值模拟结果(a)~(c)和实验结果(d)~(f), (g)和(h)为同样情况下的高斯光束
Fig. 5 Numerical simulation results (a)~(c) and experimental results (d)~(f) of Airy beams, (g) and (h) for the same cases of the Gaussian beam in different distances

2.2.3 自愈特性

当艾里激光束在传输过程中丢失部分信息后,艾里激光束能够自愈,类似于贝塞尔光束,其波包具有抗扰动的非凡恢复力。研究发现光束的重建是通过其内部能量流动完成的,如图 6 所示,艾里激光束在扰动的条件下可以保留其形状,但高斯光束在同样的环境下将遭受巨大变形^[6]。图 6(a)为二维艾里激光束,图 6(b)为在 $z=0$ 平面被遮住主瓣的艾里激光束,图 6(c)为在 $z=11$ cm 平面,艾里激光束实现自我愈合,图 6(d)为在

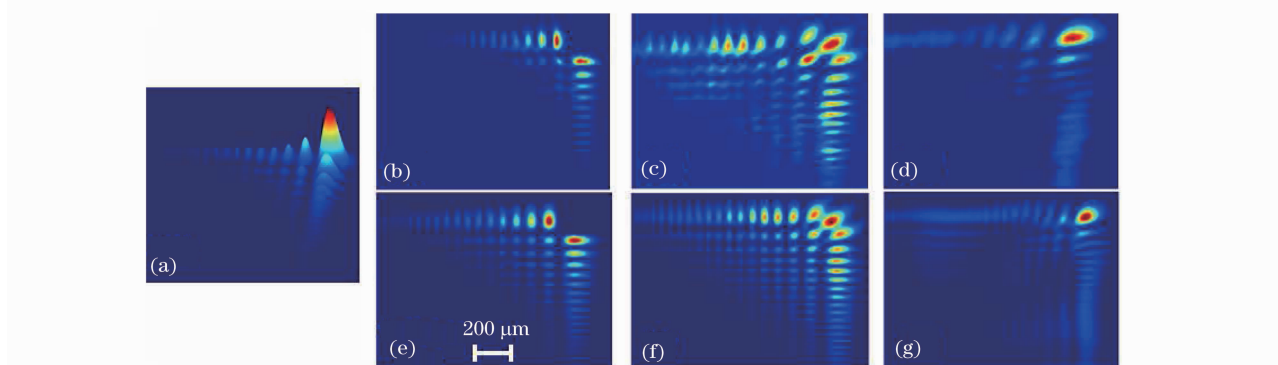


图 6 艾里激光束(a)及其自愈的实验结果(b)~(d),相应的数值模拟结果(e)~(g)

Fig. 6 Two-dimensional picture (a) and self-healing experimental results (b)~(d) of Airy beams, and the corresponding numerical simulation results (e)~(g)

$z=30$ cm平面的艾里激光束,图 6(e)~(g)为相应的数值模拟结果。

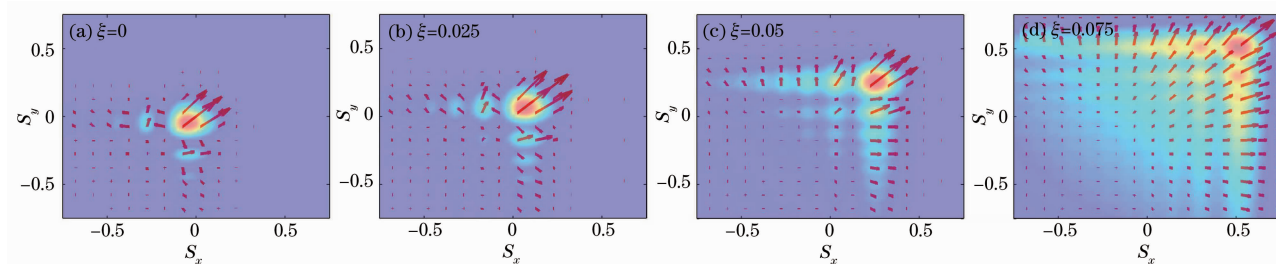


图 7 传播到不同平面时艾里激光束的能量流动方向

Fig. 7 Energy flow patterns of Airy beams in different planes

艾里激光束的自愈特性可以通过其坡印廷矢量的演变来研究。H. I. Sztul 等^[9]分析和描述了艾里激光束的坡印廷矢量和角动量的演变,并用数值模拟了坡印廷矢量的能量流动方向,如图 7 所示。图 7 中箭头表示的是有限能量的艾里激光束传播到不同平面时的能量流动方向,其能量流动方向就是艾里激光束的自由加速的方向。当艾里激光束的部分被遮挡后,就会通过内部能量的流动完成重组光束,完成自愈,如图 8 所示^[6]。图 8(a)为在 $z=0$ 平面被遮住主瓣的艾里激光束图,白色箭头表示的是能量流动的方向,图 8(b)为在 $z=11$ cm 平面,艾里激光束能量流动重组出了主瓣,实现了自愈特性。

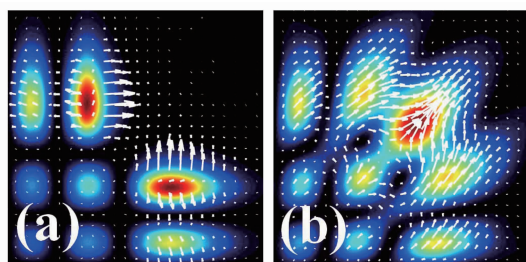


图 8 艾里激光束自愈的能量流动方向

Fig. 8 Energy flow patterns of self-healing Airy beams

艾里激光束总的角动量为零,但艾里激光束的主瓣和“尾巴”的角动量强度非零,如图 9 所示^[9]。图 9(a)~(d)显示的是有限能量的艾里激光束传播到不同平面时的角动量大小的分布情况,图中红色表示的是正值,蓝色是负值,绿色是零。

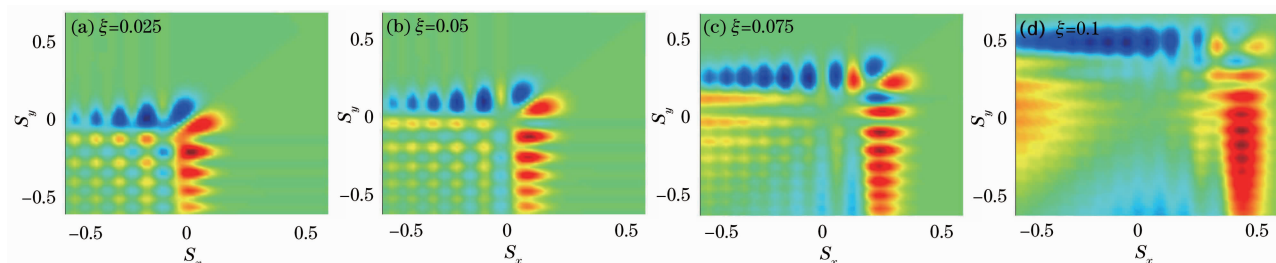


图 9 传播到不同平面时的艾里激光束角动量分布图

Fig. 9 Angular momentum distribution of Airy beams in different planes

3 艾里激光束的应用

3.1 飞秒艾里激光束产生弯曲的等离子体轨道

Pavel Polynkin 等^[10]使用二维艾里函数(即艾里激光束)的飞秒脉冲引发空气中非线性的等离子体细丝。飞秒艾里激光束用于生成细丝时,产生细丝的光束核心和其剩余的准线性部分之间有约束力,其强度可以被不同的艾里激光束模式的横向加速度操纵。所产生的等离子体轨道是弯曲的,并引起在空间分离的远场辐射,如图 10 所示^[10]。艾里激光束的主瓣相当于“光子弹”,一个强度集中的电磁能量,它沿着弧形轨迹传播并在后面留下一条弯曲等离子体轨道。

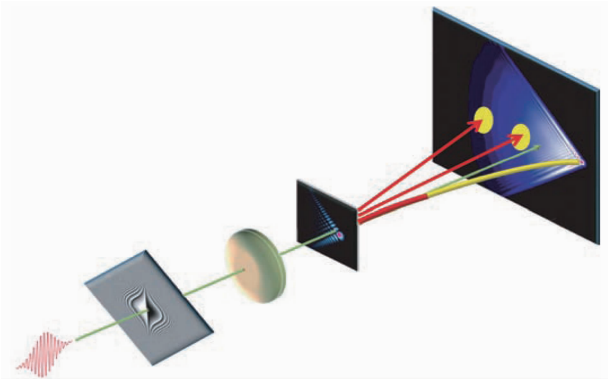


图 10 飞秒艾里激光束产生弯曲的等离子体轨道的实验装置图

Fig. 10 Experimental setup of generating bent plasma orbit by femtosecond Airy beams

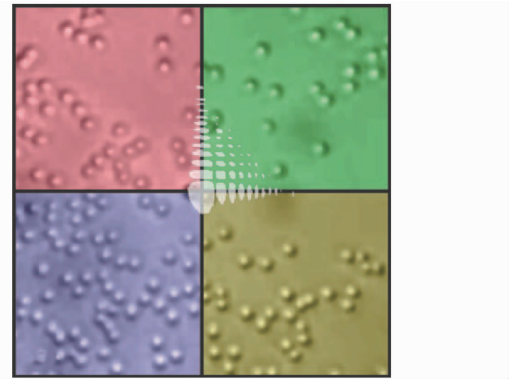


图 11 均匀分布的颗粒在艾里激光束下 1 min 后分布发生变化

Fig. 11 Distribution change of particles after 1 min irradiation by Airy beams

3.2 用艾里光束清理光学颗粒

二维艾里波包可用于沿着弯曲路径运输粒子,有望在直射光束无法操控的区域进行微观操作,被操控粒子的运动轨迹为可预测的抛物线轨迹。如图 11 所示,艾里激光束照射在微米量级的胶体颗粒样品室里,可在局部区间精确转移或清理光学颗粒。均匀分布的微米大小的胶体颗粒暴露在艾里激光束下 1 min 后,胶体颗粒的分布发生了明显的变化,颗粒的分布偏向于艾里激光束主瓣所在的像限,或者说艾里激光束像“吹雪机”一样,吸引粒子或向边上吹^[8]。

艾里激光束独特的光学特性,激起了科技工作者的广泛兴趣。科技工作者正在探讨产生加速艾里激光束的不同方法^[11~14]、艾里激光束的光学特性^[15~18]、产生的机理及其应用等。

4 结 论

艾里激光束具有非常独特的特性,因此有着广泛的应用潜力,例如,短脉冲艾里激光束可补偿或产生光纤中的色散^[19],实现光纤中的光孤子^[20,21]传输。艾里激光束的研究才刚刚起步,还有许多未知的特性及产生机制需要探讨,相信不久的将来,更多更新的艾里激光束的内在机理和潜在应用会逐渐被开发。

参 考 文 献

- 1 M. V. Berry, N. L. Balazs. Nonspreading wave packets[J]. *Am. J. Phys.*, 1979, **47**(3): 264~267
- 2 Georgios A. Siviloglou, Demetrios N. Christodoulides. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 979~981
- 3 J. Broky, G. Siviloglou, A. Dogariu *et al.*. Observation of accelerating Airy beams[C]. *Frontiers in Optics*, OSA, 2007. PDP_B3
- 4 J. Durnin, J. J. Miceli Jr., J. H. Eberly. Diffraction-free beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 5 J. Durnin. Exact solutions for nondiffracting beams. 1. The scalar theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4): 651~654
- 6 John Broky, Georgios A. Siviloglou, Aristide Dogariu *et al.*. Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12880~12891
- 7 Z. Bouchal, J. Wagner, M. Chlup. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **151**(4-6): 207~211
- 8 J. Baumgartl, M. Mazilu, K. Dholakia. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(11): 675~678
- 9 H. I. Sztul, R. R. Alfano. The Poynting vector and angular momentum of Airy beams[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9411~9416
- 10 Pavel Polynkin, Miroslav Kolesik, Jerome V. Moloney *et al.*. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, **324**(5924): 229~232
- 11 Miguel A. Bandres, Julio C. Gutiérrez-Vega. Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems[J]. *Opt.*

- Express*, 2007, **15**(25): 16719~16728
- 12 Don M. Cottrell, Jeffrey A. Davis, Thomas M. Hazard. Direct generation of accelerating Airy beams using a $3/2$ phase-only pattern[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(17): 2634~2636
- 13 Jeffrey A. Davis, Mark J. Mitry, Miguel A. Bandres *et al.*. Generation of accelerating Airy and accelerating parabolic beams using phase-only patterns[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(17): 3170~3176
- 14 H. T. Dai, X. W. Sun, D. Luo *et al.*. Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19365~19370
- 15 J. E. Morris, M. Mazilu, J. Baumgartl *et al.*. Propagation characteristics of Airy beams: dependence upon spatial coherence and wavelength[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 13236~13245
- 16 Andrey V. Novitsky, Denis V. Novitsky. Nonparaxial Airy beams: role of evanescent waves[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3430~3432
- 17 J. Lee, S. Jia, J. W. Fleischer *et al.*. Airy beam propagation through unbiased photorefractive media[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA, 2009. ITuC7
- 18 Luis Carretero, Pablo Acebal, Salvador Blaya *et al.*. Nonparaxial diffraction analysis of Airy and SAiry beams[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 22432~22441
- 19 Sui Kerong, Zhu Xiaosong, Tang Xiaoli *et al.*. Study on material dispersion of dielectric layer in hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2062~2066
隋可融,朱晓松,汤晓黎等. 空芯光纤中介质层材料色散的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2062~2066
- 20 Li Zhiqian, Wang Zhibin, Liu Yang. The influence of high order dispersion to femesecond solitons[J]. *Opt. Instrum.*, 2008, **30**(2): 66~69
李志全,王志斌,刘洋. 高阶色散对光孤子传输的影响[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(2): 66~69
- 21 Meng Xiaobo, Zhou Jun, Ren Chunyang *et al.*. Effect of high-order dispersion on propagation of optical soliton and soliton couple[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(6): 638~641
孟小波,周骏,任春阳等. 高阶色散对光孤子及孤子对传输的影响分析[J]. *激光技术*, 2009, **33**(6): 638~641