

微型曲面发光二极管阵列照度一致性研究

班章 梁静秋 吕金光 梁中翥 冯思悦

Study on uniform irradiance of micro curved-light-emitting diode array

Ban Zhang Liang Jing-Qiu Lü Jin-Guang Liang Zhong-Zhu Feng Si-Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 070701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172596

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172596>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单晶硅微纳构件加工表面性能的时变性研究

Performance evolution process of machined surface of monocrystalline silicon micro/nanostructures

物理学报.2013, 62(22): 220704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.220704>

光学读出红外成像中面光源影响下的光学检测灵敏度研究

Optical detection sensitivity of area light source in optical read-out IR imaging

物理学报.2013, 62(22): 220703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.220703>

表面镀金 SU-8 微柱的低频电动旋转特征

Electrorotation characteristics of gold-coated SU-8 microrods at low frequency

物理学报.2013, 62(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.200702>

薄片激光器热效应及其对输出功率的影响

Analysis of thermal effect and its influence on output power of thin disk laser

物理学报.2012, 61(8): 084208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.084208>

# 微型曲面发光二极管阵列照度一致性研究\*

班章<sup>1)2)</sup> 梁静秋<sup>1)†</sup> 吕金光<sup>1)</sup> 梁中翥<sup>1)</sup> 冯思悦<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年12月6日收到; 2018年1月16日收到修改稿)

为提高微型曲面发光二极管(LED)阵列在显示及照明使用方面的舒适度, 针对微型曲面LED阵列照度分布的均匀性问题进行研究. 采用TracePro光线追迹法分别计算了柱面显示阵列及球面照明阵列的照度分布. 计算结果表明, 曲面弯曲半径 $R$ 和光源辐射参数 $m$ 是影响柱面阵列照度分布的主要因素. 通过合理排布阵列像素单元位置, 可以增强器件显示均匀度, 提高能量利用效率.  $10 \times 10$ 柱面LED阵列最大平坦化照度均匀度为90.5%. 对球面环形阵列照度分布计算结果表明, 单环形LED阵列照度均匀性与像素数量无关. 影响球面多环LED阵列照度分布的参数主要包括环线分布系数 $K$ 、环法线与第一环阵列光源法线夹角 $\varphi_0$ 及各环线像素光通量之比 $\Phi$ . 以双环LED阵列为模型进行计算, 获得最大平坦化照度均匀度为94.8%. 调整球面多环阵列位置参数可实现不同照度分布模式. 实验对比了微型LED像素单元夹角 $\theta$ 分别为 $13^\circ$ ,  $15^\circ$ 和 $17^\circ$ 时的照度分布, 实验结果与理论计算较为一致. 本文取得的理论与实验结果可以为微型曲面LED显示及多模式智能照明设计提供参考.

**关键词:** 微型, 发光二极管阵列, 曲面, 照度均匀性

**PACS:** 07.10.Cm, 42.66.Si, 42.60.Lh, 85.60.Jb

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172596

## 1 引言

发光二极管(LED)的优势主要表现在发光亮度高、响应速率快、工作寿命长及节能环保等方面<sup>[1-5]</sup>. 目前, LED的应用非常广泛, 如健康照明、户外显示、医疗通信<sup>[6,7]</sup>等. 研究表明, 相比大尺寸LED芯片, 微型LED能够承载饱和电流密度更大, 调制带宽更高<sup>[8,9]</sup>. 2014年, 美国苹果公司收购了微型显示屏公司Luxvue, 引起了科学机构对微显示器件的广泛关注. 微型LED阵列现已被研究用于微显示器件、微投影仪及室内可见光通信等新型热门领域<sup>[10-13]</sup>. 曲面微型LED阵列除具有平面阵列基本特性外, 还可以实现更广的观测视角、提供更便于摆放携带的使用体验, 如制作弯曲手机

屏、曲面智能手表屏、广角通信照明光源<sup>[14-16]</sup>等. LED显示器件作为一阶光源时, 可避免由覆盖二阶光学设计引起的能量损失, 并减少炫光产生<sup>[17,18]</sup>. 将微型LED应用于可见光通信, 除可以实现光通信技术绿色低碳、避免信号被截获泄露的优点外, 还可以进一步提高通信调制带宽<sup>[9]</sup>. 同时, 微型LED还可应用于健康照明、植物照明等领域, 用于改善人们工作、生活的环境和质量, 促进心理、生理健康<sup>[6,7]</sup>.

照度均匀性是评价显示和通信照明器件优良程度的重要参数指标之一, 提高照度均匀性可减轻因连续长时间紧张的视觉作业对视觉器官造成的不良影响, 同时增强能量利用率<sup>[19-21]</sup>. 但目前未见关于提高微型曲面LED照度均匀性的研究报道.

为提高微型曲面LED阵列在显示照明使用方

\* 国家自然科学基金(批准号: 61274122)、吉林省科技发展计划(批准号: 20160204007GX, 20180201024GX)、广东省科技发展计划(批准号: 2016B010111003)、中国科学院创新促进会基金(批准号: 2014193, 2018254)和长春市科技计划资助项目(批准号: 2013269)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

面的性能, 本文针对微型曲面LED阵列照度分布均匀性的问题进行研究. 采用TracePro光线追迹法计算了柱面显示阵列及球面照明阵列的照度分布. 实验对比了微型LED像素单元夹角 $\theta$ 分别为 $13^\circ$ ,  $15^\circ$ 和 $17^\circ$ 时的照度分布, 并与相同条件下的理论计算结果进行对比.

## 2 LED出光模型

LED在空间任意点处照度 $E(r, \theta)$ 分布应满足函数关系<sup>[18]</sup>:

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos^m \theta, \quad (1)$$

其中,  $E_0(r)$ 表示出光面法线方向上距LED出光面中心 $r$ 处的照度值, 单位为 $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\theta$ 表示LED任意角度出射光线方向与出光面法线之间的夹角;  $m$ 为光强分布参数, 当 $m = 1$ 时, LED芯片为理想朗伯体; 当 $m > 1$ 时, LED为非理想朗伯体.  $m$ 可具体定义为

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}, \quad (2)$$

其中,  $\theta_{1/2}$ 表示光强下降为法线方向一半时对应的光出射角度.

人眼感知均匀光照性取决于多方面因素, 主要为观测者与观测目标的距离、照射光线的入射角度、背景亮度、目标反射率及目标自身的颜色和形状等. 为简化计算模型, 本文对光照系统做出如下假设:

- 1) LED阵列的前平面为出光平面;
- 2) LED阵列表面不添加光学元件及其他封装结构;
- 3) LED像素单元发光面积小于 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ , 近似为成点光源, 可采用照度余弦定理计算远场照度变化;
- 4) 光源到接收平面的距离范围近似等于人眼观察手机屏幕距离的范围;
- 5) 任意LED阵列像素单元具有相等的波长分布和相同的空间辐射通量.

## 3 柱面显示阵列照度分析

为提高器件在弯曲情况下的照度均匀性, 本文以柱面阵列器件为计算模型, 分析研究影响微型

LED显示器件照度均匀性的主要物理因素. 本节分别对两种排布阵列照度分布进行分析计算. 将柱面阵列划分为环线阵列及直线阵列两种排布类型, 如图1(a)所示.

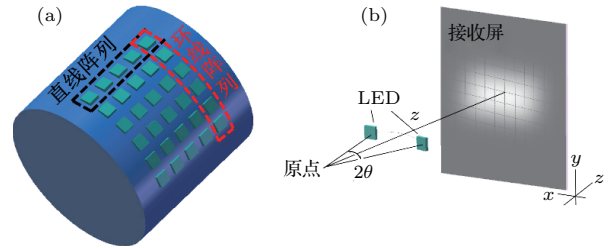


图1 (a) 柱面LED阵列分布示意图; (b) 柱面环上两LED辐射照度分布

Fig. 1. (a) Diagram of the cylindrical LED array distribution; (b) irradiance distribution of two LEDs on a cylindrical curve surface.

### 3.1 直线阵列照度分布

根据平面照度公式可计算求得轴线方向上LED的照度表达式<sup>[18]</sup>:

$$E(x, y, z) = \frac{z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}}}{[(x - x_0^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{(m+2)/2}}, \quad (3)$$

其中,  $A_{\text{LED}}$ 表示发光面积, 单位为 $\text{m}^2$ ;  $L_{\text{LED}}$ 表示LED法线方向上辐射亮度, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$ ;  $(x, y, z)$ 表示空间任意点坐标,  $(x_0, y_0, 0)$ 表示光源点坐标位置.

对轴线上多颗LED像素进行叠加, 求得LED阵列轴线方向总照度表达式:

$$E(x, y, z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \sum_{n=1}^m \{ [x - (N + 1 - 2n)(d/2)]^2 + y^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2}, \quad (4)$$

其中,  $N$ 表示LED数量,  $n$ 表示正整数,  $n = \{1, 2, 3, \dots\}$ .

根据(4)式求解得相邻两像素最佳间距 $d$ 的解析式为

$$d = \sqrt{\frac{4}{m+3}} \cdot z, \quad (5)$$

由(5)式可知, 直线阵列相邻像素最佳间距 $d$ 由LED光强分布参数 $m$ 和像素到接收屏距离 $z$ 两参数共同决定.

### 3.2 环线阵列照度分布

柱面环线阵列上LED点光源位置坐标可通过柱坐标  $(x_0 = R \sin \theta, y_0, z_0 = R \cos \theta)$  来表示, 对应到接收平面上任意一点  $(x, y, z)$  的LED照度分布表达式,

$$E(x, y, z, R, \theta) = A_{LED} L_{LED} \times \frac{[(x - R \sin \theta) \sin \theta + (z - R \cos \theta) \cos \theta]^m}{[(x - R \sin \theta)^2 + (y - y_0)^2 + (z - R \cos \theta)^2]^{(m+2)/2}}. \quad (6)$$

首先, 对柱面圆环上两LED光源照度分布进行计算, 如图1(b)所示.  $\theta$ 表示LED光源与光轴夹角,  $R$ 表示柱面圆环弯曲半径,  $z$ 表示柱面圆环到探测器的投影距离.

本文将LED辐射照度分布近似成为高斯分布, 根据斯派洛法则<sup>[2]</sup>,

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} [f(x) + f(x + \sigma_L)] = 0, \\ \frac{d^2}{dx^2} [f(x) + f(x + \sigma_L)] = 0, \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\sigma_L$ 表示两高斯函数最大平坦距离. 此时, 将  $\sigma_L$ 最大平坦距离替换为两LED光源法线夹角  $2\theta$ . 两LED组合照度分布函数可表示为

$$E(x, y, z) = E(x, y, z, R, \theta) + E(x, y, z, R, -\theta). \quad (8)$$

将(8)式进行二阶求导, 即  $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$ 时, 探测器上照度达到最大平坦化. (8)式简化为:

$$m(m-1)(m+2)^{-1} [R^2 \sin^2 \theta + (z - R \cos \theta)^2]^2$$

$$\begin{aligned} & \times [z \cos \theta - R]^{-2} + 2mR[R^2 \sin^2 \theta + (z - R \cos \theta)^2] \\ & \times [z \cos \theta - R]^{-1} - \sin^{-2} \theta [R^2 \sin^2 \theta + (z - R \cos \theta)^2] \\ & + (m+4)R^2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式可知, 环线两LED光源最佳照度值由  $\theta, z, R$ 共同决定. 当  $z \gg R$ 时, 两LED远场最佳照度分布对应的夹角  $\theta$ 解析式为

$$\theta = \arctan \left( \sqrt{\frac{m+2}{m(m-1)}} \right). \quad (10)$$

以  $m = 60, z = 300 \text{ cm}, R = 5 \text{ cm}$ 为例进行计算, 根据(10)式计算得出光源与光轴夹角  $\theta = 7.5^\circ$ . 将  $\theta$ 参数代入光线追迹系统, 获得柱面圆环上两LED组合的照度分布, 如图2(a)所示. 探测屏中心区域照度达到最大且分布均匀, 在  $\{(x, y) | -50 < x < 50, -50 < y < 50\}$ 区间内平均照度为67.1%, 在  $\{(x, y) | -20 < x < 20, -10 < y < 10\}$ 区间内照度均匀度达到90%. 提取两光源照度在  $x$ 轴方向上分布曲线并进行叠加, 在  $[-50, 50]$ 区间内照度分布一致均匀, 如图2(b)所示. 由上述计算可知, 当给定参数  $m$ , 弯曲半径  $R$ , 接受屏距离  $z$ 时, 根据(10)式可获取相邻两LED光源最佳夹角  $\theta$ .

当环线LED像素总数为  $n$ 时, 环形阵列照度分布可表示为

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^N E(x, y, z, R, \theta_n), \quad (11)$$

其中,  $\theta_n$ 表示LED在环线不同位置上对应的角度参数.

将(11)式进行二阶求导, 计算得环线LED阵列角度分布与计算参数关系表达式为

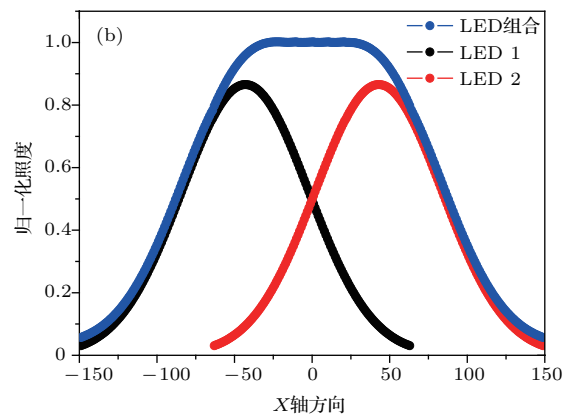
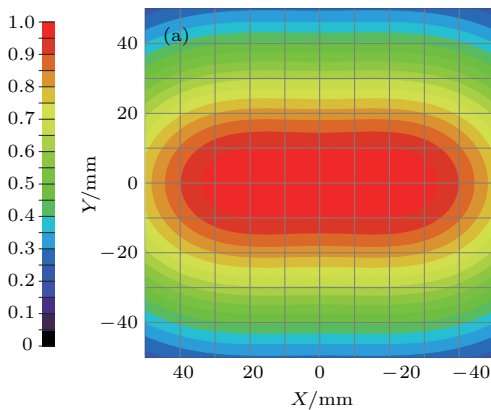


图2 (a)柱面两LED照度分布图,  $R = 5 \text{ cm}, \theta = 7.5^\circ, m = 60, z = 300 \text{ cm}$ ; (b)在  $y = 0$ 处  $x$ 方向的归一化照度  
Fig. 2. (a) Irradiation distribution of two LED source,  $R = 5 \text{ cm}, \theta = 7.5^\circ, m = 60, z = 300 \text{ cm}$ ; (b) at  $y = 0$ , the normalized irradiation distribution along  $x$  axis direction.

$$\sum_{i=1}^N [m(m-1) - (m^2 + 2) \cos^2 \theta_n] \cos^{m-2} \theta_n = 0. \quad (12)$$

根据环线阵列上LED奇偶数量的不同, 求解得到的 $\theta$ 函数解析式对应两种情况,

$$\begin{cases} \theta_n = \arctan[0.5(N+1-2n) \tan \theta_0] \\ N = 2, 4, 6 \dots, \\ \theta_n = \arctan[(N+1-2n) \tan \theta_0] \\ N = 3, 5 \dots, \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\theta_0$ 表示环中线与环上相邻LED的圆心线所成张角.

以环线阵列LED数量等于10为例进行计算, 设 $\theta_0 = 75^\circ$ ,  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ ,  $m = 6$ , 根据(13)式求解环线阵列夹角参数 $\theta_n$ , 代入光线追迹系统获得阵列照度分布, 如图3(a)所示. LED阵列照度在 $x$ 轴方向 $[-100, 100]$ 区间内达到均匀分布, 在 $\{(x, y) | -40 < x < 40, -40 < y < 40\}$ 区域内

照度均匀度为90.2%; 取 $x$ 轴方向上归一化照度分布曲线, 在 $(-40, 40)$ 区间内达到最佳平坦化, 如图3(b)所示. 对比直线LED阵列可知, 环线LED阵列出射光线可呈现更大的发散角, 有利于实现光源在更广空间内的均匀照明和通信.

### 3.3 柱面阵列照度分布

在微型显示等应用领域中, 提高显示器件照度均匀性可增强使用的舒适度. 因此, 为进一步提高照度一致性及能量利用效率, 对曲面阵列照度进行优化. 图4(a)所示为弯曲半径 $R = 5 \text{ cm}$ 柱面 $10 \times 10$ 阵列, 对其最佳照度分布进行计算. 取 $m = 200$ ,  $\theta_0 = 75^\circ$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ , 根据(5)和(13)式求得阵列像素位置分布参数, 将计算参数代入光线追迹系统, 获取柱面阵列照度分布. 在 $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$ 区域内最大平坦化照度均匀度为90.5%, 如图4(b)所示.

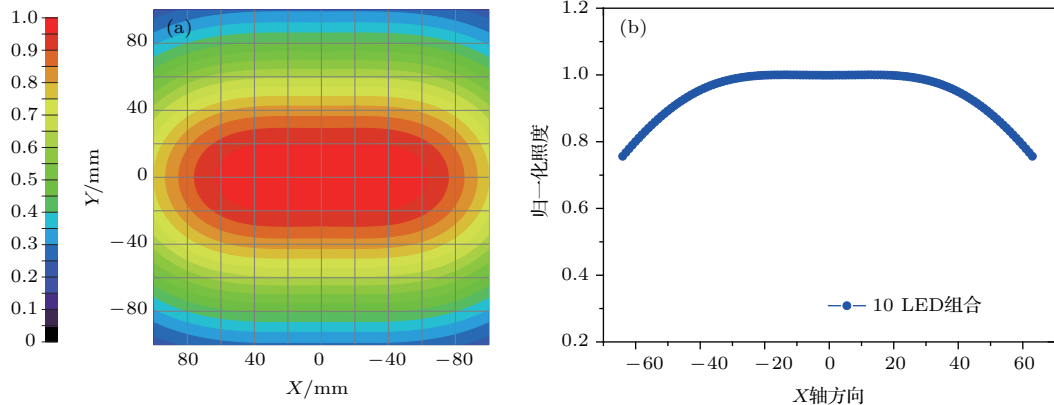


图3 (a)  $1 \times 10$ 阵列照度分布,  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $\theta_0 = 75^\circ$ ,  $m = 6$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ ; (b) 在 $y = 0$ 处 $x$ 方向的归一化照度  
Fig. 3. (a) Irradiation distribution of  $1 \times 10$  LED array source, the parameter is  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $\theta = 7.5^\circ$ ,  $m = 60$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ ; (b) at  $y = 0$ , the normalized irradiation distribution along  $x$  axis direction.

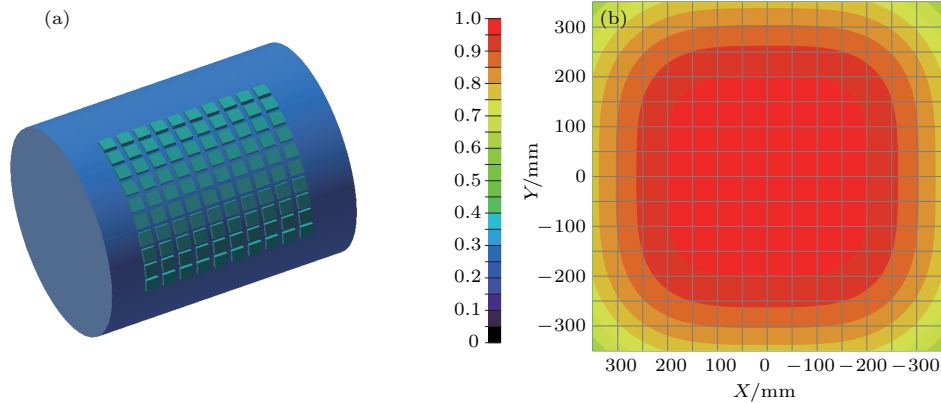


图4 (a) 柱面阵列示意图; (b)  $10 \times 10$ 阵列照度分布,  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $\theta_0 = 75^\circ$ ,  $m = 200$ ,  $z = 300 \text{ cm}$   
Fig. 4. (a) Diagram of the cylindrical LED array distribution; (b) irradiation distribution of  $10 \times 10$  LED array source, the parameter is  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $\theta = 7.5^\circ$ ,  $m = 60$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ .

## 4 球环照明阵列照度分析

研究表明, 随像素单元尺寸减小, LED 电光转换效率逐渐增高<sup>[20]</sup>. 为提高通信照明领域光源器件的能量利用效率, 可将微型 LED 阵列替代传统大尺寸 LED. 同时, 可将曲面 LED 阵列器件作为一

阶光源直接用于照明, 避免由二阶光源元件引起的能量损失. 本文以球面基底为计算模型, 分析研究影响环形 LED 阵列照度均匀性的主要参数.

### 4.1 单环阵列

根据 (1) 和 (2) 式求解球面 LED 单元像素照度分布表达式为:

$$E(x, y, z, R, \varphi, \xi) = A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \frac{[(x - R \sin \varphi \cos \xi) \sin \varphi \cos \xi + (y - R \sin \varphi \sin \xi) \sin \varphi \sin \xi + (z - R \cos \varphi) \cos \varphi]^m}{[(x - R \sin \varphi \cos \xi)^2 + (y - R \sin \varphi \sin \xi)^2 + (z - R \cos \varphi)^2]^{(m+2)/2}}, \quad (14)$$

其中,  $\varphi, \xi$  表示在球面坐标系内 LED 与  $x$  轴和  $y$  轴分别所成夹角,  $R$  为球面半径.

将球面环线 LED 阵列照度叠加, 求得 LED 阵列总照度分布表达式为

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^{N_i} E\left(x, y, z, R, \varphi_i, \frac{2\pi n}{N_i}\right), \quad (15)$$

其中,  $M$  表示环数,  $N_i$  表示每环上 LED 数量,  $n$  为大于等于 3 的正整数.

$\{(x, y) | -100 < x < 100, -100 < y < 100\}$  区域内, 两阵列 LED 照度分布均匀程度基本一致, 最大平坦化照度均匀度分别为 91.69% 和 91.68%. 对比在  $x$  轴方向  $[-150, 150]$  区间内阵列照度最大平坦化曲线, 两 LED 阵列照度分布曲线符合程度较好, 如图 6(c) 所示. 图 6(d) 对比了环线阵列 LED 数量分别为 3, 5, 9, 15, 20 最大平坦化均匀照度; 计算结果表明, 环线阵列上不同 LED 数量可提供相同的均匀照度. 为提高器件能量利用率, 可在使用过程中选择多颗 LED 像素同时工作以降低 LED 发热效应, 或减少 LED 工作数量节约像素单元, 均不影响器件照度均匀程度.

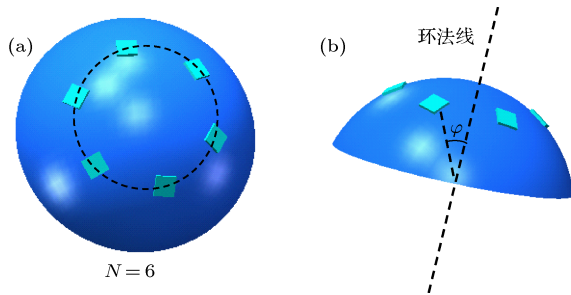


图 5 球面环形阵列 (a) 俯视图和 (b) 侧视图

Fig. 5. Schematic diagram of spherical ring array: (a) Top; (b) side view.

首先对单环 LED 阵列照度进行计算. 如图 5(b) 所示,  $\varphi$  表示 LED 法线方向与环法线方向所成夹角. 均匀照度下  $\varphi$  解析式为

$$\varphi = \arctan\left(\sqrt{\frac{2(m+2)}{m(m-1)}}\right). \quad (16)$$

由 (16) 式可知, 球面环线 LED 阵列达到均匀照度与环线上 LED 像素数量无关. 设  $R = 3.5$  cm,  $\varphi = 15^\circ$ ,  $m = 30$ , 对比环线阵列 LED 数量分别为 5 和 9 时照度分布, 如图 6(a) 和图 6(b) 所示. 在

### 4.2 环心阵列

对带有中心像素单元的球面环型 LED 阵列照度进行计算分析. 均匀照度下,  $\varphi$  解析式为

$$\varphi = \arctan\left(\sqrt{\frac{2(2m+1)}{(m-2)(m-1)}}\right). \quad (17)$$

由 (17) 式可知, 球面环心阵列角度计算结果与球面环形 LED 阵列对应的结果不同. 中心 LED 像素单元与环 LED 发光强度所成比例对整体阵列光源照度分布存在影响, 计算得知, 当中心像素单元与环 LED 阵列像素单元光通量之比满足 (18) 式时, 环心 LED 阵列照度分布达到最大平坦程度.

$$\Phi = N \left(\frac{m^2 + m + 4}{m^2 - 4}\right) \cos^m \theta_0, \quad (18)$$

其中,  $N$  为环 LED 阵列单元数量.

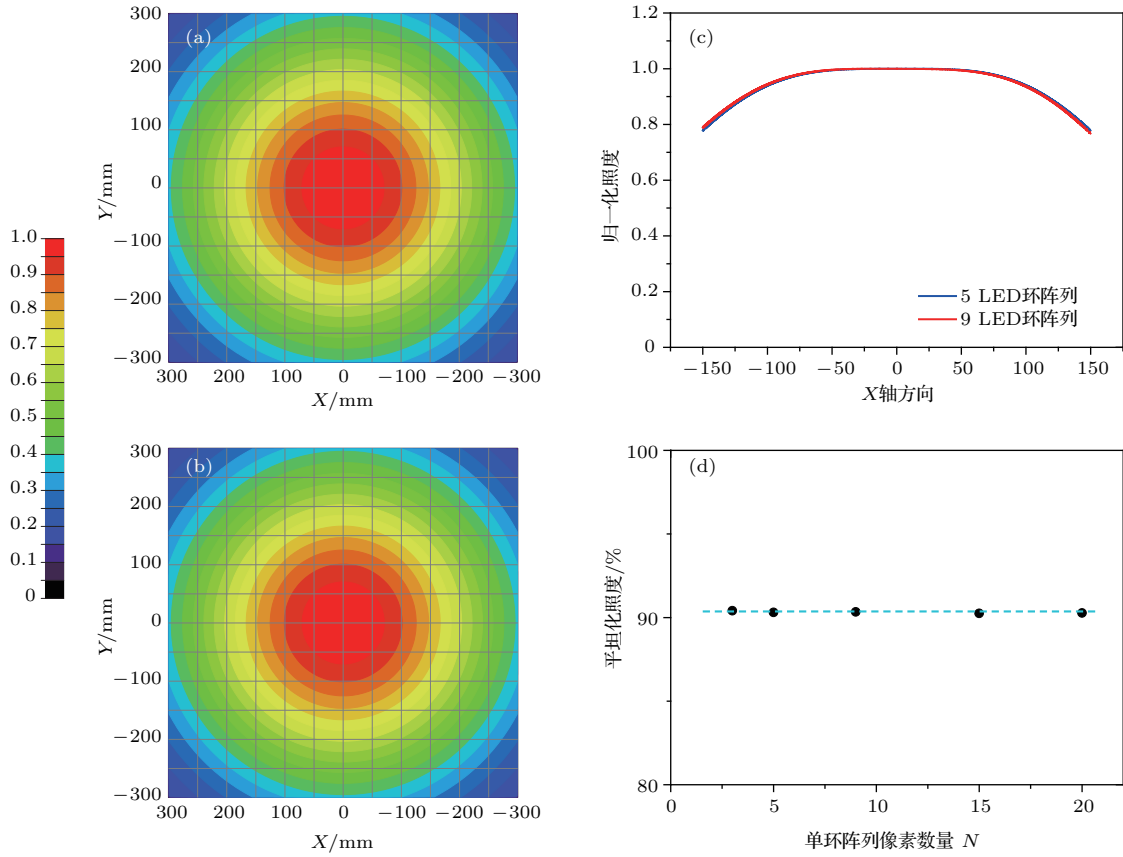


图6 环线光源像素数量为(a) 5 LED和(b) 9 LED 照度分布,  $R = 3.5 \text{ cm}$ ,  $\varphi_0 = 15^\circ$ ,  $m = 30$ ,  $z = 250 \text{ cm}$ ; (c) 5 LED和9 LED 环线光源在  $y = 0$  时  $x$  方向的归一化照度对比; (d) 环线阵列 LED 数量分别为 3, 5, 9, 15, 20 时对应的最大平坦化照度值  
 Fig. 6. Irradiation distribution of (a) 5 LED and (b) 9 LED array source, the parameter is  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $\varphi_0 = 7.5^\circ$ ,  $m = 60$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ ; (c) at  $y = 0$ , the normalized irradiation distribution along  $x$  axis direction; (d) maximum flatness irradiation of ring LED array with pixel number 3, 5, 9, 15, 20.

对比单元数量为6的球面环形阵列与环心阵列照度分布,如图7所示. 设定环线阵列参数与环心阵列参数分别为  $R = 3.5 \text{ cm}$ ,  $z = 250 \text{ cm}$ ,  $\varphi = 15^\circ$ ,  $m = 30$ 和  $R = 3.5 \text{ cm}$ ,  $z = 250 \text{ cm}$ ,  $\varphi = 21.2^\circ$ ,  $m = 30$ ,  $\Phi = 0.64$ . 在  $\{(x, y) | -80 < x < 80, -80 < y < 80\}$  区域内球面环形阵列照度均匀程度分别为 88.7%和 90.3%,如图7(a)和图7(b)所示. 对比两者结果可知,相同LED 像素数量下,球面环心阵列比球面环形阵列照明均匀程度更大. 因此可知,将球面环形LED阵列改进为球面环心LED阵列可进一步改善LED 阵列照明均匀程度.

根据(18)式可知,  $\Phi$  值对整体阵列光源照度分布存在影响. 设  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $z = 250 \text{ cm}$ ,  $m = 3$ ,  $\varphi_0 = 52.3^\circ$ , 计算  $\Phi$  分别为 1, 0.1, 0.01 时阵列的照度分布. 随  $\Phi$  值减小,阵列照度分布均匀性逐渐提高. 在  $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$  区域内,三种  $\Phi$  值对应的阵列照度均匀程度分别为 92.5%, 93.1%和 93.2%,如图8(a)—8(c)所示. 通

过控制中心像素与环线像素出射光强比例,可实现不同照度分布模式. 上述模拟结果为多模式智能照明提供理论参考.

### 4.3 多环阵列

对多环LED阵列照度分布进行计算分析. 计算均匀照度下各环阵列上LED法线方向与环法线方向夹角  $\varphi_i$  表达式为

$$\varphi_i = \arctan[i^K \tan \varphi_0], \quad (19)$$

其中,  $\varphi_0$  为第一环上LED法线方向与环法线方向所成夹角,  $K$  为各环排布比例因子. 根据前文讨论可推知,各环LED出光通量不同,可产生不同照度的分布模式. 总照度函数可表达式为

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^{N_i} \Phi_i E \left\{ x, y, z, R, \varphi_i, \frac{2\pi n}{N_i} \right\}. \quad (20)$$

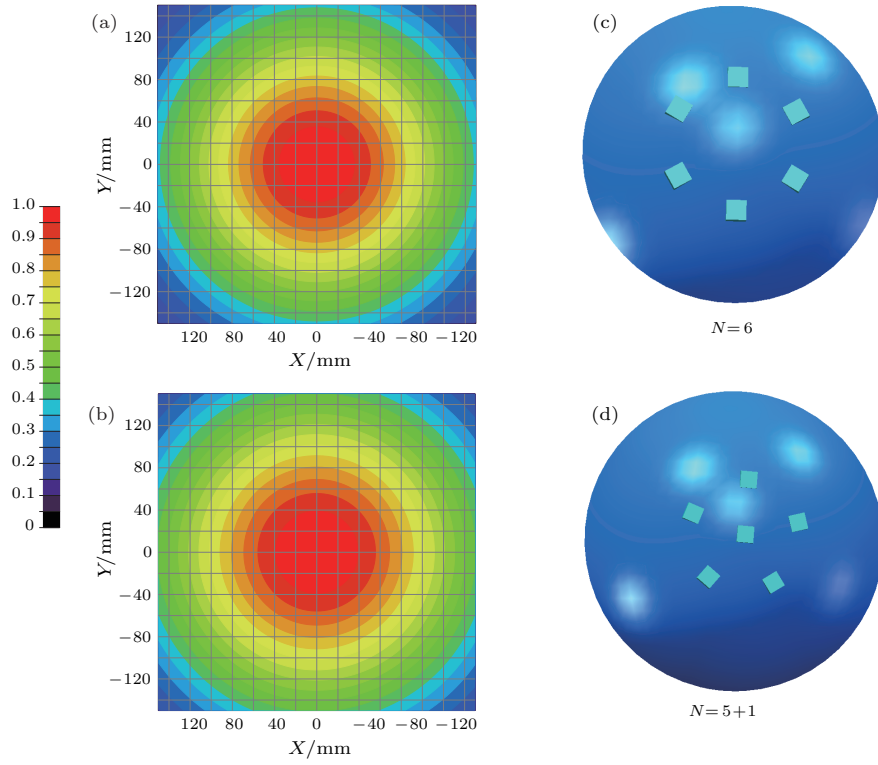


图7 环线光源像素数量为 (a) 6LED 和 (b) 5+1 LED 照度分布,  $R = 3.5 \text{ cm}$ ,  $\varphi = 21.2^\circ$ ,  $m = 30$ ,  $z = 250 \text{ cm}$ ,  $\Phi = 0.64$ ; (c) 6 LED 和 (d) 5+1 LED 像素分布示意图

Fig. 7. Irradiation distribution of (a) 6 LED and (b) 5+1 LED array source,  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $\varphi = 7.5^\circ$ ,  $m = 60$ ,  $z = 300 \text{ cm}$ ,  $\Phi = 0.64$ . Schematic diagram of spherical ring array with pixel number (c) 6 and (d) 5+1.

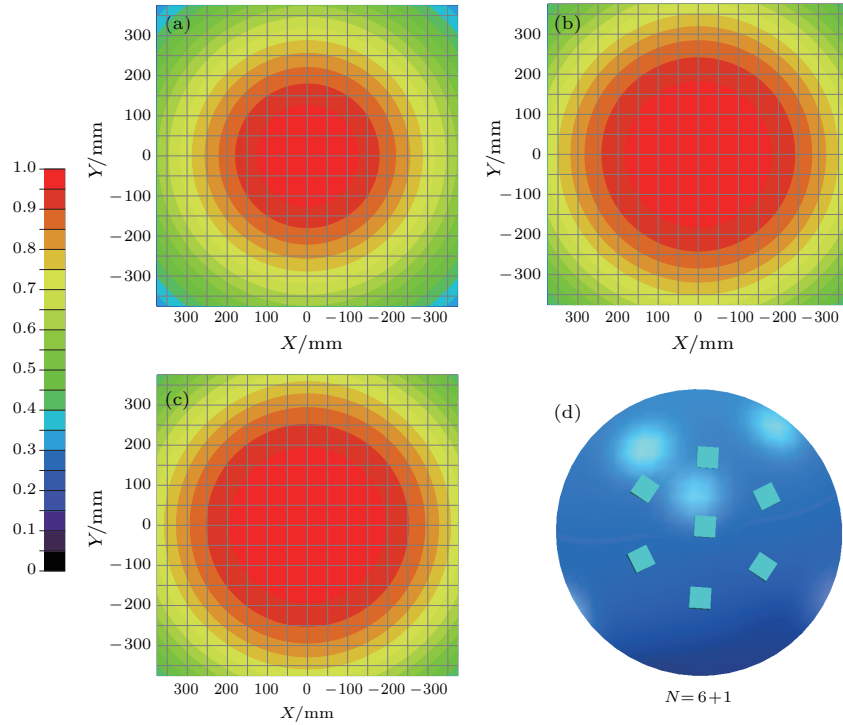


图8 环心光源  $\Phi$  值分别为 (a) 1, (b) 0.1, (c) 0.01 时的照度云图; (d) 环心阵列照度分布图

Fig. 8. Irradiation distribution of the ring LED source with  $\Phi$  value: (a) 1, (b) 0.1, (c) 0.01; (d) schematic diagram of spherical ring array.



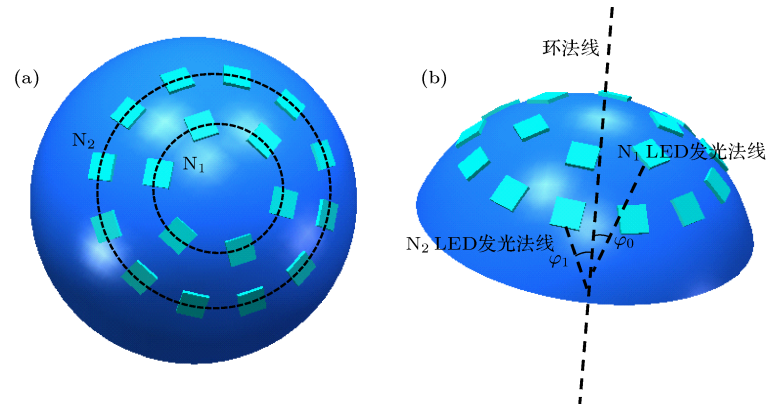


图9 6+12双环LED阵列分布 (a)俯视图和(b)侧视图, 两环与环法线夹角分别为 $\varphi_0$ 和 $\varphi_1$

Fig. 9. Schematic diagram of two spherical ring array with pixel number 6+12: (a) Top, (b) side view, angle between luminous normal and ring normal is  $\varphi_0$  and  $\varphi_1$ , respectively.

根据最大平坦化法则可将(20)式可简化为

$$\sum_{i=1}^M [m(m-1)\tan^2\varphi_i - 2(m+2)]\Phi_i N_i \cos^m\varphi_i = 0, \quad (21)$$

其中,  $N_i$ 为各环阵列LED数量,  $\Phi_i$ 为各环LED单元与第一环LED单元出光通量之比. 由(19)—(21)式可知, 不同 $\Phi$ ,  $\varphi_0$ ,  $K$ 参数下, 多环LED阵列可产生多种均匀照度分布模式. 设定第一环LED数量为 $N_1 = 6$ , 第二环LED数量为 $N_2 = 12$ , 两环线与法线夹角分别 $\varphi_0$ 和 $\varphi_1$ , 如图9所示.

保持 $\varphi_0$ 与 $K$ 值相同, 对 $\Phi = 1, 5, 20$ 时进行计算.  $\varphi_0 = 20^\circ$ ,  $K = 2$ ,  $R = 10$  cm,  $z = 200$  cm. 由于各环LED发光强度不同, 在 $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$ 区域内, 照度分布均匀度分别为91%, 92%和92.2%, 如图10(a)—10(c)所示.

保持 $K$ 与 $\Phi$ 值不变, 对 $\varphi_0$ 值分别等于 $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 时进行计算. 设 $\Phi = 1$ ,  $K = 2$ ,  $R = 10$  cm,  $z = 200$  cm. 在 $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$ 区域内, 照度分布均匀度分别为89.3%和92%, 如图11(a)和图11(c)所示; 设 $\Phi = 5$ ,  $K = 2$ ,

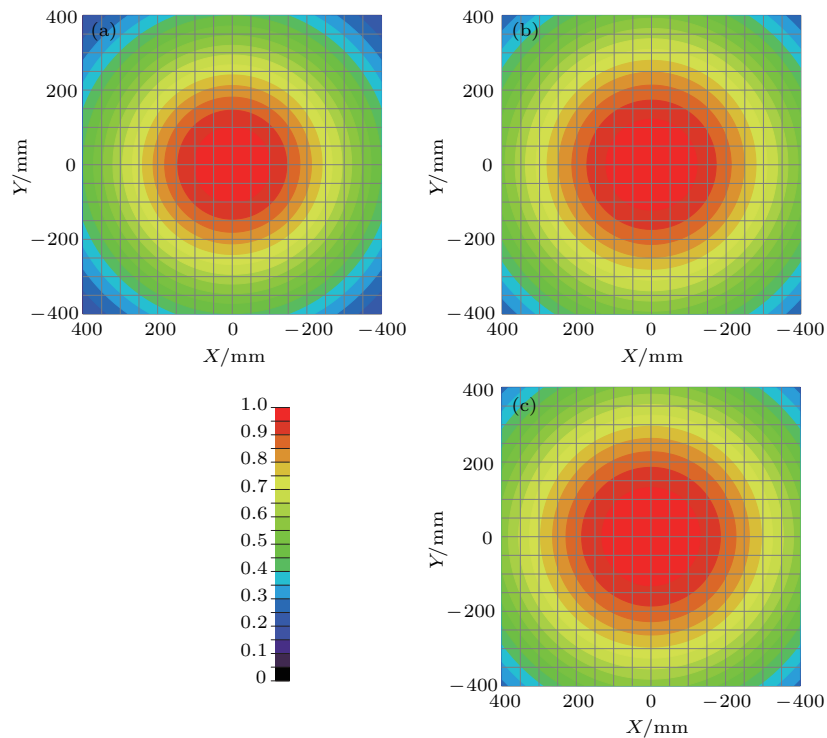


图10 当 $\Phi$ 值分别为(a) 1, (b) 5, (c) 20时照度分布图,  $R = 10$  cm,  $\varphi_0 = 20^\circ$ ,  $m = 5$ ,  $z = 200$  cm,  $K = 2$

Fig. 10. Irradiation distribution of the ring LED source with  $\Phi$  value (a) 1, (b) 5, (c) 20;  $R = 10$  cm,  $\varphi_0 = 20^\circ$ ,  $m = 5$ ,  $z = 200$  cm,  $K = 2$ .

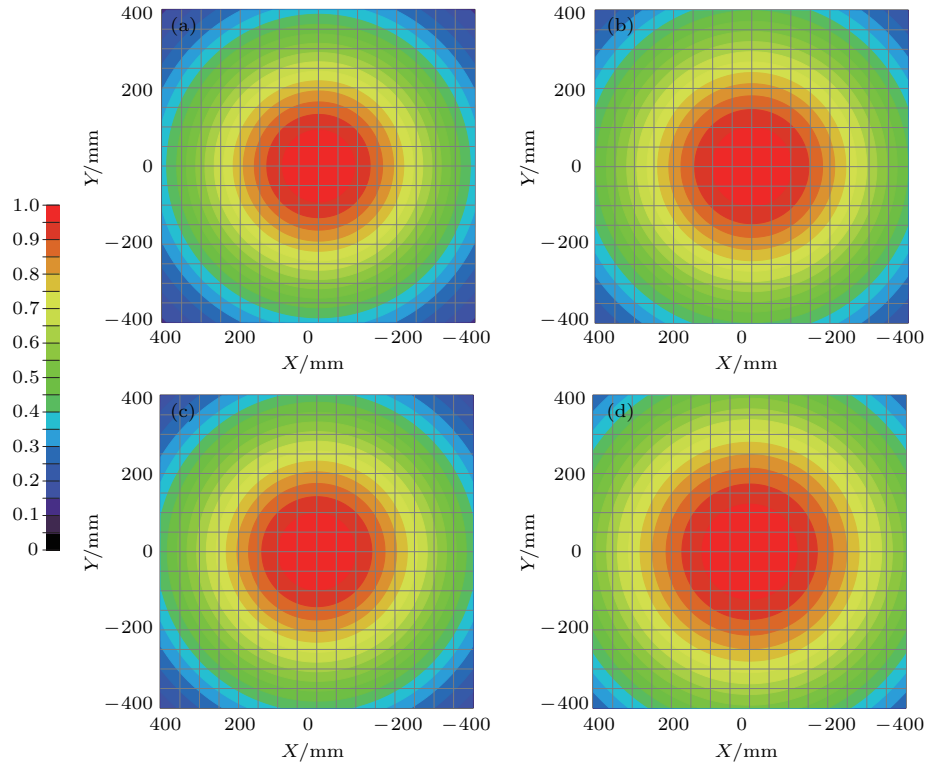


图 11 (a)  $\Phi = 1, \varphi_0 = 15^\circ$ , (b)  $\Phi = 5, \varphi_0 = 15^\circ$ , (c)  $\Phi = 1, \varphi_0 = 20^\circ$ , (d)  $\Phi = 5, \varphi_0 = 20^\circ$  的照度分布图  
 Fig. 11. Irradiation distribution of the 6+12 ring LED source with  $\Phi$  value: (a)  $\Phi = 1, \varphi_0 = 15^\circ$ ; (b)  $\Phi = 5, \varphi_0 = 15^\circ$ ; (c)  $\Phi = 1, \varphi_0 = 20^\circ$ ; (d)  $\Phi = 5, \varphi_0 = 20^\circ$ .

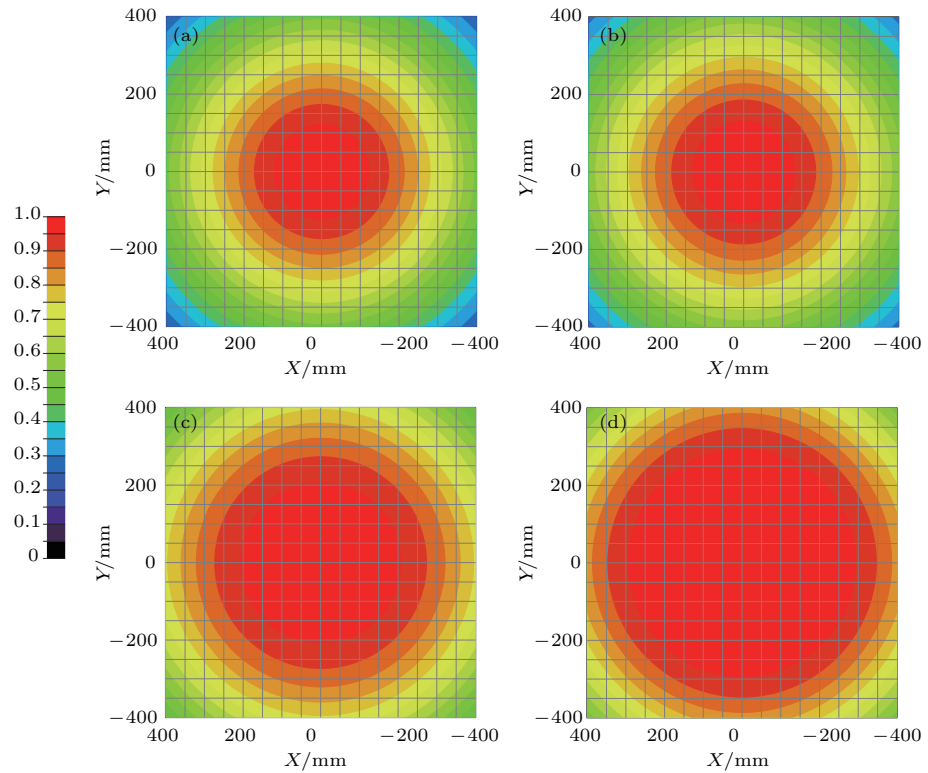


图 12 (a)  $\Phi = 5, K = 2$ ; (b)  $\Phi = 20, K = 0.5$ ; (c)  $\Phi = 5, K = 0.5$ ; (d)  $\Phi = 20, K = 0.5$  的阵列照度分布图  
 Fig. 12. Irradiation distribution of the 6+12 ring LED source with  $\Phi$  value: (a)  $\Phi = 5, K = 2$ ; (b)  $\Phi = 20, K = 0.5$ ; (c)  $\Phi = 5, K = 0.5$ ; (d)  $\Phi = 20, K = 0.5$ .

$R = 10 \text{ cm}$ ,  $z = 200 \text{ cm}$ . 在  $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$  区域内, 照度分布均匀度分别为 90% 和 92.2%, 如图 11 (b) 和图 11 (d) 所示. 因此可知, 多环阵列照度分布均匀程度随阵列圆环位置改变而产生变化.

保持  $\varphi_0$  与  $\Phi$  值不变, 对  $K$  值分别等于 2 和 0.5 时进行计算. 设  $\varphi_0 = 20^\circ$ ,  $\Phi = 5$ ,  $R = 10 \text{ cm}$ ,  $z = 200 \text{ cm}$ . 在  $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$  区域内, 照度分布均匀度分别为 92% 和 94.4%, 如图 12 (a) 和图 12 (c) 所示;  $\varphi_0 = 20^\circ$ ,  $\Phi = 20$ ,  $R = 10 \text{ cm}$ ,  $z = 200 \text{ cm}$ , 在  $\{(x, y) | -200 < x < 200, -200 < y < 200\}$  区域内, 照度分布均匀度分别为 92.2% 和 94.8%, 如图 12 (b) 和图 12 (d) 所示.

计算结果表明, 球面多环阵列均匀照度分布随  $K$ ,  $\varphi_0$  和  $\Phi$  等参数的改变产生变化. 为在探测区域内获取不同均匀照度模式或最大平坦照度可通过参数枚举法进行计算.

### 5 实验测试

本文采用单元像素尺寸  $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$  微型 LED 阵列. 具体制作流程为: 1) 采用 MOCVD

生长 GaAs 基 AlGaInP 外延片; 2) 将外延片量子阱结构转移至蓝宝石衬底, 并进行像素分割, 制备倒装型芯片阵列; 3) 根据像素阵列尺寸特征制备 PDMS 模具; 4) 通过 PDMS 印章将制备好的 Al-GaInP LED 像素单元转移至柔性电路基底. 将 LED 阵列置于弯曲半径为 1.5 cm 圆柱表面进行驱动测试, 如图 13 (c) 所示. 分别选取相邻两 LED 像素夹角  $13^\circ$ ,  $15^\circ$  和  $17^\circ$ , 探测器距离为 30 cm, 正向开启电压值为 1.58 V, 利用高清 CCD 相机进行图像采集, 如图 13 (a) 所示. 当两像素夹角为  $15^\circ$  时, 得到最佳平坦照度, 如图 13 (b) 所示, 框内为测试结果放大示意图. 将光强分布进行归一化处理, 采用归一化照度分布的均方根 RMS 值表征两者照度的均匀性. 通过实验测试照度分布得出归一化照度分布均方根 RMS 值为 0.12, 理论计算结果归一化照度分布的均方根 RMS 值为 0.10. 二者 RMS 值较小且较为接近, 表明照度均匀性较好, 且实验与理论计算结果较为一致. 曲面阵列照度分布均匀程度因相邻两像素单元夹角不同而产生差异. 当相邻两像素夹角大于最大平坦化照度对应的角度时, 探测接收面中心出现不均匀分布; 随两像素夹角收缩, 探测接收面逐渐达到最大平坦化照度; 继续收缩夹角, 平坦化照度面积缩小, 如图 13 (d) 所示.

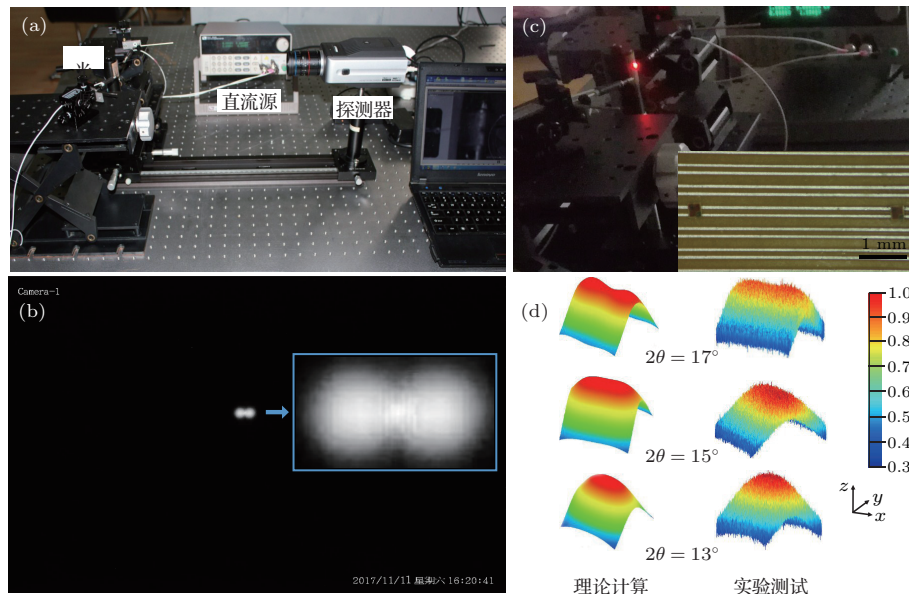


图 13 (a) 光照度测试系统; (b) 像素夹角  $15^\circ$  时的采集图像; (c) 微型曲面 LED 阵列驱动发光测试; (d) 微型双 LED 照度分布理论计算与实验测试对比

Fig. 13. (a) Illumination test system; (b) capture images at  $15^\circ$  angles; (c) drive test of micro-curved LED array; (d) comparison between theoretical and experimental double micro LED irradiance distribution.

## 6 结 论

本文针对微型曲面LED阵列照度分布一致性的问题进行了研究. 采用光线追迹法计算了柱面显示阵列及球面照明阵列的照度分布. 结果表明, 弯曲半径 $R$ 和光源辐射参数 $m$ 是影响柱面阵列照度分布的主要因素, 通过计算最大平坦化关系可获得合理的阵列像素排布位置, 进而增强器件显示均匀程度, 提高能量利用效率. 计算球面环形阵列照度分布, 结果表明, 单环形LED阵列照度均匀性与像素数量无关. 影响球面多环LED阵列照度分布的参数主要为环线分布系数 $K$ 、环法线与第一环阵列光源法线夹角 $\varphi_0$ 及各环线像素光通量之比 $\Phi$ . 调整球面多环阵列位置参数可产生不同的照度分布模式, 为实现微型LED阵列智能照明情景模式的多样化提供理论参考. 实验对比了微型LED像素单元夹角 $\theta$ 分别为 $13^\circ$ ,  $15^\circ$ 和 $17^\circ$ 时照度分布, 与理论计算结果较为一致.

## 参考文献

- [1] Jiang H X, Lin J Y 2013 *Opt. Express* **21** A475
- [2] Bao X Z, Liang J Q, Liang Z Z, Qin Y X, Lü J G, Wang W B 2016 *Chin. J. Lumin.* **37** 1399 (in Chinese) [包兴臻, 梁静秋, 梁中翥, 秦余欣, 吕金光, 王维彪 2016 发光学报 **37** 1399]
- [3] Xue B, Yang H, Yu F, Wang X T, Liu L L, Pei Y R, Lu P Z, Xie H Z, Kong Q F, Li J, Yi X Y, Wang J X, Li J M 2014 *Optoelectronic Devices and Integration V* (Beijing: Spie Press) p9270
- [4] Herrnsdorf J, McKendry J J D, Zhang S, Xie E, Ferreira R, Massoubre D, Zuhdi A M, Henderson R K, Ian U, Scott W, Kelly Anthony E, Gu E, Dawson M D 2015 *IEEE Trans. Electron Dev.* **62** 1918
- [5] Ban Z, Liang Z, Liang J, Wang W, Lü J, Qin Y 2017 *Curr. Opt. Photon.* **1** 143
- [6] Chen H W, Wen S S, Ma B X, Fu M, Xie Y 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 0222001 (in Chinese) [陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 符民, 谢雅 2017 光学学报 **37** 0222001]
- [7] Chai Y B 2012 *M. S. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [柴颖斌 2012 硕士学位论文 (上海: 复旦大学)]
- [8] Mckendry J J D, Massoubre D, Zhang S, Rae B R, Green R P, Gu E, Henderson R K, Kelly A E, Dawson M D 2011 *J. Lightwave Technol.* **30** 61
- [9] Tian P, Mckendry J J, Gu E, Chen Z, Sun Y, Zhang G, Dawson M D, Liu R 2016 *Opt. Express* **24** 699
- [10] Day J, Li J, Lie D Y C, Bradford C, Lin J Y, Jiang H X 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 031116
- [11] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, Tam K H, Lau K M 2013 *IEEE Photon. Tech. L.* **25** 2267
- [12] Rajbhandari S, Chun H, Faulkner G, Cameron K, Jalajakumari A V N, Henderson R, Tsonev D, Ijaz M, Chen Z, Haas H, Xie E, McKendry J J D, Herrnsdorf J, Gu E, Dawson M D, O' Brien D 2015 *IEEE J. Sel. Area. Comm.* **33** 1750
- [13] O'Brien D, Haas H, Rajbhandari S, Chun H, Faulkner G, Cameron K, Jalajakumari A V N, Henderson R, Tsonev D, Ijaz M, Chen Z, Xie E, McKendry J J D, Herrnsdorf J, Gu E, Dawson M D 2015 *Broadband Access Communication Technologies IX* (Beijing: Spie Press) p9387
- [14] Gao D, Wang W, Liang Z, Liang J, Qin Y, Lü J 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 405108
- [15] Fang S W 2017 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [方士伟 2017 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [16] Liu H J, Lan T, Ni G Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 238503 (in Chinese) [刘浩杰, 蓝天, 倪国强 2014 物理学报 **63** 238503]
- [17] Shi C Y, Wen S S, Chen Y C 2015 *Chin. J. Lumin.* **36** 348 (in Chinese) [史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪 2015 发光学报 **36** 348]
- [18] Moreno I, Avendaño M, Tzonchev R I 2006 *Appl. Opt.* **45** 2265
- [19] Zhu Z, Ma D, Hu Q, Tang Y, Liang R 2018 *Opt. Express* **26** A54
- [20] Zhao Z, Zhang H, Zheng H, Liu S 2018 *Opt. Commun.* **410** 123
- [21] Tian P, Mckendry J J D, Gong Z, Guilhabert B, Watson I M, Gu Erdan, Chen Z, Zhang G, Dawson M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 2217

# Study on uniform irradiance of micro curved-light-emitting diode array\*

Ban Zhang<sup>1)2)</sup> Liang Jing-Qiu<sup>1)†</sup> Lü Jin-Guang<sup>1)</sup> Liang Zhong-Zhu<sup>1)</sup> Feng Si-Yue<sup>1)2)</sup>

1) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 6 December 2017; revised manuscript received 16 January 2018 )

## Abstract

The curved light-emitting diode (LED) array has so many advantages over conventional planar micro LED array such as wider viewing angles, and convenience in its actual applications: curved mobile phone screen, curved smart watch screen, and wide-angle communication illumination light source, etc. Irradiance uniformity is considered to be one of the momentous parameters for evaluating the degree of display or communication lighting devices. In order to improve the utilization of micro-curved LED array in display illumination, we focus on uniform irradiance of cylindrical and spherical micro-LED array by the method of ray-tracing. The calculation results show that the curved radius  $R$  and LED radiation parameter  $m$  are main factors affecting the uniform irradiance of the cylindrical array. We can improve the energy utilization efficiency by arranging the array pixel positions rationally. The simulation of  $10 \times 10$  cylindrical array with bending radius  $R = 5$  cm shows that the uniformity of maximum irradiance can reach 90.5% when detection distance  $z = 300$  cm and the detection area is defined as  $\{(x, y) | -100 < x < 100, -100 < y < 100\}$ . Furthermore, the irradiance distribution of spherical array is calculated and the results show that the irradiance uniformity of the single spherical array is unrelated to the number of pixels when it surpasses three. The main factors that affect the irradiance distribution of the multi-ring LED array are the ring distribution coefficient  $K$ , the normal angle  $\varphi_0$ , and the luminous flux ratio of each ring  $\Phi$ . Also the two-ring LED array model is calculated when the pixel number of the first ring is set to be 6 and the second ring is assumed to be 12. And the simulation results show that the maximum irradiance uniformity of the two-ring LED array can reach 94.8% in which the value of  $\varphi_0$  is set to be  $20^\circ$ , the ring distribution coefficient  $K = 0.5$  and the two ring pixel unit luminous flux ratio  $\Phi = 20$ . Experimentally, we adopt the approach of the two micro LEDs to confirm the accuracy of the theory. And the results show that the irradiance distributions of two LEDs with the values of angle  $\theta = 13^\circ, 15^\circ$  and  $17^\circ$  are consistent with the theoretical calculations. Thus, the theoretical and the experimental results in the paper can offer references for curved-LED display and multi-mode intelligent illumination.

**Keywords:** micro, light-emitting diode array, curve, irradiance uniformity

**PACS:** 07.10.Cm, 42.66.Si, 42.60.Lh, 85.60.Jb

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172596

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274122), Science and Technology Development Plan of Jilin Province, China (Grant Nos. 20160204007GX, 20180201024GX), Science and Technology Development Plan of Guangdong Province, China (Grant No. 2016B010111003), the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. 2014193, 2018254), and the Changchun Science and Technology Plan, China (Grant No. 2013269).

† Corresponding author. E-mail: [liangjq@ciomp.ac.cn](mailto:liangjq@ciomp.ac.cn)