

艾里光束产生方法的研究进展

程 振 赵尚弘 楚兴春 邓博于 张曦文

空军工程大学, 陕西 西安 710000

摘要 艾里光束作为无衍射光的一种,以其近似无衍射、横向自加速和自恢复的独有特性而得到普遍的关注,在光电子学、微粒操控、大气通信等领域有着广阔的应用前景。综述了产生艾里光束的几种主要方法,从系统造价、实现难易度和应用潜力等方面对各方法的优缺点做深入比较分析,提出了改进和完善建议。

关键词 物理光学;艾里光束;产生方法;优缺点;应用前景

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030008

Research Progress of the Generation Methods of Airy Beam

Cheng Zhen Zhao Shanghong Chu Xingchun Deng Boyu Zhang Xiwen

Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract Airy beam has gained a widespread attention owing to its particular properties: approximate non-diffraction, self-accelerating in the transverse and self-recovery as a member of non-diffraction light family. Airy beam has a broad application prospect in optoelectronic sciences, particle manipulation, atmospheric communication and so on. The main methods of Airy beam generation are summarized and a deep analysis for each method is made from the cost of the system, how complex to come true and potential of applications, and some improving and perfecting suggestions are given.

Key words physical optics; Airy beam; generation methods; advantages and disadvantages; application prospect

OCIS codes 140.3570; 050.1950; 260.5430

1 引言

1979年, Berry等^[1]在量子领域发现薛定谔方程具有一个遵循艾里函数的波包解,并且认为一维薛定谔方程具有唯一的无衍射解。但是艾里波包携带有无穷大的能量,实验上是无法实现的,因此受到的关注程度不大。2007年, Siviloglou等^[2]发现在艾里波包上加一个指数衰减函数仍然满足薛定谔方程,并且在实验上第一次产生了有限能量的艾里光束。艾里光作为无衍射光的一种,因其具有独特的近似无衍射、横向自加速、自恢复等性质,人们对艾里光束的产生方法、轨迹控制和应用做了大量的研究^[3-8]。近年来,艾里光束在等离子通道^[9]、微粒操控^[10-11]、光子弹^[12]、大气通信^[13-14]以及其他领域发挥着重要的作用。本文综述产生艾里光束的几种主要方法,对每种方法从系统造价、实现难易度和应用潜力等方面的优缺点进行了深入的比较分析。

2 艾里光束的产生方法

2.1 基于空间光调制器艾里光束的产生

Siviloglou等^[2]对有限能量艾里光束进行傅里叶变换求出傅里叶频谱,发现其波包功率谱是具有立方相位因子的高斯分布,这一结果表明对高斯光束进行立方相位调制再进行傅里叶变换就可以得到艾里光束。图1为基于空间光调制器(SLM)产生艾里光的实验装置图^[3],图中BE为扩束镜, M为平面镜, BS为分束镜, L为傅里叶透镜, MO为显微物镜,起放大镜的作用。

收稿日期: 2014-09-10; 收到修改稿日期: 2014-10-14; 网络出版日期: 2015-02-06

作者简介: 程 振(1991—),男,硕士研究生,主要从事艾里光束传输方面的研究。E-mail: 2008cheng.2008@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

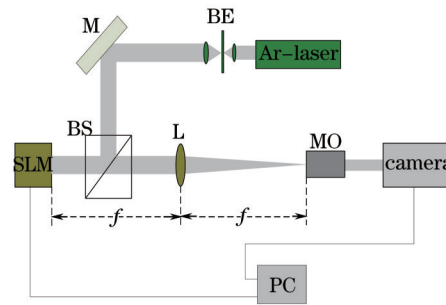


图1 基于空间光调制器产生艾里光束

Fig.1 Generation of Airy beam based on spatial light modulator

氩离子激光器发射的激光入射到空间光调制器中,空间光调制器中加载有满足立方相位分布的相位膜片,从空间光调制器反射出去的光即已调光,通过焦距为 f 的傅里叶透镜进行傅里叶变换,在透镜焦距 f 处就可以观察到艾里光束。通过移动相机可以观察艾里光传输不同距离的光场信息,通过观察的数据可以验证艾里光的无衍射和自加速性质。也可以在相机前放置一个放大镜来放大艾里光斑,来观察艾里光能量分布的细节变化。

这种产生艾里光束的方法,由于液晶空间光调制器损伤阈值有限,因此输出艾里光的功率受到限制,衍射效率也不高。而且系统的造价昂贵,制作过程复杂。

2.2 基于二次非线性光子晶体产生艾里光

2009年,Ellenbogen等^[15]发现:高斯抽运激光通过钽酸锂光子晶体后,只要满足一定的条件,其二次谐波就具有立方相位。对具有立方相位的二次谐波做傅里叶变换就可以得到艾里光束。Ellenbogen等设计的具有二次项系数的非线性光子晶体的偏振函数为

$$\chi^{(2)}(x,y) = \text{sign}\left\{\cos\left[2\pi\left(f_x x + f_c y^3\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数, f_x 是光传输方向上的调制空间频率, f_c 是立方调制系数。

在共线准相位匹配的情况下,在二次谐波产生的过程中,只要二次谐波矢量 \mathbf{k}_2 和基波矢量 \mathbf{k}_1 满足公式 $\mathbf{k}_2 - 2\mathbf{k}_1 = 2\pi\mathbf{f}_x$,就可以得到具有立方相位的二次谐波的有效增强。

Ellenbogen等把单模高斯Nd:YLF抽运激光聚焦在钽酸锂光子晶体上,同时测量二次谐波的转换效率和温度调优性能,用 $f = 100 \mu\text{m}$ 的傅里叶透镜对输出光作傅里叶变换,并且记录变换后光的传输动态,其中,传输方向上的调制周期 $1/f_x = 7.38 \mu\text{m}$,立方调制系数 f_c 是 $1.9 \times 10^{-5} \mu\text{m}^{-3}$,调制通道大小是 $1 \text{mm} \times 1 \text{mm}$,转换效率是 $5.4 \times 10^{-6} \text{W}^{-1}$ 。

这种产生艾里光的方法主要优点是改变光子晶体温度和抽运波长就能控制艾里光束峰值强度的位置^[16],从而改变艾里光束的形状。

2.3 基于二进制相位图的高分子分散液晶产生艾里光束

2005年,Ren等^[17]用聚合物和液晶制作了一种具有“偏振独立”和“仅相位调制”功能的高分子分散液晶(PDLC),在PDLC两边加上低电压时,由于光的散射效用,PDLC具有半透明的性质,当增大电压到饱和水平,PDLC就变成高透明的并且具有“仅相位调制”的功能。基于这种思想,2009年,Dai等^[18]将主要聚合物成分是三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)和液晶的混合液体用毛细管注射到液晶单元槽中,在数字显微镜(DMD)芯片上的二进制立方相位图被记录在PDLC单元中,当光通过PDLC的液晶区域和聚合物区域会经历不同的相位调制,已调光通过傅里叶透镜得到艾里光束。实验装置如图2所示^[18]。

二进制立方相位图的设计方法是:把二维连续艾里光立方相位图 $0 \sim \pi$ 之间的相位延迟值设为最小灰度级0, $\pi \sim 2\pi$ 之间的相位延迟值设为最大灰度级255。在图2(a)中可以观察到,电脑设计好的二进制立方相位图传送给DMD芯片上,一束平行的激光(532 nm)入射到DMD芯片上进行调制,具有二进制立方相位的已调光通过由一个凸透镜($f=15 \text{cm}$)和物镜(5 \times)组成的图像系统记录在PDLC中。在图2(b)中显示在PDLC中调制好的光束通过傅里叶透镜进行傅里叶变换成艾里光束,并用CCD相机记录艾里光束的场强分布,传输距离。实验验证了艾里光束的自加速性质。

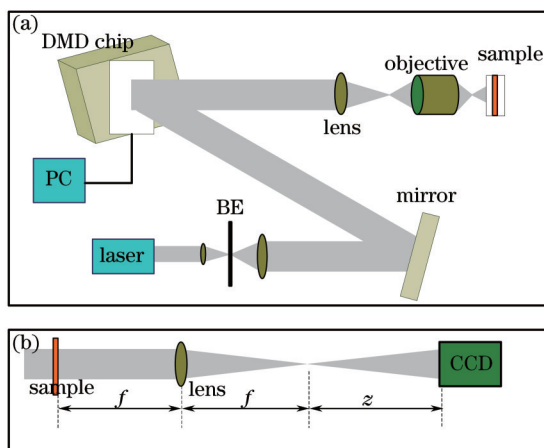


图2 基于二进制相位图的PDLC产生艾里光束的装置

Fig.2 Generation setup of Airy beam based on PDLC with a binary phase pattern

基于二进制相位图的PDLC产生艾里光束的方法,其二进制图是由电脑设计而成,再经过基于DMD芯片程序化的平板印刷系统转移到PDLC上,因此控制艾里光束非常容易。并且PDLC的制作多样化,其具有很大的应用潜力,可以产生不同的特殊光束。但是本系统的相位调制范围只有 0.3π ,而且PDLC一旦制作而成,就无法改变调制范围。

2.4 基于具有二进制相位图电极的液晶单元产生艾里光

为了克服2.3节所述方法调制范围只有 0.3π 并且无法调节调制范围的问题,Luo等^[19]提出了另外一种产生艾里光的方法:用具有二进制相位图电极的液晶单元产生电压可控的二维艾里光束,这种方法产生的艾里光束可根据电场的变化产生或者消失,相位差根据电压的大小而改变。

把二维连续艾里波包相位图 $0\sim\pi$ 之间的相位延迟值设为 0 , $\pi\sim 2\pi$ 之间的相位延迟值设为 π ,这样就能把二维连续艾里波包相位图转变为具有立方相位调制的二进制图。用标准的光刻工艺在钢锡氧化物(ITO)涂覆玻璃衬底的材料上刻上已设计的二进制图,并用具有二进制图的ITO玻璃把二进制图转移到透明的掩膜上。具有二进制图的ITO玻璃组成的液晶单元做一个电极,没有二进制图空白的ITO玻璃组成的液晶单元作相反的电极。当在液晶单元两边加上调节电压时,有ITO电极的区域中液晶分子重新排列,而没有ITO电极区域中液晶分子将保持不变,这样就在两区域之间就产生了相位差。调节电压大小可改变相位差的大小。当入射光的偏振方向与液晶单元摩擦方向平行时,外加电压情况下相位差 $\Delta\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_{\text{eff}}) \cdot d$,其中 λ 是入射光波长, d 是液晶单元之间间隙, n_e 是无ITO电极区域的有效折射率, n_{eff} 是有ITO电极区域的有效折射率。图3为本实验的实验装置^[19]。

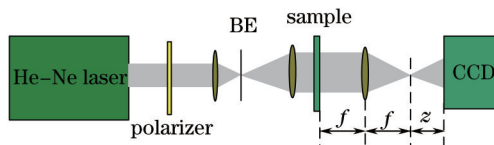


图3 具有二进制相位图电极的液晶单元产生艾里光束实验装置

Fig.3 Experimental setup of generation of Airy beam based on a liquid crystal with a binary phase pattern electrode

He-Ne激光器(633 nm)发射的激光通过偏光镜进入具有二进制立方相位图作电极的液晶单元中,偏光镜的作用是保证入射激光的偏振方向与液晶单元摩擦方向平行,再经过傅里叶透镜作傅里叶变换,并且用CCD相机观察艾里光的传输情况,实验验证了艾里光束的无衍射和横向自加速性质。实验发现,当相位差是 π 的偶数倍时,不产生艾里光束,当相位差是 π 的奇数倍时,产生艾里光束。

这种产生艾里光束的方法,其制作过程简单费用低,而且调节电压可控制相位调节范围,同样在自适应光具有很大的应用潜力。

2.5 等离子激元艾里光束

表面等离子激元是沿着金属和介质面传播的表面电磁波。2010年,Salandrino等^[20]通过理论研究发现

金属表面可以产生艾里等离子激元,并给出了理论预测结果和实验产生方法。在金属表面用周期阵列改变表面等离子偏振激元(SPP)的传输已经获得很大成功,这种方法可以看成是相位调制。满足一定条件的非周期阵列把SPP的线性相位改变成非线性的是有可能的。2011年,Li等^[21]成功在银表面用非周期阵列实验产生了等离子激元艾里光束,并且验证了艾里光的无衍射、自加速和自恢复等特性。图4为产生等离子激元艾里光束的装置^[21]。

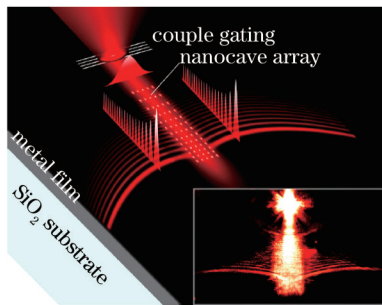


图4 等离子激元艾里光束的产生

Fig.4 Generation of plasmonic Airy beam

He-Ne激光器入射到耦合光栅中产生平面传输的SPP波,SPP波进入非周期纳米凹洞阵列,并最终在阵列两边产生SPP艾里光束。纳米凹洞阵列是在以0.2 mm厚的玻璃为基底,60 nm厚的银膜上用聚焦离子光制作而成,阵列在横向是周期分布的,在竖向是分级分布的。

这种产生艾里光束的方法在纳米微粒操控,光传感,甚至等离子电路有很大的应用潜力。由于在金属表面刻阵列的技术比较基础,因此在制作方面也比较简单。

值得一提的是,2011年,Minovich等^[22]组成的研究小组在玻璃基底的金属膜面上也实验产生了等离子激元艾里光束,其装置如图5所示^[22]。

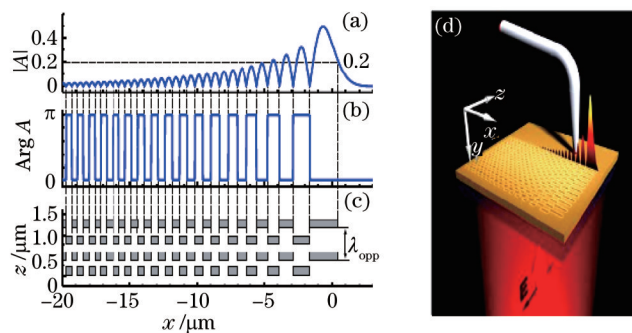


图5 艾里等离子激元的产生。(a) 艾里函数绝对值;(b) 光栅的相位图;(c) 光栅的结构大小图;(d) 实验平台

Fig.5 Generation of Airy plasmons. (a) Absolute value of the Airy function; (b) phase of the optical grating; (c) grating geometry; (d) stage of the experiment

2.6 艾里激光器

微芯片激光器作为固态激光器一个重要组成部分,以其超小体积和单频输出特性引起人们极大的兴趣。微芯片激光的一般组成是:电介质涂覆在稀土掺杂、薄的激光晶体上组成的微型平面腔,红宝石激光做端面抽运。2011年,Longhi^[23]在理论上推导出微芯片激光的平面腔有小角度倾斜时,在合适的高斯抽运激光作用下能发射出艾里光束。同年10月,Porat等^[24]对Stefano Longhi的理论做出了证明,其基本思想是用特制的衍射光栅当成激光器的输出镜面做出了艾里激光器。衍射光栅函数为

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

式中 h_0 是边缘高度, Λ 是快速调制载波周期, $\Phi(x,y)$ 描述了 x 轴和 y 轴相位调制。图6为艾里激光器示意图^[24]。

红宝石激光(808 nm)通过一个掺钕钇铝石榴石的柱面(Nd:YAG),柱面的一侧能透过808 nm光,反射1064 nm光,另一侧能透过1064 nm光。衍射光栅能像普通镜面一样把大部分的人射光反射回腔内,同时允许许多个衍射级的激光输出到腔外。衍射光栅对入射光做立方相位调制,输出耦合光经过傅里叶透镜就可以

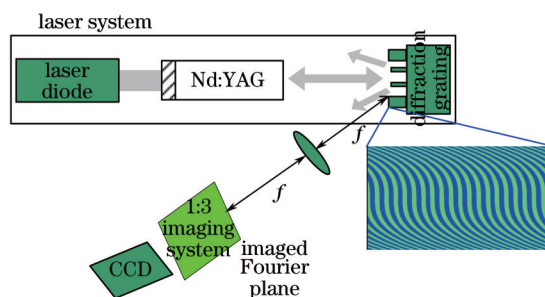


图6 艾里激光器

Fig.6 Airy beam laser

得到艾里光束。

相较于其他方法,此方法制作简单。但是这种方法产生的艾里光束,其衍射损耗比较大。可通过改变平面腔的设计,提高光栅表面质量或者改用高反射率的材料来减小衍射损耗,但是也增加了造价费用。用这种方法同样可以产生其他不同的特殊光束,应用潜力大。

2.7 飞秒激光诱导纳米光栅产生艾里光束

2004年, Bricchi等^[25]用飞秒激光在烧融的石英玻璃中诱导出纳米光栅,这种纳米光栅能使激光感应双折射并且能控制光偏振的空间分布和入射激光的相位。控制光栅中慢轴角的方向使激光诱导延迟值与半波值相等,这样就可以操控入射线性偏振光的偏振方向^[26]。如果入射光是圆偏振的,则发射光的相位依赖于慢轴角^[27]。2012年, Gecevičius等^[28]用脉冲为270 fs,重复频率为200 kHz,工作波长为1030 nm的飞秒激光通过一个非球面透镜入射到烧融的石英玻璃中诱导出纳米光栅,安装在机动旋转台上的消色差半波板用来控制入射光的偏振方向。这种条件下诱导出的纳米光栅大小是2 mm×2 mm,其诱导延迟值是266 nm,恰好是波长532 nm的一半。图7(a)为纳米光栅^[28],图中非彩色部分是慢轴角。

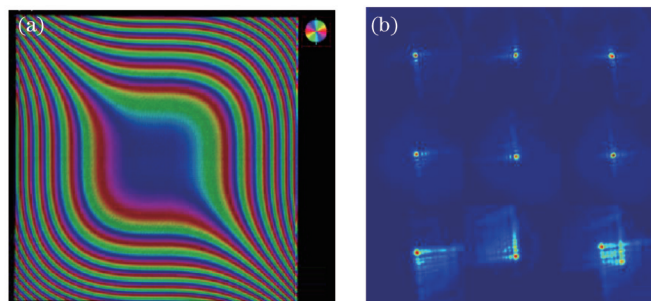


图7 (a) 诱导的纳米光栅结构; (b) 产生不同传输方向的艾里光束

Fig.7 (a) Structure of the induced nanograting; (b) profiles of Airy beam generated in different directions

连续的氩离子激光入射到诱导出的光栅结构中进行立方相位调制,已调光通过傅里叶透镜产生艾里光束。入射圆偏振光的偏振方向控制艾里光的加速方向,如果入射是线性偏振光,则产生“双重艾里光”。图7(b)中第一行和第二行分别是左旋圆偏振光和右旋圆偏振光产生的艾里光,第三行是线性偏振光产生的“双重艾里光”。这是一种简单有效产生艾里光的方法。

2.8 基于连续相位板艾里光束的产生

用液晶空间相位调制器的方法产生艾里光束,由于受到填充因子的影响,其衍射效率不高,而且产生的艾里光束功率受到调制器损伤阈值的限制,功率不高。选择基于衍射光学元件,用特殊材料制作的连续相位板来代替液晶调制器,可以实现高衍射率、较大功率的艾里光束输出。2011年, Cao等^[29]在AR-N4340负性光刻胶上用激光直写的方式制作了一个立方相位分布的连续相位板,激光波长为442 nm。通过测量得到这个方法产生的艾里光衍射效率为98.33%。图8为实验装置^[3],图中CPP即是制作的连续相位板。

连续相位板相比较于2.6节方法中衍射光栅,对入射光的衍射损耗非常小,可以充分的利用入射光,因此能得到高衍射效率和较大功率的艾里光,但是其立方调制范围不可调,不能对艾里光束进行动态控制。

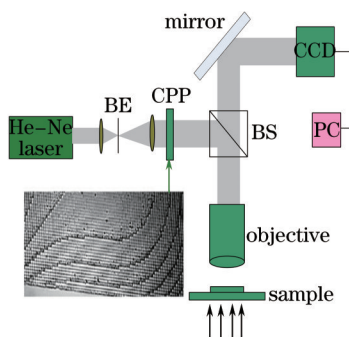


图8 用连续相位板产生艾里光

Fig.8 Generation of Airy beam using continuous phase plate

2.9 基于傅里叶透镜像差产生高质量可调的艾里光束

当透镜倾斜时,会出现光学像差。基于这个原理,2010年Papazoglou等^[30]用两个圆柱形透镜得到立方相位函数。为了得到大功率且立方调制范围可调的艾里光束,2012年,Acebal等^[31]用傅里叶平凸透镜的像差得到的立方相位图产生了高质量的、简单可调的一维艾里光束,并且从理论和实验上验证了只控制元件间距和透镜倾斜角两个参量就能控制输出宽范围的艾里光束的结论。实验装置如图9所示^[31],图中 d 和 d' 分别为物点和像点到透镜的距离, α 为物点和透镜之间的连线与光轴的夹角, $s=d\cos\alpha$, $d'=d$, $s'=s$, σ_η 为光阑半长度, σ_ζ 为光阑孔径的半径。

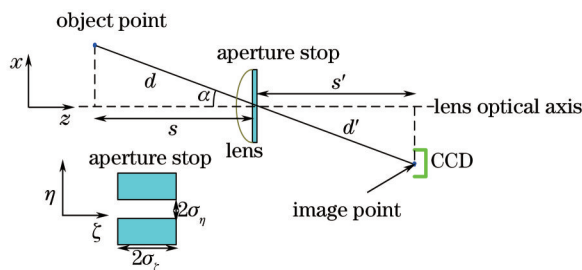


图9 基于透镜像差产生艾里光的光学系统

Fig.9 Optical system of Airy beam generation based on the aberrations of a single lens

实验系统包括5大元件:工作波长为632.8 nm的He-Ne激光器、有小孔的物镜(40 \times)、焦距为25 cm的平凸透镜、位于透镜后面以光轴为中心的矩形孔径光阑和一个像素大小为2 μm \times 2 μm 的CCD相机。平凸透镜安装在旋转平移台上,方便控制倾斜角和与物镜之间的距离,从而调节像差系数。理论研究表明艾里光特征参量 x_0 是间距和倾斜角的函数,这就说明只要改变间距和倾斜角大小就可以调节特征参量。

此方法不需要液晶空间相位调制器,实验系统比较简单容易实现。而且由于组成系统的元件都是无源的且对光信号格式不敏感,所以系统没有功率限制,也就不存在2.1节方法中由于损伤阈值的存在限制输入光功率的问题,同时此方法的艾里光特征参量 x_0 (任意横向尺度)用相同的元件就可以改变的范围是10~200 μm ,这就意味着可以得到可调的宽范围艾里光,打破了2.8节方法中相位调制范围不可调的限制。

2.10 电子艾里光束的产生

电子波函数的包络场的空间变化可以用傍轴亥姆霍兹方程表示,可以发现这个方程与薛定谔方程的形式相同。傍轴亥姆霍兹方程并非描述电子波函数的时间变化,而是描述电子在空间传输时波函数的变化。当电子波函数的初始值设定为艾里函数时,对解出的波包做平方,可以发现波包平方的形状保持不变,并且沿着抛物线轨迹传输。根据这一发现,2013年,Voloch-Bloch等^[32]用电子波函数代替高斯光束产生艾里光束。图10(a)为电子艾里光束的产生过程。

电子枪发射一束电子,通过具有立方相位的纳米级全息图(和立方相位光栅作用相同)进行相位调制,已调光通过一系列磁透镜作傅里叶变换,在后聚焦平面上获得电子艾里光束。实验中测量平面有固定的位置,可以改变磁透镜的焦距来观察电子艾里波包的变化。实验同样验证了艾里光的无衍射,自加速和自恢复的性质。图10(b),(c)是纳米级全息图的TEM显微图像,(b)是有空间载波频率时的显微图像,(c)是无载

波时的显微图像。全息图的设计方法是用如下公式构建一个二进制衍射光栅：

$$h(x,y) = \frac{1}{2} h_0 \left\{ \text{sign} \left\{ \cos \left[2\pi x / \Lambda + c_x x^3 + c_y y^3 \right] + D_{\text{cycle}} \right\} + 1 \right\}, \quad (3)$$

式中 Λ 是载波周期, h_0 是二进制相位膜片的边缘高度, D_{cycle} 可以是任意的数值, c_x, c_y 是 x, y 方向上的常量。用这种方法可以把载波频率加到立方相位上。电子从二进制结构衍射出来会分解成不同的衍射级。在立方相位调制情况下, 每种衍射级是不同立方相位的叠加。因此, 每种衍射级会沿着具有二次系数不同的抛物线轨迹传输, 称这种衍射图为“艾里晶格”。

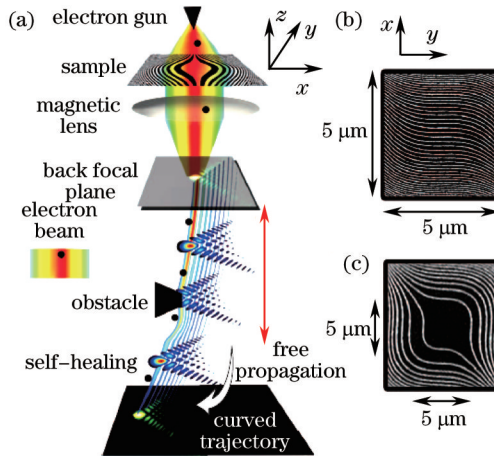


图 10 电子艾里光束产生的实验装置

Fig.10 Experimental setup of the electron Airy beam generation

用电子波函数代替高斯光束产生的电子艾里光, 具有有效传输距离超过 100 m 的优点, 此方法在传输距离上有明显的增加, 可以将此方法运用在艾里光束长距离传输上。

2.11 基于声光晶体产生可调非完整艾里光束

声光效应就是研究光通过超声波扰动的介质时发生散射的现象, 它是光波与介质中声波相互作用的结果。2014 年, Khilo 等^[33]研究发现, 入射光在声波驻波点的声光折射过程中, 当入射光穿过声光晶体单元 (AO cell) 满足一定的条件时, 会在传输光上加上立方相位图, 从而起到立方相位调制的功能。经过傅里叶变换之后会产生非完整艾里光^[34]。图 11 为基于声光晶体产生可调非完整艾里光束的装置^[34]。

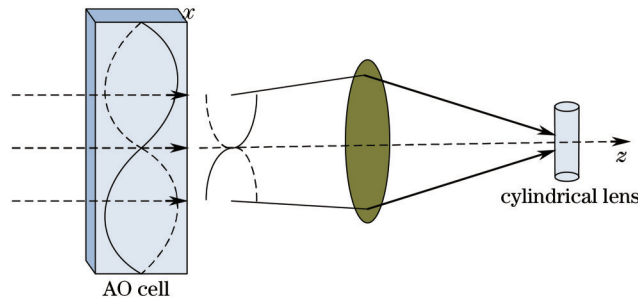


图 11 基于声光晶体产生艾里光束

Fig.11 Generation of Airy beam based on the acousto-optic crystal

矩形的 AO 单元其中一面附有压电传感器, 压电传感器由振动电信号驱动。径向声波沿着 x 轴方向传播, 到达第二个面被反射回来, 从而形成驻波。圆透镜放置在傅里叶透镜的焦距 f 处, CCD 相机记录艾里光传输性质, AO 单元中充满液体或者是实心。理论研究结果表明, 当光轴与驻波节点一致, 同时入射光沿 x 轴宽度小于半声波长时, 由于介质折射系数的时间独立梯度存在, 在声光折射过程中会在传输光上加上立方相位图。

理论分析发现, 增加声波频率和功率, 可以减小非完整艾里光的曲率, 即减小艾里光的横向加速, 因此可通过控制声波来控制艾里光加速, 同时声光晶体所需要的驱动电信号较低, 但是由于声光晶体的局限性, 使其在调制宽度上不太理想。此方法只在理论上得到证明, 有待在实验上进一步的验证。

3 比较分析

本文对几种主要产生艾里光的方法在系统造价、实现难易度、应用潜力等方面进行了比较分析,结果如表1所示。

表1 艾里光产生方法在系统造价、实现难易度、应用潜力等方面的比较

Table 1 Comparison of fabrication cost and difficulty, potential application and other aspects in different methods on generating Airy beams

Method	Fabrication cost	Difficult to fabrication	Potential application	Other aspects
1) Generation of Airy beam based on spatial light modulator	Expensive	Difficult	Nondiffraction beam, particle control, plasma channel and so on	Power output limited, low diffraction efficiency
2) Generation of Airy beam based on quadratic nonlinear photonic crystal	Low price	Easy	Nondiffraction beam, particle control, plasma channel and so on	Trajectory control by change crystal temperature and pump wavelength
3) Generation of Airy beam based on PDLC with a binary phase pattern	Low price	Little difficult	A great potential for application in the adaptive beam, special beam.	Small modulation range and cannot change, but can generate high quality Airy beam
4) Generation of Airy beam based on a liquid crystal with a binary phase pattern electrode	Low price	Little difficult	A great potential for application in the adaptive beam, special beam.	Modulation range can be changed, and can generate high quality Airy beam
5) Generation of plasmonic Airy beam	Low price	Easy	A great potential for application in nanoparticles manipulation, optical sensing, plasma circuit	Large diffraction loss, short propagation distance
6) Airy beam laser	Little expensive	Easy	A great potential for application in the hologram and other high order beams	Large diffraction loss
7) Generation of Airy beam by nanograting induced by femtosecond laser	Low price	Easy	To generate dual Airy beam	Difficult to control Airy beam trajectory
8) Generation of Airy beam using continuous phase plate	Low price	Easy	Apply to generate Airy beam of high power, low diffraction loss	Very low diffraction loss, high power output but cannot change modulation range
9) Airy beam generation based on the aberrations of a single lens	Low price	Easy	Apply to generate high quality one dimensional Airy beam	Low diffraction loss, power output not limited and generate high quality tunable Airy beam
10) Electron Airy beam generation	Low price	Little difficult	Apply to transport long distance	Long effective propagation distance
11) Generation of Airy beam based on the acoustooptic crystal	Low price	Easy	Nondiffraction beam, particle control, plasma channel and so on	Control Airy beam acceleration trajectory by change acoustic frequency and power

最基本产生艾里光束的方法是用空间光调制器对高斯光束进行立方相位调制,再通过透镜进行傅里叶变换。根据这种方法可以把实验装置分为三个部分:高斯光源、立方相位调制器和傅里叶透镜。方法2)~4)、6)~9)和11)都是对立方相位调制器做改变,用不同的方法对高斯光源做立方相位变换,形成不同的立方相位调制器。找到费用更低、简单易实现的立方相位调制器制作方法,对于减少系统造价有很大帮助。方法5)中金属膜表面非周期的纳米阵列是将立方相位调制器和傅里叶透镜组合起来产生艾里光。方法10)中是用改变高斯光源的方法产生艾里光束,用电子代替高斯光,纳米全息图对电子进行立方相位调制,磁透镜发挥傅里叶变换的功能。目前,产生艾里光束的方法很难满足艾里光长距离的传输,在复杂介质中以及非傍轴情况下的传输也有待更加深入的研究。

4 结 论

通过研究近年来艾里光束的主要产生方法的进展,对每种方法在系统造价、实现难易度和应用潜力等方面作比较分析,发现产生艾里光的主要方法可分为三个部分:高斯光源、立方相位调制器和傅里叶透镜。通过分析总结认为造价低、简单易实现的立方相位调制器制作方法可降低系统造价,衍射损耗小、输出功率大、适用性强的产生方法是产生艾里光的发展趋势。

参 考 文 献

- Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. *Am J Phys*, 1979, 47(3): 264–267.
- Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.*. Observation of accelerating Airy beams[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99(21): 213901.
- Wang Xiaozhang. Research on Generation of Airy Beams and Propagation Controlled by Using Spatial Light Modulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王晓章. 基于相位空间光调制器的艾里光束产生和传输控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 979–981.
- Zhang Ze, Hu Yi, Zhao Juanying, *et al.*. Research progress and application prospect of Airy beams[J]. *Science China*, 2013, 58(34): 3514–3520.
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): 3514–3520.
- Xu Jia, Liu Juan, Xie Jinghui, *et al.*. Reviews of recent researches on Airy beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 070501.
徐 佳, 刘 娟, 谢敬辉, 等. 艾里激光束理论及应用的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(7): 070501.
- 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.
- Nikolaos K Efremidis. Airy trajectory engineering in dynamic linear index potentials[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 3006–3008.
- Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.*. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. *Science*, 2009, 324(5924): 229–232.
- Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. *Nat Photonics*, 2008, 2(11): 675–678.
- Cheng Hua, Zang Weiping, Tian Jianguo. Study on optical trapping and propulsion of small particles by Airy beam[J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, 31(s1): s100405.
程 化, 臧维平, 田建国. 艾里光束对微小颗粒的捕获和输运研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100405.
- Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D, *et al.*. Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(25): 253901.
- Chunyi Chen, Huamin Yang, Mohsen Kavehrad, *et al.*. Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52: 106–114.
- 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.
- T Ellenbogen, N Voloch, A Ganany-Padowicz, *et al.*. Nonlinear generation and manipulation of Airy beams[J]. *Nat*

- Photonics, 2009, 3(7): 395–398.
- 16 Ido Dolev, Tal Ellenbogen, Noa Voloch–Bloch, *et al.*. Control of free space propagation of Airy beams generated by quadratic nonlinear photonic crystals[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(20): 201112.
- 17 H W Ren, Y H Lin, Y H Fan, *et al.*. Polarization– independent phase modulation using a polymer– dispersed liquid crystals[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(14): 141110.
- 18 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.
- 19 D Luo, H T Dai, X W Sun, *et al.*. Electrically switchable finite energy Airy beams generated by a liquid crystal cell with patterned electrode[J]. Opt Communications, 2010, 283(20): 3846–3849.
- 20 A Salandrino, D N Christodoulides. Airy plasmon: a nondiffracting surface wave[J]. Opt Lett, 2010, 35(12): 2082–2084.
- 21 L Li, T Li, S M Wang, *et al.*. Plasmonic Airy beam generated by in– plane diffraction[J]. Phys Rev Lett, 2011, 107(12): 126804.
- 22 A Minovich, A E Klein, N Janunts, *et al.*. Generation and near– field imaging of Airy surface plasmons[J]. Phys Rev Lett, 2011, 107(11): 116802.
- 23 Stefano Longhi. Airy beams from a microchip laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(5): 716–718.
- 24 G Porat, I Dolev, O Barlev, *et al.*. Airy beam laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(20): 4119–4121.
- 25 E Bricchi, B G Klappauf, P G Kazansky. Form birefringence and negative index change created by femtosecond direct writing in transparent materials[J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 119–121.
- 26 M Beresna, P G Kazansky, T Gertus, *et al.*. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass[J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(20): 201101.
- 27 M Beresna, P G Kazansky. Polarization diffraction grating produced by femtosecond laser nanostructuring in glass[J]. Opt Lett, 2010, 35(10): 1662–1664.
- 28 Mindaugas Gecevičius, Martynas Beresna, Peter G.Kazansky. Accelerating Airy beams generated by ultrafast laser induced space– variant nanostructures in glass[C]. 2012 Conference on Lasers and Electro– Optics (CLEO), San Jose, CA, IEEE, 2012. JTulK.7.
- 29 Rui Cao, Yong Yang, Jingang Wang, *et al.*. Microfabricated continuous cubic phase plate induced Airy beams for optical manipulation with high power efficiency[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(26): 261106.
- 30 D G Papazoglou, S Suntsov, D Abdollahpour, *et al.*. Tunable intense airy beams and tailored femtosecond laser filaments[J]. Phys Rev A, 2010, 81(6): 061807.
- 31 P Acebal, L Carretero, S Blaya, *et al.*. Generation of high– quality tunable one– dimensional Airy beams using the aberrations of a single lens[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(5): 1273–1280.
- 32 Noa Voloch–Bloch, Yossi Lereah, Yigal Lilach, *et al.*. Generation of electron Airy beams[J]. Nature, 2013, 494(7437): 331–335.
- 33 N A Khilo, V N Belyi, N S Kazak, *et al.*. Acoustooptic refraction– influenced generation of tunable incomplete Airy beams[J]. J Opt, 2014, 16(8): 085702.
- 34 Ring J D, Howls C J, Dennis M R. Incomplete Airy beams: finite energy from a sharp spectral cutoff[J]. Opt Lett, 2013, 38(10): 1639–1641.

栏目编辑: 史 敏