

超艾里光束激光器的设计

邓想全^{1,2} 徐世祥^{1,2} 吴庆阳^{1,2} 郑国梁^{1,2}

¹深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060

²深圳微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 与传统的二维艾里光束相比,超艾里光束具有无衍射性、自弯曲性、自愈性等传输特性,主瓣尺寸更小、能量更集中,因此超艾里光束在光学微粒子操控等领域具有广阔的应用前景。为了得到产生超艾里光束的紧凑装置,提出了一种直接输出超艾里光束的激光器设计方案。该激光器使用激光二极管作为抽运源,采用端泵的方式抽运掺杂浓度为1%(原子分数)的掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)棒,以加载了超艾里光束立方相位信息的衍射光栅作为耦合输出镜,在一级衍射方向直接输出超艾里光束。计算结果表明,该激光器的阈值功率为1.4 W,当抽运功率为2 W时,输出功率达到678 mW。

关键词 物理光学;超艾里光束;衍射光栅;激光器

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.102601

Design of Super-Airy Beam Laser

Deng Xiangquan^{1,2} Xu Shixiang^{1,2} Wu Qingyang^{1,2} Zheng Guoliang^{1,2}

¹College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

²Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Compared with the traditional two-dimensional Airy beams, the super-Airy beams have such transmission characteristics as no diffraction, self-bending and self-healing, and their main lobes have advantages like much smaller size and more intensive energy. Therefore, the super-Airy beams have a broad application prospect in the optical micro-particle manipulation. In order to make a compact equipment for generating super-Airy beams, we present a laser design proposal for outputting the super-Airy beams directly. In our design, the 1% neodymium-doped yttrium aluminum garnet rod is pumped by a laser diode which is used as the pump source. The diffraction grating on which the cubic phase information of the super-Airy beams is loaded is used as the output coupler, so that it can output the super-Airy beams directly in the direction of the first order diffraction. The numerical calculation results show that the threshold power of the laser is 1.4 W, and the output power will rise up to 678 mW when the pump power is 2 W.

Key words physical optics; super-Airy beams; diffraction gratings; lasers

OCIS codes 260.2030; 050.1950; 140.3300; 350.550

1 引言

在量子力学框架下,薛定谔方程用于描述粒子和波的运动。1979年,Berry等^[1]求解薛定谔方程时,发现了一种特殊的艾里波包解,即具有艾里函数空间分布的粒子和波在时间演化的过程中表现出无衍射以及横向自加速的特性。遵循该解的粒子和波携有无穷能量,在现实中不存在,因此相关研究处于停滞阶段。直

收稿日期: 2016-06-02; **收到修改稿日期:** 2016-06-12; **网络出版日期:** 2016-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(11404220, 61275101)、深圳市技术研究开发计划(JCYJ20120614085204873, JCYJ20140418091413574)、深圳市微纳光子信息技术重点实验室开放基金(MN201408, MN201503)

作者简介: 邓想全(1990—),男,硕士研究生,主要从事艾里光束的产生和调控方面的研究。E-mail: 844900188@qq.com

导师简介: 郑国梁(1980—),男,博士,副教授,主要从事非线性光学和信息光学方面的研究。

E-mail: zhgl@szu.edu.cn(通信联系人)

到 2007 年,Christodoulides 等^[2-3]将艾里波包解引入光学领域,并对理想艾里光束进行截趾以获得有限能量的艾里光束。自此,艾里光束又成为研究热点。

目前,针对艾里光束的研究主要集中在产生与调控^[1-7]、传输特性分析^[8-13]和应用^[14-20]三个方面。艾里光束的无衍射性、自加速性和自愈性,使其在等离子体通道的产生^[14]、光子导弹^[15]、光学微粒子操控^[18-19]、艾里激光器^[20]等众多研究领域具有重要的应用价值。在应用方面,例如微粒子操控^[18-19],主要利用艾里光束的主瓣,因为主瓣具有最高的光场能量。因此,艾里光束的主瓣尺寸和主瓣能量这两个物理参数是衡量艾里光束性能的重要指标。

近期,Singh 等^[7]通过对传统二维艾里光束的相位进行调制,成功实现了超艾里光束。相比传统艾里光束,超艾里光束的主瓣尺寸更小,能量更集中,在光学微粒子操控方面具有更突出的应用潜力。常用的获取超艾里光束(艾里光束)的方法是通过空间相位调制器(SLM)对入射高斯光束的相位进行调制,使其携带超艾里光束(艾里光束)的相位信息。这种传统的获取超艾里光束(艾里光束)的方法需要较大的横向空间,不便于操作。针对这一缺陷,研究者们提出了多种解决方案。以色列 Porat 等^[20]成功制作了艾里光束激光器,实现了艾里光源的微型化。为了使产生超艾里光束的装置更加紧凑,本文基于超艾里光束理论以及艾里光束激光器的工作原理,提出了一种超艾里光束激光器的设计方案。激光器的设计中,以反射型的衍射光栅作为激光器的输出镜,衍射光栅类似普通的腔镜,反射大部分的光束回到谐振腔内,只有部分不同阶次的衍射光经反射离开谐振腔。整个设计方案的关键在于反射型衍射光栅的设计,可以对出射的衍射光加载超艾里光束的相位信息。

2 基本原理

2.1 产生超艾里光束的原理

在傍轴近似条件下,自由空间中光波的二维波动方程为^[1-3]

$$i\partial\Phi/\partial Z + 0.5\partial^2\Phi/\partial X^2 = 0, \quad (1)$$

式中 Φ 为光波场的波函数; X 为无量纲横向坐标, $X = x/x_0$,其中 x_0 为任意横坐标常数; Z 为归一化纵向传播距离, $Z = z/kx_0^2$,其中 k 为光波波数($k = 2\pi n/\lambda_0$, n 为折射率, λ_0 为光波波长)。(1)式存在艾里波包解,其非发散解可以表示为

$$\Phi(X, Z) = A [X - (Z/2)^2] \exp[i(XZ/2 + Z^3/12)], \quad (2)$$

式中 A 为艾里函数。在光学领域,如果空间光束的波前以艾里函数形式分布,这种光束被称为艾里光束。由于理想的艾里光束的能量无限大,引入指数衰减项 $\exp(\alpha X)$ (其中 α 为衰减因子),截去艾里光束的拖尾,得到有限能量的艾里光束。通过傅里叶变换得到有限能量的艾里光束的频域表达式为

$$\Psi(k_x) = \exp(-\alpha k_x^2) \exp[i(k_x^3 - 3\alpha^2 k_x - i\alpha^3)/3], \quad (3)$$

式中 k_x 为沿 X 方向的归一化波数。二维艾里光束可看作由两个分别关于 X 、 Y 的一维艾里光束相乘得到,二维艾里光束可表示为 $\Phi(X, Y, Z) = \Phi(X, Z)\Phi(Y, Z)$ 。为了便于观察,将传统二维有限能量艾里光束的相位旋转 45° ,该光束的频域表达式为

$$\Psi(k_x, k_y) = \exp[-\alpha(k_x^2 + k_y^2)] \exp\{i[(3\sqrt{2})^{-1}x_0^3(3k_y k_x^2 + k_y^3) - \alpha^2 k_y]\}, \quad (4)$$

式中 k_x 、 k_y 分别为沿 x 、 y 方向的归一化波数。

以色列 Singh 等^[7]利用一维调制函数 $M(k_x)$ 对光束立方相位的傅里叶频谱 $(3\sqrt{2})^{-1}x_0^3(3k_y k_x^2 + k_y^3)$ 进行像差修正,得到了 2D 超艾里光束。调制函数 $M(k_x)$ 可表示为

$$M(k_x) = \begin{cases} -1, & |k_x| \leq k_\pi \\ 1, & \text{else} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 k_π 为对光束立方相位进行 π 相移的区域临界值。数值计算结果表明,当 $k_\pi = 1.25/x_0$ 时,得到的超艾里光束的主瓣尺寸最小,能量最高^[7]。结合(4)、(5)式,可以得到超艾里光束的频域表达式为

$$\Psi(k_x, k_y) = \exp[-\alpha(k_x^2 + k_y^2)] \exp\{i[(3\sqrt{2})^{-1}x_0^3(3k_y k_x^2 + k_y^3) - \alpha^2 k_y]\} M(k_x). \quad (6)$$

由(6)式可知,将超艾里光束的相位因子 $\exp[i(3\sqrt{2})^{-1}x_0^3(3k_y k_x^2 + k_y^3)]M(k_x)$ 加载到 SLM 中,使其

对入射的高斯光束进行相位调制,调制后的光束经过傅里叶透镜变换到空域,即可得到超艾里光束。

2.2 超艾里光束激光器的理论

采用非周期二进制反射型衍射光栅作为超艾里光束激光系统的出光镜,这种光栅的设计为整个设计方案的核心。此类光栅可对入射的光束进行相位和振幅调制,针对超艾里光束,只须进行相位调制。采用二进制调制方式,加载了超艾里光束相位信息的衍射光栅轮廓分布可以表示为^[21]

$$h(x, y) = 0.5h_0 \{ \text{sign} \{ \cos [2\pi x / \Lambda + \phi(x, y)] \} + 1 \}, \quad (7)$$

式中 h_0 为衍射光栅的槽深, Λ 为衍射光栅的周期, $\phi(x, y)$ 为超艾里光束的相位因子。假设激光基横模 (TEM₀₀) 高斯光束入射到衍射光栅,对衍射光栅进行标量衍射理论分析,得到 m ($m \neq 0$) 阶衍射光的复振幅为^[22]

$$A(x, y) = A_0 \frac{2}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} h_0\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_g^2}\right) \exp[im\phi(x, y)], \quad (8)$$

式中 A_0 为入射光振幅, r_g 为入射光束的束腰半径。由(8)式可知,不同阶次的衍射光分别受到了超艾里光束的立方相位调制,并且光栅的 0 阶反射效率和 ± 1 阶衍射效率都受槽深 h_0 的影响,最终影响到衍射光栅对输出光的耦合程度。设光栅的周期 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, 超艾里光束相位项为

$$\phi(x, y) = (3\sqrt{2})^{-1} [3(\sqrt[3]{y} \cdot \sqrt[3]{x^2}/150)^3 + (y/150)^3] M(k_x). \quad (9)$$

根据光栅的实际槽深,结合(8)、(9)式,得到该衍射光栅的 0 阶反射效率和 ± 1 阶衍射效率。

3 仿真及讨论

3.1 光束与超艾里光束的相位图以及光强分布图

利用(4)、(6)式,可以分别得到光束和超艾里光束的频域相位信息,对相位分布作傅里叶逆变换,即可得到和超艾里光束的复振幅分布。图 1(a)~(f)分别为和超艾里光束的相位分布图、空间光强分布图以及光束主瓣沿 x 方向的轮廓分布图。

图 1(a)、(b)分别为艾里光束、超艾里光束的相位分布图,从图 1(b)可以看出,超艾里光束的相位在 $|k_x| = k_\pi$ 处发生了相位为 π 的突变。图 1(c)、(d)分别为艾里光束、超艾里光束的空间光强分布,对比两图可以发现,超艾里光束的主瓣尺寸明显比艾里光束的主瓣尺寸小,且超艾里光束的能量更加集中。图 1(e)、

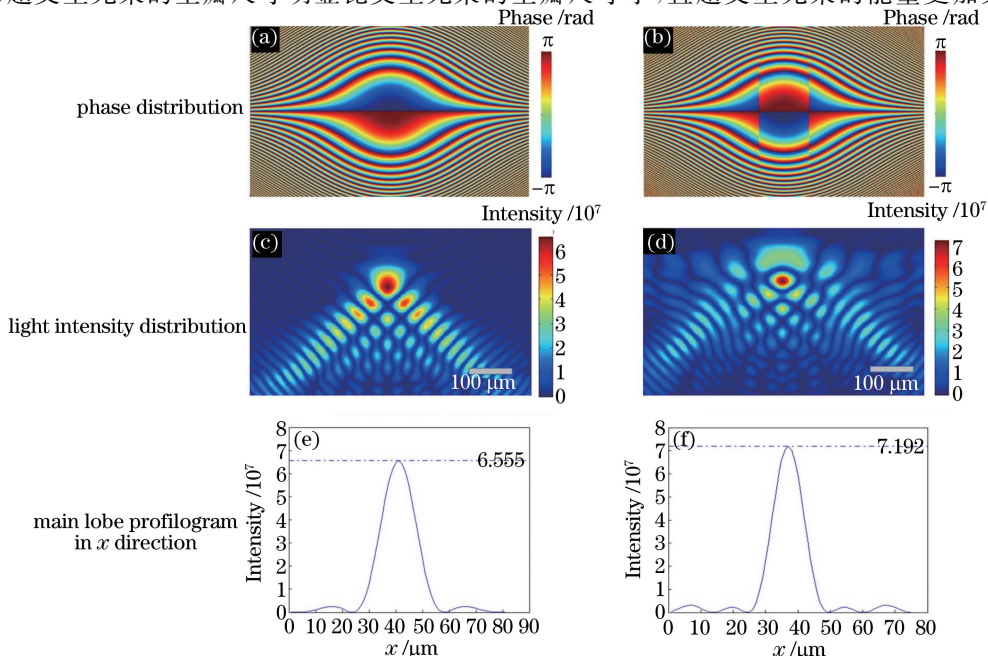


图 1 (a)(c)(e) 光束和 (b)(d)(f) 超艾里光束的仿真结果

Fig. 1 Simulation results of (a)(c)(e) Airy beams and (b)(d)(f) super-Airy beams

(f)分别为艾里光束、超艾里光束主瓣峰值位置沿 x 方向的剖面图,对比两图可以发现,超艾里光束主瓣的峰值能量比艾里光束主瓣的峰值能量大。计算得到超艾里光束主瓣的峰值能量比艾里光束主瓣的峰值能量增加了约 10%,超艾里光束的主瓣尺寸为艾里光束主瓣尺寸的 70%。

3.2 超艾里光束激光器的结构设计

采用文献[20]提出的艾里光束激光器设计方案,重新设计系统中的反射型衍射光栅,系统结构简图如图 2 所示。

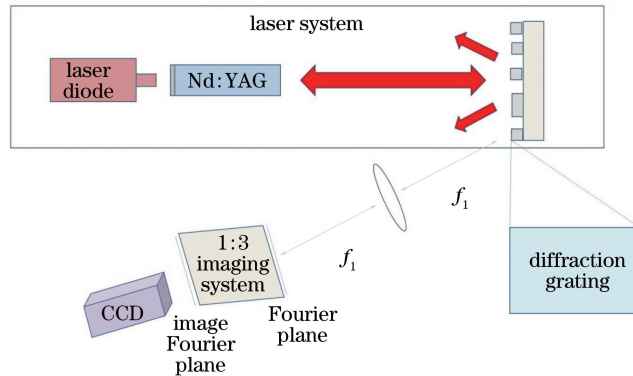


图 2 超艾里光束激光器系统原理图

Fig. 2 Schematic of super-Airy beam laser system

该激光器以波长为 808 nm 的激光二极管作为抽运源,选用端泵的方式抽运掺杂浓度为 1%(原子分数)的 Nd:YAG 棒(大小为 3 mm×8 mm),Nd:YAG 棒的左端面镀有对 808 nm 波长的光束高透、对 1064 nm 波长的光束高反的介质膜,另一端面镀有对 1064 nm 波长的光束高透的介质膜。与传统固体激光器的谐振腔不同,该激光器在腔内增加了衍射光栅,衍射光栅作为激光器输出镜。利用折叠镜将其中一束 1 阶衍射光引到腔外,经过焦距 $f_1=100$ mm 的傅里叶透镜(即对引出腔外的 1 阶衍射光作傅里叶变换)后得到超艾里激光束。为了便于 CCD 收集信息,在透镜后焦点处加入一个 4f 系统。整个 4f 系统由两个透镜组成,它们的焦距分别为 $f_2=150$ mm 和 $f_3=50$ mm,用于放大出射的超艾里光束。

衍射光栅作为超艾里光束激光器的输出镜,是整个激光系统的核心部分,可以将超艾里光束的相位信息加载到激光束中。根据(7)、(9)式进行仿真,得到加载了超艾里光束相位信息的衍射光栅的轮廓图,如图 3 所示。

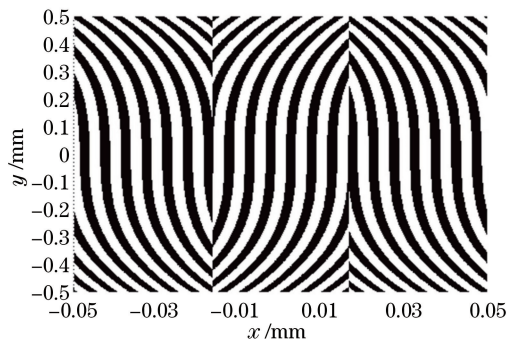


图 3 衍射光栅轮廓分布图

Fig. 3 Profilogram of diffraction grating

从图 3 可以看出,该衍射光栅为二元非周期衍射光栅。图样中黑色部分的值为 0,白色部分的值为 1。由光栅的轮廓分布可以看出,该光栅受到了超艾里光束的相位因子调制,光栅的中间部分图样出现了 180° 的翻转,这是由于超艾里相位在 $|k_x|=k_\pi$ 处发生了相位为 π 的突变。

衍射光栅的制作可以采用电子束直写技术。在 15 mm×15 mm 的硅衬底上镀一层厚度为 70 nm 的银层,并在银层的上表面覆盖一层较薄的有机玻璃(PMMA);利用电子束在 PMMA 表面 0.1 mm×1 mm 的范围内曝光,得到需要的光栅图样;在 PMMA 的上表面镀一层厚度为 60 nm 的银层;将得到的样品浸泡于

丙酮溶液中,使 PMMA 及覆盖在 PMMA 上表面的银层上升脱落,只留下根据要求设计的银光栅图样覆盖在 70 nm 的银层表面;再经过加工处理便可得到非周期二进制衍射光栅。

3.3 超艾里光束激光器的输出功率理论仿真

利用文献[23]中简易激光器模型理论,得到超艾里光束激光器的输出功率为

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{4} h \omega r_g^2 \eta_1 \left\{ \frac{[1 - \exp(-\alpha_p L)]}{0.5 h \omega_p r_{\text{rod}}^2 [\delta_p + \ln(1/\eta_0)]} p_{\text{pump}} - \frac{1}{2\sigma\tau} \right\}, \quad (10)$$

式中 h 为普朗克常数, ω 为激光的角频率 ($\omega = 2\pi/\lambda_{\text{out}}$, λ_{out} 为输出光束的波长), ω_p 为抽运光的角频率 ($\omega_p = 2\pi/\lambda_p$, λ_p 为抽运光的波长), r_{rod} 为激光腔内光束的束腰半径, r_g 为入射到衍射光栅表面光束的束腰半径, α_p 为 Nd:YAG 棒抽运吸收效率 ($\alpha_p = 8 \text{ cm}^{-1}$), L 为 Nd:YAG 棒的长度 ($L = 8 \text{ mm}$), δ_p 为光束在腔内双程损耗的对数(该损耗不含输出耦合的损耗), p_{pump} 为激光二极管的抽运功率, σ 为 Nd:YAG 的受激辐射横截面积 ($\sigma = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$), τ 为荧光寿命 ($\tau = 2.3 \times 10^{-4} \text{ s}$), η_0 为衍射光栅的 0 阶反射效率, η_1 为衍射光栅的 ± 1 阶衍射效率。由(10)式可知,当激光器的激活物质、光栅槽深和激光器的腔长确定后,决定该激光器输出功率、阈值功率的因素包括增益介质棒内光束束腰半径 r_{rod} 、入射到衍射光栅表面的光束半径 r_g 以及光束在腔内双程损耗的对数 δ_p 。计算结果表明,激光器阈值功率与激光腔内光束束腰半径呈反比关系;激光器的输出功率与激光器腔内光束双程损耗取对数呈反比关系。

Porat 等^[20]充分考虑了增益介质棒的右端面高衍射效应和腔的热透镜效应等因素,利用实验结果拟合出 Nd:YAG 棒内光束束腰半径 r_{rod} 和衍射光栅表面光束半径 r_g 的值,并由此确定光束在腔内的双程损耗(对数形式为 δ_p)。理论计算中,采用文献[20]中的参数 $r_{\text{rod}} = 328 \text{ }\mu\text{m}$, $r_g = 425 \text{ }\mu\text{m}$ 以及 $\delta_p = 0.092$ 。当衍射光栅槽深 $h_0 = 60 \text{ nm}$ 、入射到光栅的光束波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 时,利用(8)、(9)式,得到衍射光栅的 0 阶反射效率 $\eta_0 = 88.3\%$, ± 1 阶的光栅衍射效率 $\eta_1 = 4.8\%$ 。利用(10)式,得到超艾里光束激光器的输出功率随抽运功率的变化,如图 4 所示。由图 4 可以看出,激光器的阈值功率为 1.4 W,当抽运功率增加至 2 W 时,输出功率高达 678 mW。

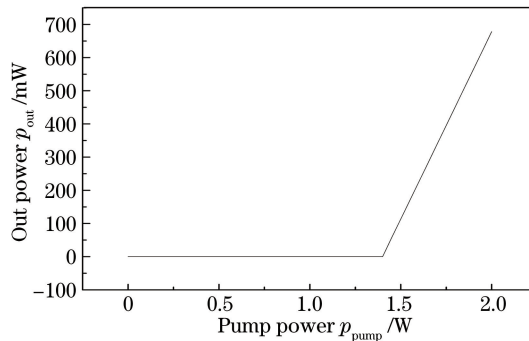


图 4 超艾里光束激光器输出功率随激光二极管抽运功率的变化

Fig. 4 Relationship between output power of super-Airy beam laser and pump power of laser diode

4 结 论

以超艾里光束基本理论为基础,结合艾里光束激光器的系统结构,提出了一种直接输出超艾里光束的激光器设计方案。计算结果表明,与艾里光束激光器相比,设计的超艾里光束激光器可直接输出主瓣尺寸更小、能量更集中的超艾里光束。超艾里光束激光器的阈值功率为 1.4 W,当抽运功率为 2 W 时,输出功率高达 678 mW。采用对 1 阶光束具有更高衍射效率的闪耀光栅代替设计的二元衍射光栅,可提高激光器的输出功率;缩小激光系统的腔长、选用其他合适的增益介质以及缩小入射到增益介质内的光束束腰半径等方式,可降低激光器的阈值功率,提高抽运光的利用率。

参 考 文 献

- 1 Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. Am J Phys, 1979, 47(3): 264-267.
- 2 Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. Opt Lett, 2007, 32(8): 979-981.
- 3 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. Phy Rev Lett, 2007, 99(21): 213901.
- 4 Cheng Zhen, Zhao Shanghong, Chu Xingchun, *et al.* Research progress of the generation methods of Airy beam[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030008.
程 振, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 艾里光束产生方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030008.
- 5 Li Li, Li Shuli, Zhang Yunzhe, *et al.* Study of Airy beams generated via four-wave mixing process in a homogeneous atomic medium[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 081406.
李 莉, 李姝丽, 张云哲, 等. 均匀原子介质中四波混频产生艾里光束的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 081406.
- 6 Shi Yaoyao, Wu Tong, Liu Youwen, *et al.* Control of self-bending Airy beams[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1401-1407.
施瑶瑶, 吴 彤, 刘友文, 等. 艾里光束自弯曲性质的控制[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1401-1407.
- 7 Singh B K, Remez R, Tsur Y, *et al.* Super-Airy beam: self-accelerating beam with intensified main lobe[J]. Opt Lett, 2015, 40(20): 4703-4706.
- 8 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. Opt Lett, 2008, 33(3): 207-209.
- 9 Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams[J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12880-12891.
- 10 Kaganovsky Y, Heyman E. Wave analysis of Airy beams[J]. Opt Express, 2010, 18(8): 8440-8452.
- 11 Li Li, Zhao Xiaoxia, Zhu Junfan, *et al.* Self-healing of selectively reflected Airy beam from resonant atoms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121404.
李 莉, 赵小侠, 朱君凡, 等. 共振原子选择反射艾里光束的自愈[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121404.
- 12 Wang Yaqian, Ren Zhijun, Li Xiaodong. Poynting vector and angular momentum of accelerating quad Airy beams[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1226001.
王雅倩, 任志君, 李晓东. 加速四艾里光束的坡印亭矢量及角动量研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1226001.
- 13 Lu Keqing, Hu Kai, Chen Weijun, *et al.* Interactions of two Airy beams in Kerr and saturable nonlinear media[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(4): 80-84.
卢克清, 胡 凯, 陈卫军, 等. 两束艾里光束在 Kerr 和饱和非线性介质中的相互作用[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(4): 80-84.
- 14 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. Science, 2009, 324(5924): 229-232.
- 15 Chong A, Renninger W H, Christodoulides D N, *et al.* Airy-Bessel wave packets as versatile linear light bullets[J]. Nat Photonics, 2010, 4: 103-106.
- 16 Wang Xiaozhang, Tang Feng, Yuan Mengjie, *et al.* Experimental simulation of circular-Airy beam drift in atmospheric turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0813001.
王晓章, 唐 峰, 原勳捷, 等. 实验模拟环形艾里光束在大气扰动中的光束漂移[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0813001.
- 17 Wang Xiaozhang, Li Qi, Zhong Wen, *et al.* Drift behavior of Airy beams in turbulence simulated by using a liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213001.
王晓章, 李 琦, 钟 文, 等. 液晶空间光调制器模拟艾里光束在湍流中的漂移[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213001.
- 18 Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. Nat Photonics, 2008, 2: 675-678.
- 19 Cheng H, Zang W P, Zhou W Y, *et al.* Analysis of optical trapping and propulsion of Rayleigh particles using Airy beam [J]. Opt Express, 2010, 18(19): 20384-20394.
- 20 Porat G, Dolev I, Barlev O, *et al.* Airy beam laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(20): 4119-4121.

- 21 Lee W H. Binary computer-generated holograms[J]. Appl Opt, 1979, 18(21): 3661-3669.
- 22 O'Shea D C, Suleski T J, Kathman A D, *et al.* Diffractive optics: design, fabrication, and test[M]. Washington: SPIE Publications, 2003: 83-113.
- 23 Siegman A E. Lasers[M]. California: University Science Books, 1986: 457-485.