

多艾里光束合成自聚焦光束的实验实现

张泽¹⁾²⁾³⁾ 刘京郊^{1)†} 张鹏²⁾ 倪培根²⁾ Prakash Jai²⁾ 胡洋⁴⁾
姜东升⁴⁾ Christodoulides Demetrios N³⁾ 陈志刚²⁾

1) (哈尔滨工业大学航天学院可调谐激光国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (旧金山州立大学物理与天文系, 美国 94132)

3) (中佛罗里达大学, 光学与光子学学院, 美国 32816)

4) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2012年3月11日收到; 2012年8月31日收到修改稿)

多光束合成和单光束聚焦一直是提高激光束功率和功率密度的两个重要方法. 结合艾里光束在自由空间中沿弯曲路径传播的特性, 从数值模拟和实验两个方面, 研究了利用多个一维艾里光束合成自由空间自聚焦光束的方法, 并对所得到的模拟和实验结果进行了对比. 采用分步束传播法, 分别模拟了由四个和八个一维艾里光束合成的自聚焦光束在自由空间中的传播过程, 给出了自聚焦光束在传播过程中横向和纵向的光强分布和变化趋势. 采用计算全息和空间光调制器技术实验, 实现了多个一维艾里光束合成的自聚焦光束. 实验中分别测量了四个和八个一维艾里光束合成的自聚焦光束的横向光强分布. 实验结果和理论结果符合得较好. 另外, 为了进一步增大自聚焦光束的功率, 可以增加参与合成的一维艾里光束的数量. 同时, 自聚焦光束的焦距可以通过调整各个一维艾里光束的相对位置进行调节.

关键词: 艾里光束, 自聚焦光束, 激光合成, 空间光调制**PACS:** 42.68.Ay, 42.30.Kq, 42.30.Lr, 42.40.Jv**DOI:** 10.7498/aps.62.034209

1 引言

1960年第一台激光器被成功研制以来, 提高激光束的功率和功率密度一直是人们研究的重要课题. 目前, 获得高功率和高功率密度激光束的方法, 主要以多光束合成和单光束聚焦为主. 单光束聚焦通常利用凸透镜或凹面镜实现. 凸透镜和凹面镜的焦距一般是不可改变的, 因此采用这种方法所产生的聚焦光束的高功率密度位置也就相对固定. 若要改变聚焦位置就需要对系统镜组的相对位置进行机械移动, 这就必然降低激光束的聚焦精度. 同时, 这种聚焦系统也需要聚焦材料和光束直接接触, 因此, 材料所能承受的功率阈值也就限制了整个系统所能承受的功率强度. 为了摆脱材料对激光束功率的限制, 研究激光束在自由空间的自

聚焦就具有重要意义. 同时, 为了能够更精确、更快速地调节激光束的聚焦位置, 研究一种非机械移动的方式来改变激光束聚焦位置也尤为必要. 2007年, 艾里光束在实验上首次被产生出来^[1-3], 其后, 艾里光束的研究和应用就一直是物理学界研究的热点问题^[4-7]. 基于艾里光束能在自由空间自横向加速传播的特点^[8,9], Hwang等^[10]发现可以用它来构造一种类贝塞尔光束. 2010年, Efremidis和Christodoulides^[11]首先在理论上提出产生自聚焦圆环形艾里光束的方法. 随后这种圆环形自聚焦艾里光束得以实验实现^[12,13], 并被应用到了粒子操控和激光烧蚀方面. 通常的一维和二维艾里光束在传播过程中均向一侧偏转, 而圆环形艾里光束在传播过程中能量逐渐向中心靠拢. 因此, 圆环形艾里光束本身是一个能在自由空间自聚焦的光束. 然而, 圆环形艾里光束本身只是一束光, 所以只能起到提高

† 通讯作者. E-mail: zhze333@gmail.com

激光功率密度的目的,而不能通过光束合成的方式获得激光总功率的提高.为了同时提高激光束的功率和功率密度,研究多光束合成的自聚焦光束就具有重要意义.基于艾里光束在自由空间自横向加速的特性,本文首先数值模拟了四个和八个艾里光束构建自聚焦光束的可能性,然后在实验上进行验证.

2 自聚焦光束的数值模拟

艾里光束的光强分布遵循艾里函数.如图 1(a)所示,艾里函数沿 x 轴的正向迅速衰减为零,而沿 x 轴的负向逐级减弱.艾里函数在数学上不可积,因此其对应的艾里光束携带有无穷能量.为了能在实验上实现艾里光束,需要对艾里函数加上指数衰减

因子,从而保证它在 x 轴负向无穷远处趋于零,使其数学上可积,如图 1(b)所示.可积的艾里函数对应有有限能量的艾里光束,因而可以实验实现^[2,3].如无特殊说明,下文中艾里光束均指有限能量艾里光束.艾里光束具有自横向加速传播(自弯曲)、自修复以及无衍射等许多有趣的特性.根据艾里光束的自弯曲特性,当等距对称排列多个一维艾里光束,并使它们都向中心做横向加速时,在传输过程中,它们所携带的能量将逐渐会聚,从而实现自聚焦.图 1(c)给出了利用四个一维艾里光束构造自聚焦光束的例子,其中四个一维艾里光束分别位于在 x, y 的正负轴上,相对于 z 轴对称排布的同时均向原点方向加速.在光束沿 z 轴正向传播的过程中,四个艾里光束将逐渐在 z 轴上实现聚焦.

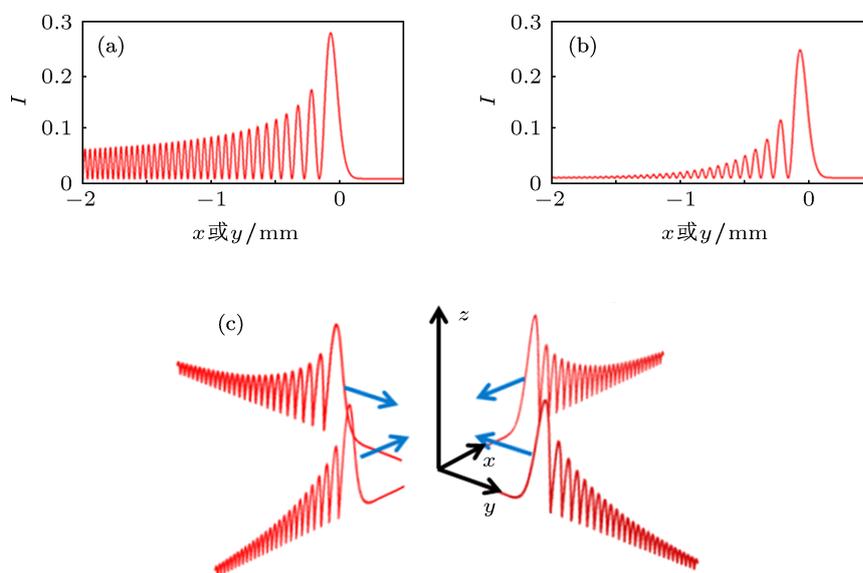


图 1 (a) 无限能量艾里光束的光强分布; (b) 指数衰减后的有限能量艾里光束光强分布; (c) 四个一维艾里光束合成自聚焦光束 (4AAB) 的构造方式示意图

基于上述思想,可以采用分步束传播法对四个一维艾里光束合成自聚焦光束的过程进行数值模拟.所谓分步束传播法是指把光束的整个传播过程分作很多小的演化过程,首先根据初始入射条件,求出第一个小演化过程的输出解,然后以此输出解作为下个过程的初始条件纳入运算,如此循环即可模拟出光束的整个传播过程.图 2 给出了四个一维艾里光束合成自聚焦光束 (4AAB) 的模拟结果,其中图 2(a) 为 4AAB 在沿 y 轴上的光强分布随光束传播位置的演化.可以看出,4AAB 首先保持低功率密度形式向前传播,光束间距逐渐缩小,能量

逐渐向中心会聚,并在一段距离后达到最大功率密度,实现了自聚焦.图 2(b1)—(b4) 分别为 4AAB 在传播方向上不同位置(见图 2(a) 中的标注)横截面的光强分布图.从图 2(b1) 可以看到,入射处光束横截面上分布了两条正交的“暗槽”,这两条“暗槽”把整个光束横截面分成了四个区域.每个区域都具有类似于二维艾里光束的横向结构,即一个光束主瓣后面分布了很多次级光瓣.这些光瓣在传播过程中逐渐向中心做横向加速,“暗槽”也逐渐变窄并隆起,如图 (b2) 所示;随着光束继续往前传播,光束能量继续向中心会聚,最终在光束中心位置获得了一

个高光强主瓣,并在原来的“暗槽”位置处形成了高光强隆起,如图(b3)所示;此时也可以观察到远离中心的小光瓣显著变弱,这主要是因为它们的能量横向加速到了光束中心,至此,光束就完成了聚焦行为.完成自聚焦后的光束开始发散,中心主瓣能量慢慢减弱,如图(b4)所示.仿照透镜焦点和焦距的定义,自聚焦光束光强最大的位置也可以定义为焦点,四个艾里光束的出射位置到焦点的距离定义为焦距.

为了进一步验证合成光束数目的可扩展性,采用同样的方法对八个一维艾里光束合成的自聚焦光束(8AAB)进行了数值模拟,结果如图2(c)所示.显然,8AAB的传播演化过程与4AAB的相似.不

同之处在于,4AAB的横向光强分布表现为一些离散的光瓣结构,而8AAB在起始位置就彼此相连形成了一个环状结构,环的周围散布了八个高光强的次级光瓣和一些低强度的旁瓣,如图4(c1)所示.随着光束的传播,环状结构渐渐缩小,最后形成了一个实心主瓣,如图4(c2)所示.随后,主瓣光强继续增大,光瓣直径越来越小,次级光瓣和其他光瓣的强度越来越弱,最终在图4(c3)处形成了光强最大、尺寸最小的主瓣,完成了自聚焦过程.相对于4AAB,8AAB的焦点位置主瓣能量更加集中,即主瓣和旁瓣能量之比更大.聚焦之后的8AAB能量开始分散,如图(c4)所示.

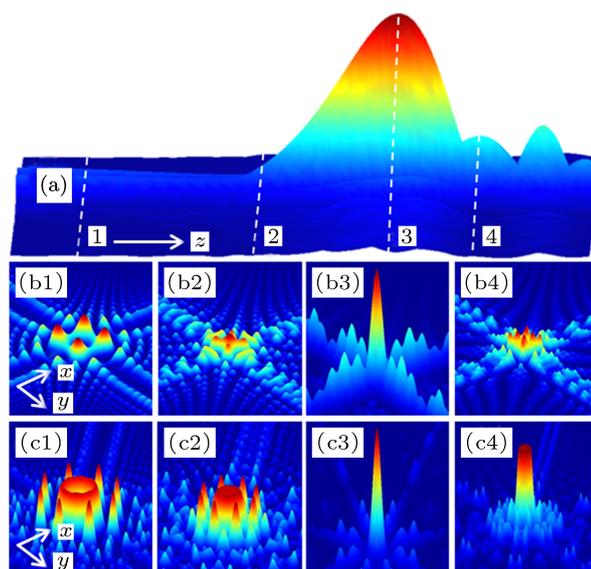


图2 多艾里光束合成的自聚焦光束光强分布的数值模拟结果 (a) 4AAB沿 y 轴光强分布在传播方向上的演化; (b1)—(b4)和(c1)—(c4)分别为4AAB和八个一维艾里光束合成自聚焦光束(8AAB)在四个不同位置横截面(见(a)中标注)上的光强分布

3 自聚焦光束的实验实现

人们通常采用空间光调制器结合相位掩模技术或计算全息技术在实验上产生艾里光束^[1-5,14-16].这里采用空间光调制器结合计算全息的技术^[14-16]来实验实现自聚焦光束.为了保证光束的合成效果,四个艾里光束由同一束激光调制而成.具体方法是在空间光调制器中输入计算生成的全息图,同时调制出四个艾里光束.所采用的计算全息图的制作通过计算机来完成,即利用Matlab编程计算四个分别位于 x, y 正负轴上艾里光束与一束平面波干涉的强度图样,如图3(a)所示.采用相同的方法,也可以制备出8AAB对应的计算

全息图,如图3(b)所示.

产生4AAB和8AAB的实验光路如图3(c)所示,高斯光首先经过空间滤波器和透镜1扩束准直,通过分束镜后垂直照射到空间光调制器上,以读出计算机输入的4AAB和8AAB的计算全息图.从空间光调制器反射的光经过透镜2和透镜3组成的 $4f$ 系统进行滤波处理后,即可得到相应的自聚焦光束.自聚焦光束在不同位置横截面上的光强分布由CCD相机进行观察和记录.通过实时更换空间光调制器中的计算全息图,可以实时地改变艾里光束之间的间距,从而可以改变光束的自聚焦位置,实现对焦距的非机械调节.

实验结果以及相应的数值模拟结果如图 4 所示, 其中图 4(a) 为自聚焦光束在传播方向上的光强分布数值模拟结果. 图 4(b1)—(b4) 为 4AAB 在图 4(a)1—4 虚线位置处的横截面光强分布的数值模拟结果. 图 4(c1)—(c4) 为与图 4(b1)—(b4) 对应的实验结果. 从图中可以看出, 在初始位置附近 (图 4(a) 中虚线 1 处) 四个艾里光束形成方形结构, 四周散布了许多光瓣, 这些光瓣在远离中心的方向上强度依次减弱, 四个顶点位置为光强极大处 (见图 4(b1) 和 4(c1)), 实验测得相邻顶点的间距约为 $250\ \mu\text{m}$,

此间距可以通过更换计算全息图来改变; 随着光束向前传播, 光强极大值点的间距渐渐缩小, 在图 4(a) 虚线 2 处形成一个极大值光瓣, 四周散布一些条形光瓣 (见图 4(b2) 和 4(c2)); 随着光束继续向前传播, 在图 4(a) 虚线 3 处获得了一个光强最大、直径最小的光斑 (图 b3), (c3), 实验测得其直径约为 $25\ \mu\text{m}$, 表明 4AAB 完成了自聚焦; 随后, 在焦点后的图 4(a) 虚线 4 处, 光强极大值四周又重新出现了旁瓣 (见图 4(b4) 和 4(c4)), 表明光束开始发散.

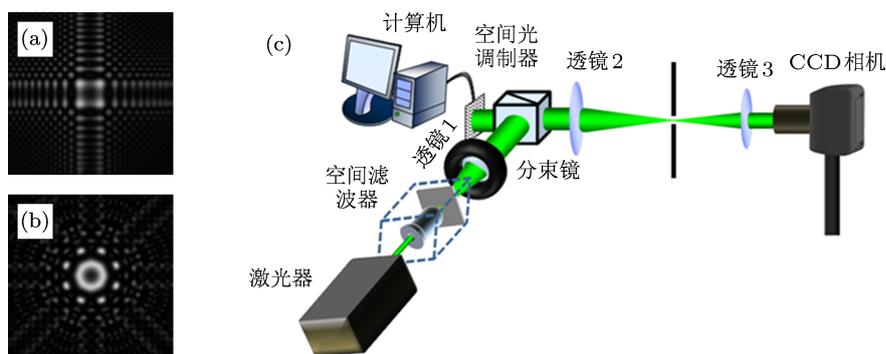


图 3 分别为产生 4AAB (a) 和 8AAB (b) 的计算全息图, (c) 为实验装置示意图

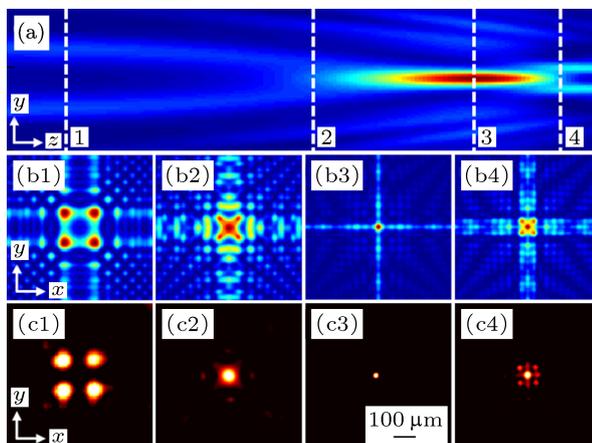


图 4 (a) 4AAB 在传播方向上的光束强度分布数值模拟图; (b1)—(b4) 4AAB 在 (a) 中 1—4 处的横截面强度分布数值模拟图; (c1)—(c4) 分别为对应于 (b1)—(b4) 的实验结果

由图 4 可以看到, 4 个相向横向加速的艾里光束可以合成自聚焦光束, 实验结果与理论模拟结果符合较好. 为了验证合成光束数目的扩展性, 对 8AAB 也进行了实验研究. 8AAB 对应的计算全息图如图 3(b) 所示, 数值模拟和实验结果如图 5 所

示. 由图中可以看出, 输入面上八个艾里光束的合成光束在横截面上表现为连续的圆环 (如图 5(b1) 和 5(c1)), 环的直径约为 $300\ \mu\text{m}$, 环的周围散布了八个二级光瓣和一些微弱的小光瓣; 随着光束继续向前传播, 环状光束在图 5(a) 中虚线 2 处汇聚成一

实心主瓣 (如图 5(b2) 和 5(c2)), 其直径约为 $80\ \mu\text{m}$, 主瓣周围除了八个清晰的二级光瓣外, 其余光瓣不再像 4AAB 那样清晰, 而表现为一些花纹结构的光瓣; 随着光束的传播, 实心主瓣慢慢变小, 图 5(a) 中虚线 3 汇聚成一个尺寸约为 $25\ \mu\text{m}$ 的光瓣 (如

图 5(b3) 和 5(c3)). 此时, 主瓣附近的二级光瓣消失不见, 花纹结构的光瓣强度也大大减弱, 主瓣强度达到最大, 完成了自聚焦; 聚焦后的光束开始发散, 在光束中心重新出现了一个环状结构 (如图 5(b4) 和 5(c4)).

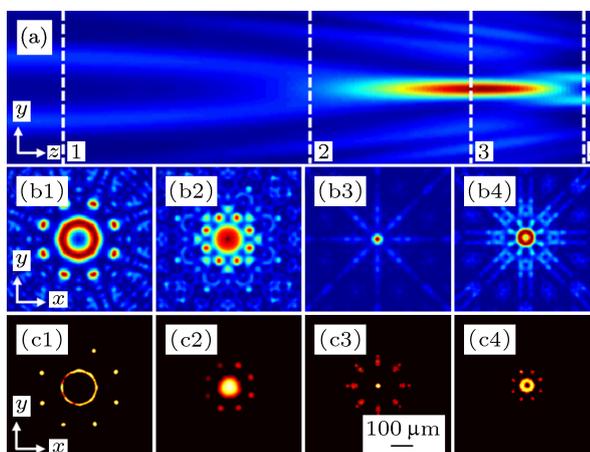


图 5 (a) 8AAB 在传播方向上的光束强度分布数值模拟图; (b1)—(b4) 8AAB 在 (a) 中 1—4 处的横截面强度分布数值模拟图; (c1)—(c4) 分别为对应于 (b1)—(b4) 的实验结果

4 结论

基于艾里光束的自横向加速特性, 分别利用四个和八个一维艾里光束合成了自聚焦光束. 从数值模拟和实验验证两个方面研究了自聚焦光束合成的效果. 实验结果和模拟结果符合较好. 这种方法产生的自聚焦光束具有两个方面的优点: 其一, 简

单地增加合成艾里光束的数目就可以提高自聚焦光束的总功率, 因而具有良好的功率可扩展性; 其二, 可以非机械地调节光束焦距的长短, 因而具有很高的调节速度和精度. 此方法有望在产生高功率和高功率密度激光束方面发挥积极作用.

感谢国家留学基金委的资助, 使得作者能在美国有此良好的学习机会.

- [1] Hu Y, Siviloglou G A, Zhang P, Efremidis N K, Christodoulides D N, Chen Z G 2012 *Nonlinear Photonics and Novel Optical Phenomena* (1st Edn.) (New York: Springer) p1
- [2] Siviloglou G A, Christodoulides D N 2007 *Opt. Lett.* **32** 979
- [3] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, Christodoulides D N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 213901
- [4] Hu Y, Zhang P, Lou C, Huang S, Xu J, Chen Z G 2010 *Opt. Lett.* **35** 2260
- [5] Hu Y, Huang S, Zhang P, Lou C, Xu J, Chen Z G 2010 *Opt. Lett.* **35** 3952
- [6] Ellenbogen T, Voloch-Bloch N, Ganany-Padowicz A, Arie A 2009 *Nature Photon.* **10** 1038
- [7] Ye Z Y, Liu S, Lou C B, Zhang P, Hu Y, Song D H, Zhao Z L, Chen Z G 2011 *Opt. Lett.* **36** 3230
- [8] Zhang P, Wang S, Liu Y, Yin X, Lu C, Chen Z G, Zhang X 2011 *Opt. Lett.* **36** 3191
- [9] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, Christodoulides D N 2008 *Opt. Lett.* **33** 207
- [10] Hwang C Y, Kim K Y, Lee B 2011 *Opt. Express* **19** 7356
- [11] Efremidis N K, Christodoulides D N 2010 *Opt. Lett.* **35** 4045
- [12] Zhang P, Prakash J, Zhang Z, Kajorndej V, Efremidis N K, Christodoulides D N, Chen Z G 2011 *Opt. Lett.* **36** 2883
- [13] Papazoglou D G, Efremidis N K, Christodoulides D N, Tzortzakis S 2011 *Opt. Lett.* **36** 1842
- [14] Zhang P, Zhang Z, Prakash J, Huang S, Hernandez D, Salazar M, Christodoulides D N, Chen Z G 2011 *Opt. Lett.* **36** 1491
- [15] Zhang P, Huang S, Hu Y, Hernandez D, Chen Z G 2010 *Opt. Lett.* **35** 3129
- [16] Zhang P, Hu Y, Cannan D, Salandrino A, Li T C, Morandotti R, Zhang X, Chen Z G 2012 *Opt. Lett.* **37** 2820

Generation of autofocusing beams with multi-Airy beams*

Zhang Ze¹⁾²⁾³⁾ Liu Jing-Jiao^{1)†} Zhang Peng²⁾ Ni Pei-Gen²⁾ Prakash Jai²⁾
Hu Yang⁴⁾ Jiang Dong-Sheng⁴⁾ Christodoulides Demetrios N³⁾ Chen Zhi-Gang²⁾

1) (National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang 150001, China)

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

3) (CREOL/The College of Optics & Photonics, University of Central Florida, Orlando, Florida 32816, USA)

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

(Received 11 March 2012; revised manuscript received 31 August 2012)

Abstract

Thus far, focusing a single beam and combining multi-optical Gaussian beams have become two major methods of locally enhancing output laser intensity. In this paper, we propose a method of generating free space auto-focusing beams by combining multiple one-dimensional Airy beams. By employing split-step beam propagation method, auto-focusing beams generated by four and eight one-dimensional Airy beams are numerically simulated, and their intensity distributions are displayed from both transverse plane and side-view propagation. By utilizing a spatial light modulator and computer generated phase masks, these auto-focusing beams are experimentally demonstrated. Our experimental results accord well with the numerical simulations.

Keywords: Airy beam, auto-focusing beam, laser combination, spatial light modulation

PACS: 42.68.Ay, 42.30.Kq, 42.30.Lr, 42.40.Jv

DOI: 10.7498/aps.62.034209

† Corresponding author. E-mail: zhze333@gmail.com