



艾里光束研究进展与应用前景

张泽^{①②③}, 胡毅^{②④}, 赵娟莹^{②③⑤}, 张鹏^{③⑥}, 陈志刚^{②③*}

① 中国科学院光电研究院, 北京 100094;

② 南开大学泰达应用物理学院, 天津 300457;

③ Department of Physics and Astronomy, San Francisco State University, San Francisco, CA 94132, USA;

④ INRS-EMT, 1650 Blvd. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, J3X 1S2, Canada;

⑤ 北京理工大学光电学院, 北京 100081;

⑥ Nanoscale Science and Engineering Center, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

* 联系人, E-mail: zgchen@nankai.edu.cn

2013-10-09 收稿, 2013-10-30 接受

国家自然科学基金(11304165)和国家重点基础研究发展计划(2013CB632703)资助

摘要 近年来, 艾里自加速光束因具有无衍射、自弯曲传输以及自愈等奇异特性引起了人们的广泛关注. 该光束的光场振幅分布遵从艾里函数, 并满足类似薛定谔型的波动方程. 在过去短短的几年时间里, 人们对它的研究涉及了理论和实验、线性和非线性、基础研究和潜在应用等多个方面. 艾里光束先后被应用到了光学微粒操控、光子弹及等离子体通道的产生、表面等离子体激元的诱导、电子加速、艾里激光器等众多研究领域, 推动自加速光的研究成为一个激动人心的前沿课题. 本文从理论模型、实验实现和应用进展 3 个方面简单综述了艾里光束的研究现状, 并探讨其潜在的研究内容和应用前景.

关键词

艾里光束
自加速光束
无衍射光束
自弯曲传输
自愈
空间光调制

衍射是光束的基本特性. 由于衍射, 激光束在传输过程中, 光斑逐渐增大, 能量逐渐分散. 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, 人们越来越希望消除衍射, 降低激光束的传输耗散.

最初, 人们对消除衍射的研究仅限于非线性材料中. 比如, 在非线性晶体中, 其非线性自聚焦效应可以抵消光束的衍射, 形成空间光孤子^[1~3], 实现激光束的长距离传输. 目前, 空间光孤子研究已经取得许多重要进展, 相关研究成果在光通信领域已经得到应用^[3~5]. 然而, 在自由空间中, 消除光束衍射的需求也很迫切^[6~9], 比如激光雷达、激光武器等. 由此, 一个新的研究领域应运而生——无衍射光束.

理论上无衍射光束携带无穷大的能量, 因此严格来讲实际并不存在. 目前主要利用孔径光阑对无衍射光束进行“截趾”来产生这些光束. 虽然“截趾”后的无衍射光束不再保持绝对无衍射的形式传输, 但

在一定的传输距离内, 相比高斯光束, 它们仍具有很好的无衍射特性, 因而被称作“近无衍射光束”. 下文中如无特殊说明, 无衍射光束均指近无衍射光束.

最具代表的沿直线传输的无衍射光束是贝塞尔(Bessel)光束^[7], 而最具代表的沿曲线传输(横向自加速)的无衍射光束是最近热门研究的艾里(Airy)光束^[10]. 艾里光束在 2007 年首先由 Christodoulides 研究组实验实现^[11]. 相比贝塞尔光束和马丢(Mathieu)光束, 艾里光束除了具有无衍射和自愈特性外, 还具有自弯曲传输的奇异特性. 自弯曲传输的特性在相应领域具有特别的应用潜力, 因此很快引起了研究人员的广泛关注^[12].

1 理论基础及研究进程

在量子力学框架下, 薛定谔方程被用来描述粒子和波的运动, 其一维形式为:

引用格式: 张泽, 胡毅, 赵娟莹, 等. 艾里光束研究进展与应用前景. 科学通报, 2013, 58: 3513–3520

Zhang Z, Hu Y, Zhao J Y, et al. Research progress and application prospect of Airy beams (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 3513–3520, doi: 10.1360/972013-1125

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

其中 m 为粒子的质量. 1979 年, Berry 和 Balazs^[13] 在上述方程中求得一个特殊的解: 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不扩展以及自加速的奇异特性. 然而, Berry 和 Balazs 的研究同时表明, 遵循该解的粒子和波因携带有无穷能量, 不能存在于现实中. 该论断显然打消了人们的研究热情, 因而数十年内, 这个奇异解没有引起过多的关注. 直到 2007 年, Christodoulides 和他的学生将该解引入到光学领域, 才重新开启了对它的研究之门.

在光学领域, 傍轴近似下光束的线性传输行为遵循衍射方程:

$$i \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0, \quad (2)$$

其中 k 为波矢. 对比(1)和(2)式, 不难发现它们在形式上极其相似, 因此, (2)与(1)式具有类似的艾里函数解^[10]:

$$\Phi(\xi, s) = Ai[s - (\xi/2)^2] \exp[i(s\xi/2) - i(\xi^3/12)], \quad (3)$$

其中, Ai 为艾里函数, $s=x/x_0$ 为归一化无量纲横向坐标, $\xi=z/kx_0^2$ 为归一化传输距离, x_0 为选取的横坐标常量.

由式(3)不难看出, 在入射面 $\xi=0$ 处, 波函数为标准艾里函数; 随着光束的传输, 波包整体发生横向平移, 而不发生衍射, 其传输行为如图 1(a1), (b1)所示. 这种自弯曲传输行为可以由等效性原理来理解, 即它可以被看作是静止的艾里波包被自由落体者观察, 因此会出现“向上”加速的现象^[14].

求解(3)式中艾里光束携带的能量, 发现其值无穷大, 因此该形式的艾里光束现实不能存在. 然而, 可以仿照贝塞尔光束的产生方法, 对艾里光束进行“截趾”, 从而约束其能量为有限值. 在数学上有多种“截趾”方法, 比较常用的是在式(3)的入射光场上乘以一个指数衰减项 $\exp(\alpha s)$ ($\alpha > 0$, 为指数衰减因子). 以该新的光场为初始解形式, 重新求解傍轴衍射方程(2), 可得^[10,11]:

$$\Phi(\xi, s) = Ai[s - (\xi/2)^2 + i\alpha\xi] \exp\{\alpha s - \alpha\xi^2/2 - i(\xi^3/12) + i[\alpha^2\xi/2 + i(s\xi/2)]\}. \quad (4)$$

求解(4)式中光场携带的能量, 其值可以收敛为^[10]

$$\int_{-\infty}^{\infty} ds |\Phi(s, \xi=0)|^2 = \sqrt{\frac{1}{8\pi\alpha}} \exp\left(\frac{2\alpha^3}{3}\right). \quad (5)$$

这表明遵循(4)式的艾里光束是可以实际存在的, 它

们的传输行为如图 1(a2), (b2)所示. 研究中, 通常把遵循(3)式的艾里光束称作无限能量艾里光束, 把遵循(4)式的艾里光束称作有限能量艾里光束. 对比图 1(b1)和(b2)发现, 由于“截趾”, 有限能量艾里光束表现出一定的衍射, 但仍具有自弯曲传输的特性^[10,11].

上面讨论的均是一维(一个横向维度 x)的艾里函数解. 类似地, 可以写出二维的艾里函数解^[10]:

$$\Phi(x, y, z=0) = Ai(x/x_0) Ai(y/y_0) \times \exp(\alpha x/x_0) \exp(\alpha y/y_0). \quad (6)$$

图 1(a3), (b3)分别展示了二维艾里光束的初始光斑及传输特性, 可以看出二维艾里光束同样具有无衍射、自弯曲传输的特性. 由于它局域在 2 个横向维度上, 因此二维艾里光束更具有实际应用性.

2 实验产生和特性验证

对(4)式的入射光场进行傅里叶变换, 可得^[11,12]:

$$\Phi_0(\omega) \propto \exp(-\alpha\omega^2) \exp(i\omega^3/3), \quad (7)$$

其中 ω 为空间角频率, 可以看出, 艾里光束的空间频谱为包含了立方相位因子的高斯型. 这表明可以对高斯光束进行立方相位调制来产生艾里光束.

产生艾里光束的实验装置如图 2(a)所示. 实验中, 把计算的相位膜片输入到液晶空间光调制器中, 对

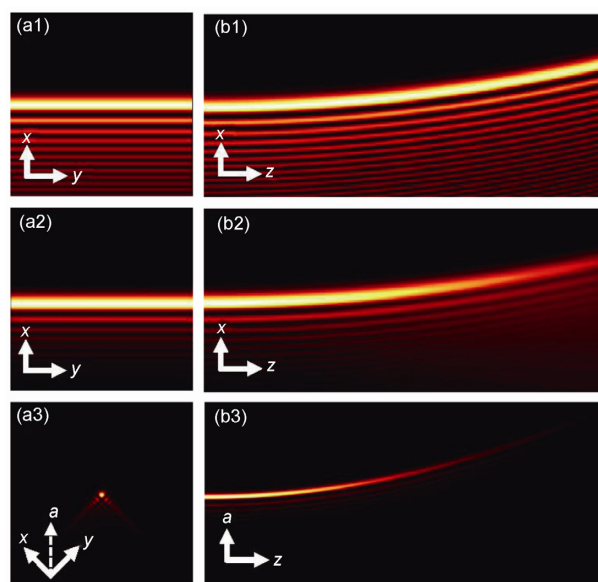


图 1 无限((a1), (b1))、有限((a2), (b2))能量一维艾里光束和二维((a3), (b3))艾里光束

(a1)~(a3) 入射光斑; (b1)~(b3) 传播过程中的光束演化. 其中(a3)和(b3)中 a 为横向加速方向

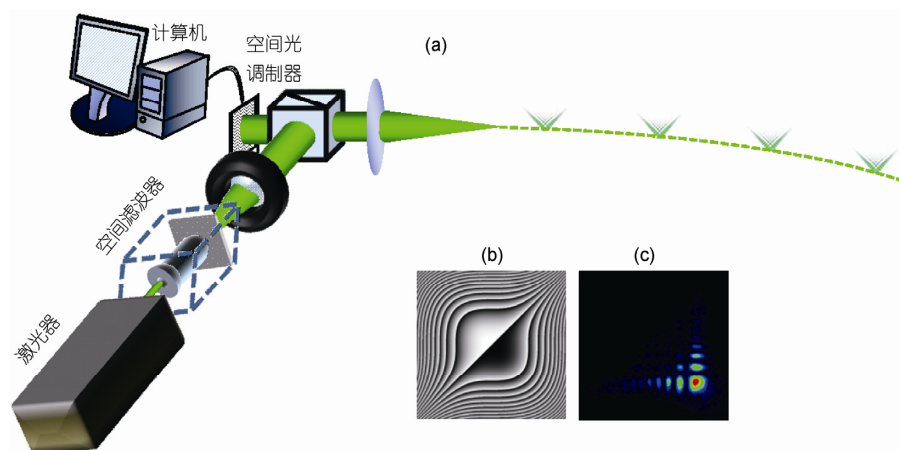


图2 (a) 艾里光束实验产生装置; (b) 二维艾里光束相位膜片; (c) 实验结果

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实域, 即产生出艾里光束^[11]. 计算的相位膜片和实验采集的艾里光束光斑分别如图2(b)和(c)所示.

艾里光束自实验实现以后, 很快就吸引了研究人员的浓厚兴趣. 人们首先对它的无衍射和自弯曲传输特性进行验证. 实验中, 主瓣尺寸约为 $90\ \mu\text{m}$ 的二维艾里光束, 在传输 $25\ \text{cm}$ 后, 光斑直径基本不变; 而同等条件下的高斯光束光斑直径扩展到原有尺寸的 $6\sim 7$ 倍. 此外, 以高斯光束作为参考, 人们还验证了它沿抛物线轨迹的自弯曲传输行为.

对艾里光束自弯曲行为的进一步研究发现, 它的抛物线轨迹^[15,16]是可控的. 调控的方式主要有2种: 其一, 借助线性折射率梯度势^[17]; 其二, 对抛物线轨道引入初始发射角度^[15]. 其中, 前者是沿艾里光束弯曲方向在传输介质中引入折射率梯度势, 从而抵消或者增强光束的弯曲; 后者则采用平移傅里叶透镜中心的方式改变艾里光束的入射角度, 从而实现传输轨道的调控. 此外, 我们研究小组还发现, 调整入射高斯光束和立方相位膜片中心的偏离量, 还可以控制传输方向上艾里光束光强极大值的位置^[16]. 这种方法通常被称为艾里光束的优化调控, 它在光束的偏转控制方面具有很好的应用前景.

除了无衍射和自弯曲传输特性外, 人们在实验中还发现艾里光束具有自愈特性^[18]. 以二维艾里光束为例, 若在某个位置遮挡其主瓣, 传输一定距离后, 被遮挡的主瓣能够重新“长出”; 同样, 艾里光束的副瓣被遮挡后, 在传播过程中也能重新“长出”. 艾里光

束的这种自愈能力来自于它各个光瓣之间的能量平衡势. 当这种平衡势被打破后, 其能量会自动流动, 以形成新的平衡. 显而易见, 这种自愈特性可以抵抗外界环境对艾里光束的破坏, 提高它在复杂介质(比如大气湍流或涡流液体)中的传输能力^[11,16,19].

3 应用进展和研究前景展望

艾里光束的奇异特性使得它具有一些很特殊的应用价值. 总结近年来的研究成果, 艾里光束在构建自会聚光束、等离子体、微粒操控、光子弹、艾里激光器和大气传输等方面均具有良好的应用前景. 下面将分别介绍.

3.1 急剧自会聚光束

众所周知, 会聚是提高激光束功率密度最直接也是最有效的方法. 人们一般采用凸透镜、凹面镜或它们的组合对光束进行会聚, 但该方式至少具有3个缺陷: 其一, 高功率密度位置纵深很短; 其二, 会引入较大的发散角; 其三, 会聚过程为缓慢渐变式. 其中, 第一个缺陷会降低激光束的作用深度, 从而给激光束的应用带来较大技术挑战, 比如由于纵深短, 在激光加工领域里很难对较厚的零件进行切割或钻孔; 在军事领域里很难让激光束高功率密度点精确落在目标点位置等. 第二个缺陷则使激光束能量以更快的速度发散掉, 从而影响其作用效果. 最后一个缺陷则可能造成聚焦前光束与传输介质的相互作用, 使得焦点位置的功率密度降低. 最近研究发现, 由艾里光束构建的新型自会聚光束可以巧妙地解决这些问

题^[20~22].

自会聚光束的结构及光强衍化分别如图 3(a)和(b)所示, 可以看到, 这种新型的自会聚光束在传输过程中具有急剧会聚性, 避免了聚焦前与传输介质可能发生的相互作用. 并且它在完成会聚后, 并不很快扩散, 而退化成了贝塞尔光束^[22], 因此其作用深度很长, 发散角很小. 这就有效克服了传统会聚方式的 3 个缺陷. 具体来说, 产生这种新型自会聚光束的物理思想为: 把一维艾里光束的条形光瓣转变成环形, 并让主瓣环处于内侧, 由于一维艾里光束在传输过程中, 其能量在横向上由副瓣向主瓣流动, 则环形艾里光束的能量随着传输将逐渐向中心会聚, 构成自会聚光束^[20~22]; 除此之外, 最新研究显示, 采用多个艾里光束合成的方法也可产生自会聚光束, 即以某轴对称放置多个艾里光束并使每个艾里光束均朝向对称轴方向横向加速, 则最终所有光的能量会聚集到对称轴位置, 形成自会聚光束^[23]. 相比之下, 这 2 种方法各有优缺点. 第一种方法可以在会聚后蜕化成贝塞尔光束, 其光强扩散非常缓慢, 发散角也很小; 而第二种方法则在会聚后蜕化成“瓶子串”光束^[24], 扩散较快, 但它可以通过多个艾里光束合成的方法获得, 因此整个光束的功率可以简单利用增加合成光束的个数来提高. 另外, 我们通过实验已经验证合成光束功率的扩散速度将随合成光束个数的增加而降低^[23].

3.2 在等离子体方面的应用

艾里光束在等离子体方面的应用主要有 2 个方面: 其一, 利用艾里光束产生弯曲的等离子体通道^[25]; 其二, 产生和操控可以自弯曲传输的艾里表

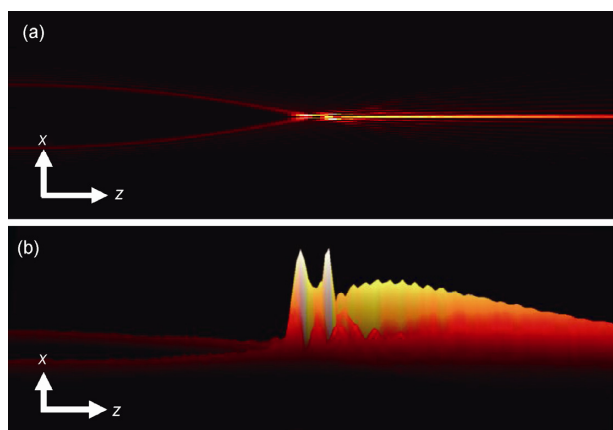


图 3 (a) 自会聚光束在传输方向的光束结构; (b) 光强衍化

面等离子体激元^[26~30].

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具有重要的应用意义. 通常情况下, 等离子体通道采用高斯光束在气体等介质中产生, 因此它是直线对称型. 这样, 等离子体通道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. 利用艾里光束可以解决该难题. 实验上, 利用艾里光束在空气中可以产生出弯曲的等离子体通道, 该通道不同切面的锥形辐射由于出射角度不一样, 因此在观测面彼此错开, 从而方便了对等离子体的观测和研究.

此外, 艾里光束还可以用来产生和操控艾里型金属表面等离子体激元. 实验中, 利用空间相位调制器把飞秒激光器的输出光束调制成艾里型. 此飞秒艾里光束垂直照射在金属表面, 并利用金属表面的耦合光栅将艾里光束的特性“传递”给金属表面等离子体激元, 形成自横向加速的艾里表面等离子体激元, 如图 4 所示. 参照在艾里光束弯曲方向上施加折射率梯度势而改变其弯曲程度的方法^[17], 也可以在艾里等离子体激元的弯曲方向施加线性势场来控制它的弯曲程度和方向^[30]. 艾里型金属表面等离子体激元的产生意味着金属表面光量子操作技术的进步, 为艾里光束在芯片表面进行微操控奠定了实验基础.

3.3 微粒操控

激光对微粒的操控在生物科学、医疗、大气科学和纳米结构加工等领域具有重要的应用前景和意义^[31,32]. 按照粒子的光学性质不同, 激光对微粒的操控机制主要有 2 种: 一是针对非吸收型微粒的操控^[31,33,34]; 另一种是针对吸收型微粒的操控^[24,35~37].

激光对非吸收型粒子的作用力主要表现为辐射压力和梯度力^[31]. 在辐射压力的作用下, 粒子获得沿光束传输方向上的动量; 在梯度力的作用下, 粒子被拉到横向光场极大值处. 由于艾里光束的主瓣能量占整个光束能量的 70% 左右, 因此, 非吸收型粒子总是处于艾里光束的主瓣传输路径上, 就好比“骑”在艾里光束上, 沿弯曲路径行走. 在这个想法的推动下, 国外一研究小组首次利用艾里光束把二氧化硅粒子从一个容器输运到了另外一个容器中^[38,39]. 我们研究小组利用圆环形艾里光束导引出了会聚的聚苯乙烯粒子流^[22]. 这种操控机制有望将特定粒子绕过

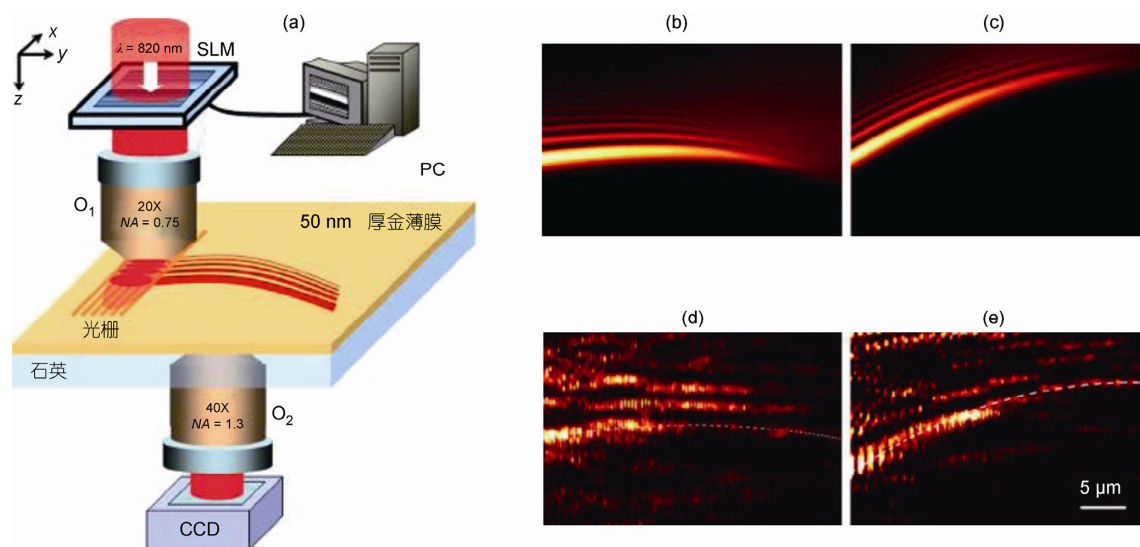


图4 (a) 艾里等离子体激元实验产生装置; (b)和(c) 不同角度入射的艾里光束; (d)和(e) 相应诱导出的等离子体激元^[27]

SLM 为空间光调制器, O_1 和 O_2 均为显微物镜, CCD 为观测相机, PC 为计算机. Reproduced with permission, ©2011 Optical Society of America

障碍物输运到目标位置,可在生物、化学和医疗领域具有很好的应用前景。

吸收型粒子在光场中主要受到光泳力,并且光泳力远大于粒子本身所受到的重力和辐射压力等。因此,在光泳力存在的情况下,其他力一般可以忽略^[32,37]。光泳力来自于空气分子对微粒的碰撞,因此光泳力的方向通常由微粒高温的一侧指向低温的一侧。这样,在光场的加热下,微粒被排斥到低光强处。为此,人们通常构建“瓶子”光束——光强极小值位置被光强极大值包围的光束——来实现对粒子的操控^[35,36]。艾里光束在构建“瓶子”光束方面也具有特定的应用。研究发现,利用8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^[24]。

3.4 光子弹

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^[40~45]。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^[40,41]。然而,由于固有的调制和结构不稳定性,光子弹在晶体中并不能稳定传输,因此在实验上很难产生出非线性光子弹。

艾里光束的无衍射特性为光子弹的实验实现创造了新的契机。早在1979年, Berry 和 Balazs^[13]就在理论上证明了艾里函数是一维薛定谔方程唯一不在时域展宽的解。如果对一个脉冲光进行调制,使得它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非线性晶体的限制,大大降低了实现难度,使得应用范围也更加广泛。基于此方法,2010年1月,康奈尔大学和中佛罗里达大学合作,在实验上实现了艾里-贝塞尔型光子弹^[44]。其原理正是在空域利用贝塞尔光束抑制衍射,在时域利用艾里光束抑制色散。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,希腊一研究小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,实现了三维艾里型光子弹^[45]。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掩体后目标的激光武器,那很可能就是三维艾里型光子弹。

3.5 艾里光束在其他领域中的应用

除了以上几个领域,艾里光束还在其他多个领域有所应用,比如艾里激光器和大气科学领域等.

通常的艾里光束产生装置是利用空间光调制器对高斯光束进行立方相位调制,其体积比较大,稳定性也相对较低.因此,科学家们希望研制出能够直接输出艾里光束的激光器.为此,意大利科学家 Longhi^[46]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,在合适泵浦条件下,小角度倾斜的微型平面腔可以输出艾里光束.同年 10 月,以色列的 Porat 等人^[47]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膜片)取代激光腔的输出镜,实现了艾里光束激光器.在他们设计的激光腔里,衍射光栅能够把入射到其上的大部分激光重新反射到激光腔内,同时允许多个衍射级的激光输出到腔外,其中第一级衍射光束通过透镜进行傅里叶变换,即能产生艾里光束.

此外,基于自愈特性,艾里光束在大气湍流等复杂介质中具有良好的传输特性,因此它在大气科学中也有很重要的研究意义^[19];基于自弯曲特性,艾里光束可以在光子晶体中实现全光路由^[48];利用微加工技术,可以制作出准艾里光束的微光纤产生器件^[49];艾里光束还可以用于产生和控制超连续光和

光纤自频移等^[50].

4 总结和前景展望

本文回顾了艾里自加速光束的理论、实验和应用研究进展,阐述了艾里光束实验产生和相关应用机理,评述了艾里光束在诸多领域中的研究意义和应用价值.基于本文所阐述的内容和目前研究工作的进展,我们认为,艾里光束以及其他自加速光束在多个领域还具有更大的应用与发展前景.首先,以往的研究工作主要集中在艾里光束的近距离传输上,而艾里光束的基本特性表明它在长距离、复杂介质中具有优良的传输特性和应用价值,因此,未来研究它在长距离、复杂环境中的应用具有重要的意义;其次,以往的工作大多关注傍轴近似下艾里光束的研究和应用,而在实际应用中需要更多地考虑非傍轴的情况,因此这一方面的研究工作将具有重要的应用价值和意义^[51~57],最激动人心的是科幻中的自回旋光将来有一天可能会成为现实^[52];最后,根据 Berry 和 Balazs^[13]的研究工作,艾里波包和自加速光束并不仅仅局限于光学领域,它们还适用于微波、声波、超声波、电子波^[58]等多个领域,并且同样具有自愈、自弯曲和无衍射的特性,是波在一定条件下的共有现象.因此,艾里类型的自加速波将会在这些领域具有巨大的开拓潜力.

致谢 感谢国家留学基金管理委员会的资金支持.

参考文献

- 1 陈志刚. 奇妙的空间光孤子. 物理, 2001, 30: 752–756
- 2 Stegeman G I, Segev M. Optical spatial solitons and their interactions: Universality and diversity. Science, 1999, 286: 1518–1523
- 3 Chen Z G, Segev M, Christodoulides D N. Optical spatial solitons: Historical overview and recent advances. Rep Prog Phys, 2012, 75: 086401
- 4 Lan S, DelRe E, Chen Z G, et al. Directional coupler with soliton-induced waveguides. Opt Lett, 1999, 24: 475–477
- 5 宋有才. 光孤子通信技术的应用与展望. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2009, 26: 43–46
- 6 Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory. Opt Soc Am A, 1987, 4: 651–654
- 7 Durnin J, Miceli J J. Diffraction-free beams. Phys Rev Lett, 1987, 58: 1499–1501
- 8 Indebetouw G. Nondiffracting optical fields: Some remarks on their analysis and synthesis. J Opt Soc Am A, 1989, 6: 150–152
- 9 Gutiérrez-Vega J C, Iturbe-Castillo M D, Chávez-Cerda S. Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams. Opt Lett, 2000, 25: 1493–1495
- 10 Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams. Opt Lett, 2007, 32: 979–981
- 11 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A. Observation of accelerating Airy beams. Phys Rev Lett, 2007, 99: 213901
- 12 Hu Y, Siviloglou G A, Zhang P, et al. Generation and control of accelerating Airy beams. In: Nonlinear Photonics and Novel Phenomena, Springer Series in Optical Sciences. New York: Springer, 2012. 170

- 13 Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets. *Am J Phys*, 1979, 47: 264–267
- 14 Greenberger D M. Comment on “Nonspreading wave packets”. *Am J Phys*, 1980, 48: 256
- 15 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A. Ballistic dynamics of Airy beams. *Opt Lett*, 2008, 33: 207–209
- 16 Hu Y, Zhang P, Lou C B, et al. Optimal control of the ballistic motion of Airy beams. *Opt Lett*, 2010, 35: 2260–2262
- 17 Ye Z Y, Liu S, Zhang P, et al. Acceleration control of Airy beams with optically induced refractive-index gradient. *Opt Lett*, 2011, 36: 3230–3232
- 18 Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams. *Opt Express*, 2008, 16: 12880–12891
- 19 Gu Y, Gbur G. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence. *Opt Lett*, 2010, 35: 3456–3458
- 20 Efremidis N K, Christodoulides D N. Abruptly autofocusing waves. *Opt Lett*, 2010, 35: 4045–4047
- 21 Papazoglou D G, Efremidis N K, Christodoulides D N. Observation of abruptly autofocusing waves. *Opt Lett*, 2011, 36: 1842–1844
- 22 Zhang P, Prakash J, Zhang Z. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams. *Opt Lett*, 2011, 36: 2883–2885
- 23 张泽, 刘京郊, 张鹏, 等. 多艾里光束合成自聚焦光束的实验实现. *物理学报*, 2013, 62: 034209
- 24 Zhang Z, Zhang P, Mills M, et al. Trapping aerosols with optical bottle arrays generated through a superposition of multiple Airy beams. *Chin Opt Lett*, 2013, 11: 033502
- 25 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, et al. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams. *Science*, 2009, 324: 229–232
- 26 Salandrino A, Christodoulides D N. Airy plasmon: A nondiffracting surface wave. *Opt Lett*, 2010, 35: 2082–2084
- 27 Zhang P, Wang S, Liu Y, et al. Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories. *Opt Lett*, 2011, 36: 3191–3193
- 28 Li L, Li T, Wang S M, et al. Plasmonic Airy beam generated by in-plane diffraction. *Phy Rev Lett*, 2011, 107: 126804
- 29 Minovich A, Klein A E, Janunts N, et al. Generation and near-field imaging of Airy surface plasmons. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 116802
- 30 Liu W, Neshev D N, Shadrivov I V, et al. Plasmonic Airy beam manipulation in linear optical potentials. *Opt Lett*, 2011, 36: 1164–1166
- 31 Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Phys Rev Lett*, 1970, 24: 156–159
- 32 Shvedov V G, Rode A V, Izdebskaya Y V, et al. Giant optical manipulation. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 118103
- 33 Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Opt Lett*, 1986, 11: 288–290
- 34 McGloin D, Reid J P. Forty years of optical manipulation. *Opt Photonics News*, 2010, 21: 20–26
- 35 Shvedov V G, Desyatnikov A S, Rode A V, et al. Optical guiding of absorbing nanoclusters in air. *Opt Express*, 2009, 17: 5743–5757
- 36 Zhang P, Zhang Z, Prakash J, et al. Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by moiré techniques. *Opt Lett*, 2011, 36: 1491–1493
- 37 Zhang Z, Cannan D, Liu J J, et al. Observation of trapping and transporting air-borne absorbing particles with a single optical beam. *Opt Express*, 2012, 20: 16212–16217
- 38 Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets. *Nat Photonics*, 2008, 2: 575–578
- 39 Christodoulides D N. Riding along an Airy beam. *Nat Photonics*, 2008, 2: 652–653
- 40 Christodoulides D N, Efremidis N K. Bessel X waves in two- and three-dimensional bidispersive optical systems. *Opt Lett*, 2004, 29: 1446–1448
- 41 Saari P, Reivelt K. Evidence of X-shaped propagation-invariant localized light waves. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 4135–4138
- 42 Gurgov H C, Cohen O. Spatiotemporal pulse-train solitons. *Opt Express*, 2009, 17: 7052–7058
- 43 Malomed B A, Mihalache D, Wise F, et al. Spatiotemporal optical solitons. *J Opt B Quantum Semiclassical Opt*, 2005, 7: R53–R72
- 44 Chong A, Renninger W H, Christodoulides D N, et al. Airy-Bessel wave packets as versatile linear light bullets. *Nat Photonics*, 2009, 4: 103–106
- 45 Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D, et al. Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 253901
- 46 Longhi S. Airy beams from a microchip laser. *Opt Lett*, 2011, 36: 716–718
- 47 Porat G, Dolev I, Barlev O, et al. Airy beam laser. *Opt Lett*, 2011, 36: 4119–4121
- 48 Denz C, Rose P, Diebel F, et al. Airy beam induced optical routing. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 101101
- 49 Deng H C, Yuan L B. Design of a novel quasi-Airy beam generator: Airy optical fiber. *Proc SPIE*, 2012, 8421: 8Y
- 50 Hu Y, Li M, Bongiovanni D, et al. Spectrum to distance mapping via nonlinear Airy pulses. *Opt Lett*, 2013, 38: 380–382
- 51 Kaminer I, Bekenstein R, Nemirovsky, et al. Nondiffracting accelerating wave packets of Maxwell’s equations. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 163901
- 52 Chen Z G. Light bends itself into an arc. *Physics*, 2012, 5: 44

- 53 Zhang P, Hu Y, Cannan D, et al. Generation of linear and nonlinear nonparaxial accelerating beams. *Opt Lett*, 2012, 37: 2820–2822
- 54 Courvoisier F, Mathis A, Froehly L, et al. Sending femtosecond pulses in circles: Highly nonparaxial accelerating beams. *Opt Lett*, 2012, 37: 1736–1738
- 55 Novitsky A V, Novitsky D V. Nonparaxial Airy beams: Role of evanescent waves. *Opt Lett*, 2009, 34: 3430–3432
- 56 Zhang P, Hu Y, Li T, et al. Nonparaxial Mathieu and Weber accelerating beams. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 193901
- 57 Aleahmad P, Miri M, Mills M S, et al. Fully vectorial accelerating diffraction-free Helmholtz beams. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 203902
- 58 Voloch-Bloch N, Lereah Y, Lilach Y, et al. Generation of electron Airy beams. *Nature*, 2013, 494: 331–335

Research progress and application prospect of Airy beams

ZHANG Ze^{1,2,3}, HU Yi^{2,4}, ZHAO JuanYing^{2,3,5}, ZHANG Peng^{3,6} & CHEN ZhiGang^{2,3}

¹ Chinese Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

² TEDA Applied Physics School, Nankai University, Tianjin 300457, China;

³ Department of Physics and Astronomy, San Francisco State University, San Francisco CA 94132, USA;

⁴ INRS-EMT, 1650 Blvd. Lionel-Boulet, Varennes, Québec J3X 1S2, Canada;

⁵ School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

⁶ Nanoscale Science and Engineering Center, University of California, Berkeley CA 94720, USA

Over the last half-dozen years, Airy beams have attracted a great deal of interests due to their non-diffraction, self-bending and self-healing properities. These beams arise from the solution of the paraxial wave equation, with their optical field distribution expressed by the Airy function. In recent years, research on Airy beams has spanned from theory to experiment, from linear to nonlinear regimes, and from fundamental understanding to application potentials. Thus far, Airy beams have been proposed and highly touted for applications in a variety of areas including optical micro-particles manipulation, generation of optical bullets, generation of curved plasma channels, routing of surface plasmon polaritons, creating curved electron beams without any external field, and formation of Airy beam lasers, to name just a few. These promising applications have further advanced the research associated to self-accelerating beams into one of the hot and dynamically changing areas at the frontier of optics and interdisciplinary sciences. This paper briefly reviews the recent development of Airy beams from three aspects: theory, experiment and application, along with the discussion about future directions of Airy-beam related research.

Airy beams, self-acceleration beam, non-diffraction beam, self-bending propagation, self-healing, spatial light modulation

doi: 10.1360/972013-1125