

# 365 nm 紫外 LED 二维空间阵列光学系统设计\*

芦永军<sup>1</sup>, 许文海<sup>2</sup>, 曲艳玲<sup>1</sup>, 赵欢<sup>2</sup>, 宋敏<sup>1</sup>

(1 大连民族学院 光电子技术研究所, 辽宁 大连 116600)

(2 大连海事大学, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:**针对紫外固化技术领域新型大功率 365 nm UV-LED 光源进行了拓展性应用研究. 提出了空间阵列排布实现能量累加的技术方案, 给出了其优化设计原理与软件实例仿真结果. 结果证明: 该二维空间阵列光学设计方案的正确性和可行性, 完全可以实现应用现场的实际光学技术指标(辐照度、光斑尺寸、后工作距离、光斑等); 其中指标要求在辐照面实现 50 mm×10 mm 线状辐照光斑, 后工作距离≥50 mm, 辐照度≥1 W/cm<sup>2</sup>, 辐照面光斑分布均匀, 设计出的空间阵列光学系统在结构上实现了最高优化设计.

**关键词:**光学设计; 紫外二极管; 阵列; 紫外固化

**中图分类号:** O439

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)02-268-4

## 0 引言

紫外固化<sup>[1-2]</sup>是许多行业(包括电子、包装、建材等)胶体速凝方面所广泛采用的技术, 该技术的应用可以极大地提高生产效率和产品质量<sup>[3-5]</sup>. 目前固化技术中的紫外辐射光源还较普遍地采用传统紫外灯(超高压水银灯). 该灯存在不可避免的诸多问题(如体积大、电光转化效率低、寿命短、光谱纯度低等), 而新型紫外二极管 UV-LED 辐射光源的出现则解决了这些问题, 成为大规模拓展性应用的又一新亮点. 但是紫外固化材料广泛使用的中心波长为 365 nm 的紫外 LED 单管辐射能量为 60~200 mW, 由于散热、寿命及体积等多方面的限制, 单管紫外 LED 辐射能量、能量限制已成为影响其在各领域推广使用的重要因素.

为了充分发挥紫外 LED 的优势同时提高被辐照面单位面积的辐射功率, 本文提出了一种采用 LED 阵列空间分布实现能量重构光学设计方案. 该方案通过针对单管的聚焦光学系统单元及各单元组成阵列进行空间合理重构设计实现辐射面的光功率、光斑尺寸及实际现场使用要求, 通过 Zemax 软件进行了单管聚焦系统的光路计算, 同时采用 Light tools 软件对该阵列组合系统进行了非序列光线追迹及空间结构优化, 得到了满足实现现场要求的仿真结果, 证明了该设计方案的可行性和有效性, 为实现紫外阵列 LED 光源系统的设计制造提

供了理论及实验依据.

## 1 紫外 LED 阵列系统设计方案

阵列系统设计在光学中有重要的应用(如半导体激光阵列<sup>[6]</sup>, 成像微透镜阵列<sup>[7-8]</sup>等), 其主导思想是要通过针对单个发光体的光学系统参量设计与阵列空间重构设计相结合实现合成图像或光斑光学指标(如均匀性、后工作距离、辐射强度、光斑尺等)的优化控制, 最终达到现场使用的具体要求.

### 1.1 紫外 LED 阵列系统单元设计

基于这种思路, 针对单管 UV-LED 光源的具体发光特性, 首先给出阵列单元光学设计的原理及思路. 采用的单管 UV-LED 辐射中心波长为 365 nm, 光谱半宽为 10 nm, 额定功率为 200 mW, 发散角是±25°, 发光面元为尺寸 1×1 mm<sup>2</sup> 的正方形灯丝. 单管 LED 的主要光学设计指标是在给定的后工作距离限制条件下实现最大限度的能量收集及光斑尺寸控制, 设计时需要在光斑尺寸与被辐射面元辐照度参量之间寻找折中点.

图 1 给出了单管 LED 光学设计的高斯近轴计算图, 由近轴计算公式  $\beta = y'/y = l'/l$ , 其中  $y$  为 LED 发光芯片半高度,  $y'$  为像方半光斑尺寸, 由公式可知像方光斑尺寸  $y'$  与后工作距离  $l'$  在物方参量一

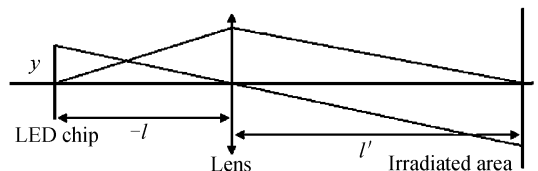


图 1 单管 UV-LED 近轴计算几何图  
Fig. 1 Figure of Gauss paraxial calculation of single UV-LED optical system design

\* 大连市科技基金(2005A11GX044)和大连民族学院博士启动基金(20056207)资助  
Tel: 020-88239467 Email: yongjun\_lu@sina.com  
收稿日期: 2007-10-31

定的条件下是同比例变化的,需要寻求一个折中点以保证 UV-LED 阵列空间排布在满足实际现场需求前提下实现较大数值孔径和最小的光斑尺寸,最终在辐射面上获得最高的辐照亮度。

以较有应用前景的线状紫外辐射光斑为例,要求空间紫外阵列在辐射面产生一条高亮度的线状辐射带,辐射带整体的光学均匀性、辐照度及 10 mm 宽尺寸为主要技术指标,就单管而言则首先需得到 10 mm 尺寸的光斑,及像方光斑半高为 5 mm. 物方辐射芯片半高为 0.5 mm,故  $\beta=y'/y=-10\times$ , 辐射发散角为  $\pm 25^\circ$ ,故要求聚光系统匹配数值孔径为  $NA=0.42$ . 考虑到空间阵列排布的紧凑性,透镜系统口径与 365 nm 紫外线 LED 尺寸相当,取  $d=10$  mm,则 LED 芯片距离透镜为  $-l=\frac{d}{2}/\tan 25^\circ=10$  mm,后工作距离  $l'=\beta * l=100$  mm,满足实际现场要求. 由于考虑到空间阵列对透镜单元的尺寸及结构指标的具体要求,现采用单片非球面<sup>[9]</sup>透镜而非传统球面系统设计,简化了光学系统结构,解决了光学系统复杂性导致的高吸收和高反射问题. 另外由于在 365 nm 波段一般光学玻璃有较强的吸收故采用较薄的高折射率及透过率紫外光学玻璃辅助增透膜技术解决这一问题. 经 Zemax 软件优化设计得到了单透镜系统的结构参量(见表 1),图 2 为系统光路追迹图。

表 1 单透镜系统结构参量

表面	半径	厚度	玻璃代号	非球面系数(conic)
目标	无穷大			
1	-836.76	3	729567	
2	-8.05	118.085		-0.7136



图 2 单管 UV-LED 光学系统光路

Fig. 2 The ray fan plot of single UV-LED optical system

## 1.2 紫外 LED 空间阵列光学设计与仿真结果

紫外 LED 空间阵列的设计必须按照实现现场的要求指标(其中包括后工作距离、光斑尺寸、辐照度等)具体结合单管 LED 系统最长度进行合理的最优空间排布设计. 图 3 给出了空间 LED 阵列系统的几何结构图。

图中  $d$  为单管 LED 聚焦光学系统通光口径,  $l'$  为后工作距离,同时也是空间阵列排布弧面的半径. 该半径  $l'$  同时也决定了弧面基板上 UV-LED 分布的最大数量,既  $N \leq \frac{\pi l'}{d}$ , 半径越大弧面基板上可排布的 LED 数量越多,但是辐照度光斑也将越大,单位面积辐照度降低,所以需要在半径  $l'$  参量与光斑

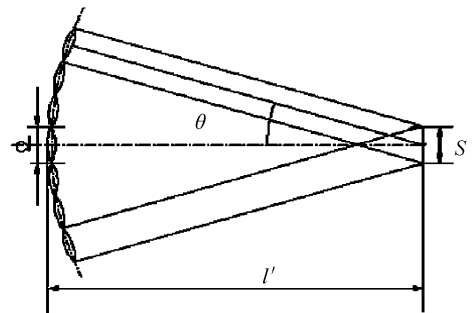


图 3 空间 LED 阵列系统的几何结构

Fig. 3 The geometrical configuration plot of two-dimensional UV-LED array

尺寸之间寻找最佳匹配值,以同时保证后工作距离  $l'$  基本条件下 LED 阵列输出合成功率满足辐照面光照及光斑尺寸最小. 辐照面单管 LED 辐照度为  $E_s$ ,  $s$  为辐照面尺寸,现场要求辐照度为  $E$ , LED 数量  $N$  应满足  $N \geq \frac{E}{E_s}$  ( $N$  取正整数). 考虑到离轴方向单管 LED 系统倾斜照射时导致的光斑扩散,  $\theta$  一般不应大于  $45^\circ$ ,所以实际 LED 数量应以空间尺度上满足  $N \leq \frac{2l' \sin 45^\circ}{d}$ , 最终依据  $\frac{E}{E_s} \leq N \leq \frac{2l' \sin 45^\circ}{d}$ , 找出满足条件的 LED 数量值  $N$ . 以电子线路板胶体速凝应用为例,要求光斑尺寸  $1\text{cm}^2$ , 辐照度  $E$  要求大于  $1000\text{mW}/\text{cm}^2$ , 单管 LED 辐照度  $E_s$  为  $150\text{mW}/\text{cm}^2$ , 需要  $N=7$ , 同时空间尺寸要求  $N < 17$ , 故取  $N=7$  实现技术要求. 为了实现线状光斑分布,对单组阵列进行空间排布优化,实现分立光斑的紧密对接,保证线光斑整体的光学均匀性. 其主要实现手段是通过 Light Tools 软件中的 Macro 编程功能设定线光斑  $X$  方向的辐照度均匀性(以  $\pm 25$  mm 范围内辐照度 RMS 值为判据)为评价函数,各点光斑在阵列间隔从  $0 \sim 10$  mm 范围步长  $0.1$  mm 移动,最终比较各间隔值对应的辐照度 RMS 值大小,最小值即为最优阵列排布空间结构. 图 4~图 6 分别给出了经过 Lighttools 软件设计及模拟得到的空间分布结构及光斑光线非序列追迹散

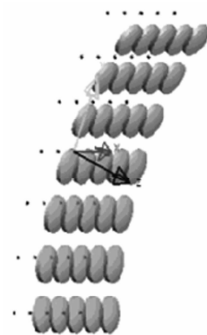


图 4 UV-LED 空间阵列系统三维立体

Fig. 4 The three-dimensional plot of UV-LED array

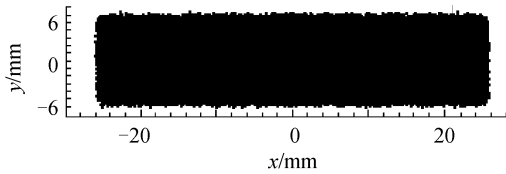


图5 空间阵列光学系统非序列光线追迹散点分布  
Fig. 5 The non-sequential optical ray trace scatter ray plot of UV-LED array

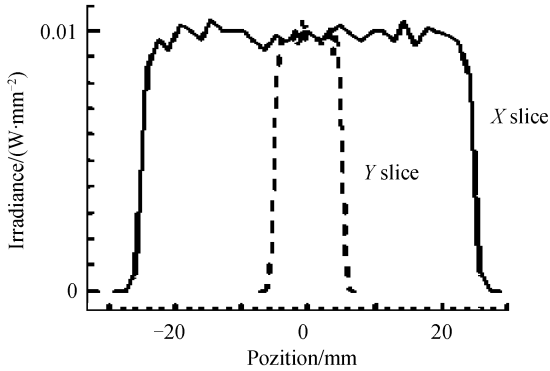


图6 UV-LED阵列在辐照平面上的辐照度分布  
Fig. 6 The distribution of irradiance of UV-LED array in the area under use

点及能量分布图。

## 2 结论

365 nm UV-LED 高功率新型紫外光源的问世对于胶体速凝技术产生了几乎革命性的影响,该光源克服了传统紫外高压水银灯的诸多缺陷,势必在许多应用领域完全替代传统光源.然而 UV-LED 单管发光功率相对较小,为了更加灵活高效地发挥该光源的优势,需要进行空间排布优化设计实现能量叠加来弥补这一不足,本文给出了 UV-LED 空间阵列系统设计的具体原理及实施方案光学模拟,结果表明针对使用现场的具体指标要求(如辐照度、后工作距离、光板尺寸等)给出的设计结果是完全满足要求且结构紧凑可靠的,对于 UV-LED 光源应用的拓展性研究与系统设计开发具有较大的参考价值.

### 参考文献

[1] WANG De-hai,JIANG Ling. UV curing materials theory and application[M]. Beijing :Science Press,2001.

- 王德海,江枫.紫外光固化材料理论与应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] LI Hong-qiang, ZENG Xing-rong. Progress of UV-curable coatings[J]. *Coating Technology & Abstracts*,2007(4):8-11. 李红强,曾幸荣.紫外光固化涂料及其研究进展[J].涂料技术与文摘,2007(4):8-11.
- [3] WANG Jun, LIU Wen-bin, SHI Dong-min. Present status of development and application of radiation curing adhesives[J]. *Chemistry and Adhesion*,2003(4):182-185. 王军,刘文彬,史明东.辐射固化胶粘剂的开发应用现状[J].化学与粘合,2003(4):182-185.
- [4] ZHU Sheng-wu, SHI Wen-fang. The market and development of UV/EB curing technology[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*,2001,19(3):161-167. 朱胜武,施文芳.紫外光/电子束固化市场状况及发展趋势[J].辐射研究与辐射工艺学报,2001,19(3):161-167.
- [5] YANG Jian-wen, ZENG Zhao-hua, WANG Zhi-ming, et al. Development of UV-curable waterborne coatings [J]. *Information Record in Materials*,2001,2(1):32-35. 杨建文,曾兆华,王志明,等.紫外光固化水性涂料的发展概况[J].信息记录材料,2001,2(1):32-35.
- [6] HE Xiu-jun, YANG Hua-jun, QIU Qi. The collimation design of the semiconductor laser array light beams [J]. *Laser Technology*,2004,28(6):528-530. 何修军,杨华军,邱琪.阵列半导体激光器光束准直设计[J].激光技术,2004,28(6):528-530.
- [7] HAN Yan-ling, LIU De-sen, JIANG Xiao-ping. Square self-focusing lens array and its image[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,36(2):221-223. 韩艳玲,刘德森,蒋小平.方形自聚焦透镜元阵列及其成像[J].光子学报,2007,36(2):221-223.
- [8] ZHANG Yu-hong, KANG Li-jun, HU Bao-wen, et al. Preparation of polymer microlenses array by using drop on demand technology[J]. *Acta Photonica Sinica*,2005,34(11):1640-1642. 张玉虹,康利军,胡宝文,等.用按需滴定技术制备聚合物微透镜阵列[J].光子学报,2005,34(11):1640-1642.
- [9] WEI Zi-hua, SHEN Wei-xing. A new method for calculating asphericity of optical aspheric surface [J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,34(4):730-732. 韦资华,沈卫星.一种新的光学非球面度计算方法[J].光子学报,2007,36(4):730-732.

## Optical System Design of Two-Dimensional Array of 365 nm UV LED

LU Yong-jun<sup>1</sup>, XU Wen-hai<sup>2</sup>, QU Yan-ling<sup>1</sup>, ZHAO Huan<sup>2</sup>, SONG Min<sup>1</sup>

(1 *Optoelectronic Institute, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China*)

(2 *Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China*)

Received date: 2007-10-31

**Abstract:** An application research on the high power 365nm UV LEDs widely used in the field of UV curing was performed, and a technical method using a two-dimensional array arrangement was suggested to realize the accumulation of their energy. The principle of optimum designing and an emulation software were provided. The emulating results exhibit the feasibility of the optical two-dimensional-array design scheme, which can reach many requirements in practical applications, including the irradiance intensity, the size and profile of spots, and the back-working distance. According to technical requirements occurred in a practical application case, the proposed system can provide a line-type irradiance spot of  $50 \times 10 \text{ mm}^2$ , a back working distance of more than 50mm, and an irradiance intensity of more than  $1000 \text{ mW/cm}^2$ . And the proposed optical two-dimensional-array design scheme is convinced of an optimum designing in the configuration side of optical system.

**Key words:** Optical design; UV LED; Array; UV curing



**LU Yong-jun** was born in 1976. He received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics in 2005. Now he is a teacher at Dalian Nationalities University, and engaged in the research on optical system design and optoelectronics.