

贝塞尔-高斯涡旋光束相干合成研究

于涛 夏辉 樊志华 谢文科 张盼 刘俊圣 陈欣

Generation of Bessel-Gaussian vortex beam by combining technology

Yu Tao Xia Hui Fan Zhi-Hua Xie Wen-Ke Zhang Pan Liu Jun-Sheng Chen Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 134203 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180325

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180325>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[贝塞尔高斯涡旋光束相干合成研究](#)

Generation of Bessel-Gaussian vortex beam by combining technology

物理学报.2018, 67(13): 134203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.134203>

[超短激光脉冲波形的单次测量技术](#)

A new technique for measuring single-shot ultrashort laser pulse

物理学报.2017, 66(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044204>

[高非线性光子晶体光纤中优化产生宽带紫外三次谐波](#)

Optimization of broadband third-harmonic UV generation in highly nonlinear photonic crystal fiber

物理学报.2017, 66(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044205>

[熔石英损伤修复坑下游光场调制的数值模拟与实验研究](#)

Study of downstream light intensity modulation induced by mitigated damage pits of fused silica using numerical simulation and experimental measurements

物理学报.2016, 65(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024205>

[利用 Kagome 光纤实现多芯光子晶体光纤的输出合束](#)

The beam combination of multi-core photonic crystal fiber by using the Kagome fiber

物理学报.2016, 65(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024206>

贝塞尔-高斯涡旋光束相干合成研究*

于涛¹⁾ 夏辉¹⁾ 樊志华²⁾³⁾ 谢文科^{1)†} 张盼¹⁾ 刘俊圣¹⁾ 陈欣¹⁾

1) (中南大学物理与电子学院, 长沙 410083)

2) (上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

3) (中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 201109)

(2018年2月12日收到; 2018年4月19日收到修改稿)

基于相干合成技术, 提出了对特定离散空间分布的高斯光束阵列加载离散涡旋相位生成二阶贝塞尔-高斯(Bessel-Gaussian, BG)涡旋光束的方案. 利用干涉法、桶中功率和相关系数对合成BG涡旋光束的拓扑荷、光束质量进行了定量评价及参数优化. 结果表明: 基于相干合成技术能够产生特定的目标BG涡旋光束, 阵列子光束紧密排布时合成BG光束的光束质量更高. 该方法的提出对于其他涡旋光束的产生或者涡旋光束功率的提高具有一定的参考意义.

关键词: 涡旋光束, 相干合成技术, 桶中功率, 拓扑荷

PACS: 42.60.Jf, 42.55.-f, 42.15.Eq, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.67.20180325

1 引言

涡旋光束是在传播方向上中心强度或轴向强度为零、位相具有螺旋上升或下降的梯度分布的环形光束, 又称暗中空光束^[1]. 涡旋光束凭借其独特的螺旋相位分布和携带轨道角动量的特性已成为近年来特殊光束研究中的热点^[2-4]. 光与物质的相互作用是人类探索微观物质结构及运动规律的重要手段, 而涡旋光束携带的轨道角动量能够为光与物质相互作用带来新的自由度, 其携带的轨道角动量所产生的力矩可用于揭示极端强场条件下的原子物理新现象、新效应^[5]等. 涡旋光束不仅对大气湍流有很强的抗干扰能力, 而且由于其涡旋光束轨道角动量本征态可以构建高维Hilbert空间, 进而可实现高密度数据存储以及通信容量和速度的提高^[6,7], 并具有较强的防窃听抗干扰能力. 涡旋光束与粒子之间的相互作用研究表明: 涡旋光束的轨道角动量特性可实现对微观粒子的旋转^[8]等. 所以, 涡旋光束在光束与物质相互作用新机理研究、

光通信、粒子操控等方面均有着重要的应用. 但目前方法获得的涡旋光束能量普遍不高, 导致其应用研究的发展受到一定的制约, 如光与物质相互作用新现象的出现、更长距离的光通信、粒子操控中光束与粒子的相互作用难以加强等. 因此, 如何获得更高功率兼具高光束质量的涡旋光束成为涡旋光束工程应用中必须要解决的问题之一^[9-11].

目前, 对高功率涡旋光源的研究大多着眼于单个激光器. 例如, Kim等^[12]利用主振荡光功率放大(master oscillator power-amplifier, MOPA)技术在谐振腔产生高光束质量的拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束, 并将LG光束耦合进多模掺铒光纤进行传输放大, 实现了连续涡旋光束输出. 但该方法存在信号光与模场区域失配、斜率效率较低等问题. Li等^[13]采用涡旋信号光通过端面抽运Ho:YAG棒放大的高功率涡旋光束产生方法. 该技术具有光路简单、空间模场面积较大, 但是放大效率低、热透镜效应严重、光束质量较差等问题. 事实上, 由于热损伤、非线性效应等物理因素, 单个激光器的输出功率不可能无限提升. 相干合成技术可以

* 装备预研领域基金(编号: 6140415020311)和高能激光技术湖南省重点实验室开放基金(编号: GNJGJS04)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenkexiedan@163.com

通过增加光束数量来增加输出功率, 通过锁定相位来保持光束质量, 最终实现输出光功率的提高. 与单台高功率激光器相比, 相干合成方法实现的阵列式光源还在系统成本、热管理和光束控制等方面有明显的优势^[14].

本文以2阶贝塞尔-高斯(Bessel-Gaussian, BG)光束为目标涡旋光束, 基于相干合成技术, 对相位同步的阵列高斯光束加载离散涡旋相位来获得涡旋光束的方法进行了实验研究. 利用干涉法实验以及桶中功率评价函数等验证了合成涡旋光束与目标光束的相位分布和光强分布的一致性, 进而验证了基于相干合成技术获得涡旋光束方法的有效性. 本文详细分析了高斯光束阵列空间布局、子光束数量等参数对合成涡旋光束质量的影响, 通过参数优化以获得不同拓扑荷数时的高光束质量涡旋光束.

2 理论基础

2.1 Gauss 光束阵列模型

贝塞尔光束是中空的环形光束, 具有螺旋相位结构. 本文以此为基础将高斯光束阵列进行圆形排布用于模拟贝塞尔光束^[15-17]. 如图1所示, 圆形排布的高斯光束阵列在 z 轴传播的光振幅表达式^[18,19]为

$$E_{\text{GBs}}(x, y, z) = \sum_{m=0}^{M-1} E_m(x, y, z), \quad (1)$$

其中,

$$E_m(x, y, z) = \exp \left[-\frac{(x - R \cos \theta_m)^2 + (y - R \sin \theta_m)^2}{w^2(z)} \right] \times \exp \left\{ -i \left[k \left[z + \frac{(x - R \cos \theta_m)^2 + (y - R \sin \theta_m)^2}{2R(z)} \right] \right] \right\} \times \exp(i \arctan(z/f)) \exp(i\varphi_m), \quad (2)$$

(2)式中, $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}$; $R(z) = z + f^2/z$; $f = \pi w_0^2/\lambda$; $\theta_m = 2\pi m/M$ ($m = 0, 1, 2, \dots, M$) 是对应高斯光束中心与 x 轴的夹角; $\varphi_m = 2\pi n m/M$ 是对应高斯子光束额外附加的相位. 其中子光束之间相位相差 $2\pi n/M$, 单位为弧度; $\lambda = 628 \text{ nm}$. R 是高斯光束组成的圆环半径; n 是拓扑荷数; M 是光束数量; l 是单束高斯光束所占的弧长; $w_0, w(z), R(z)$ 分别为高斯光束的束腰半径、光斑半径和曲率半径; z 是传播距离; f 为高斯光束的共焦参数. 由(1)和(2)式, 子光束的衍射效应会使得加载了相位差的相邻子光束间产生光场的叠加, 从而在自由空间相干合成获得近似的BG光束的光场分布. $M = 12, n = 2, R = 0.8 \text{ cm}, w_0 = 0.2 \text{ cm}$ 时, 源平面高斯光束阵列的振幅及相位分布如图1所示.

相关系数用于表征两个物理量间的相似程度. 相关系数越接近于1, 两个物理量的近似度越高; 相关系数为0, 则说明两个物理量不存在相似性. 设仿真BG光束的光场分布为 I_1 , 标准BG光束的光场分布为 I_2 , 则有

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n I_{1i} I_{2i} - \sum_{i=1}^n I_{1i} \cdot \sum_{i=1}^n I_{2i}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n I_{1i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n I_{1i} \right)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n I_{2i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n I_{2i} \right)^2}}. \quad (3)$$

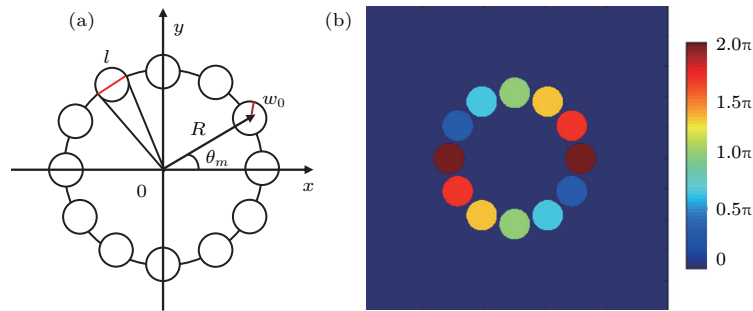


图1 高斯光束阵列的 (a) 空间振幅分布和 (b) 相位分布, 其中 $M = 12, n = 2, R = 0.8 \text{ cm}, w_0 = 0.2 \text{ cm}$

Fig. 1. (a) Intensity distributions and (b) phase distributions of Gaussian beam array for $M = 12, n = 2, R = 0.8 \text{ cm}, w_0 = 0.2 \text{ cm}$.

由于BG光束的中空环形光强分布, 斯特列尔比等参数不适合用于描述BG光束的远场光强分布的能量集中度. 本文以目标处的桶中功率 (power-in-the-bucket, PIB) 作为评价合成BG光束质量的性能指标, 其定义为在远场给定尺寸的“桶”中包围的激光功率占总功率的百分比, 它表征光束的能量集中状态, 反映了实际激光在远场的可聚焦能力^[20]. 设桶的半宽度为 b , 整个光斑的半宽度为 a , 则有

$$PIB = \frac{\int_0^b \int_0^{2\pi} |E(x, y)|^2 r dr d\theta}{\int_0^a \int_0^{2\pi} |E(x, y)|^2 r dr d\theta}, \quad (4)$$

其中 $E(x, y)$ 为远场振幅分布. 本文利用目标处 PIB 作为评价合成BG光束质量的性能指标, PIB 介于 0 和 1 之间, 越大说明合成导致的旁瓣越少, 能量更集中.

2.2 实验原理图

实验装置图如图 2 所示, He-Ne 激光器发出的光经过扩束镜扩束 5 倍后, 经过分束镜分束, 其中一束入射到振幅型空间光调制器 (SLM), 将扩束后的光分成 M 束相同的高斯光束, 此时振幅 SLM 所加载的灰度图如图 3 中所示, 阵列光束经过纯相位型 SLM 加载拓扑荷为 n 的涡旋相位, 最后经过合束镜、透镜后入射到电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 上; 经分束镜分束后的参考光束被反射镜反射后入射到合束器与合成涡旋光束合束, 在 CCD 上观察到干涉条纹. 图 3 中的偏振片 1 和偏振片 2 的角度互相垂直, 且偏振片 2 的角度满足纯

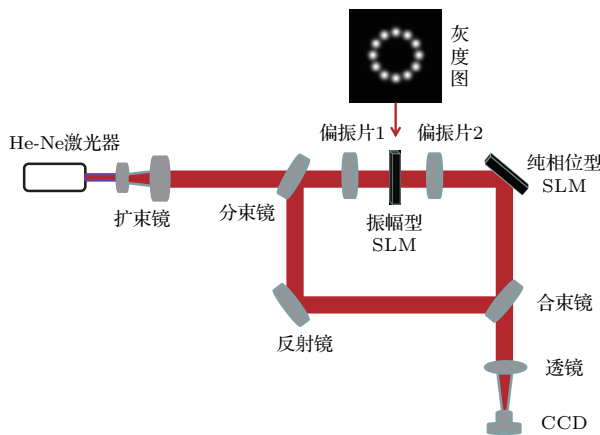


图 2 实验光路图

Fig. 2. Experimental setup for the generation of a BG beam by the coherent combining technology.

相位型 SLM 的纯相位调制状态.

相干合成的技术难点之一在于对参与合成的各子光束的精细相位控制, 本实验通过振幅型 SLM 分束简化了相干合成中子光束初相位同步的问题. 这是因为振幅型 SLM^[21] 加载的灰度图中子光束的灰度一致, 能够保证分束之后子光束的相位同步性, 实现了锁相输出.

本文利用图 3 所示的实验装置验证了高斯光束阵列加载离散涡旋相位合成产生 BG 光束方法的有效性.

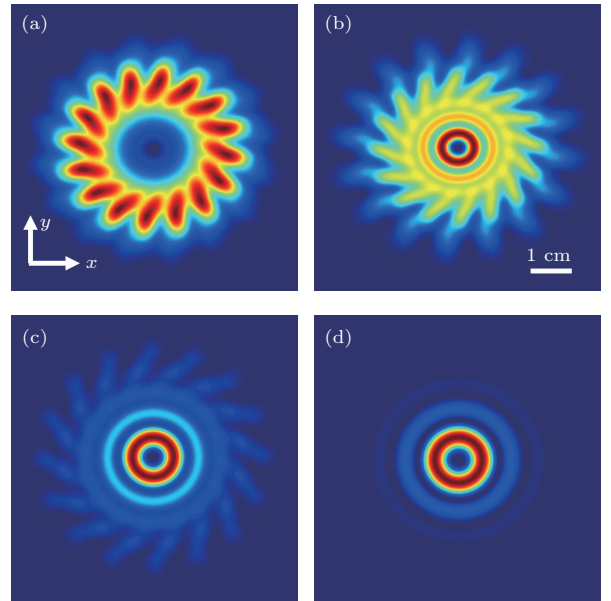


图 3 合成 BG 光和标准二阶 BG 光的光强截面图 (a) $z = 0.6$ m; (b) $z = 1$ m; (c) $z = 2$ m; (d) 标准二阶 BG 光

Fig. 3. Comparison of the intensity distributions between coherently combined BG beam with different z and second-order BG beam: (a) $z = 0.6$ m; (b) $z = 1$ m; (c) $z = 2$ m; (d) second-order BG beam.

3 结果与讨论

3.1 合成BG光束强度分布验证

根据 (1) 式, 数值计算了 $M = 16, n = 2$, $R = 1.1$ cm, $w_0 = 0.2$ cm 时合成的 BG 光在 $z = 0.6, 1, 2$ m 的光强分布分别如图 3(a)–(c) 所示, 图 3(d) 为标准二阶 BG 光束的光强分布. 由图 3 可知, 在 $z = 0.6$ m 时, 高斯光束阵列尚没有合束形成类似 BG 光束的中央亮环结构; 在 $z = 1$ m 处, 光场分布已经具有标准二阶 BG 光的中央亮环结构, 但环外旁瓣明显. 取图 3(b) 坐标原点为圆心到第三亮环的外环为半径, 即包含了所有亮环的 $b = 1.3$ mm、包含旁瓣在内的半径 $a = 4$ mm 的圆,

计算了此时合成BG光的 $PIB = 39.2\%$, 相关系数 $r = 0.77$; $z = 2\text{ m}$ 处, 取 $b = 2\text{ mm}$, $a = 4\text{ mm}$ 时的 $PIB = 77.45\%$, $r = 0.901$. 由此可见, $z = 1\text{ m}$ 时, 合成BG光与标准二阶BG光的中央亮环结构相似但光束质量较差; $z = 2\text{ m}$ 时, 合成BG光束不仅具有与标准二阶BG光束相同的中央亮环结构, 同时具有更好的能量集中度. 结果验证了加载涡旋相位的高斯光束阵列能够合成BG光束.

在相同参数下计算了传播距离 $z = 10\text{ m}$ 的结果如图4(a)所示, 图4(b)为相同参数时, 用2.2节所述实验装置观察到的光强分布图. 对比图4(a)和图4(b)发现, 仿真和实验具有相同的中空环形光强分布, 且具有相同的亮环数目. 取 $a = 2\text{ cm}$ 以及图4(a)坐标原点为圆心到第三亮环的外环为半径即 $b = 0.95\text{ cm}$ 的圆为 PIB 的“桶”, 计算了仿真获得的2阶合成BG光的 PIB 为 91.8% , 实验获得的2阶合成BG光的 PIB 为 86.2% , 即实验合成二阶BG光束的能量集中度不及仿真结果. 其原因是由于实验中子光束角度、相位等参数一致性误差导致更多的环外旁瓣所致.

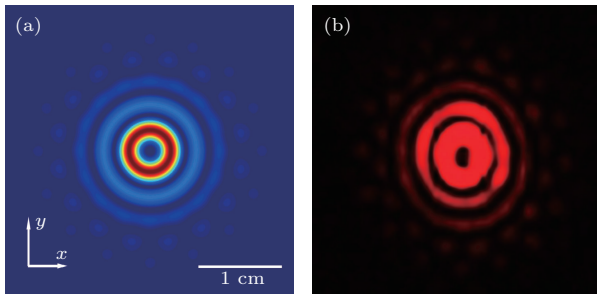


图4 $M = 16$, $n = 2$, $R = 1.1\text{ cm}$, $w_0 = 0.2\text{ cm}$ 时 (a) 仿真光强分布; (b) 实验光强分布

Fig. 4. Intensity distributions of coherently combined BG beam by simulation and experiment for $M = 16$, $n = 2$, $R = 1.1\text{ cm}$, $w_0 = 0.2\text{ cm}$: (a) Simulation intensity distribution; (b) experimental intensity distribution.

3.2 合成BG光束拓扑荷验证

对于拓扑荷为 n 的涡旋光束, 方位角每旋转一周波前相位会有 $n2\pi$ 变化, 根据干涉理论两束光相位相差一个 2π 周期干涉时会出现一个明暗条纹, 相应地拓扑荷为 n 的涡旋光束与参考光干涉, 其干涉条纹中会增加 n 个明暗条纹^[22]. 实验拍摄的 $M = 20$, $n = 2$ 的合成BG光与平面波的近场干涉

条纹图如图5所示. 由图5可知, 涡旋光束与平面波干涉条纹不再是亮暗相间的竖直条纹, 而是出现一个条纹分裂为3个, 所以干涉图5显示的涡旋光束的拓扑荷 n 为2, 与目标光束的拓扑荷数完全一致.

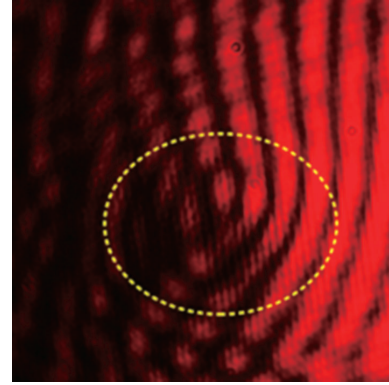


图5 $M = 20$, $n = 2$ 的近场干涉

Fig. 5. The near field interference fringes for $M = 20$, $n = 2$.

利用 PIB 和 r 参数对仿真获得的合成BG光束和标准二阶BG光束进行了定量分析, 验证了合成BG光束和标准二阶BG光束的光强分布一致性. 然后通过对实验获得的合成BG光束的光强图与仿真获得的BG光的光强图的定性对比以及利用 PIB 参数进行定量的光束质量分析, 验证了合成BG光束与目标光束的光强分布一致性; 最后通过干涉实验验证了合成BG光束与目标BG光束相位结构的一致性. 最终验证了图3所示实验理论和装置合成BG光束的有效性.

4 涡旋光束相干合成参数优化研究

4.1 R 的大小对合成的影响

$M = 20$, $n = 1$, $w_0 = 0.2\text{ cm}$, $z = 10\text{ m}$ 的不同 R 参数的合成BG光束光强分布图如图6所示. 取 $a = 1.5\text{ cm}$, 图6(c)中坐标原点到第四亮环的外环为半径即 $b = 1.1\text{ cm}$ 的圆为 PIB 的“桶”, 计算了 $R = 1.7\text{ cm}$, $R = 1.5\text{ cm}$, $R = 1.3\text{ cm}$ 的 PIB 分别为 61.7% , 77.5% , 81.2% . 可见, 保持 M 和 w_0 不变, 随着 R 逐渐减小高斯子光束阵列排布更加紧密, 子光束之间的叠加程度逐渐提高, 合成BG光束的环外旁瓣明显减少, 因此能量集中度更高.

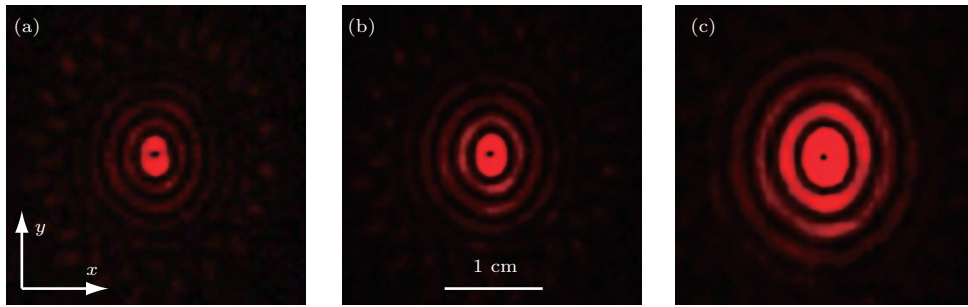


图6 涡旋光束光强截面图 ($M = 20, n = 1, w_0 = 0.2 \text{ cm}$) (a) $R = 1.7 \text{ cm}$; (b) $R = 1.5 \text{ cm}$; (c) $R = 1.3 \text{ cm}$
 Fig. 6. Intensity distributions of coherently combined BG beam with different R for $M = 20, n = 1, w_0 = 0.2 \text{ cm}$: (a) $R = 1.7 \text{ cm}$; (b) $R = 1.5 \text{ cm}$; (c) $R = 1.3 \text{ cm}$.

4.2 M 的大小对合成的影响

在其他参数保持不变的情况下, $M = 6, 8, 12$ 时合成光束的光强分布如图 7(a)—(c) 所示, 取 $a = 1.5 \text{ cm}$ 和图 7(c) 中坐标原点到第三亮环的外环为半径即 $b = 0.74 \text{ cm}$ 的圆为 PIB 的“桶”. $M = 6$ 时合成的涡旋光斑呈空心分布, 但只有一个连续的亮环, 且表现出较为明显的六边形特征, 桶中功率为 80.2%; $M = 8$ 时合成空心涡旋光斑更接近于目标光束的环形光强分布, 但旁瓣明显增加, 桶中功率仅为 64.5%, 即当 $M = 8$ 时可以形成 $n = 1$ 的合成 BG 光, 但光束质量很差. 如图 7(c)

所示, 增加光束数量至 $M = 12$ 时, 形成的 $n = 1$ 的合成 BG 光的 PIB 达到 80.4%, 光束质量明显提升. 对 M 参数的分析可知, 子光束之间的相位差为 $2\pi n/M$, 其中拓扑荷数不变时增加光束数量会缩小子光束之间的相位差, 故离散的涡旋相位能更好地逼近连续涡旋相位形成质量更好的 BG 光.

在上述基础上, 分析了 M 对生成 n 阶涡旋光束的影响. 如图 8 所示, $M = 8$ 时仅能生成 $n = 1, 2$ 的合成涡旋光, 当拓扑荷数 $n = 3$ 时高斯阵列没有合束形成 BG 光, 主要是由于拓扑荷数太大而光束数量少, 导致相邻子光束间附加的相位差太大而不能合成 BG 光束.

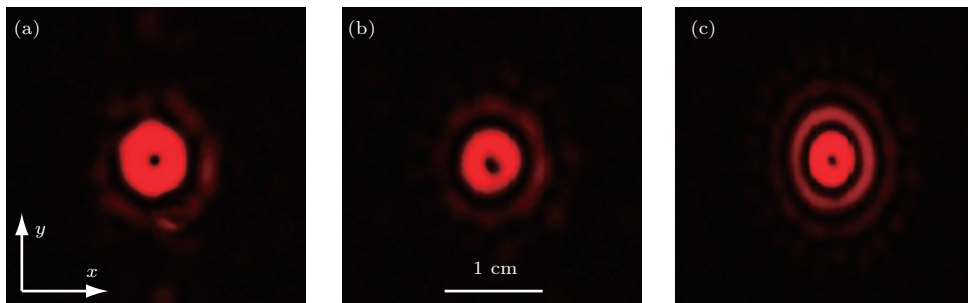


图7 光强分布图 ($n = 1$) (a) $M = 6$; (b) $M = 8$; (c) $M = 12$
 Fig. 7. Intensity distributions of coherently combined BG beam with different M for $n = 1$: (a) $M = 6$; (b) $M = 8$; (c) $M = 12$.

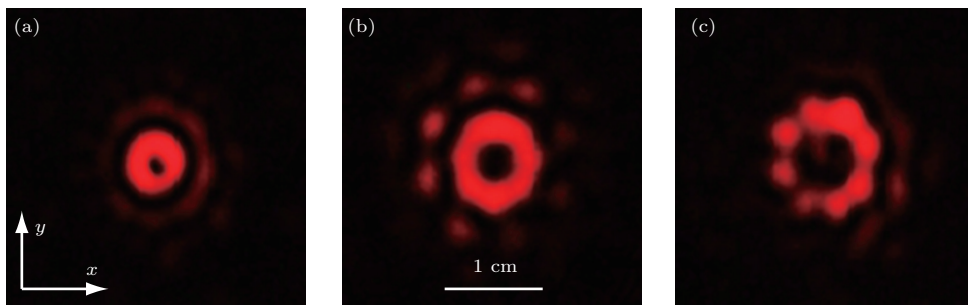


图8 光强分布图 $M = 8$ 时, (a) $n = 1$, (b) $n = 2$, (c) $n = 3$
 Fig. 8. Intensity distributions of coherently combined BG beam with different topological charges for $M = 8$: (a) $n = 1$; (b) $n = 2$; (c) $n = 3$.

对比图9(b)和图10(b)可知,取 $a = 1.5\text{ cm}$ 和图10(a)中坐标原点到第四亮环的外环为半径即 $b = 0.85\text{ cm}$ 的圆为PIB的“桶”.同样 $n = 3$ 的合成BG光, $M = 20$ 的光斑的旁瓣明显比 $M = 12$ 时的少且光斑均匀,光束质量更好,桶中功率由 $M = 12$ 时的76.6%提升至 $M = 20$ 时的91.8%;对

比图9(c)和图10(c)可知,光束数量从12增加至20时, $M = 20$ 生成了 $n = 5$ 的合成BG光.对 M 参数的分析可知,子光束之间的相位差为 $2\pi n/M$,其中拓扑荷数不变时增加光束数量会缩小子光束之间的相位差,故离散的涡旋相位能更好地逼近连续涡旋相位形成质量更好的BG光.

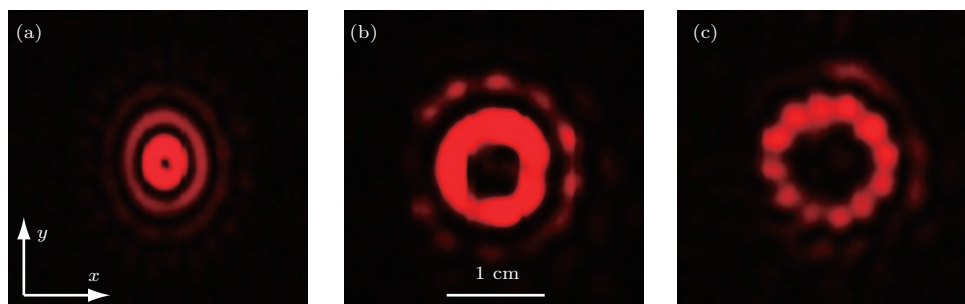


图9 光强分布图 $M = 12$ 时, (a) $n = 1$, (b) $n = 3$, (c) $n = 5$

Fig. 9. Intensity distributions of coherently combined BG beam with different topological charges for $M = 12$: (a) $n = 1$; (b) $n = 3$; (c) $n = 5$.

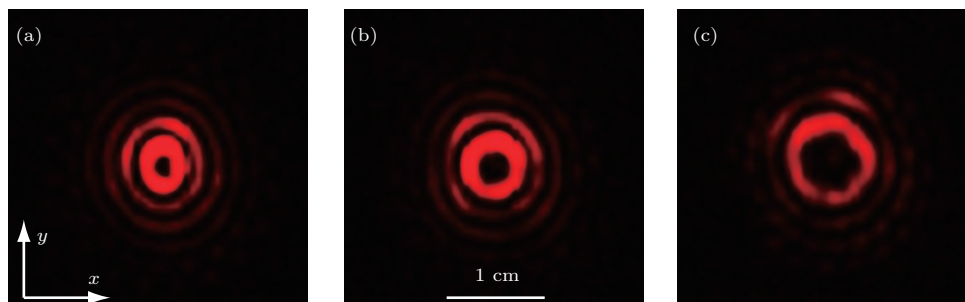


图10 光强分布图 $M = 20$ 时, (a) $n = 2$, (b) $n = 3$, (c) $n = 5$

Fig. 10. Intensity distributions of coherently combined BG beam with different topological charges for $M = 20$: (a) $n = 2$; (b) $n = 3$; (c) $n = 5$.

4.3 w_0 的大小对合成的影响

$M = 16, n = 2, R = 1.1\text{ cm}, z = 10\text{ m}$,不同 w_0 的合成BG光束光强分布如图11所示.取 $a = 2.5\text{ cm}$ 和图11(c)中坐标原点到第三亮环的外环为半径即 $b = 0.95\text{ cm}$ 的圆为PIB的“桶”,分别

计算了 $w_0 = 0.1\text{ cm}, w_0 = 0.15\text{ cm}, w_0 = 0.2\text{ cm}$ 的PIB分别38%, 67%, 86.2%.说明保持其他参数不变,随着 w_0 逐渐增大,子光束之间的间距逐渐缩小,子光束之间的叠加程度得到提高,合成BG光束的环外旁瓣明显减少,因此能量集中度更高.

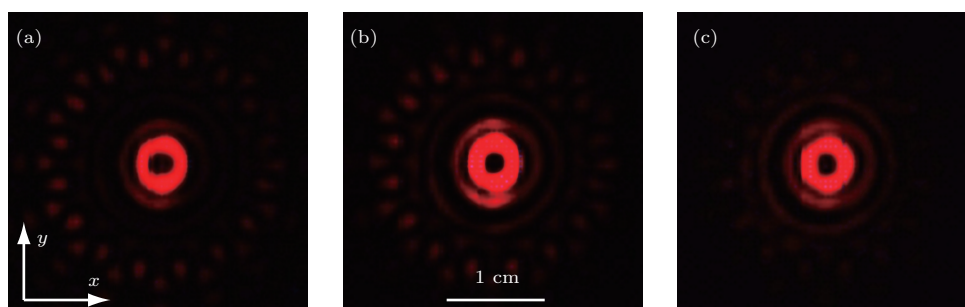


图11 涡旋光束光强截面图 $M = 16, n = 2, R = 1.1\text{ cm}, z = 10\text{ m}$ 时, (a) $w_0 = 0.1\text{ cm}$, (b) $w_0 = 0.15\text{ cm}$, (c) $w_0 = 0.2\text{ cm}$

Fig. 11. Intensity distributions of coherently combined BG beam with different w_0 for $M = 16, n = 2, R = 1.1\text{ cm}, z = 10\text{ m}$: (a) $w_0 = 0.1\text{ cm}$; (b) $w_0 = 0.15\text{ cm}$; (c) $w_0 = 0.2\text{ cm}$.

通过对 M , w_0 和 R 的分析, 定义了光束阵列排布的占空比 (光束阵列圆形排布的紧密程度) $k = lM/2\pi R$, 设 $l \approx 2w_0$, 可得到 $k = w_0M/\pi R$. 通过改变束腰半径 w_0 、组束环半径 R 和光束数量 M 来控制 k 的大小. 通过对 k 中各个参数的研究发现, 高斯光束阵列圆形排布的紧密程度对合成的涡旋光斑质量有显著的影响, 改变参数使占空比 $k \approx 1$ 时可获得最佳的合成效果.

5 结 论

本文基于相干合成技术提出了利用高斯光束阵列加载离散涡旋相位获得 2 阶合成 BG 的方法, 通过实验与理论的光强分布对比、干涉实验、PIB 和相关系数等参数, 从实验上论证了这种方法的有效性. 通过对高斯光束阵列的空间排布和子光束数量的研究, 得到了占空比接近 1 时可以获得最佳光束质量的合成 BG 光. 但本文没有考虑相干合成过程中的相位控制和环境噪声, 只是从高斯光束阵列加载离散涡旋相位的角度验证了相干合成技术用于生成高功率涡旋光束方法的有效性, 对用相干合成技术产生高功率涡旋光束和合成其他类型的涡旋光束有一定的指导意义.

参考文献

- [1] Yin J P, Liu N C, Xia Y, Yun M 2004 *Prog. Phys.* **24** 336 (in Chinese) [印建平, 刘南春, 夏勇, 恽旻 2004 物理学进展 **24** 336]
- [2] Shu W X, Ke Y G, Liu Y C, Ling X H, Luo H L, Yin X B 2016 *Phys. Rev. A* **93** 013839
- [3] Liu Y C, Ke Y G, Zhou J X, Liu Y Y, Luo H L, Wen S C, Fan D Y 2017 *Sci. Rep.* **7** 44096
- [4] Liu Z X, Liu Y Y, Ke Y G, Liu Y C, Shu W X, Luo H L, Wen S C 2017 *Photon. Res.* **5** 15
- [5] Allegre O J, Jin Y, Perrie W, Ouyang J, Fearon E, Edwardson S P, Dearden G 2013 *Opt. Express* **21** 21198
- [6] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, Huang H, Ahmed N, Bao C J, Ren Y X, Cao Y W, Li L, Zhao Z, Molish F, Tur M, Padgett M J, Willner A E 2014 *Nat. Commun.* **5** 4876
- [7] Liu Y D, Gao C Q, Gao M W, Li F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 854 (in Chinese) [刘义东, 高春清, 高明伟, 李丰 2007 物理学报 **56** 854]
- [8] Padgett M, Bowman R 2011 *Nature Photon.* **5** 343
- [9] He Y L, Liu Z X, Liu Y C, Zhou J X, Ke Y G, Luo H L, Wen S C 2015 *Opt. Lett.* **40** 5506
- [10] Ngcobo S, Aïtameur K, Passilly N, Hasnaoui A, Forbes A 2013 *Appl. Opt.* **52** 2093
- [11] Lin D, Daniel J M O, Clarkson W A 2014 *Opt. Lett.* **39** 3903
- [12] Kim D J, Kim J W, Clarkson W A 2014 *Appl. Phys. B* **117** 459
- [13] Li Y, Li W, Zhang Z, Miller K, Shori R 2016 *Opt. Express* **24** 1658
- [14] Liu Z J, Zhou P, Hou J, Xu X J 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 518 (in Chinese) [刘泽金, 周朴, 侯静, 许晓军 2009 中国激光 **36** 518]
- [15] Chu X X, Liu Z J, Zhou P 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 5102
- [16] Zhu K C, Tang H Q, Sun X M, Wang X W, Liu T N 2002 *Opt. Commun.* **207** 29
- [17] Zhu K C, Tang H Q, Wang X W, Liu T N 2002 *Optik* **113** 222
- [18] Zhu K C, Zhou G Q, Li X G, Zheng X J, Tang H Q 2008 *Opt. Express* **16** 21315
- [19] Chu X X, Sun Q, Wang J, Lu P, Xie W K, Xu X J 2015 *Sci. Rep.* **5** 18665
- [20] Feng G Y, Zhou S H 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1643 (in Chinese) [冯国英, 周寿桓 2009 中国激光 **36** 1643]
- [21] Wang Q M 2008 *M. S. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [王启明 2008 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [22] Li Y Y, Chen Z Y, Liu H, Pu J X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1740 (in Chinese) [李阳月, 陈子阳, 刘辉, 蒲继雄 2010 物理学报 **59** 1740]

Generation of Bessel-Gaussian vortex beam by combining technology*

Yu Tao¹⁾ Xia Hui¹⁾ Fan Zhi-Hua²⁾³⁾ Xie Wen-Ke^{1)†} Zhang Pan¹⁾
Liu Jun-Sheng¹⁾ Chen Xin¹⁾

1) (School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

2) (Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

3) (Infrared Detection Technology Research and Development Center of CASC, Shanghai 201109, China)

(Received 12 February 2018; revised manuscript received 19 April 2018)

Abstract

Bessel beam is an important member of the family of non-diffracting beams and has some unique properties which can be used in many areas, such as micro particle manipulating, material processing and optical communication. However, the source of Bessel beam generated by the existing methods can be used only in a short distance due to its low power. In this paper, according to the coherent combining technology, we propose a method to generate a second-order Bessel-Gaussian (BG) beam by loading discrete vortex phase on specific spatially distributed Gaussian beam array. The coherent combining technology can enhance the output power by increasing the number of beams and use the phase-locking technique to maintain the beam quality. The experimental scheme is described as follows. The expanded Gaussian beam is first split by an amplitude-based spatial light modulator, then the Gaussian beam array is incident on a phase-only spatial light modulator to load the discrete vortex phase, and finally the Gaussian beam array loaded with phase can synthesize BG beam in free space. Due to the diffraction effect of the sub-beams, the optical field distribution between the adjacent sub-beams which are loaded with phase differences, are superimposed. As a result, the optical field distribution of the approximate beam can be obtained by coherent synthesis in free space. After that, the degree of similarity between simulated results and theoretical data is analyzed by correlation coefficient, including the comparison of light intensity between experiment and simulation, and the power-in-the-bucket is used to evaluate beam quality. In addition, the topological charge of the synthesized BG beams is verified by the interference method. By studying the number of beams, the waist radius and the radius of the ring, we find some interesting results which are summarized as follows. Firstly, the closed arrangement of Gaussian beam arrays can improve the quality of the synthesized BG beam. Secondly, the smaller the phase difference between the sub-beams, the more easily the discontinuous piston phase approaches to the vortex phase. Therefore, increasing the number of sub-beams can significantly improve the beam quality of the synthesized BG beam and obtain a higher order synthetic BG beam. Finally, we define the parameter k to represent the tightness of a circular array of Gaussian beams. The present study shows that when the parameter k is close to 1, the best experimental results can be obtained. Therefore, the proposed method has important guidance in generating various vortex beams or enhancing the vortex beam power.

Keywords: vortex beam, coherent combining technology, power-in-the-bucket, topological charges

PACS: 42.60.Jf, 42.55.-f, 42.15.Eq, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.67.20180325

* Project supported by the Equipment Pre-research Field Fund (Grant No. 6140415020311) and the Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology Fund, China (Grant No. GNJGJS04).

† Corresponding author. E-mail: wenkexiedan@163.com