

文章编号:1002-2082(2009)01-0016-04

二维空间紫外LED阵列实现单光斑 辐照固化系统的设计

芦永军¹, 许文海², 赵欢², 曲艳玲¹, 宋敏¹

(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:新型大功率紫外LED具有电光转化效率高、光谱纯度高和体积小等优点,但单管LED功率仍很难满足光固化的要求,针对单光斑辐照要求,提出采用空间阵列UV-LED排布实现能量累加的方案。该方案通过单管LED聚光系统与集成阵列系统综合设计实现了各单元单光斑辐照度在辐照面上的合成,最终得到的光斑辐照度分布均匀、尺寸合理,阵列系统后工作距离长,完全满足现场应用的具体指标要求。通过外围电子线路控制阵列LED的电流强度及通断状态可实现光斑辐照度在(1 000~1 800) mW/cm²可调,光斑尺寸为1 cm²,后工作距离为10 cm。

关键词:光学设计; 紫外二极管; LED阵列; 紫外固化

中图分类号: TN24; O439

文献标志码: A

Design a single spot UV-curing system with two-dimensional UV-LED array

LU Yong-jun¹, XU Wen-hai², ZHAO Huan², QU Yan-ling¹, SONG Min¹

(1. Optoelectronic Institute, Dalian Nationalities University,
Dalian 116600, China; 2. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Since the single LED can not meet the demand of UV-curing, a new solution in which the accumulation of UV radiative energy was implemented by two-dimensional LED array is proposed to utilize the advantages of the latest high-power UV-LED, such as high electro-optical conversion efficiency, high spectral purity and small volume. The irradiance combination of each single spot on the irradiated surface was realized by the combined design of single LED focusing system and the integrated array system. The obtained spot has the merits of uniform irradiance distribution, reasonable size and long back operation distance. The spot irradiance adjustable in the range of 1 000—1 800 mW/cm² is achieved by controlling the current and on-off state of LED array with peripheral electronics. The size of the obtained spot is 1 cm² and the back operation distance is 10 cm.

Key words: optical design; UV-LED; LED array; UV-curing

引言

紫外光固化^[1]是一种采用紫外辐射照射涂料或胶体使其快速凝固成形的技术,该技术优越于常规热固化技术,且光固化具有温度低、时间短、能耗

小等优点^[2],但如果采用传统紫外光源如高压水银灯,温度、时间和能耗仍然是制约光固化技术发展的重要因素。所以,在光固化应用技术中一方面需要在紫外固化材料^[3-5]方面开展工作,另一方面则

收稿日期:2008-08-11; 修回日期:2008-10-24

基金项目:大连市科技基金资助项目(2005A11GX044);大连民族学院博士启动基金(20056207)

作者简介:芦永军(1976—),男,内蒙古乌海人,讲师,主要从事光学设计与光电检测技术研究。E-mail: yongjun_lu@sina.com

需要在新型紫外辐射光源系统的研制方面开展有效的工作。UV-LED 新型紫外光源的出现和推广使用可以完全克服传统紫外固化光源存在的诸多问题,具有发光效能高、光谱纯度高(主要集中在固化材料最敏感的 365 nm 附近)、体积小等优点,有很广阔的应用前景。但是单管 UV-LED 自身功率受制造技术的限制,一般不超过 200 mW,对于许多应用场合(如光电子、包装领域等),该功率无法满足使用要求。由于光固化材料的固化时间直接与辐射光照度有关,所以对研制新型单光斑高功率紫外光源系统具有重要意义。本文提出采用二维空间阵列^[6]排布设计方案实现单管 UV-LED 的能量累加,通过对空间各 UV-LED 单元进行硬件电路设计实现叠加能量的可控性,设计中充分考虑了阵列的空间排布最优化设计。针对现场使用的具体技术指标(如光斑尺寸、后工作距离、辐照度、体积等),给出了实例性设计和优化结果。结果表明:通过二维空间阵列光学系统设计不但可以充分发挥 UV-LED 光源的优势,而且可以通过电子线路轻松控制各阵列单元的辐射功率参数,使应用更加灵活可靠,得到的设计结果完全满足现场的使用要求。

1 单光斑紫外二维光源系统设计

1.1 总体设计方案

该二维紫外 UV-LED 空间阵列系统方案需要针对实际现场的具体技术指标(光斑尺寸、后工作距离、辐照度、系统结构紧凑性等)综合考虑。首先通过单管 UV-LED 聚光系统的设计实现单光斑系统基本技术指标,重点是考虑系统在满足实际使用场合后工作距离及光斑尺寸指标的前提下实现最大数值孔径的能量收集,同时需要兼顾单聚光系统的空间体积参数,保证后续阵列系统集成时的紧凑性和可实现性。由于单聚光系统单元设计时对阵列空间排布进行了统筹考虑并给出了基本的光学指标数据,为空间阵列结构参数(LED 数量、间隔、空间分布)合理优化设计提供了依据。空间阵列光学系统设计着重于考虑各单元空间排布的紧凑性及能量累加后得到光斑的辐照度分布均匀性。由于倾斜照射单元在辐照面上形成的光斑扩散现象导致辐射面辐照度接收效率降低,所以需要研究各单元在辐照面上辐照度与倾斜角度之间的关系,最终实现阵列系统整体辐照效率的最优化设计,给出合理有效的空间排布结构参数。

另外,为了保证最终空间阵列系统应用更加灵

活,通用性更强,设计时增加了阵列系统辐照强度控制的冗余度,采用外部电子线路灵活控制各 UV-LED 的工作电流与通断状态,满足不同应用场合下辐照面对辐照度的不同要求。

1.2 紫外 LED 阵列单元系统设计

单管 UV-LED 聚光系统的设计需要综合后工作距离、数值孔径 NA 及光斑尺寸之间的关系,保证在满足后工作距离条件下实现最大数值孔径和最小的光斑尺寸指标要求;同时针对后续阵列系统设计需求兼顾聚光系统整体复杂性和体积等因素。UV-LED 采用的具体指标为中心波长 365 nm,光谱半宽 ± 10 nm,外形尺寸 10 mm \times 10 mm,发散角 $\pm 25^\circ$,额定辐射功率 200 mW,发光芯片尺寸 1 mm \times 1 mm。由于在紫外波段绝大多数光学玻璃具有很强的吸收,所以在紫外波段需要选择高透过率的玻璃且保证聚光系统整体光学厚度要小。基于以上考虑及光学成像差控制的需要,采用单片 H-LaF50A 玻璃结合非球面设计^[7-8]可以达到最终技术指标要求。表 1 给出了 H-LaF50A 玻璃的紫外透过率数据,考虑能量利用效率并结合单聚光系统尺寸要求,计算得到最大数值孔径。为了保证空间阵列系统的紧凑性,考虑单系统通光口径与 UV-LED 外形尺寸相当,取 $d=10$ mm,辐照光斑尺寸要求 10 mm \times 10 mm,由此得到芯片与聚光系统距离 $l'=100$ mm,提供的后工作距离操作范围满足多种应用场合的实际要求。图 1 为经过 Zemax 光学设计优化后得到的单片非球面透镜系统的光学成像系统光路图,图 2 和图 3 分别给出了经过 Light Tools 光学软件仿真后得到的单聚光系统光线追迹图——单光斑能量分布图及非序列光线追迹散点图。

表 1 H-LaF50A 光学玻璃(厚度 5 mm)透过率数据

Table 1 Transmittance of H-LaF50A optical glass

λ/nm	340	350	360	370	380	390	400
透过率 τ	0.75	0.83	0.89	0.927	0.949	0.966	0.977

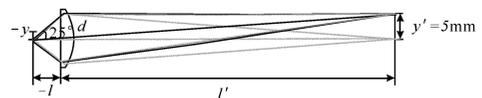


图 1 单管 UV-LED 光路图与参数

Fig. 1 Beam path and parameter of single UV-LED

从图 2 可以看出,在辐射面上 X 和 Y 方向的辐照度分布均匀,在光斑 ± 5 mm 范围内强度平均为 $140 \text{ mW}/\text{cm}^2$,对于总功率为 200 mW 的单管 UV-

LED而言,聚光系统能量聚集能力强,能量利用率高。图3中给出了通过Light Tools软件进行大量光线非序列追迹后得到的光线散点分布图,光线基本在控制范围内,从另一侧面说明了单透镜聚光系统的成像质量满足要求,光线控制效果好。

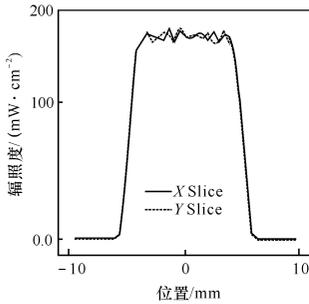


图2 单管UV-LED单光斑能量分布图

Fig. 2 Distribution of single spot irradiance of single UV-LED

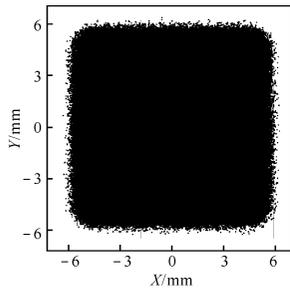


图3 单管UV-LED非序列光线追迹散点图

Fig. 3 Scatter plot for non-sequential ray tracing of single UV-LED

2 阵列系统集成与仿真结果讨论

依据单管UV-LED聚光系统的主要参数及应用现场的实际需求进行LED数量确定及空间阵列排布光路计算。实际应用要求辐照面有尽量高的辐照度以满足生产线快速固化的目的,最低设计指标取为 $1\ 000\ \text{mW}/\text{cm}^2$,考虑到阵列系统的通用性增加阵列整体输出光照度($1\ 800\ \text{mW}/\text{cm}^2$),可以通过外围电子线路控制各UV-LED的电流及通断控制辐照面的总辐照度。由设计要求辐照度指标 $1\ 000\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 及单管LED聚光系统辐照面辐照度 $140\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 可计算出LED的数量约为7个,达到 $2\ 000\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 指标则需要14个。考虑到倾斜照射单元在辐照面上光斑的扩展及能量利用效率,倾

斜角一般不超过 45° 。

通过Light Tools软件可以完成阵列排布整体结构的合理分配及优化设计,基于加工难度、阵列系统紧凑性及叠加光斑指标控制等多种因素,最终给出图4的十字形二维空间阵列分布结构。图5为由整个阵列系统在辐照面上得到的辐照度分布,从图中可以看出该阵列系统总输出辐照度为 $1\ 800\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 以上,由于倾斜照射导致的光斑展宽,能量有所分散,计算最边缘LED单元的倾角约为 20° ,达到了设计要求。

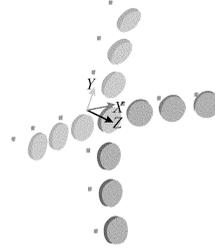


图4 单光斑二维空间阵列三维结构图

Fig. 4 3-D structural diagram of 2-D array producing single spot

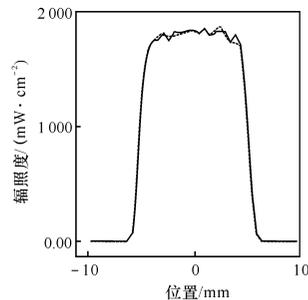


图5 紫外阵列LED被辐照面辐照度分布图

Fig. 5 Irradiance distribution on irradiated surface of 2-D UV-LED array

3 结论

新型大功率紫外LED的出现可以说在许多光固化技术应用领域中将完全替代传统高压水银灯紫外光源,成为拓展性应用的一个新亮点。关键在于充分发挥UV-LED光源的优势同时弥补单管功率不足的弱势,本文提出采用光学空间阵列结构设计方案实现了这一要求,而且通过电子线路可以灵活地对UV-LED阵列辐照强度进行控制,增加了设计方案的通用性和灵活性。实验结果证明了该方

案的可行性和有效性,为实际固化仪器设备的研制提供了实验依据和原理验证。

参考文献:

- [1] 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.
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. (in Chinese)
- [2] 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, 28(4): 8-11.
LI Hong-qiang, ZENG Xing-rong. Progress of UV-curable coatings [J]. Coatings Technology & Abstract, 2007, 28(4): 8-11. (in Chinese)
- [3] 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, 25(4): 182-185.
WANG Jun, LIU Wen-bin, SHI Dong-min. Present status of development and application of radiation curing adhesives [J]. Chemistry and Adhesion, 2003, 25(4): 182-185. (in Chinese)
- [4] 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.
YANG Jian-wen, ZENG Zhao-hua, WANG Zhi-ming, et al. Development of UV-curable waterborne coatings [J]. Information Recording Materials, 2001, 2(1): 32-35. (in Chinese)
- [5] 王德海,江根. 紫外光固化材料理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
WANG De-hai, JIANG Ling. UV curing materials theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [6] 匡丽娟,翟金会,阮玉,等. 复眼透镜阵列应用于均匀照明系统的特性研究[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(6): 29-31.
KUANG Li-juan, ZHAI Jin-hui, RUAN Yu, et al. Characteristics of flyeye lens in uniform illumination system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(6): 29-31. (in Chinese)
- [7] 勾志勇,王江,王磊,等. 衍射极限非球面准直透镜[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 528-530.
GOU Zhi-yong, WANG Jiang, WANG Lei, et al. Diffraction-limited a spheric collimation lens [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6): 529-530. (in Chinese)
- [8] 陈胜斌,李纪赛,张新宇. 基于硅各向异性腐蚀的非球面微光学元件的制作[J]. 半导体光电, 2007, 28(2): 231-234.
CHEN Sheng-bin, LI Ji-sai, ZHANG Xin-yu. Fabrication of aspherical micro-optical elements based on silicon anisotropic etching [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(2): 231-234. (in Chinese)