

新型发光二极管透镜产生局域空心光束*

何西 杜团结 吴逢铁†

(华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 厦门 361021)

(2013年9月24日收到; 2013年12月8日收到修改稿)

首次提出采用发光二极管和二次光学透镜直接产生单个局域空心光束的方法. 首先从几何光学角度分析发光二极管点光源结合二次光学透镜产生局域空心光束的原理, 推算出所得局域空心光束长度及最大暗域半径计算公式, 随后用数值计算软件 Matlab, 3D建模软件 Solidworks 及光学仿真软件 Tracepro 计算得出一款二次光学透镜并进行了仿真验证. 同时计算了可能获得的局域空心光束的最小尺寸和囚禁粒子的散射力. 结果显示: 该透镜能够产生单个局域空心光束, 所得局域空心光束的长度及最大暗域半径都在误差允许范围内与理论计算符合. 研究成果为采用发光二极管光源产生局域空心光束提供一种现实可行低成本的有效方法.

关键词: 局域空心光束, 发光二极管, 二次光学透镜

PACS: 42.25.Gy, 42.15.Eq, 42.15.Dp

DOI: 10.7498/aps.63.074201

1 引言

局域空心光束 (bottle beam) 是一束沿着光传播方向上有强度为零的三维密闭区域的光束^[1-3], 周围围绕着高强度的光. bottle beam 可作为光镊^[4, 5]和光学扳手^[6]等有力工具, 还可用于囚禁微观粒子、中性原子、分子和生物细胞等^[7, 8], 在生命科学与纳米科技领域中有着重要的应用.

传统产生 bottle beam 都是采用相干性极高的激光作为光源. 然而非相干光源产生的 bottle beam 具有波前相位不易发生畸变、光强分布比较均匀等优点, 对于粒子囚禁、原子冷却等有极高的应用价值^[9-13]. 在许多非相干光源中发光二极管 (LED) 作为一种新型光源具有体积小、耗电量低、寿命长、高亮度低热量、环保、坚固耐用等许多优点, 并且 LED 领域还在迅速发展^[14, 15], 若能用 LED 直接产生 bottle beam 势必会推广 bottle beam 的应用范围, 增强 bottle beam 的实用性, 大大降低产生 bottle beam 的成本. 我们课题组在非相干光源产生近似无衍射贝塞尔光^[16, 17]和 bottle beam

方面做了较深入的研究^[18-20], 得知非相干光源的空间相干性对于贝塞尔光束和 bottle beam 的产生有重要影响. 本文从几何光学的角度出发对新型 LED 透镜产生 bottle beam 原理进行分析, 根据 LED 二次光学设计原理^[21], 用 Matlab 编程进行设计, 并计算出 LED 透镜自由曲面截线的离散点坐标, 把离散点坐标数据导入 Solidworks 中拟合出透镜自由曲面截线, 建立透镜实体模型, 把实体模型导入 Tracepro 中设置相关参数进行光线追迹, 得到的理论模拟结果与理论分析基本符合, 为直接产生单个 bottle beam 提出了一种简洁实用的新方法.

2 基本原理

2.1 LED 透镜产生 bottle beam 的几何原理

新型 LED 透镜产生 bottle beam 的几何原理如图 1 所示, 以透镜的自由曲面在 XZ 平面上的截线为例, 位于 O 点的 LED 点光源发出的光经过设计透镜之后被分为四部分, 四部分的光束被分别聚焦到离透镜某一距离 h 处的目标平面上 $x = r_1$,

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178015) 和福建省自然科学基金项目 (批准号: 2012J01278) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn

$r_2, -r_1, -r_2$ 的地方, 其中LED发出的光通过透镜自由曲面上的 AB_1 段 (OB_1 与 Z 轴夹角约 45°) 后汇聚于目标平面上 $x = -r_2$ 处, 偏折角较大; 通过透镜自由曲面上 B_2C 段后汇聚于目标平面上 $x = -r_1$, 偏折角较小. 而透镜的自由曲面关于 Z 轴旋转对称, 因此在这四部分光束交叉的中间区域, 会产生一个没有光通过的区域(图1中阴影区域 PQRS 所示), 从而形成了局域空心光束, 即 bottle beam. 在 bottle beam 的两端的区域内(端点 AP, RT 所夹的四边形区域), 分别有两个锥面波相叠加, 形成近似无衍射贝塞尔光束. bottle beam 的起点位置即为图1中线段 B_1H 与 Z 轴的交点 P, 终点位置即为线段 B_2G 与 Z 轴的交点 R, bottle beam 的暗域半径最大位置及最大暗域半径可由线段 D_1E 与 B_2G 的交点 Q 算出.

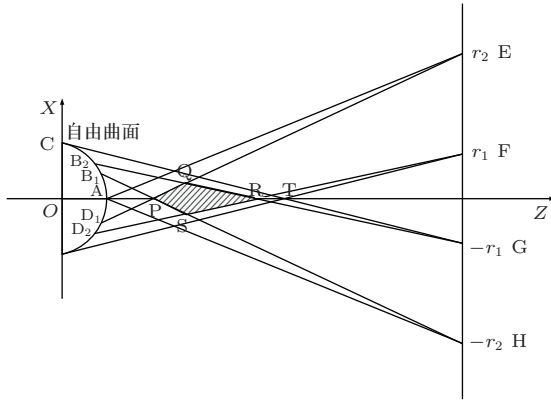


图1 LED透镜产生 bottle beam 几何原理示意图

由计算的 Matlab 程序可计算出透镜自由曲面上 B_1, B_2 点坐标, 设为 $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$, D_1 点坐标为 $(-x_1, z_1)$, H 点的坐标为 $(-r_2, h)$, G 点的坐标为 $(-r_1, h)$, E 点的坐标为 (r_2, h) , 则线段 B_1H 所在直线的函数表达式为

$$\frac{z - z_1}{h - z_1} = \frac{x - x_1}{-r_2 - x_1}. \quad (1)$$

当 $x = 0$ 时, 可求得 bottle beam 的开环点坐标

$$z_{\min} = \frac{x_1}{r_2 + x_1}(h - z_1) + z_1.$$

同理可求出 bottle beam 的闭环点坐标

$$z_{\max} = \frac{x_2}{r_1 + x_2}(h - z_2) + z_2.$$

bottle beam 的长度 L 即为

$$\begin{aligned} L = \Delta z &= z_{\max} - z_{\min} \\ &= \frac{x_2}{r_1 + x_2}(h - z_2) - \frac{x_1}{r_2 + x_1}(h - z_1) \\ &\quad + z_2 - z_1. \end{aligned} \quad (2)$$

线段 B_2G 与 D_1E 所在直线的函数表达式分别为

$$\begin{aligned} \frac{z - z_2}{h - z_2} &= \frac{x - x_2}{-r_1 - x_2}, \\ \frac{z - z_1}{h - z_1} &= \frac{x + x_1}{r_2 + x_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

联立上述两个表达式解出 Q 的坐标, Q 点的横坐标即为最大暗域半径 R , 纵坐标即为最大暗域所在位置

$$R = x = \frac{(z_2 - z_1) + x_2(h - z_2)(r_2 + x_1) - x_1(h - z_1)(r_1 + x_2)}{(h - z_2)(r_2 + x_1) + (r_1 + x_2)(h - z_1)}, \quad (4)$$

$$z = \frac{[(z_2 - z_1) + (x_2 + x_1)(h - z_2)(r_2 + x_1)](h - z_1)}{[(h - z_2)(r_2 + x_1) + (r_1 + x_2)(h - z_1)](r_2 + x_1)} + z_1. \quad (5)$$

2.2 元件设计

如图2所示, 以光源所在位置为原点建立直角坐标系, 以 LED 晶元所在平面为 XY 平面, 垂直晶元平面方向为 Z 轴. 以 XZ 所在平面为例, h 为目标平面与光源的距离. 入射光线与透镜出射面的交点为 A, 坐标为 (x, z) , 出射光线与目标平面的交点为 B, 坐标为 (r, h) , 则可以得到

入射光线的单位矢量

$$\mathbf{I}_{\text{in}} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + z^2}}(x, z). \quad (6)$$

出射光线的单位矢量

$$\mathbf{I}_{\text{out}} = \frac{1}{\sqrt{(r - x)^2 + (h - z)^2}}(r - x, h - z). \quad (7)$$

在图2所示的四分之一自由曲面内将 $(0, \pi/2)$ 内的角度 m 等分, 对应于入射光线 $i_0 - i_m$ 与 Z 轴的夹角为 $\theta_0 - \theta_m$, 经过透镜出射面折射后, $\theta_0 - \theta_{m/2}$ 对应目标面上点: $x = -r_2$, $\theta_{m/2} - \theta_m$ 对应目标面上的点: $x = -r_1$.

设初始光线 i_0 沿 Z 轴正向, 在它的传播路径上选择一个初始点 $S_0(0, Z_0)$ 作为自由曲面的起点, i_0 经出射面折射后对应于目标面上的点 $H(-r_2, h)$. 由这两点的坐标通过 (6), (7) 式可求出初始光线入射方向和出射方向的单位矢量. 由折射定律可求出自由曲面在初始点 S_0 处的法向矢量

$$\mathbf{N}_0 = n \cdot \mathbf{I}_{in0} - \mathbf{I}_{out0}, \quad (8)$$

n 为透镜材料的折射率, 由法向矢量和起始点坐标求出 S_0 点的切平面 T_0 .

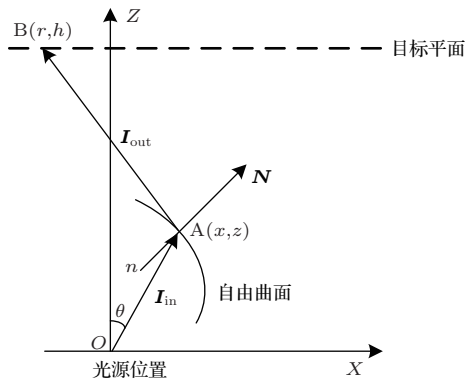


图2 透镜自由曲面求解原理图

求出光线 i_1 与切平面 T_0 的交点 $S_1(X_1, Z_1)$, 并由目标平面上的对应点 $H(-r_2, h)$ 求出点 S_1 处的入射光线和出射光线的单位矢量 $\mathbf{I}_{in1}, \mathbf{I}_{out1}$, 再根据 (8) 式求出在 S_1 点表面的法向矢量 \mathbf{N}_1 . 由法向矢量和 S_1 点的坐标求出切平面 T_1 , 再求出光线 i_2 与切平面 T_1 的交点 $S_2(X_2, Z_2)$, 依据上述步骤, 迭代求出透镜自由曲面在 XZ 平面截线上的离散数据点 S_0, S_1, \dots, S_m 的坐标, 即确定了透镜自由曲面在 XZ 平面上的截线. 在迭代求解过程中, 角度等分越小, 计算结果与预期目标越接近, 误差越小.

3 建立模型

选取设计的参数: 高度 $h = 200 \text{ mm}$, $r_1 = 20 \text{ mm}$, $r_2 = 23 \text{ mm}$, 等分角度 $m = 2000$, 改变 r_1, r_2 的值可改变 bottle 的尺寸大小. 根据之前的设计原理利用 Matlab 编程求出自由曲面在 XZ 平面截线上离散点的坐标, 把离散点坐标数据导入三维制图软件 Solidworks 中拟合为平滑曲线, 如图 3 所示, 其中透镜出射面是所设计的自由曲面, 入射面为球面, LED 放置在球心处, 入射光线经过球面后方向

不变. 把闭合曲线绕旋转轴旋转一周, 即得所需要的透镜实体, 如图 4 所示.



图3 透镜自由曲面截线

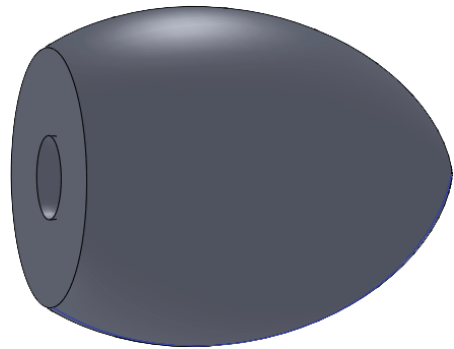


图4 透镜实体

4 仿真模拟

把生成的透镜实体的 Solidworks 文件导入到 Tracepro 中, 在 Tracepro 中选取透镜的材料为 PM-MA, 其折射率为 1.4935, 在入射表面的球心处插入点光源, 设置点光源的发光场角为朗伯发光场型, 光通量为 50 W, 波长为 $0.5461 \mu\text{m}$, 总光线数为 500000 条, 运行 Tracepro 进行光线追迹.

根据之前设计透镜的原理, 在 Matlab 程序中计算出 bottle 的起点位置为 34.4079 mm, 终点位置为 39.9181 mm, 暗域半径最大位置为 36.9337 mm, 最大暗域半径为 0.3356 mm.

根据 bottle 的起终位置, 在沿 Z 轴不同距离处插入接收面, 得到 bottle beam 沿 Z 轴不同位置处的截面图和剖面曲线, 如图 5 所示, 仿真模拟所得数据与理论计算所得数据的比较如表 1 所示.

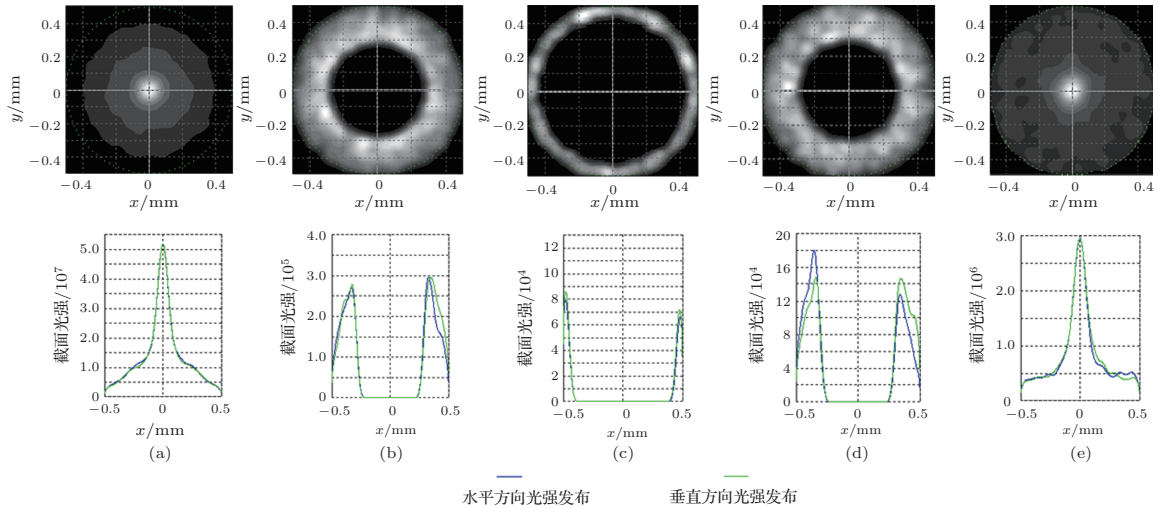


图5 不同位置局域空心光束的截面及剖面图 (a) $z = 34.5000$ mm; (b) $z = 34.9000$ mm; (c) $z = 35.5000$ mm; (d) $z = 36.8340$ mm; (e) $z = 40.0000$ mm

表1 理论计算与理论模拟所得局域空心光束尺寸比较

	开环点 /mm	闭环点 /mm	bottle 长度 /mm	最大暗域半径 /mm
理论计算	34.4079	39.9181	5.5102	0.3356
仿真模拟	34.5000	40.0000	5.5000	0.4244

图5(a)—(e)分别为轴上距离 Z 等于34.5000 mm, 34.9000 mm, 35.5000 mm, 36.8340 mm, 40.0000 mm时的截面光强图和剖面图. 可以看出光束在 $Z = 34.5000$ mm的位置是近似贝塞尔光束, 随着传播距离的增加, 光束中心开始出现开口, 并不断增大, 在 $Z = 35.5000$ mm处开口达到最大, 即暗域半径最大, 随后暗域半径逐渐减小, 并在 $Z = 40.0000$ mm处开口闭合, 重新出现近似贝塞尔光束, 整个过程中心光强由亮变暗再变亮, 在34.5000—40.0000 mm范围内形成一个完整的光学bottle beam. 由于误差影响所形成bottle beam外环的水平 and 垂直方向的光强分布有所不同.

由表1可知仿真模拟bottle beam的数据与理论计算的数据在误差允许范围内基本符合, 误差的原因在于: 在设计过程中LED透镜的光源采用的是点光源, 在实际模拟过程中以半径为0.01mm的圆形面光源来近似代替点光源; LED光源是朗伯光源, 出光光束角度为 120° , 导致透镜底部有一部分通过的光的强度很弱, 到达bottle beam所在位置时光强几乎为零; 并且由于迭代算法积累误差和建模误差影响导致仿真模拟与理论计算有偏差. 据此证明所设计的LED透镜能够产生单个bottle beam.

根据设计原理, 改变出射光束照射到目标平面上坐标的位置, 可以改变bottle beam尺寸的大小, 当 r_1, r_2 的取值越大, 且两者取值越接近时, 得到的bottle beam的尺寸越小. 选择 $r_1 = 84$ mm, $r_2 = 85$ mm可以得到最小bottle beam的起点为11.6313 mm, 终点为11.7189 mm, 纵向长度为87.6 μm , 最大暗环半径为19.6 μm . bottle beam对粒子的囚禁主要是依靠其散射力, 由文献[22]可知散射力 F_s 可以表示为

$$F_s = n_m \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \frac{I}{c}, \quad (9)$$

其中 n_m 为微粒所在介质的折射率, $m = n_p/n_m$, n_p 为微粒的折射率, a 为微粒的尺寸, c 为光速, I 为光强. 以水中的瑞利粒子为例, 取之前模拟bottle beam最大暗环处水平方向两侧的最大光强, 取微粒半径 $a = 10$ nm, 介质为水的折射率为 $n_m = 1.33$, 粒子折射率为 $n_p = 1.592$, 波长为0.5461 μm , 则可以计算出bottle beam最大暗环处水平方向左侧的最大散射力约为 1.438×10^{-21} N, 右侧的最大散射力约为 1.168×10^{-21} N, 与文献[23]中双轴棱锥产生bottle beam的第一个外环的散射力较为接近, 当bottle beam的尺寸更小时, 暗环周围的光强分布更为集中, 所产生的散射力也就更大, 俘获效率更高.

5 结 论

本文基于LED透镜二次光学设计原理首次提出一种能直接产生单个bottle beam的LED透镜,

模拟结果表明设计的新型LED透镜能够产生单个bottle beam, 对于粒子囚禁、光镊等有很高的应用价值, 并且LED作为一种新型光源体积小、耗电量低、寿命长、高亮度低热量、坚固耐用, 使产生bottle beam的成本大大降低. 与以往产生bottle beam装置相比, 利用LED透镜这一单一元件直接产生bottle beam转换效率高, 成本低, 结构简单, 元件加工相对容易, 为非相干光源产生bottle beam提供了一种简洁实用的新方法.

参考文献

- [1] Arlt J, Padgett M J 2000 *Opt. Lett.* **25** 191
- [2] Pavelyev V, Osipov V, Kachalov D, Khonina S, Cheng W, Gaidukeviciute A, Chichkov B 2012 *Appl. Opt.* **51** 4215
- [3] Gao W, Hu X B, Sun D, Li J Y 2012 *Opt. Express* **20** 20715
- [4] Taylor M A, Knittel J, Bowen W P 2013 *Opt. Express* **21** 8018
- [5] Ivanov V V, Isaacs J A, Saffman M, Kemme S A, Ellis A R, Brady G R, Wendt J R, Biedermann G W, Samora S 2013 *eprint arXiv* **1305** 5309
- [6] Black B J, Mohanty S K 2012 *Opt. Lett.* **37** 5030
- [7] Zhong M C, Wei X B, Zhou J H, Wang Z Q, Li Y M 2013 *Nat. Commun.* **4** 1768
- [8] Xu P, He X D, Wang J, Zhan M S 2010 *Opt. Lett.* **35** 2164
- [9] Shvedov V G, Izdebskaya Y V, Rode A V, Desyatnikov A, Krolikowski W, Kivshar Y S 2008 *Opt. Express* **16** 20902
- [10] Pu J X, Liu X Y, Nemoto S 2005 *Opt. Commun.* **252** 7
- [11] Pu J X, Dong M M 2006 *Appl. Opt.* **45** 7553
- [12] Gbur G, Visser T D 2003 *Opt. Lett.* **28** 1627
- [13] Rao L Z, Pu J X 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 379
- [14] Qi Z J, Huang W G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 197801 (in Chinese) [齐智坚, 黄维刚 2013 物理学报 **62** 197801]
- [15] Chen S F, Guo X, Wu Q, Zhao X F, Shao M, Huang W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 128506 (in Chinese) [陈淑芬, 郭旭, 郭强, 赵晓飞, 邵茗, 黄维 2013 中国物理 **22** 128506]
- [16] Durnin J 1987 *J. Opt. Soc. Am. A* **4** 651
- [17] Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, Fang X 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **42** 805 (in Chinese) [程治明, 吴逢铁, 范丹丹, 方翔 2012 中国科学 **42** 805]
- [18] Fan D D, Wu F T, Cheng Z M, Zhu J Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104219 (in Chinese) [范丹丹, 吴逢铁, 程治明, 朱健强 2013 物理学报 **62** 104219]
- [19] Cheng Z M, Wu F T, Fan D D, Fang X 2013 *Opt. Laser Technol.* **52** 87
- [20] Fang X, Wu F T, Cheng Z M 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0205001 (in Chinese) [方翔, 吴逢铁, 程治明 2013 光学学报 **33** 0205001]
- [21] Zhang Q H 2010 *MS Dissertation* (Guangzhou: South China University of Technology) (in Chinese) [张奇辉 2010 硕士学位论文 (广州: 华南理工大学)]
- [22] Harada Y, Asakura T 1996 *Opt. Commun.* **124** 529
- [23] Cheng Z M, Wu F T, Fang X, Fan D D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214201 (in Chinese) [程治明, 吴逢铁, 方翔, 范丹丹 2012 物理学报 **61** 214201]

Optical bottle beam generated by a new type of light emitting diode lens*

He Xi Du Tuan-Jie Wu Feng-Tie[†]

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Xiamen, 361021, China)

(Received 24 September 2013; revised manuscript received 8 December 2013)

Abstract

A new method for generating a single bottle beam directly by light emitting diode (LED) with a secondary optical lens is proposed for the first time, so far as we know. Firstly, in the aspect of geometrical optics, we analyze the principle of generation of a single bottle beam by the LED spot light with a secondary optical lens. Then, we calculate the expression of the length and the radius of the biggest dark region of the bottle beam. After that, a new type of a secondary optical lens is calculated numerically and simulated by numerical recipes software Matlab, three-dimensional modeling software Solidworks and optical simulation software Tracepro. Meanwhile, the minimum size of the bottle beam and the scattering force for trapping particles are calculated. The result shows that the designed secondary optical lens can produce a single bottle beam, the length and the radius of the biggest dark region of the generated bottle beam are in accordance with the theoretical calculations. This result offers a practical and available method for generating a bottle beam with light emitting diode at a low cost.

Keywords: bottle beam, light emitting diode, secondary optical lens

PACS: 42.25.Gy, 42.15.Eq, 42.15.Dp

DOI: [10.7498/aps.63.074201](https://doi.org/10.7498/aps.63.074201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178015), and the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2012J01278).

[†] Corresponding author. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn