

自加速光的调控及其新奇应用

陈志刚^{1,2} 许京军¹ 胡毅¹ 宋道红¹ 张泽³ 赵娟莹⁴ 梁毅^{1,5}

¹南开大学物理学院泰达应用物理研究院, 天津 300457

²旧金山州立大学物理与天文系, 加利福尼亚 旧金山 94132

³中国科学院光电研究院, 北京 100094

⁴华北电光研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

⁵广西大学物理科学与工程技术学院广西相对论天体物理重点实验室, 广西 南宁 530004

摘要 实现自弯曲光乃至自回旋光一直是人们的梦想与科幻的题材。近年来,艾里光束以及推广的自加速光束因其无衍射、自弯曲传输以及自愈等奇异特性引起了人们极大的研究兴趣。这些光束的构想不仅得到了实验证实,而且具有广泛的应用前景,包括操控微纳颗粒、等离子体通道和表面等离子体激元、电子加速、精密成像、湍流传输、引导放电等,这些应用前景使得自加速光倍受青睐,成为一个广泛关注和激动人心的前沿热点课题。本文简单综述了基于相位调制的自加速光束的研究进展,包括自加速光束的产生和传输特性,以及其在空域和时域的推广与调控,并着重介绍自加速光在若干领域的新奇应用。

关键词 物理光学; 相位调制; 自加速光; 艾里光束; 无衍射; 自弯曲; 自修复; 光学操控

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1026009

Control and Novel Applications of Self-Accelerating Beams

Chen Zhigang^{1,2} Xu Jingjun¹ Hu Yi¹ Song Daohong¹

Zhang Ze³ Zhao Juanying⁴ Liang Yi^{1,5}

¹ TEDA Applied Physics Institute, School of Physics, Nankai University, Tianjin 300457, China

² Department of Physics and Astronomy, San Francisco State University, San Francisco, California 94132, USA

³ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

⁴ Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Institute of Electronics Optics, Beijing 100015, China

⁵ Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, School of Physical Science & Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

Abstract For decades, it has always been a dream of mankind to create self-bending of light in free space and even a boomerang of light as often seen in science fiction. Recently, Airy beams, along with their generalized self-accelerating beams, have attracted a great deal of attention due to their novel properties such as non-diffraction, self-bending, and self-healing. These unconventional optical beams not only have been realized in experiment, but also have wide application prospects, such as for particle manipulation, plasma channels, surface plasmons, electron acceleration, super-resolution imaging, transmission in turbulent environment, and guiding electric discharge. These application prospects make self-accelerating beams an attracting and exciting frontier of research. Here, we present an overview of the development and recent advances about self-accelerating beams mediated by phase modulation, including the generation and propagation properties of self-accelerating beams, and their extension and control in both spatial and temporal domains, with a focus on discussion of their novel applications in several areas.

收稿日期: 2016-08-26; **收到修改稿日期:** 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61475161, 11304165, 11604058)、国家 973 计划(2013CB632703, 2013CB328702)、PCSIRT (IRT_13R29)、111 Project(B07013)

作者简介: 陈志刚(1964—),男,博士,教授,主要从事非线性光学和光子学、光场调控和维纳结构方面的研究。

E-mail: zgchen@nankai.edu.cn

Key words physical optics; phase modulation; self-accelerating beams; Airy beams; non-diffraction; self-bending; self-healing; optical manipulation

OCIS codes 260.5950; 140.3300; 060.5060; 070.3185; 350.4855

1 引 言

众所周知,光波与声波和水波一样,传播越远扩散越大。衍射是光束的基本特性,由于衍射,光束在传输过程中光斑逐渐增大,能量逐渐分散。事实上,随着激光在通信、军事等长距离传输领域应用的不断拓展和深化,人们越来越希望通过有效的光场调控来消除衍射,从而降低光束的传输耗散。最初,人们对消除衍射的研究仅限于非线性材料中。比如,利用晶体的非线性效应,光束的自聚焦可以抵消光束的衍射,形成像光针一样的空间光孤子^[1-3]。然而,在自由空间中,消除光束衍射的需求也很迫切,虽然利用贝塞尔光束一定程度上实现了这一目的,但是该光束的轨迹单一,只能沿直线传输。一些光学元器件(如反射镜、透镜乃至光纤和集成光波导)可以迫使光沿着设定的路径传输,但实现像科幻小说或电影中描述的那种可在自由空间自行弯曲,绕过障碍物,甚至自回旋的光束一直是人们梦寐以求的。无衍射光束在传播过程中若能按照预定的轨迹自行弯曲,将对光在微观领域(比如微纳颗粒的光学操控)以及宏观领域(比如大气传输、激光武器等)的应用带来诱人的前景。由此,一个新的研究领域应运而生——通过光场调控来实现自弯曲光束^[4-7]。

实际上,产生特殊设计的无色散的自弯曲光束的想法来自于量子物理。1979年,Berry等^[8]首次提出无外场的薛定谔方程具有随时间不扩展的艾里波包形式的解。这个早期的工作在随后的数十年中没有引起太多的关注,直到2007年由美国中佛罗里达大学光电学院的Siviloglou等^[4-5]在光学中实现了类似的艾里光束,这种特殊形貌的光束能够在很长距离上无衍射传输而且能够横向加速。

相比最具代表的沿直线传输的无衍射贝塞尔光束^[9-10],艾里光束除了具有无衍射和自愈特性外,还具有可控的自弯曲弹道轨迹传输等奇异特性^[11-13](第2节将会讨论艾里光束的这些独特性质),因此吸引了人们极大的兴趣,许多基于艾里光束令人兴奋的应用被先后提出并得以实现,典型的例子有光操控微粒^[14-18]、产生弯曲的等离子通道、超连续辐射、光子弹^[19-22]、表面等离子激元路由^[23-30]和无电场的自加速电子束^[31-32]。除此之外,艾里光束还在微加工^[33]、光路由互联和图像传输^[34-36]以及单分子超分辨成像^[37]和片光显微镜^[38]等方面表现出优越的性质。最近基于这类奇异光束的拉曼频率调谐^[39]以及激光引导放电也被成功地实现^[40]。第5节将讨论基于艾里光束的若干应用。

与此同时,自加速光的概念被推广到了沿任意凸轨迹传输的弯曲光束,超出了通常在傍轴近似下的艾里光束的范畴,典型的例子包括具有径向对称的急剧自会聚光束和瓶子光束^[41-45],非线性效应下孤子型的自加速光^[46-53],可以沿球面、椭圆甚至是任意设计的轨迹大弯曲角度传输的非傍轴自加速光^[54-61],在折射率梯度势场和周期结构中的自加速光^[62-67],类贝塞尔加速光^[68-71],矢量型艾里光束^[72-74],非相干艾里光束^[75],以及各种时域中的自加速艾里型激光脉冲^[76-81]。第3节和第4节将分别讨论空域和时域不同类型的自加速光束/脉冲的产生和调控。

在最近几年关于自加速光的研究中,尤其是具有量子特性的自加速电子束的成功实现^[31],已经证明了自加速波包广泛存在于各种波动系统。实际上,除了光学和等离激元光子学领域,自加速波的概念已经被推广到不同的物理系统,包括水波中的艾里型水波脉冲^[82]、声波中的艾里型声波和声光瓶^[83-86]、玻色爱因斯坦凝聚体中的艾里型物质波^[87]等等。有趣的是,当初利用量子物理薛定谔方程中艾里波包解的概念来产生各种经典的自加速波,而最近这样的概念又被应用到量子体系中研究自加速的狄拉克粒子和相对论效应^[88-89]。

在过去的十年中,人们对自加速光的研究兴趣激增。国内也有越来越多的科研小组加入到研究基于相位调控的自加速光束这一领域,并且做出了很多贡献(本文后面将提及这些工作)。正如其他的研究领域一样,自加速光的研究和发展也得益于一些关键的想法和实验,这篇综述中只能选择性地讨论一部分这样的关键工作。鉴于这个领域的发展是非常迅速而且多变的,本文不可能完整地包括所有这些工作,并有可能遗漏某些重要贡献。事实上,在撰写本文的过程中,很多围绕自加速光的新发现及其相关应用的工作成果也正在各种期刊上发表。

2 艾里光束的产生和传输特性

上节提到,艾里光束是无外场薛定谔方程的艾里波解在光学领域的成功类比实现。这种特殊光束的产生主要依赖于相位调制,具有在空间传输时无衍射、自修复和自加速(弯曲传播)等特性^[4-7]。本节先简单介绍艾里光束的首次理论预言与实验实现,并概述其在自由空间以及类湍流介质和层流介质(阶梯势)中的传输行为及轨道调控。

2.1 艾里光束的理论预言与首次实验实现

为方便讨论,首先考虑一维情况。在一维情况下,光的传输行为遵循一维的傍轴衍射波动方程,即:

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

式中 $s = x/x_0$ 为归一化的横坐标, x_0 为随机选取的横坐标常量, $\xi = z/kx_0^2$ 为归一化的纵坐标,代表传输距离(与瑞利长度有关), $k = 2\pi n/\lambda_0$ 为波数。值得一提的是,(1)式也可用于描述脉冲在色散介质中的传输行为。

基于 Berry 等^[8]在量子力学领域的研究成果,Siviloglou 等^[4]首次发现(1)式具有如下艾里波包解:

$$\varphi(s, \xi) = \text{Ai} \left[s - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \right] \exp \left[i \left(\frac{s\xi}{2} - \frac{\xi^3}{12} \right) \right], \quad (2)$$

显然,在坐标原点处波函数为标准艾里函数,即 $\varphi(s, 0) = \text{Ai}(s)$, 表明按照艾里函数分布的光场也能遵循光的衍射规律。同时也不难看出,满足(2)式的光场能够发生横向加速,同时又能保持波形不变,即无衍射传输。(2)式中 $(\xi/2)^2$ 项为横向加速项,描述了艾里波包沿弯曲轨道传输的特性。应该指出的是,这种自加速行为并不与埃伦费斯特理论(本质上是能量守恒定律)相冲突,这可以由艾里函数的平方可积性进行验证。

对艾里函数平方积分发现,其积分值不收敛,即 $\int \text{Ai}^2(s) ds \rightarrow \infty$, 这意味着理想艾里波包携带无穷大能量,因此相应波函数的“质心”不能被定义。携带无穷大能量的波函数显然无法在实验上产生出来。为了能实际产生出艾里光束,比较通用的做法是寻找类似于精确解的“截趾”解,即寻求类似于下式的解:

$$\varphi(s, 0) = \text{Ai}(s) \exp(\alpha s), \quad (3)$$

式中 α 为“截趾”因子或衰减因子。当 $\alpha = 0$ 时,(3)式还原为精确解的形式,其传输形式如图 1(a)所示,图中展示了能量不损耗的艾里光束的弯曲传输;当 $\alpha > 0$ 时,衰减因子能够起到“截趾”作用,从而保证艾里光束能够实际产生。显然,衰减因子的大小代表了(3)式与精确解的近似度: α 取值越小,(3)式越趋近于精确解的形式。以(3)式为基础解形式,对(1)式进行直接求解,可以得到:

$$\varphi(s, \xi) = \text{Ai} \left[s - \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 + i\alpha\xi \right] \exp \left(\alpha s - \frac{\alpha\xi^2}{2} - i \frac{\xi^3}{12} + i \frac{\alpha^2\xi}{2} + i \frac{s\xi}{2} \right). \quad (4)$$

对(4)式进行数值模拟发现,在较长的传输距离中,这种近似的艾里波包仍然能够保持较好的无衍射特性。更有趣的是,近似的艾里波包还保留了其最奇异的横向自加速特性。这些结论同样适用于二维情况^[4-7]。

为了实验上能够产生出“截趾”的艾里光束,人们最感兴趣的是寻求(3)式的傅里叶谱。求解发现,在波矢空间,(3)式可以表示为

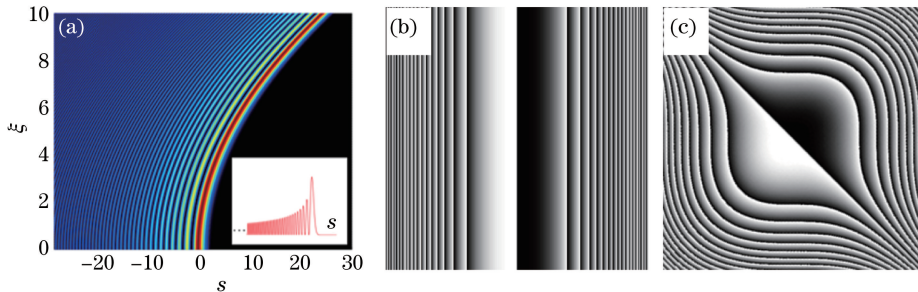


图 1 (a)理想的无限能量艾里光束的传输模拟图;用于产生(b)一维和(c)二维艾里光束的立方相位图^[5]

Fig. 1 (a) Simulation of the propagation of ideal Airy beam with infinite energy; typical cubic phase patterns used for generating (b) one and (c) two dimensional Airy beams, respectively^[5]

$$\Phi_0(k) = \exp(-\alpha k^2) \exp\left[\frac{i}{3}(k^3 - 3\alpha^2 k - i\alpha^3)\right], \quad (5)$$

由(5)式可以看出,“截趾”艾里光束的傅里叶频谱为立方相位调制的高斯函数。这意味着艾里光束可以通过对方位相位调制的高斯光束进行傅里叶逆变换实现。按照这个实验思路,Siviloglou等^[4-5]在实验中首次成功产生了一维和二维的自加速艾里光束,获得了科学界的广泛关注,也开辟了基于相位光场调控的新纪元。实验中采用的一维和二维艾里光束的立方相位分别如图1(b)、(c)所示,可通过商用液晶空间光调制器很方便地实现。基于Siviloglou的实验装置,艾里光束的无衍射传输和横向自加速特性很快得到验证,实验结果与理论预测结果相当吻合^[4-7]。

2.2 艾里光束在自由空间中的传输行为及轨道调控

如上所述,在自由空间中,艾里光束可以沿弯曲路径传输。在艾里光束被实验实现的第二年,Siviloglou就对这种弯曲行为进行了深入研究,结果显示,艾里光束的弯曲轨道遵循方程 $x_d = \theta z + z^2 / (4k^2 x_0^3)$ 所描述的抛物线轨迹,其中 θ 为艾里光束的初始发射角。当 $\theta = 0$ 时,传输路径类似于平抛运动,为典型艾里光束的传输方式;当 $\theta < 0$ 时,传输路径类似于上抛运动;当 $\theta > 0$ 时,传输路径类似于下抛运动。这样,艾里光束在空中的传输和小球在重力作用下的弹道运动相当类似。值得一提的是,无论有限能量的艾里光束沿何种路径传输,其“质心”始终是沿直线传输的,与现有理论并不冲突。

调控光场像粒子那样在自由空间中进行抛物运动一直是许多科学工作者的梦想,艾里光束沿抛物轨迹传输的特性显然为实现这一梦想带来了希望。本课题组在这方面也做了深入研究。2010年,通过改变立方相位模板和入射高斯光束的相对位置可以方便地改变艾里光束传输轨道的顶点、幅宽及光强极大值出现的位置,如图2所示。在艾里光束生成装置[图2(a)]中,当高斯光、相位模板和透镜共轴时,产生的艾里光束做平抛运动,光强峰值出现在 $z=0$ 处,如图2(b)第一行所示;若竖直向下平移模板而保持高斯光的位置不变,产生的艾里光束做上抛运动,而光强峰值出现在轨迹的最高点,如图2(b)第二行所示;若在平移相位模板的基础上同时竖直向上平移高斯光,且保证两者平移量相等,同仅平移相位模板的结果相比,艾里光束的轨迹没有发生变化,只是光强峰值的位置发生了变化,出现在了轨迹的落点位置,如图2(b)第三行所示。特别地,该方法可用于优化该光束在复杂环境中的传输:当艾里光束被介质的畸变破坏时,若调整相位模板和高斯光束的位置,则可以使得其波形在特定位置得到还原。这些对艾里光束传输轨道和波形进行调控的方法统称为艾里光束的优化控制方法。通过这些手段,激光能量将有望能够绕过障碍物或可控地穿越复杂介质环境,从而被高效地输运到选定目标上。

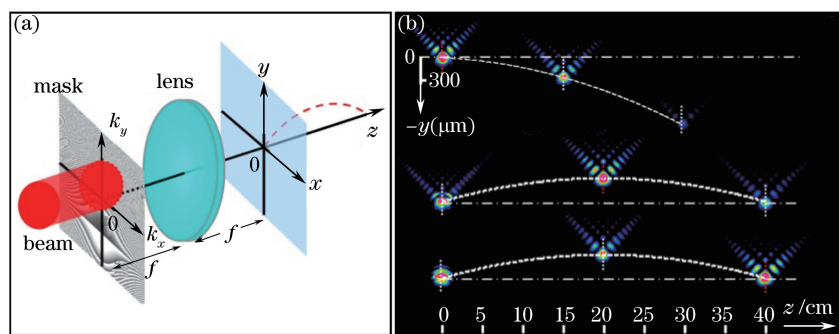


图2 (a)艾里光束实验产生的简化装置,主要是对空间相位调制的高斯光束进行傅里叶逆变换;
(b)不同初始条件下,艾里光束的传输轨迹和光强模式^[13]

Fig. 2 (a) Schematic diagram for experimental generation of Airy beams, where a spatial phase modulated Gaussian beam is inversely Fourier transformed; (b) propagation trajectories and intensity patterns of Airy beams under different initial conditions

2.3 艾里光束的自愈效应

理论和实验研究发现,艾里光束除了无衍射和自加速外,还具有第三个奇异特性——自愈特性,即在某个位置主动或被动地破坏艾里光束的结构,传输一段距离后,被破坏的部分能够重新“长出”。Broky等^[12]分别在实验中破坏了艾里光束的主瓣和副瓣,发现传输一段距离后,这些破坏的主瓣或副瓣均能重新出现。

为了解释这种现象, Broky 参照巴比涅原理, 把来自外界的破坏效应等效为微扰势, 即把破坏后的光场写为 $\varphi(x, y, z=0) = U_{\text{ND}}(x, y, z=0) - \varepsilon(x, y, z=0)$, 其中 $U_{\text{ND}}(x, y, z=0)$ 为破坏前的光场, $\varepsilon(x, y, z=0)$ 为微扰势。把破坏后的光场函数代入到衍射方程中, 发现微扰项会很快地衍射掉, 即 $i\varepsilon_z + (1/2k) \nabla_{\perp}^2 \varepsilon = 0$, 因而只保留了原光场。这样, 长距离传输后, 光场强度恢复至破坏前的形状, 即 $|\varphi(x, y, z)|^2 = |U_{\text{ND}}(x, y, z)|^2$ 。在研究中, 由于并没有假设初始波函数为艾里函数, 而只假定了原波函数为无衍射光束解, 因此, 此结论也同样适用于其他无衍射光束。此外, 这类光束的自愈特性还可以用平衡势的概念解释, 即光束各个光瓣之间存在着平衡势, 当这种平衡势被打破后, 其能量就会从高势能位流向低势能位, 形成新的平衡, 即恢复了原光束结构。

艾里光束的这种自愈特性具有很好的应用价值, 其中最诱人的应用表现在抑制大气湍流方面^[90]。众所周知, 在激光通信、激光武器等应用中, 大气湍流是制约应用效果的一个重要因素。通常情况下, 人们利用自适应光学技术抑制湍流, 能在一定程度上修正大气湍流带来的畸变影响, 但这项技术只能把一个特定波前恢复到较好的形状, 而对于全通道光束波前的控制则具有一定的限制。相比之下, 艾里光束则无需采用自适应光学矫正, 仅凭自身特性就可以使得激光在全通道上都能保持很好的波前。文献[13]中也演示了艾里光束在湍流介质中传播时的自愈效应。

2.4 艾里光束在阶梯势中的轨迹调控

上述讨论的情形基本限于艾里光束在自由空间的传输。然而, 在实际情况中, 光束的传输环境可能会比较复杂, 比如, 在某些情况下, 传输介质(如层流介质等)可能具有折射率梯度。艾里光束在含有折射率梯度介质中的传输可以模拟层流介质中光波的传输行为。对艾里光束在阶梯势中传输行为的讨论可追溯至 Berry 等^[8,91]早期发表的论文, 其研究讨论了艾里波包在阶梯势中的传输情况。理论研究认为, 介质的阶梯势对艾里波包的传输具有调控作用, 当阶梯势的方向与波包加速的方向一致时, 艾里波包会加速得更厉害, 而当阶梯势的方向与波包加速的方向相反时, 艾里波包的加速则会被减缓, 甚至会被完全抵消。2011年, Efremidis^[62]也从理论上研究了艾里光束在线性折射率梯度势中的传输和调控。本课题组在实验研究中验证了艾里光束的这种调控行为^[63]。具体地, 采用光折变铌酸锶钡晶体作为艾里光束传输介质, 利用白光诱导的方法在晶体中引入了折射率梯度势。研究发现, 实验结论与 Berry 的理论预测结论符合得很好。这些结果有助于研究艾里光束在大气、层流介质、阶梯光纤等环境中的应用。

3 空域自加速光的推广与调控

艾里光束在实验室的成功实现以及对其无衍射、自修复和自加速等特性的演示, 立即引起了人们对自加速光的广泛兴趣。除了最基本的一维和二维的艾里光束之外, 自加速光的概念迅速得到推广, 从自由空间推广到非均匀介质以至周期结构, 从线性推广到非线性, 从相干光推广到非相干光, 从空域推广到时域。本节将先讨论自加速光在空域的推广与调控。

3.1 急剧自会聚自加速光束

众所周知, 会聚是提高激光功率密度最直接也是最有效的方法。一般采用凸透镜、凹面镜或两者的组合对光束进行会聚, 但该方式有很多缺陷。一直以来, 对光束能量会聚的研究具有巨大的科学兴趣和实际重要性。在最常见的高斯光束情况下, 焦点附近的光强遵循光滑的洛伦兹分布。但是, 如果光束的能量密度在焦点前保持较低, 而在焦点处能够突然增大, 这样的光束对许多应用是很重要的。比如, 在激光医疗或在光刻波导过程中, 这种急剧聚焦行为能避免聚焦前光束与传输介质发生强烈的相互作用, 从而最大程度地降低灼烧损耗。

基于自加速光束的研究, Efremidis 等^[41]预测了一种新型的令人着迷的光束——急剧自会聚自加速光束。这种光束在刚开始传输时最大光强几乎没什么变化, 但在接近聚焦点时会突然自动会聚, 其峰值强度呈数量级地增加, 因此这类波包能够在介质中“默默”地传输, 直到某个目标处突然显示出它们的存在。这种光束可以说是由圆环形艾里波包产生的, 宛如将一维的艾里光束环绕一圈。理论预言很快得到实验证实^[15,42-43]。圆环形艾里光束光强沿 z 轴的分布如图 3(a)所示, 光束先是遵从虚线所示的抛物线轨道传输, 直到某一点($z=6$)时, 光束能量密度骤然增加。数值模拟和实验演示的自会聚光束在不同传输截面的横向

光场分布分别如图 3(b)、(c)所示。不仅如此,本课题组还将该光束用于捕获和操控微纳颗粒(第 5 节将会讨论)。值得一提的是,这类自会聚光束在远场退化为无衍射的贝塞尔光束。本课题组的研究结果证明,相比于高斯光束,基于艾里波包产生的自会聚光束具有巨大的应用潜力,在光生物医学、焊接以及光刻光子学微纳结构上都可能得到广泛应用。

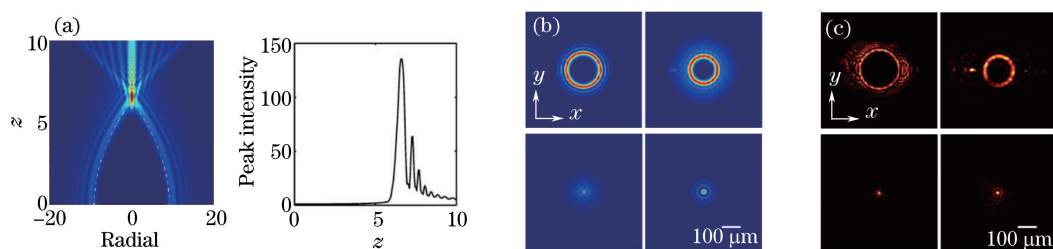


图 3 急剧自会聚自加速光束。(a)数值模拟自会聚自加速光束沿 z 轴传输的纵向强度分布^[41];
(b)数值模拟和(c)实验演示的自会聚光束在不同传输截面的横向光场分布^[15]

Fig. 3 Illustration of an abruptly auto-focusing accelerating beam. (a) Typical longitudinal intensity distribution of an auto-focusing accelerating beam during propagation along z axis^[41]; transverse intensity profiles taken at different propagation sections from (b) numerical simulation and (c) experiment, respectively^[15]

3.2 非傍轴近似下的自加速光

先前介绍的艾里自加速光束是在傍轴近似下波动方程的解,其在大角度弯曲传播的非傍轴近似下是不存在的。庆幸的是,自加速光概念也可直接通过全空间的麦克斯韦方程来产生和实现,因此理论上能够产生接近 180° 弯曲的光束。并且,这种非傍轴条件可以带来一系列不同轨迹的自加速光束。这一设想是由以色列理工学院的 Segev 课题组最先提出的,他们直接求出了麦克斯韦方程的自加速光束解,这些光束具有无衍射特性并能够沿着严格的圆形轨迹传输。

为了找到无衍射的非傍轴自加速光束,Segev 课题组研究了给定偏振方向的标量麦克斯韦方程。由于方程在 x 和 z 坐标具有完全对称性,具有不变形态的光束解必须具有圆形对称性。因此 Segev 课题组将方程转换到极坐标系,寻找形态不变的光波解。在极坐标系中,波动方程的解为贝塞尔函数,转换回直角坐标系中,可将光波解分解为傅里叶空间中向前和向后传输的波包。然而,只有向前传输的部分形成了理想的自加速光束,因此这类光波解被称作“半贝塞尔波包”^[54-55]。受此理论的启发,不同课题组把研究重点放在沿着非圆形轨迹甚至任意轨迹传播的非傍轴自加速光束^[56-61]。

本课题组和加州大学伯克利分校的张翔课题组以及加拿大的 Morandotti 课题组从理论和实验上发现了亥姆霍兹方程的精确解对应产生的 Mathieu 和 Weber 非傍轴自加速光束,它们能够突破傍轴近似的限制,分别沿着椭圆形和抛物线轨迹在空间大角度弯曲传输。本课题组的结果将之前研究的艾里加速光的概念推广到非傍轴近似波动方程的全空间范畴。更重要的是,这些研究证明了圆形非傍轴加速光束是 Mathieu 加速光束的特例,而广为研究的艾里光束仅仅是 Weber 光束在傍轴近似极限条件下的特例^[59]。

除了基础科学的研究兴趣之外,这种非傍轴自加速光束能够保持形态并自动向左或向右大角度偏转,具有很好的工程应用价值,而其相关的基础概念也可以方便地推广到自然界其他线性波系统,比如电磁波、弹性波、水波甚至物质波。这些研究将有助于挖掘与自加速光束相关的新现象和新应用。

3.3 特殊设计的类贝塞尔型自加速光

虽然涡旋光束^[92]、贝塞尔光束^[9-10]以及艾里光束^[4-5]都在光学捕获和操控中发挥着各自独特的作用,但是设计出能够综合以上光束特征(有轨道角动量、无衍射和自加速)的光束仍有一定的挑战。那么,一个很自然的问题是:是否可能产生一种无衍射、自加速又具有轨道角动量的奇特光束且沿着任意预先设计的轨道传输?

与 Efremidis 课题组合作,本课题组首先实现了类似贝塞尔光束的自加速光束^[68-69]。众所周知,贝塞尔光束虽然具有圆对称的光强分布和无衍射特性,但其只能沿直线传播;而艾里光束具有无衍射和自弯曲的传播特性,但其横向光强分布很不对称(图 1 和图 2)。实现具有贝塞尔光束光强对称或是近似对称分布的自加速光束显然很重要。本课题组不仅实现了这类贝塞尔型的自加速光束,还构建了类贝塞尔型的具有自加

速特性的涡旋光束,也就是上面提到的综合艾里光束、贝塞尔光束及涡旋光束的奇异光束,这些光束能在弯曲传播中保持无衍射的中心孔及不变的轨道角动量^[18,71]。这些光束能沿着抛物、双曲及三维轨道传输,且光场保持高阶贝塞尔函数形式。此外,本课题组还构造了自呼吸、自螺旋光束以及非傍轴的类型贝塞尔自加速光束,并在实验上证明了此类光束在三维空间捕获和操控粒子的能力。

需要说明的是,构造具有多种特性并能沿着多种轨道传输的类型贝塞尔涡旋自加速光束的关键点是寻找一个合适的初始相位函数。详细的求解过程可参考文献[18]的补充材料。从光线理论来看,由输入平面上的同一圆周上发出的锥形线束偏斜错开,其“会聚”在聚焦线的不同位子上,沿着聚焦线光束干涉导致高阶贝塞尔光强模式与螺旋相位(图4),并沿着预设的轨道传输。传输过程中,这种光束保持无衍射的主瓣光强模式及守恒的涡旋光轨道角动量。更有趣的是,这类光束能够用于光镊装置进行三维的微纳颗粒操控。就像通过应用电场和磁场驱动一个带电粒子的螺旋运动一样,在光梯度力、辐射压力和轨道角动量的联合作用下,自弯曲的类型贝塞尔光束能用于三维空间中螺旋式驱动聚苯乙烯颗粒。此外,这种中空的类型贝塞尔涡旋光束原则上也可以用于操控光吸收粒子和低折射率的透明粒子^[93-94]。这些工作有望带来光场调控和光束构造的新课题,将来可能应用在诸如生物操控、软物质及大气科学等各种领域中。

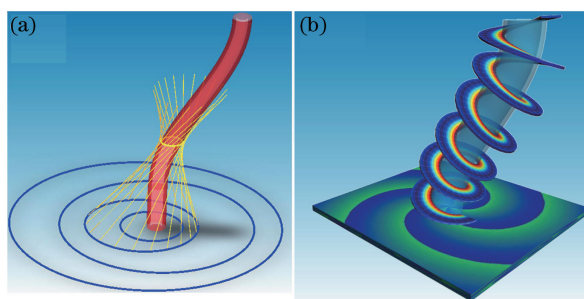


图4 类型贝塞尔自加速涡旋光束的设计。(a)无衍射类型贝塞尔自加速光束在空间沿着弯曲轨道的传输;
(b)螺旋相位结构和光束的动态传输示意图^[18]

Fig. 4 Design of a Bessel-like self-accelerating vortex beam. (a) Propagation of non-diffraction Bessel-like self-accelerating beam along a curved trajectory in free space; (b) illustration of its spiral phase structure and the beam dynamics^[18]

3.4 基于非相干光的自加速光束

在大多数产生自加速波包的体系中,自加速行为起源于波包中最基本的特性——干涉效应。然而,自然界中波并不都是完全相位相干的。比如,自然光属于自发辐射产生的一种电磁波,是一种完全非相干光波。很自然地有人会想到,是否可用部分相干光(特别是相干长度极短如接近波长量级的相干光)来产生无衍射的自加速光束呢?也就是说,能否像产生相干自加速光束一样对部分相干光进行相位调控来产生非相干自加速光呢?苏州大学的蔡阳健等用类似方式产生了部分相干的 Gaussian-Schell 模光束^[95]。而在自加速光方面,也有几个课题组初步研究了部分空间相干艾里光的产生及其线性传输^[96-99]。遗憾的是,这些研究认为非相干性对自加速光的传播特性产生消极影响:光的非相干性越大,自加速传播的距离就越短,甚至无法产生自加速光。这导致了一种错觉:非相干性会削弱自加速光的传播,甚至限制自加速光的产生。2015年,本课题组与 Segev 课题组合作,发表了关于傍轴和非傍轴非相干自加速光的理论和实验产生^[75],并发现在合适的光场调控手段下,部分空间相干性不会影响自加速光的横向自加速传播特性。即使在单波长的相干长度范围内,这种非相干自加速光仍能保持原有的传播特性和波形结构,并沿着与相干自加速光一样的轨迹进行传输。值得注意的是,这种非相干自加速光束只有一个很宽的主瓣和光滑的分布轮廓,不具有与相干自加速光一样的振荡起落光场分布。此外,本课题组的研究还提出了一些非相干自加速光可能产生的应用,如利用其进行微粒操控和在一些量子相干限制体系中产生自加速的量子波包。特别的是,非相干光自身带有抗干扰的特性,与自加速光无衍射、自加速、自修复传播特性的结合将在一些无序扰动环境或者系统中产生应用,如在无序介质中进行图像信号传输^[36]。本课题组的结果可为自加速光应用于大气天文观测、生物显微成像、光通信等方面提供理论支持和实验基础。

4 艾里脉冲和时域自加速光的调控

由于时空的可类比性——即衍射和色散的可类比性,空间上自加速光的概念可用于时域中,形成以艾里脉冲为代表的自加速脉冲。由于色散和非线性的可调控特性,艾里脉冲的演化表现出一些新颖的现象,并带来一些潜在的应用。实际上,艾里脉冲或类似的脉冲形状在具有高阶色散(三阶及以上)的系统中很早被注意到,也被尝试性地应用于频谱展宽和相干调控上,然而这类脉冲的性质并未被深入发掘。直到2007年,随着空域自加速光的迅猛发展,艾里脉冲才又被广泛关注,其线性与非线性传播得以深入研究。本节将讨论自加速光在时域的推广与调控。

4.1 线性光子弹:抵抗衍射与色散的光能量波包

自从激光器被研制出来,人们就一直希望用它来取代传统的武器。因为利用强激光脉冲作为武器,其作用速度和精度均具有先天性的优势。然而,与普通子弹或炮弹不同,激光脉冲在传输过程中会发生空间和时间的展宽,即衍射和色散效应。这种展宽会大大降低激光束长距离传输后的能量密度。为此,研究人员一直在致力于实现同时抑制衍射和色散的脉冲光,即“光子弹”^[3,21,100]。理论上,在非线性介质中,只要衍射长度和色散长度绝对相等,并且为反常型色散,光子弹就可以产生。然而,由于固有的调制和结构不稳定性,光子弹在非线性介质中一般不能稳定传输,因此在实验上很难产生出理想的非线性光子弹^[101]。

艾里脉冲的无色散特性为光子弹的实验实现创造了新的契机。如果对一个脉冲光进行调制,使得其在时域遵循艾里函数分布,而在空域遵循贝塞尔函数或艾里函数分布,就有可能产生出一个既不在时域也不在空域展宽的光子弹。并且这样的机制摆脱了基于传统非线性材料的限制,实现难度大大降低,应用范围也更加广泛。基于这一思想,2010年康奈尔大学 Wise 和中佛罗里达大学 Christodoulides 课题组合在实验上首次实现了艾里-贝塞尔型光子弹[图5(a)^[21]],其原理正是在空域利用贝塞尔光束抑制衍射,在时域利用艾里脉冲抑制色散。与高斯-贝塞尔波包相比,艾里-贝塞尔光子弹具有很好的波形稳定性。同年12月,希腊 Tzortzakis 课题组在实验上同时把脉冲光在时域和空域调制成艾里函数分布,实现了三维艾里-艾里型光子弹[图5(b)^[20]](该课题组在后来的研究中也实现了基于上面提到的急剧自会聚自加速光束而产生的非线性光子弹^[102])。值得指出的是,由于在空域遵循艾里函数分布,三维艾里型光子弹同时具有自愈和自弯曲传输的特性。可以想象,如果在未来的战场中出现了一种能够弯曲打击位于掩体后面的目标的激光武器,那很可能就是三维艾里型光子弹。

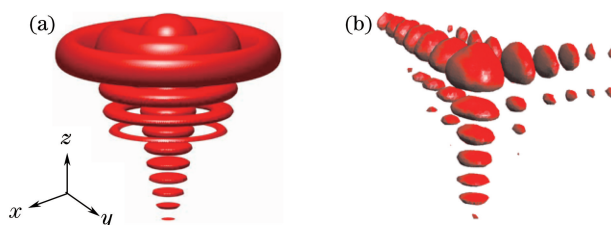


图5 (a)艾里-贝塞尔型光子弹^[4]; (b)艾里-艾里型光子弹^[20]

Fig. 5 (a) Airy-Bessel type light bullet^[4]; (b) Airy-Airy type light bullet^[20]

4.2 艾里脉冲的线性传播特性

尽管艾里脉冲同空域的艾里光束具有可类比性,它们却有一些物理上的不同。比如对于艾里脉冲,需遵从时间上的因果律。受此因素的影响,自减速脉冲的群速度会渐进地趋近于零,而自加速脉冲一旦达到无穷大的群速度时就会发生破裂^[78]。这种现象只有在二阶色散很大的情况下出现,目前尚未被实验验证。对于大多数色散系统(比如光纤)而言,艾里脉冲的传播不受因果律的影响。然而高阶色散却可以修正该脉冲的传输。研究发现,在合适的三阶色散的作用下,艾里脉冲能够在更远的距离上保持其形貌而不发生色散^[76]。另外,本课题组和以色列及加拿大的合作者研究发现,可通过三阶色散来实现艾里脉冲在自加速和自减速状态间的切换,而在切换过程中,艾里脉冲会出现自压缩的过程,这个过程持续的距离同三阶色散系数以及艾里脉冲的“截趾”因子都有关系。同时本课题组还研究了非线性对切换过程的影响,为该方法的实际应用提供了建议^[79]。不仅如此,艾里脉冲的传播还可以通过色散的工程化设计来得到调控^[103],或是通过频谱振幅的调制来实现可控的峰值功率调节^[104]。事实上,关于艾里脉冲线性传播特性的研究工作很多,这里就不一一介绍了。

4.3 艾里脉冲的非线性传播特性

艾里脉冲在非线形传播时,其主峰的瞬时功率随传播距离发生线性平移,在克尔非线性的作用下,这一特点反映到频谱上。正常色散和反常色散条件下艾里脉冲的频谱分别集中在单个和两个峰上,并且整形后的频谱特征在传播过程中线性频移,从而映射到传播距离上,可以用来实现可控的波长转换功能^[80]。相比于传统滤波器的线性滤波过程,该方法的优越性在于可以将不需要的频谱能量通过非线性转移到目标波长上,达到了节能的目的;另一方面,在长度固定的光纤中,还可以通过简单地对艾里脉冲的三次频谱相位结构施加偏移量来实现波长选择,因而在光信号处理、脉冲整形等方面具有潜在的应用。在反常色散下,若入射功率过强,则会从艾里脉冲里发射出一个或数个孤子,而剩余的能量继续保持加速的特性^[77]。

在只考虑二阶色散和克尔非线性的情况下,尽管艾里脉冲具有不对称的形貌,时间反演的艾里脉冲的传播特性也仅仅是时间上反演了,但是在非对称响应(比如拉曼效应、自陡效应等)的作用下,形貌非对称的艾里脉冲表现出一些新的传播特性^[105-107]。这一点对于空域艾里光束在非对称的非线性效应或边界条件上也已得到反映。与 Morandotti 课题组合作,最近本课题组研究了时间反演的两个艾里脉冲的非线性传输^[39],并通过相位调制和功率调节成功实现拉曼频率调谐和多色拉曼孤子(图 6)。在非线形较强时,由于艾里脉冲的不对称性,在延时的拉曼散射的作用下,时间反演的两个艾里脉冲在激发拉曼孤子的数目上表现出不同。不仅如此,通过改变相关参数可以实现出射波长的调控。该方法与传统利用高斯脉冲的方法相比更有效可行。利用此法还能实现多个拉曼孤子,而且这些孤子间的波长差也可以得到有效的调节^[80]。艾里脉冲还能通过非线性相互作用来影响另一孤子脉冲的传输,通过改变艾里脉冲与孤子的时间间隔,相互作用可为相干和非相干^[106]。如果条件合适,弱的艾里脉冲甚至可以用来调控强的孤子脉冲的传播^[81]。

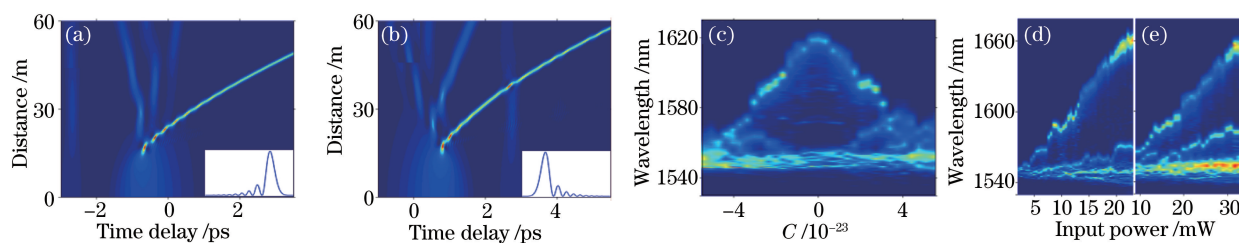


图 6 (a)~(b)时间反演的两个艾里脉冲的非线性传输,插图为相关的入射脉冲形状;(c)通过对三次相位施加偏移量实现的频率调谐;(d)~(e)通过功率调节实现的多色拉曼孤子^[39]

Fig. 6 (a)-(b) Nonlinear propagation of two time-inversed Airy pulses, and the insets show the shapes of corresponding input pulse; (c) frequency shift controlled by applying an offset to the cubic phase; (d)-(e) power-dependent control of multicolor Raman soliton generation^[39]

4.4 艾里脉冲产生超连续谱

另外一个相关的课题是基于艾里脉冲的超连续谱的产生。超连续谱在相干断层扫描、荧光显微、光学频率测量、光纤通信等方面具有重要的应用。频谱的极度展宽是在色散、瞬时以及延时非线性的共同作用下产生的。光子晶体光纤由于其非线性和色散可通过光纤结构的设计来调控,因而成为产生超连续谱的一个重要平台^[108]。尽管人们利用形貌对称的脉冲(如高斯或双曲正割脉冲)作为入射对超连续谱的产生进行了广泛的研究,然而利用特殊形貌的脉冲来控制和优化超连续谱的研究却屈指可数。美国亚利桑那大学 Moloney 课题组^[22]首先研究了艾里脉冲在产生超连续谱中的特点。对于传统的对称脉冲,一旦其能量转移到一个或多个基本孤子后,超连续谱的进一步展宽便会止步,而剩余的能量转化为色散波。而对于艾里脉冲,这一过程会因为脉冲的自愈特性而发生变化。艾里脉冲的主峰通常占据大部分能量,在超连续谱的产生过程中起主要作用。即使主峰在传播过程中的某一位置因为孤子和色散波被耗散,然而由于艾里脉冲自修复的特性,在接下来的传播过程中,超连续谱的产生还会继续。由于自修复前后的主峰具有不同的群速度,频谱特征会形成一定的错位。因此,以艾里脉冲或者其他具有自愈特性的脉冲为载体,通过线性的光学手段就可调控超连续谱的产生。

5 自加速光的新奇应用

自加速光束的无衍射、自修复和自弯曲等特性使其在不同领域都具有很多特殊的应用。总结近年来的研究成果发现,自加速光束在操控微纳颗粒、操控金属表面等离子激元、操控等离子体轨道和大气放电、高精度显微成像等诸多方面均具有良好的应用前景。

5.1 自加速光在操控微粒方面的应用

艾里光束最早也是最令人兴奋的应用之一是对微粒的操控和运输。由于具有自弯曲的动量和即使是在湍流和散射的环境中也能自修复的能力,艾里光束为光捕获和光操控领域提供了新的工具和手段。事实上,艾里光束操控微粒的成功实现,不仅提高了人们对自加速光的研究兴趣,相关方法也很快被推广到细胞、表面等离子激元和电子的操控等方面。下面仅举几个例子。

2008年,Dholakia 课题组^[14]意识到艾里光束的自加速特性结合光对颗粒的作用力(梯度力和辐射压力)可以用来光学推动微粒沿着抛物线轨迹运动并按照目标来重新分布。由于二维艾里光束具有一个主瓣和一系列强度衰减的副瓣,光场产生的梯度力会将微粒拖向主瓣——就像在光镊中一样,同时辐射压力驱使微粒沿光传输方向弯曲行驶。这样,艾里光束就像“吹雪机”一样,能对目标微粒进行清扫继而将其送至其他地方,如图 7(a)所示。由于具有无衍射和自修复特性,艾里光束对目标微粒的清扫程度和效率得到了显著提高。在随后的实验中,该课题组还利用艾里光束在不同微型器皿中重新排布聚苯乙烯微粒乃至红细胞^[109]。

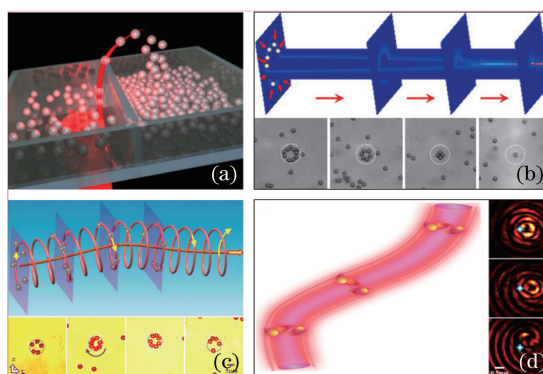


图 7 自加速光在微纳颗粒操控上的应用。(a)基于二维艾里光束的微粒清扫^[109]; (b)利用急剧自会聚光束进行的光学捕获,上面一行显示粒子沿着自会聚光束的输运情况,下面一行显示微粒在纵向不同位置的捕获截面图^[15]; (c)利用类贝塞尔型的自加速涡旋光束对微粒的三维操控^[18]; (d)利用螺旋桨型自加速光束驱动微粒做盘旋运动^[71]

Fig. 7 Applications of particle manipulation by self-accelerating beams. (a) Particle cleaning via a two-dimensional Airy beam^[109]; (b) optical trapping via an abruptly auto-focusing beam, where the 1st row shows the particles delivery along the beam propagation direction and, the 2nd row shows snapshots of particle manipulation at different longitudinal positions^[15]; (c) three-dimensional particle manipulation via a Bessel-like self-accelerating vortex beam^[18]; (d) spiral movement of particles actuated by a propelling self-accelerating beam^[71]

除了利用二维艾里光束外,其他类型的自加速光也被用于光捕获和光操控。一个典型的例子就是第 3 节讨论的急剧自会聚自加速光束^[41](图 3)。本课题组利用该光束实现了对聚苯乙烯微粒的捕获和运输^[15],如图 7(b)所示,微粒首先被最亮的环所捕获,然后自会聚传输。从不同的纵向位置的截面图来看,当圆环的半径逐渐减小,能够被捕获到圆环光束上的微粒也逐渐减少。在聚焦点位置,当该光束突然收缩成一个亮点,只有一个微粒能够被完全捕获。这些结果表明急剧自会聚自加速光束可以作为引导微粒的锥形通道。

另外一个例子是上面提到的类贝塞尔型的自加速光束^[68-69]。通过对相位的智能调控,这类光束可以设计成既具有自加速光无衍射、自修复和自弯曲的特性,又能携带涡旋光的轨道角动量^[18]。与 Efremidis 合作,本课题组实验演示了这类奇异光束,发现它们可以沿任意设定的轨迹传输,同时能够保留其轨道角动量和像甜甜圈那样基本圆对称的光束主瓣。本课题组不仅实验证明了这类贝塞尔型的奇异光束可以沿着抛物线、双曲线甚至三维的螺旋轨迹传输,还利用该奇异光束实现了对微粒的三维操控;就像带电粒子能在电磁场作用下做螺旋运动一样,在光梯度力、辐射压力和轨道角动量的联合作用下,聚苯乙烯颗粒也能在三维空间中做盘旋运动,如图 7(c)所示。

通过对贝塞尔光场的适当相位调制和傅里叶变换,不仅可以产生急剧自会聚自加速光束,还能产生形状优雅的瓶颈光束^[43],以形成一个稳定的光学势阱来捕获空气中悬浮的颗粒,并可将捕获的颗粒从一个玻璃容器运输到另外一个中^[94]。利用多个一维艾里光束可以构建出“瓶子串”光束,并可以用来一次捕获多个吸收性微粒^[45]。此外,基于对叠栅条纹的调制,本课题组还实现了光学螺旋浆光束^[110],并和类贝塞尔自加速光束结合起来,对微米颗粒实施三维空间的驱动和操控,如图 7(d)所示^[71]。

值得一提的是,在光捕获和操控的许多应用中,需要利用第 3 节中提到过的非傍轴自加速光束来实现大的弯曲角度。事实上,Schley 等^[17]最近已经在流体中利用防损耗的自加速光实现了非傍轴的微粒操控,使粒子有陡峭角度转向。而在透明的介质中,该类防损耗非傍轴自加速光束的强度呈指数增长,这将在微纳操控和非线性光学方面带来新的应用。

总之,特殊设计的自加速光束在微纳操控中发挥着无以替代的作用,在生物科学、医疗、大气科学和微纳结构加工等领域都具有十分诱人的应用前景。

5.2 自加速光在操控金属表面等离子体方面的应用

表面等离子体是金属与电介质界面的自由电子和光子耦合强局域集体振荡形成的准粒子,在亚波长光学、光学储存与成像、微纳和生物光子学等方面都有广泛应用^[111]。利用艾里光束激发的表面等离子体可以表现出许多与艾里光相似的优异性质,包括无衍射、沿着抛物线轨迹自弯曲和通过障碍物后的自修复特性。艾里型表面等离子体最初由 Christodoulides 等^[23]在 2010 年提出,他们从理论上证明了艾里表面等离子体可以被一系列不同光束尺寸和波长的光来激发产生。因为在自由空间的波矢和表面等离子体波的波矢存在失配等问题,实验上激发和观察这样的艾里表面等离子体具有一定的挑战,比如,怎样采用一定的耦合技术来补偿波矢失配。然而,在理论预言出炉仅仅一年之后,国际上三个独立的研究课题组就利用不同的激发方法成功地观察到这种艾里表面等离子体^[24-26]。Zhang 等^[24]利用图 8(a)所示的实验装置直接将自由空间的一维艾里光束通过一个光束耦合器耦合到金属表面,并论证了表面等离子体可以在金属界面沿曲线传导而不需要利用任何物理波导结构。在他们的实验中,艾里光入射到一个纳米周期的金属光栅,然后激发对应的艾里表面等离子体,再通过辐射泄漏显微镜技术来直接观察。他们还发现艾里表面等离子体的弹道轨迹和峰值光强的位置可以像艾里光束那样被实时调控^[13],如图 8(b)~(e)所示。Li 等^[25]利用一个精心设计的纳米阵列结构(具有啁啾分布间隔的纳米腔阵列),也观察到可以沿着空气和金属的界面传播的艾里型表面等离子体。在另外一个独立工作中,Minovich 等^[26]利用特殊设计的具有艾里函数相位分布的耦合光栅,也观察到艾里表面等离子体并研究了其独特性和自修复特性。

事实上,之后有大量的研究工作都集中在自加速表面等离子体上,包括利用线性的势场或梯度场来产生

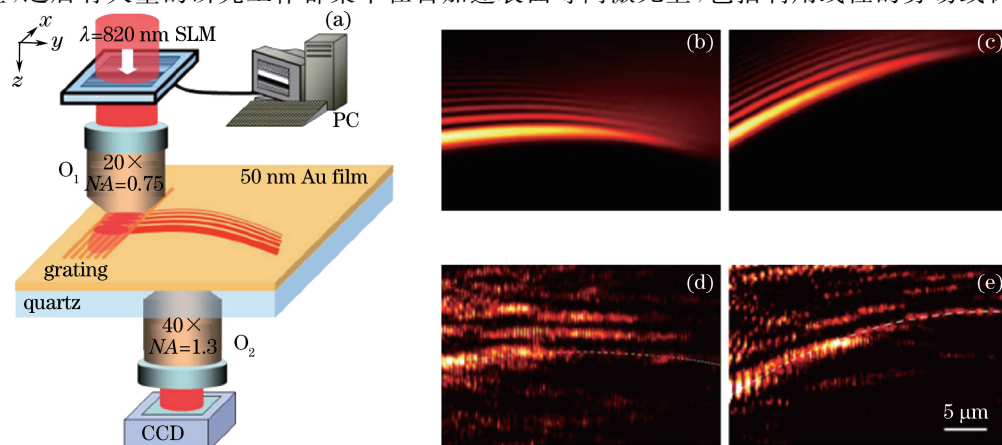


图 8 (a)艾里型表面等离子体的实验产生装置;(b)~(c)数值模拟不同角度入射的艾里光束;

(d)~(e)实验观测到与(b)~(c)相应的艾里等离子体^[24]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of experimental setup for generating Airy surface plasmons; (b)-(c) numerical simulation for Airy beams propagating at different input angles; (d)-(e) experimentally observed Airy plasmons corresponding to figure (b)-(c), respectively^[24]

和调控艾里等离激元的传输轨迹、利用金属薄膜表面两个艾里等离激元的干涉来产生和控制等离激元的聚焦“热点”、实现基于全息光束整形的任意形貌的表面等离基元、实现高度局域的 cosine-Gauss 等离激元束和准直等离激元束、实现非傍轴条件下自弯曲的等离激元束以及最近利用表面超材料对相位和振幅的调制来实现的等离激元束等等^[27-30,112-117], 其中有些工作已经在一些综述论文中作了详细的讨论^[30]。各种自加速金属表面等离激元的产生意味着金属表面光子学操作技术的进步, 为光场调控在芯片表面进行微纳操控和光子学电路奠定了实验基础。

5.3 自加速光操控等离子体弯曲通道和大气放电

自加速光的另一个应用是产生激光诱导的弯曲等离子体通道^[19]。激光产生等离子体通道在遥感光谱、太赫兹波、超短脉冲压缩和大气科学中都具有重要的应用意义。通常情况下, 该通道采用高斯型光束在气体等介质中产生, 因此其为直线对称型。这样, 不同位置的锥形辐射在观测面相互重叠在一起, 不易区分, 难以对特定切面的等离子体特性进行观察和检测。Polynkin 等在实验上首次演示了利用艾里光束在空气中可以产生出弯曲的等离子体通道[图 9(a)], 由于出射角度不同, 该通道在不同切面的锥形辐射在观测面彼此错开, 从而方便了对等离子体的观测和研究。

最近, 自加速光在大气放电的控制方面也发挥了独特的作用。如果空气中的电场强度超过一定的数值, 空气将会被击穿从而产生放电现象。但是, 通常放电的轨迹是随机不可预测的, 如果能将放电产生的电子流进行可控的路径导引以及实现特殊目标物的放电控制, 将会在闪电保护和高压电容放电等方面有很多应用价值, 也会对电子干扰、电焊和加工方面的发展具有积极的意义。本课题组和 Morandotti 为主的多个课题组合作, 成功地演示了自加速艾里光束对大气放电的操控^[40]。通过对光场相位的调控, 实现了沿着抛物线的轨迹放电, 并利用自加速光束的自修复特性, 演示了绕过障碍物的放电过程[图 9(b)], 这是利用传统的高斯光束无法实现的。并且实验上发现利用自加速光诱导的放电轨迹比高斯光束更加平滑, 这从侧面反映出自加速光抗干扰的能力更强。由于该类光束的轨迹可通过设计不同的相位来调节, 因而可以实现沿预设的轨迹来放电, 比如, 本课题组实现了沿“S”形路径的放电。该研究还利用传统的贝塞尔光束引导了光滑轨迹的放电过程。通过 3.3 节的介绍可知, 贝塞尔光束也可沿弯曲轨迹传输, 因而为今后利用贝塞尔光束实现放电轨迹的调控提供了契机。

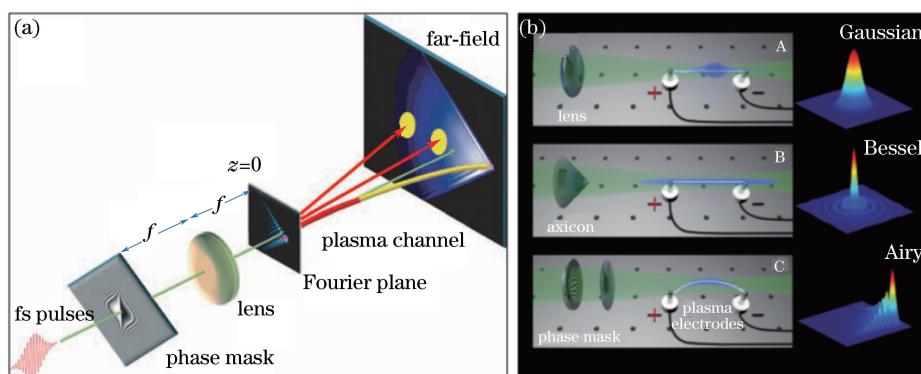


图 9 (a) 利用自加速光实现等离子体弯曲通道^[19]; (b) 利用自加速光操控大气放电, 图中展示了基于高斯光束、贝塞尔光束和艾里光束的不同放电轨迹^[40]

Fig. 9 (a) Curved plasma channel generated by a self-accelerating beam^[19]; (b) laser-assisted guiding of electric discharge by a self-accelerating beam, where different discharge paths associated with Gaussian, Bessel and Airy beams are illustrated for comparison^[40]

5.4 自加速光在其他领域的应用

除了以上几个领域, 自加速光束还在其他许多领域有所应用, 比如用于产生艾里光束激光器、高精度成像、光片照明显微成像和图像传输等等。

在艾里光束激光器方面, 意大利科学家 Longhi^[118]首先在理论上讨论了艾里微芯片激光器的实现方法。理论结果表明, 在合适的抽运条件下, 小角度倾斜的微型平面腔可以输出艾里光束。以色列科学家 Porat 等^[119]采用非周期性的衍射光栅(相当于产生艾里光束实验装置中的相位模板)取代激光腔的输出镜实现了

艾里光束激光器。这样,激光器腔就可以直接输出艾里光束,给相关应用带来方便。在超高分辨的荧光成像方面,哈佛大学 Jia 等^[37]引入了基于艾里光束的自弯曲点扩展函数(PSF),实现了三维的超分辨荧光成像[图 10(a)]。无衍射和横向自弯曲的点扩展函数非常适合在很长的成像深度上精确地实现荧光分子的三维局域。利用这种方法,他们在 $3\ \mu\text{m}$ 的成像深度上实现了具有 $10\sim 15\ \text{nm}$ 的超高分辨率成像。在显微成像方面,艾里光束的非对称横向光强分布对片光照明显微技术具有独特的应用。英国圣安德鲁大学 Vettenburg 等^[38]利用艾里光束实现了高对比度和大于 10 倍的视场分辨率的片光照明显微技术[图 10(b)]。在图像传输方面,本课题组基于艾里光束提出了一种新的方案——将图像的信息加载到艾里光束的空间频谱上。本课题组的实验和数值模拟发现,即使艾里光束在传输的过程中遇到障碍物,或是经历了无序散射介质的干扰,加载的图像信息相较于传统的高斯光束仍具有很好的保真度^[36]。这些应用激动人心,也必将推动自加速光及整个光场调控领域的加速发展。

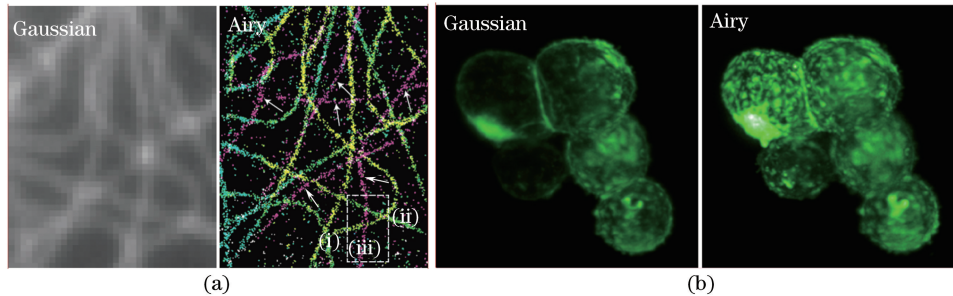


图 10 (a)利用高斯点扩展函数和艾里自弯曲点扩展函数对微管实施的随机光学重建显微成像^[37];
(b)利用高斯光和艾里光对肾腺癌细胞簇实施片光成像^[38]

Fig. 10 (a) Stochastic optical reconstruction microscopy imaging of microtubules using the standard Gaussian PSF and Airy-based self-bending PSF^[37]; (b) light sheet imaging of a renal adenocarcinoma cell cluster using the Gaussian beam and the Airy beam^[38]

6 国内在自加速光领域的研究概述

国内有很多课题组对自加速光的研究做了大量工作,这里很难全面列举。除了上文已提及的工作,下面再简单概述一下,遗漏之处敬请包涵。

南京大学除了 Li 等^[25,116,120-121]研究了自加速光在不同条件下激发表面等离子激元 Liu 课题组研究了在波导中自加速光带来的与广义相对论效应有关的现象^[89]外,还有很多关于自加速光调控和自加速声波方面的研究工作^[84,122-125]。苏州大学 Cai 等除了对基于相干度调控的 Gaussian-Schell 模光束进行了深入研究外^[95],在与自加速光相关的光束整形方面也做了很多工作^[73,126-127]。西北工业大学 Zhao 等^[71,128-129]研究了与矢量光场和涡旋光场有关的急剧自会聚自加速光束以及艾里光束在光子晶格中的布洛赫振荡。西安交通大学 Zhang 等^[130-133]研究了非线性自加速光以及不同势场条件下的自加速光的传输特性。华东师范大学 Huang 课题组主要研究了如何在相干原子系统里面利用电磁感应透明效应来调控艾里光束^[134-136]。华南师范大学 Deng 等^[137-139]主要研究了多种与艾里函数关联的高斯光波包。浙江大学 Zhao 课题组研究了艾里光及涡旋艾里光在手性材料中的传播特性与应用^[140-141],Lu 课题组则研究了急剧自会聚自加速光束捕获瑞利散射粒子时产生的辐射力^[142-143]。浙江农林大学 Chu 等^[144-150]研究了艾里光在不同环境(如湍流)中的传输和自修复以及在克尔非线性介质中的自聚焦和崩塌现象。深圳大学 Yuan 课题组通过设计各种特殊的相位模板和二维超材料人工结构产生类艾里光束和弯曲表面等离子激元^[151-154],Zhong 课题组研究了时域艾里脉冲的稳定性和非线性传输^[152-154]。西安光机所 Yao 课题组也设计了多种无衍射自加速光场和三维自加速光阵列^[155-156]。天津大学 Sun 课题组研究了携带涡旋光相位的艾里光束的传输动力学行为^[157-158]。南开大学 Tian 课题组在利用艾里光束对真空电子加速和对微纳颗粒产生作用力方面都有研究^[32,159-160]。另外,国内还有很多其他科研单位的课题组也都在自加速光研究的竞技场上做出了贡献^[161-169],这里不一一罗列。

总的来说,迄今为止,国内已经有很多出色的科研课题组对自加速光的传播特性和调控应用进行了诸多

研究。有理由相信,在未来几年还会有更多的课题组投入其中,也将会有更多的新发现问世。

7 总 结

本文回顾了自加速光束的理论、实验和应用研究进展,阐述了艾里光束的实验产生和相关应用机理,评述了自加速光束在时域和空域的推广以及在诸多领域中的应用价值和意义。如上所述,艾里光束以及其他推广的自加速光束在多个领域还具有更大的发展前景。未来研究艾里光束在长距离、大角度和复杂环境中的应用具有重要意义。最激动人心的是科幻中的自回旋光将来可能会成为现实。另外,艾里波包和自加速光束并不仅仅局限于光学领域,它们已在微波、声波、水波、电子波、等离子波和物质波等多个领域得到重视,在这些领域具有巨大的发展潜力和应用前景。

致谢 衷心感谢 Zhang P, Zhang X, Christodoulides D N, Efremidis N K, Morandott R 等人的合作和对本论文的帮助。

参 考 文 献

- 1 Stegeman G I, Segev M. Optical spatial solitons and their interactions: universality and diversity[J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1518-1523.
- 2 Chen Zhigang. Fascination behavior of optical spatial solitons[J]. *Physics*, 2001, 30(12): 752-756.
陈志刚. 奇妙的空间光孤子[J]. *物理*, 2001, 30(12): 752-756.
- 3 Chen Z G, Segev M, Christodoulides D N. Optical spatial solitons: historical overview and recent advances[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(8): 086401.
- 4 Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981.
- 5 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physics Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- 6 Hu Y, Siviloglou G A, Zhang P, *et al.* Self-accelerating Airy beams: generation, control, and applications[J]. *Springer Series in Optical Sciences*, 2012, 170: 1-46.
- 7 Zhang Ze, Hu Yi, Zhao Juanying, *et al.* Research progress and application prospect of Airy beams[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(34): 3513-3520.
张 泽, 胡 毅, 赵娟莹, 等. 艾里光束研究进展与应用前景[J]. *科学通报*, 2013, 58(34): 3513-3520.
- 8 Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. *American Journal of Physics*, 1979, 47(3): 264-267.
- 9 Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 651-654.
- 10 Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physics Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- 11 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 207-209.
- 12 Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12880-12891.
- 13 Hu Y, Zhang P, Lou C, *et al.* Optimal control of the ballistic motion of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2260-2262.
- 14 Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 675-678.
- 15 Zhang P, Prakash J, Zhang Z, *et al.* Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2883-2885.
- 16 Zheng Z, Zhang B F, Chen H, *et al.* Optical trapping with focused Airy beams[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(1): 43-49.
- 17 Schley R, Kaminer I, Greenfield E, *et al.* Loss-proof self-accelerating beams and their use in non-paraxial manipulation of particles' trajectories[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(5): 5189.
- 18 Zhao J, Chremmos I D, Song D, *et al.* Curved singular beams for three-dimensional particle manipulation[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12086.
- 19 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J].

- Science, 2009, 324(5924): 229-232.
- 20 Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D G, *et al.* Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes [J]. Physics Review Letters, 2010, 105(25): 253901.
- 21 Chong A, Renninger W H, Christodoulides D N, *et al.* Airy-Bessel wave packets as versatile linear light bullets [J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 103-106.
- 22 Ament C, Polynkin P, Moloney J V. Supercontinuum generation with femtosecond self-healing Airy pulses [J]. Physics Review Letters, 2011, 107(24): 243901.
- 23 Salandrino A, Christodoulides D N. Airy plasmon: A nondiffracting surface wave [J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 2082-2084.
- 24 Zhang P, Wang S, Liu Y, *et al.* Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories [J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3191-3193.
- 25 Li L, Li T, Wang S M, *et al.* Plasmonic Airy beam generated by in-plane diffraction [J]. Physics Review Letters, 2011, 107(12): 126804.
- 26 Minovich A, Klein A E, Janunts N, *et al.* Generation and near-field imaging of Airy surface plasmons [J]. Physics Review Letters, 2011, 107(11): 116802.
- 27 Liu W, Neshev D N, Shadrivov I V, *et al.* Plasmonic Airy beam manipulation in linear optical potentials [J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1164-1166.
- 28 Epstein I, Arie A. Arbitrary bending plasmonic light waves [J]. Physics Review Letters, 2014, 112(2): 023903.
- 29 Libster-Hershko A, Epstein I, Arie A. Rapidly accelerating Mathieu and Weber surface plasmon beams [J]. Physics Review Letters, 2014, 113(12): 123902.
- 30 Minovich A E, Klein A E, Neshev D N, *et al.* Airy plasmons: non-diffracting optical surface waves [J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(2): 221-232.
- 31 Voloch-Bloch N, Lereah Y, Lilach Y, *et al.* Generation of electron Airy beams [J]. Nature, 2013, 494(7437): 331-335.
- 32 Li J X, Fan X L, Zang W P, *et al.* Vacuum electron acceleration driven by two crossed Airy beams [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 648-650.
- 33 Mathis A, Courvoisier F, Froehly L, *et al.* Micromachining along a curve: femtosecond laser micromachining of curved profiles in diamond and silicon using accelerating beams [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(7): 071110.
- 34 Rose P, Diebel F, Boguslawski M, *et al.* Airy beam induced optical routing [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(10): 101101.
- 35 Wiersma N, Marsal N, Sciamanna M, *et al.* All-optical interconnects using Airy beams [J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5997-6000.
- 36 Liang Y, Hu Y, Song D, *et al.* Image signal transmission with Airy beams [J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5686-5689.
- 37 Jia S, Vaughan J C, Zhuang X. Isotropic three-dimensional super-resolution imaging with a self-bending point spread function [J]. Nature Photonics, 2014, 8(4): 302-306.
- 38 Vettenburg T, Dalgarno H I C, Nylk J, *et al.* Light-sheet microscopy using an Airy beam [J]. Nature Methods, 2014, 11(5): 541-544.
- 39 Hu Y, Tehranchi A, Wabnitz S, *et al.* Improved intrapulse Raman scattering control via asymmetric Airy pulses [J]. Physics Review Letters, 2015, 114(7): 073901.
- 40 Clerici M, Hu Y, L'assonde P, *et al.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects [J]. Science Advances, 2015, 1(5): e1400111.
- 41 Efremidis N K, Christodoulides D N. Abruptly autofocusing waves [J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 4045-4047.
- 42 Papazoglou D G, Efremidis N K, Christodoulides D N, *et al.* Observation of abruptly autofocusing waves [J]. Optics Letters, 2011, 36(10): 1842-1844.
- 43 Chremmos I, Zhang P, Prakash J, *et al.* Fourier-space generation of abruptly autofocusing beams and optical bottle beams [J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3675-3677.
- 44 Chremmos I D, Chen Z, Christodoulides D N, *et al.* Abruptly autofocusing and autodefocusing optical beams with arbitrary caustics [J]. Physical Review A, 2012, 85(2): 023828.
- 45 Zhang Z, Zhang P, Mills M, *et al.* Trapping aerosols with optical bottle arrays generated through a superposition of multiple Airy beams [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 033502.
- 46 Ellenbogen T, Voloch-Bloch N, Ganany-Padowicz A, *et al.* Nonlinear generation and manipulation of Airy beams [J].

- Nature Photonics, 2009, 3(7): 395-398.
- 47 Jia S, Lee J, Fleischer J W, *et al.* Diffusion-trapped Airy beams in photorefractive media[J]. Physics Review Letters, 2010, 104(25): 253904.
- 48 Chen R P, Yin C F, Chu X X, *et al.* Effect of Kerr nonlinearity on an Airy beam[J]. Physical Review A, 2010, 82(4): 043832.
- 49 Hu Y, Huang S, Zhang P, *et al.* Persistence and breakdown of Airy beams driven by an initial nonlinearity[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3952-3954.
- 50 Kaminer I, Segev M, Christodoulides D N. Self-accelerating self-trapped optical beams[J]. Physics Review Letters, 2011, 106(21): 213903.
- 51 Lotti A, Faccio D, Couairon A, *et al.* Stationary nonlinear Airy beams[J]. Physical Review A, 2011, 84(2): 021807.
- 52 Dolev I, Kaminer I, Shapira A, *et al.* Experimental observation of self-accelerating beams in quadratic nonlinear media [J]. Physics Review Letters, 2012, 108(11): 113903.
- 53 Hu Y, Sun Z, Bongiovanni D, *et al.* Reshaping the trajectory and spectrum of nonlinear Airy beams[J]. Optics Letters, 2012, 37(15): 3201-3203.
- 54 Kaminer I, Bekenstein R, Nemirovsky J, *et al.* Nondiffracting accelerating wave packets of Maxwell's equations[J]. Physics Review Letters, 2012, 108(16): 163901.
- 55 Chen Z. Viewpoint: light bends itself into an arc[J]. Physics, 2012, 5: 44.
- 56 Zhang P, Hu Y, Cannan D, *et al.* Generation of linear and nonlinear nonparaxial accelerating beams[J]. Optics Letters, 2012, 37(14): 2820-2822.
- 57 Courvoisier F, Mathis A, Froehly L, *et al.* Sending femtosecond pulses in circles: highly nonparaxial accelerating beams [J]. Optics Letters, 2012, 37(10): 1736-1738.
- 58 Novitsky A V, Novitsky D V. Nonparaxial Airy beams: role of evanescent waves[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3430-3432.
- 59 Zhang P, Hu Y, Li T, *et al.* Nonparaxial Mathieu and Weber accelerating beams[J]. Physics Review Letters, 2012, 109(19): 193901.
- 60 Aleahmad P, Miri M A, Mills M S, *et al.* Fully vectorial accelerating diffraction-free Helmholtz beams[J]. Physics Review Letters, 2012, 109(20): 203902.
- 61 Miguel A B, Rodríguez-Lara B M. Nondiffracting accelerating waves: Weber waves and parabolic momentum[J]. New Journal of Physics, 2013, 15(1): 013054.
- 62 Efremidis N K. Airy trajectory engineering in dynamic linear index potentials[J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 3006-3008.
- 63 Ye Z, Liu S, Lou C, *et al.* Acceleration control of Airy beams with optically induced refractive-index gradient[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3230-3232.
- 64 Efremidis N K. Accelerating beam propagation in refractive-index potentials[J]. Physical Review A, 2014, 89(2): 023841.
- 65 El-Ganainy R, Makris K G, Miri M A, *et al.* Discrete beam acceleration in uniform waveguide arrays[J]. Physical Review A, 2011, 84(2): 023842.
- 66 Qi X, Makris K G, El-Ganainy R, *et al.* Observation of accelerating Wannier-Stark beams in optically induced photonic lattices[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1065-1068.
- 67 Makris K G, Kaminer I, El-Ganainy R, *et al.* Accelerating diffraction-free beams in photonic lattices [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2129-2132.
- 68 Chremmos I D, Chen Z, Christodoulides D N, *et al.* Bessel-like optical beams with arbitrary trajectories[J]. Optics Letters, 2012, 37(23): 5003-5005.
- 69 Zhao J, Zhang P, Deng D, *et al.* Observation of self-accelerating Bessel-like optical beams along arbitrary trajectories [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 498-500.
- 70 Chremmos I D, Efremidis N K. Nonparaxial accelerating Bessel-like beams[J]. Physical Review A, 2013, 88(6): 063816.
- 71 Zhao J, Chremmos I D, Zhang Z, *et al.* Specially shaped Bessel-like self-accelerating beams along predesigned trajectories[J]. Science Bulletin, 2015, 60(13): 1157-1169.
- 72 Liu S, Wang M, Li P, *et al.* Abrupt polarization transition of vector autofocusing Airy beams[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2416-2418.

- 73 Wang F, Zhao C, Dong Y, *et al.* Generation and tight-focusing properties of cylindrical vector circular Airy beams[J]. Applied Physics B, 2014, 117(3): 905-913.
- 74 Zhou J, Liu Y, Ke Y, *et al.* Generation of Airy vortex and Airy vector beams based on the modulation of dynamic and geometric phases[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3193-3196.
- 75 Lumer Y, Liang Y, Schley R, *et al.* Incoherent self-accelerating beams[J]. Optica, 2015, 2(10): 886-892.
- 76 Besieris I M, Shaarawi A M. Accelerating Airy wave packets in the presence of quadratic and cubic dispersion[J]. Physical Review E, 2008, 78(4): 046605.
- 77 Fattal Y, Rudnick A, Marom D M. Soliton shedding from Airy pulses in Kerr media[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17298-17307.
- 78 Kammer I, Lumer Y, Segev M, *et al.* Causality effects on accelerating light pulses[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 23132-23139.
- 79 Driben R, Hu Y, Chen Z, *et al.* Inversion and tight focusing of Airy pulses under the action of third-order dispersion[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2499-2501.
- 80 Hu Y, Li M, Bongiovanni D, *et al.* Spectrum to distance mapping via nonlinear Airy pulses[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 380-382.
- 81 Cai W, Mills M S, Christodoulides D N, *et al.* Soliton manipulation using Airy pulses[J]. Optics Communications, 2014, 316: 127-131.
- 82 Fu S, Tsur Y, Zhou J, *et al.* Propagation dynamics of Airy water-wave pulses[J]. Physics Review Letters, 2015, 115(3): 034501.
- 83 Zhang P, Li T, Zhu J, *et al.* Generation of acoustic self-bending and bottle beams by phase engineering[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4316.
- 84 Zhao S, Hu Y, Lu J, *et al.* Delivering sound energy along an arbitrary convex trajectory[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6628.
- 85 Bar-Ziv U, Postan A, Segev M. Observation of shape-preserving accelerating underwater acoustic beams[J]. Physical Review B, 2015, 92(10): 100301.
- 86 Li Y, Assouar M B. Three-dimensional collimated self-accelerating beam through acoustic metascreen[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17612.
- 87 Efremidis N K, Paltoglou V, Von Klitzing W. Accelerating and abruptly autofocusing matter waves[J]. Physical Review A, 2013, 87(4): 043637.
- 88 Kammer I, Nemirovsky J, Rechtsman M, *et al.* Self-accelerating Dirac particles and prolonging the lifetime of relativistic fermions[J]. Nature Physics, 2015, 11(3): 261-267.
- 89 Sheng C, Bekenstein R, Liu H, *et al.* Wavefront shaping through emulated curved space in waveguide settings[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10747.
- 90 Gu Y, Gbur G. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3456-3458.
- 91 Greenberger D M. Comment on "Nonspreading wave packets"[J]. American Journal of Physics, 1980, 48(3): 256.
- 92 Allen L, Padgett M J, Babiker M. IVthe orbital angular momentum of light[J]. Progress in Optics, 1999, 39(1-3): 291-372.
- 93 Zhang P, Zhang Z, Prakash J, *et al.* Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by moiré techniques[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1491-1493.
- 94 Zhang Z, Cannan D, Liu J, *et al.* Observation of trapping and transporting air-borne absorbing particles with a single optical beam[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16212-16217.
- 95 Liu X, Wang F, Wei C, *et al.* Experimental study of turbulence-induced beam wander and deformation of a partially coherent beam[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3336-3339.
- 96 Morris J E, Mazilu M, Baumgartl J, *et al.* Propagation characteristics of Airy beams: dependence upon spatial coherence and wavelength[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 13236-13245.
- 97 Dong Y, Zhang L, Luo J, *et al.* Degree of paraxiality of coherent and partially coherent Airy beams[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49(7): 1-5.
- 98 Eyyuboğlu H T, Sermetli E. Partially coherent Airy beam and its propagation in turbulent media[J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 451-457.
- 99 Cui Shengwei, Chen Ziyang, Hu Kelei, *et al.* Investigation on partially coherent Airy beams and their propagation[J].

- Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094205.
- 崔省伟, 陈子阳, 胡克磊, 等. 部分相干 Airy 光束及其传输的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094205.
- 100 Silberberg Y. Collapse of optical pulses[J]. Optics Letters, 1990, 15(22): 1282-1284.
- 101 Minardi S, Eilenberger F, Kartashov Y V, *et al.* Three-dimensional light bullets in arrays of waveguides[J]. Physics Review Letters, 2010, 105(26): 263901.
- 102 Panagiotopoulos P, Papazoglou D G, Couairon A, *et al.* Sharply autofocused ring-Airy beams transforming into nonlinear intense light bullets[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2622.
- 103 Wang S, Fan D, Bai X, *et al.* Propagation dynamics of Airy pulses in optical fibers with periodic dispersion modulation[J]. Physical Review A, 2014, 89(2): 023802.
- 104 Preciado M A. Linear dispersive pre-defined peak amplitude modulation of spectrally modulated Airy-based pulses[J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13394-13401.
- 105 Zhang L, Zhang J, Chen Y, *et al.* Dynamic propagation of finite-energy Airy pulses in the presence of higher-order effects[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2014, 31(4): 889-897.
- 106 Rudnick A, Marom D M. Airy-soliton interactions in Kerr media[J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25570-25582.
- 107 Shi X, Tan C, Bai Y, *et al.* Dressed dynamics of two time-reversed shapes of Airy pulses in a relaxing nonlinear medium[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(9): 1816-1823.
- 108 Dudley J M, Genty G, Coen S. Intensity and phase dynamics of Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1135-1184.
- 109 Baumgartl J, Hannappel G M, Stevenson D J, *et al.* Optical redistribution of microparticles and cells between microwells[J]. Lab on a Chip, 2009, 9(10): 1334-1336.
- 110 Zhang P, Huang S, Hu Y, *et al.* Generation and nonlinear self-trapping of optical propelling beams[J]. Optics Letters, 2010, 35(18): 3129-3131.
- 111 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- 112 Bleckmann F, Minovich A, Frohnhaus J, *et al.* Manipulation of Airy surface plasmon beams[J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1443-1445.
- 113 Klein A E, Minovich A, Steinert M, *et al.* Controlling plasmonic hot spots by interfering Airy beams[J]. Optics Letters, 2012, 37(16): 3402-3404.
- 114 Dolev I, Epstein I, Arie A. Surface-plasmon holographic beam shaping[J]. Physics Review Letters, 2012, 109(20): 203903.
- 115 Lin J, Dellinger J, Genevet P, *et al.* Cosine-Gauss plasmon beam: a localized long-range nondiffracting surface wave[J]. Physics Review Letters, 2012, 109(9): 093904.
- 116 Li L, Li T, Wang S M, *et al.* Collimated plasmon beam: nondiffracting versus linearly focused[J]. Physics Review Letters, 2013, 110(4): 046807.
- 117 Li Z, Cheng H, Liu Z, *et al.* Plasmonic Airy beam generation by both phase and amplitude modulation with metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(8): 1230-1235.
- 118 Longhi S. Airy beams from a microchip laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 716-718.
- 119 Porat G, Dolev I, Barlev O, *et al.* Airy beam laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(20): 4119-4121.
- 120 Li L, Li T, Wang S M, *et al.* Steering plasmon beam from a point source[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5091-5093.
- 121 Tang X M, Li L, Li T, *et al.* Converting surface plasmon to spatial Airy beam by graded grating on metal surface[J]. Optics Letters, 2013, 38(10): 1733-1735.
- 122 Hong X H, Yang B, Zhang C, *et al.* Nonlinear volume holography for wave-front engineering[J]. Physics Review Letters, 2014, 113(16): 163902.
- 123 Yang B, Hong X H, Yue Y Y, *et al.* Nonlinear optical Fourier transform in an optical superlattice with "x+2" structure[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18310-18315.
- 124 Wei B Y, Chen P, Hu W, *et al.* Polarization-controllable Airy beams generated via a photoaligned director-variant liquid crystal mask[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17484.
- 125 Gao H, Gu Z M, Liang B, *et al.* Acoustic focusing by symmetrical self-bending beams with phase modulations[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(7): 073501.
- 126 Wei C, Wu D, Liang C, *et al.* Experimental verification of significant reduction of turbulence-induced scintillation in a full Poincare beam[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24331-24341.

- 127 Wen W, Lu X, Zhao C, *et al.* Propagation of Airy beam passing through the misaligned optical system with hard aperture[J]. Optics Communications, 2014, 313: 350-355.
- 128 Li P, Liu S, Peng T, *et al.* Spiral autofocusing Airy beams carrying power-exponent-phase vortices[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7598-7606.
- 129 Xiao F, Li B, Wang M, *et al.* Optical Bloch oscillations of an Airy beam in a photonic lattice with a linear transverse index gradient[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22763-22770.
- 130 Zhang Y, Belić M, Wu Z, *et al.* Soliton pair generation in the interactions of Airy and nonlinear accelerating beams[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4585-4588.
- 131 Zhang Y, Belić M R, Zheng H, *et al.* Interactions of Airy beams, nonlinear accelerating beams, and induced solitons in Kerr and saturable nonlinear media[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 7160-7171.
- 132 Zhang Y, Liu X, Belić M R, *et al.* Anharmonic propagation of two-dimensional beams carrying orbital angular momentum in a harmonic potential[J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3786-3789.
- 133 Zhang Y, Zhong H, Belić M R, *et al.* Dual accelerating Airy-Talbot recurrence effect[J]. Optics Letters, 2015, 40(24): 5742-5745.
- 134 Hang C, Huang G. Slow-light Airy wave packets and their active control via electromagnetically induced transparency [J]. Physical Review A, 2013, 88(1): 013825.
- 135 Hang C, Huang G. Guiding ultraslow weak-light bullets with Airy beams in a coherent atomic system[J]. Physical Review A, 2014, 89(1): 013821.
- 136 Hang C, Bai Z, Huang G. Storage and retrieval of Airy light wave packets in a coherent atomic system[J]. Physical Review A, 2014, 90(2): 023822.
- 137 Deng D, Guo Q. Airy complex variable function Gaussian beams[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(10): 103029.
- 138 Chen B, Chen C, Peng X, *et al.* Propagation of sharply autofocused ring Airy Gaussian vortex beams[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19288-19298.
- 139 Deng F, Deng D. Three-dimensional localized Airy-Hermite-Gaussian and Airy-Helical-Hermite-Gaussian wave packets in free space[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 5478-5486.
- 140 Zhuang F, Du X, Ye Y, *et al.* Evolution of Airy beams in a chiral medium[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1871-1873.
- 141 Liu X, Zhao D. Propagation of a vortex Airy beam in chiral medium[J]. Optics Communications, 2014, 321(12): 6-10.
- 142 Jiang Y, Huang K, Lu X. Radiation force of abruptly autofocusing Airy beams on a Rayleigh particle[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 24413-24421.
- 143 Li N, Jiang Y, Huang K, *et al.* Abruptly autofocusing property of blocked circular Airy beams[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22847-22853.
- 144 Chu X. Evolution of an Airy beam in turbulence[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2701-2703.
- 145 Chu X, Wen W. Quantitative description of the self-healing ability of a beam[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6899-6904.
- 146 Chen R P, Ooi C H R. Nonclassicality of vortex Airy beams in the Wigner representation[J]. Physical Review A, 2011, 84(4): 043846.
- 147 Chen R P, Chew K H, He S. Dynamic control of collapse in a vortex Airy beam[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1406.
- 148 Wang J, Bu J, Wang M, *et al.* Generation of high quality Airy beams with blazed micro-optical cubic phase plates[J]. Applied Optics, 2011, 50(36): 6627-6631.
- 149 Xiao K, Wei S, Min C, *et al.* Dynamic cosine-Gauss plasmonic beam through phase control[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13541-13546.
- 150 Cao R, Yang Y, Wang J, *et al.* Microfabricated continuous cubic phase plate induced Airy beams for optical manipulation with high power efficiency[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(26): 261106.
- 151 Lin J, Wang Q, Yuan G, *et al.* Mode-matching metasurfaces: coherent reconstruction and multiplexing of surface waves [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10529.
- 152 Zhang L, Zhong H. Modulation instability of finite energy Airy pulse in optical fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17107-17115.
- 153 Zhang L, Zhong H, Li Y, *et al.* Manipulation of Raman-induced frequency shift by use of asymmetric self-accelerating Airy pulse[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 22598-22607.
- 154 Zhang L, Liu K, Zhong H, *et al.* Engineering deceleration and acceleration of soliton emitted from Airy pulse with

- quadratic phase modulation in optical fibers without high-order effects[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11843.
- 155 Yan S, Li M, Yao B, *et al.* Accelerating nondiffracting beams[J]. *Physics Letters A*, 2015, 379(12-13): 983-987.
- 156 Yu X, Li R, Yan S, *et al.* Experimental demonstration of 3D accelerating beam arrays[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 3090-3095.
- 157 Dai H T, Liu Y J, Luo D, *et al.* Propagation dynamics of an optical vortex imposed on an Airy beam[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4075-4077.
- 158 Dai H T, Liu Y J, Luo D, *et al.* Propagation properties of an optical vortex carried by an Airy beam: experimental implementation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1617-1619.
- 159 Cheng H, Zang W, Zhou W, *et al.* Analysis of optical trapping and propulsion of Rayleigh particles using Airy beam[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20384-20394.
- 160 Yang Y, Zang W P, Zhao Z Y, *et al.* Optical forces on Mie particles in an Airy evanescent field[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25681-25692.
- 161 Ren Z, Dong L, Ying C, *et al.* Generation of optical accelerating regular triple-cusp beams and their topological structures[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29276-29283.
- 162 Ren Z, Wu Q, Shi Y, *et al.* Production of accelerating quad Airy beams and their optical characteristics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15154-15164.
- 163 Deng H, Yuan L. Generation of Airy-like wave with one dimensional waveguide array[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1645-1647.
- 164 Deng H, Yuan L. Airy-like beam transverse acceleration control by rainbow effect[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1089-1092.
- 165 Hu Y, Bongiovanni D, Chen Z, *et al.* Multipath multicomponent self-accelerating beams through spectrum-engineered position mapping[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(4): 043809.
- 166 Zhang L, Ye F, Cao M, *et al.* Investigating the self-healing property of an optical Airy beam[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 5066-5069.
- 167 Cao Z, Tan Q, Li X, *et al.* Nonlinear evolution of Airy-like beams generated by modulated waveguide arrays[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6601-6605.
- 168 Mao Y, Mei Z, Gu J. Propagation of Gaussian Schell-model Array beams in free space and atmospheric turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 86: 14-20.
- 169 Liu W, Lu Y, Gong L, *et al.* Dynamic enhancement of autofocusing property for symmetric Airy beam with exponential amplitude modulation[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7): 075301.