

# 均匀辐照 365 nm LED 光源设计及其在光刻中的应用

王向贤<sup>1,2</sup> 汪波<sup>1</sup> 傅强<sup>1</sup> 陈漪恺<sup>1</sup> 胡继刚<sup>1</sup> 张斗国<sup>1</sup> 明海<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026)  
(<sup>2</sup>巢湖学院物理与电子科学系, 安徽 巢湖 238000)

**摘要** 优化设计了 365 nm 紫外 LED 点光源阵列、聚焦透镜组的排布, 实现了高强度均匀辐照的 LED 面光源。利用优化后的 365 nm LED 面光源进行了接触式曝光光刻实验, 所得刻写图形与掩模板图形一致。提出的基于 365 nm 紫外 LED 阵列均匀辐照面光源的光刻方法具有结构简单、节能、环保等优势。

**关键词** 光学制造; 紫外发光二极管; 阵列; 光刻

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0416001

## Design of Uniform Illumination Optical Source with 365 nm LED and Application in Lithography

Wang Xiangxian<sup>1,2</sup> Wang Bo Fu Qiang<sup>1</sup> Chen Yikai<sup>1</sup> Hu Jigang<sup>1</sup>  
Zhang Douguo<sup>1</sup> Ming Hai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)  
(<sup>2</sup>Department of Physics and Electronic Science, Chaohu College, Chaohu, Anhui 238000, China)

**Abstract** Arrangements of point light sources array with 365 nm ultraviolet LED and focusing lens are designed and optimized. Area light source with uniform illumination and high intensity is achieved based on arrangements system. Lithography experiment with contact exposure method is realized with the optimized area optical source. Lithographic patterns are consistent with mask. The lithography method based on uniform area optical source from 365 nm LED arrays has advantages of simple structure, energy conservation and environmental protection.

**Key words** optical fabrication; ultraviolet LED; arrays; lithography

**OCIS codes** 230.3670; 220.2945; 220.3740

## 1 引言

光刻技术是一种精密的微纳加工技术, 是微纳光子学器件<sup>[1~3]</sup>和微电子学器件<sup>[4,5]</sup>中的主流制造技术。近年来, 光刻技术朝着减小刻写图形的线宽<sup>[5]</sup>、光刻设备小型化和低成本化<sup>[6]</sup>等发展方向不断更新。基于高压汞灯光源的光刻机, 大多用汞(Hg)的 365 nm *i* 线曝光。由于汞灯光源属于立体

全方位辐照, 为了实现单一波长的均匀辐照, 往往需要采用复杂的光学系统, 包括光阑、快门、准直镜、复眼透镜(一般需要几十个甚至上百个透镜)、*i* 线滤光片、场镜、反射镜等。经过一系列光学元件后, 由于各种损耗, 其效率很低, 加之汞灯开启后不能关闭, 导致了不曝光期间能量的进一步浪费; 同时, 汞灯光源还存在诸如稳定性低、寿命短(2000 h)、温度

**收稿日期**: 2011-10-12; **收到修改稿日期**: 2012-01-10

**基金项目**: 国家 973 计划(2011CB301802)、国家自然科学基金(61177053, 11004182)、安徽省自然科学基金(11040606Q26)、安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2012Z272)和中国科学技术大学青年创新基金资助课题。

**作者简介**: 王向贤(1980—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事微纳光学方面的研究。E-mail: wangxx869@126.com

**导师简介**: 明海(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术、微纳光学等方面的研究。

E-mail: minghai@ustc.edu.cn(通信联系人)

高(1000 ℃)等不足。这些都导致了基于汞灯光源的光刻机存在诸如价格高、操作复杂、能耗高等不足。

紫外发光二极管(LED)阵列光源可实现在距离光源一定距离,即工作距离处的大面积均匀辐照<sup>[7~9]</sup>,且已被用于紫外固化领域<sup>[10,11]</sup>。然而到目前为止,紫外LED阵列光源应用于光刻领域的报道很少。众所周知,LED光源的谱线单一,无需额外的滤光片进行滤光,而汞灯光源具有多条谱线,在有些光刻技术中,如亚微米投影光刻机中一般都是通过滤光片选取其中的一条谱线用于对光刻胶进行曝光,而其他波长光的能量得不到利用。同时,LED光源的曝光时间和曝光辐照强度可以通过对光源本身的发光控制来实现,需要曝光时LED发光,曝光结束,LED自动关闭,故不需要光电快门即可自动控制曝光。另外,LED的寿命可长达 $2 \times 10^4$  h。因此,相较于汞灯光源,在光刻领域中,LED光源具有结构简单、节能、环保、寿命长等优势。本文优化设计了365 nm LED点光源 $4 \times 4$ 平面阵列、聚焦透镜组的排布,实现了工作距离处的曝光面均匀辐照的紫外LED面光源,并将其应用于光刻工艺,成功实现了微结构的光学刻写。

## 2 均匀辐照紫外LED面光源设计

通过增加紫外LED的数量,采用LED阵列结构或LED阵列加透镜结构并合理设计其排布,可以实现距LED光源一定距离即工作距离处的辐照面的高强度大面积均匀辐照。通常采用的方式包括<sup>[6]</sup>:将紫外LED阵列排布在平面上,在该阵列前加透镜组;将紫外LED阵列排布在具有一定曲率半径的弧面上,在每个紫外LED前加1个透镜;或将紫外LED光源排布在具有一定曲率半径的弧面上,不加透镜阵列,直接照明。本文只讨论第一种情况。

LED辐照的实际近似分布为观察角余弦多次方的函数<sup>[8]</sup>

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

式中 $\theta$ 为视角, $E_0(r)$ 为轴向距离LED $r$ 处的照度值, $m$ 的取值可由 $\theta_{1/2}$ 决定,处于该角度的光强为中心光强的一半

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

对处于 $(X, Y)$ 位置的单管LED, $(x, y, z)$ 处的辐照分布可以表示为<sup>[8]</sup>

$$E(x, y, z) = \frac{z^m I_{\text{LED}}}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{(m+2)/2}}, \quad (3)$$

式中 $I_{\text{LED}}$ 为LED的强度。对于平面排列的 $N \times M$ LED阵列,当 $N, M$ 均为偶数时,其总照度为<sup>[8]</sup>

$$E(x, y, z) = z^m I_{\text{LED}} \sum_{n=-\frac{N-2}{2}}^{\frac{N-2}{2}} \sum_{l=-\frac{M-2}{2}}^{\frac{M-2}{2}} \times \left\{ \left[ x - (2n-1) \frac{d}{2} \right]^2 + \left[ y - (2l-1) \frac{d}{2} \right]^2 + z^2 \right\}^{-\frac{m+2}{2}}, \quad (4)$$

式中 $d$ 为LED的间距。

虽然在LED阵列前不加透镜组,也可以实现某一工作距离处的曝光面的均匀辐照,但其离光源很近且光束发散很大,不利于在实际光刻中的应用。加上透镜组,LED阵列发射光束经过透镜组聚束后可有效减小光束发散度,同时可提高辐照强度,且在距LED较远处实现均匀辐照,故选择后者。设置合适的系统参数,经软件优化即可得到最优的光源系统。图1为使用单管尺寸 $0.9 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ ,中心间隔 $1 \text{ mm}$ 的 $4 \times 4$ LED阵列和2个透镜构成的透镜组(物方孔径为 $10 \text{ mm}$ )的优化结果。图1(a)为该LED空间阵列光学系统光线追迹示意图, $L$ 为透镜2到均匀辐照面的距离,即工作距离;(b)为距透镜2不同距离平面的中心轴线(与正方形阵列的边长平行)上的照度分布图,可以看出,该光学系统在工作距离为 $22 \text{ mm}$ 的辐照面实现均匀辐照,系统的照明孔径角为 $12^\circ$ ;(c)为工作距离处的辐照面上的照度分布图,可以看出,均匀辐照面为正方形。

## 3 光刻实验

利用 $4 \times 4$ 平面阵列排布加2个透镜实现的均匀辐照LED面光源,进行了接触式曝光光刻实验。所用 $365 \text{ nm}$ 紫外LED的光谱如图2所示,其半峰全宽为 $10 \text{ nm}$ ,而一般的 $365 \text{ nm}$ 窄带滤光片的带宽在 $20 \text{ nm}$ 左右,故实验中无需使用紫外滤光片进行滤光。图3为实验结构排布图,光刻胶(德国ALLRESIST公司的X AR-N 7700/30)旋涂在基底上,并与掩模板直接接触,光源系统(包括LED阵列和透镜组)距曝光面即光刻胶薄膜面的距离 $L$ 为 $22 \text{ mm}$ ,插图为实验测量的LED光源系统辐照在工作距离处的紫外显示卡上形成的光斑,即曝光光刻胶的光斑,其辐照均匀分布的区域约为 $4 \text{ mm} \times$

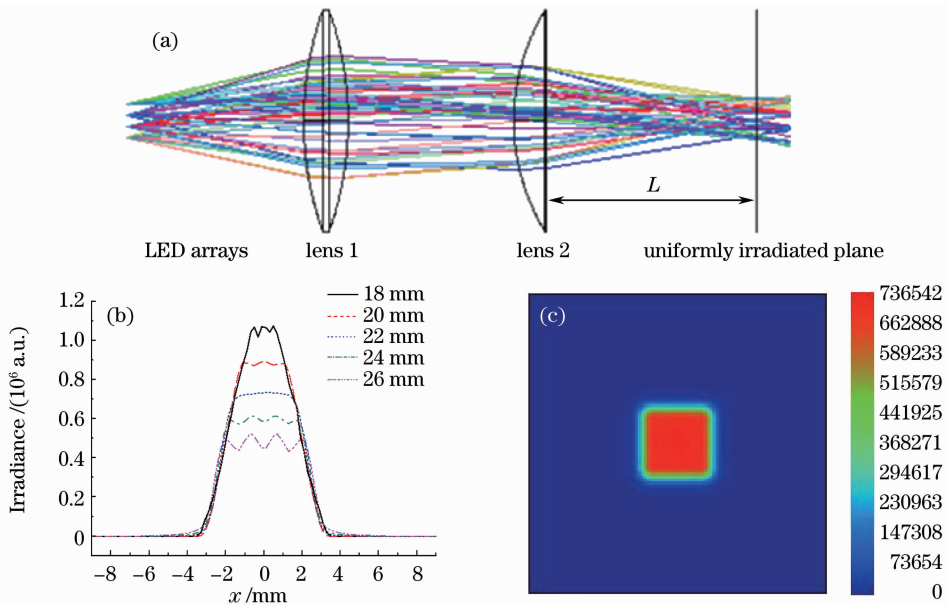


图 1 (a) LED 空间阵列光学系统光线追迹示意图；(b)距透镜 2 不同距离平面的中心轴上的照度分布；(c) 22 mm 工作距离处的辐照面上的照度分布

Fig. 1 (a) Ray tracing schematic of LED spatial arrays' optical system; (b) irradiance distributions of the symmetry axis in different plane from the lens 2; (c) irradiance distributions of the system in plane of working distance 22 mm

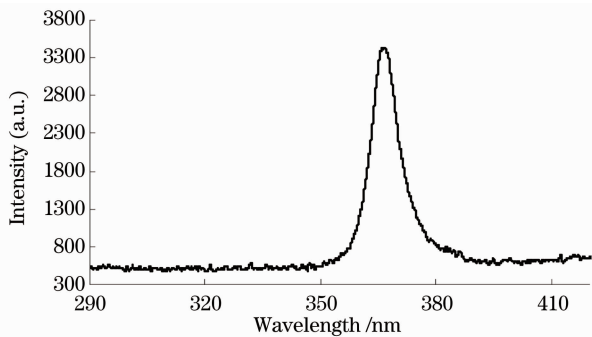


图 2 365 nm 紫外 LED 光谱图

Fig. 2 Spectrum of ultraviolet LED with 365 nm wavelength

用功率为光源最大输出功率的 10%，在曝光面的功率密度约为  $135 \text{ mW/cm}^2$ ，曝光时间为 1 s。曝光后，经过显影定影等后续工艺处理，便可将掩模板的图形转移到衬底上的光刻胶层。图 4(a)和(b)分别为掩模板和显影所得图形的显微镜像，掩模板图形为两金属电极，其尖端部分的宽度为  $4.98 \mu\text{m}$ ，刻写图形的形状和尺寸与掩模板图形一致，由于掩模板图形的材料是金属铬(Cr)，衬底是玻璃，而光刻胶图形为透明的聚合物，衬底为硅片，故刻写图形与掩模图形具有不同的颜色，二者对应的背景颜色也不相同。

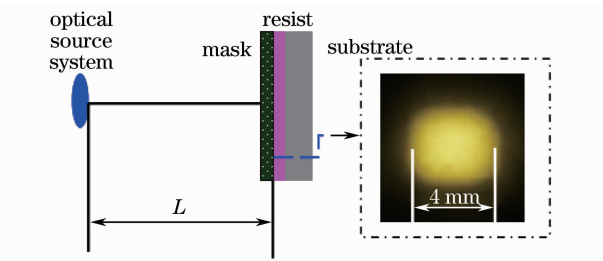


图 3 光刻实验结构排布图，插图为曝光面的光斑  
Fig. 3 Configuration of lithography experiment, inset shows luminous spot of the exposure plane

4 mm 的正方形，光斑形状和尺寸与前述优化结果基本相同。该光源系统的最大辐照功率为 450 mW，其曝光辐照功率可以通过光源发光控制器在最大值的 1%~100% 范围内调节，实验曝光所

在倏逝波干涉光刻、表面等离子体光刻等光刻工艺中，往往需要光刻胶薄膜的厚度在 100 nm 以下。为得到厚度小于 100 nm 的 X AR-N 7700/30 型光刻胶薄膜，将光刻胶稀释至质量分数为 30% 的光刻胶-稀释剂混合溶液后，以不同的速度旋涂在石英衬底上，转速从 3000 r/min 到 8000 r/min，每隔 1000 r/min 旋涂一个薄膜，利用上述光源和图 3 所示的实验排布结构，曝光石英衬底上的光刻胶。完成曝光后，经显影、定影等后续工艺处理，再用原子力显微镜(AFM)测量薄膜厚度。图 5 为用 AFM 测量光刻胶薄膜厚度的图片(对应的涂胶转速为 8000 r/min)，(a)为电极斜线部分(靠近正方形处)的 AFM 扫描图，(b)为图 1(a)中画线部分的截面分析，从该图可知，薄膜厚度为 47 nm。图 6 为光刻胶薄膜

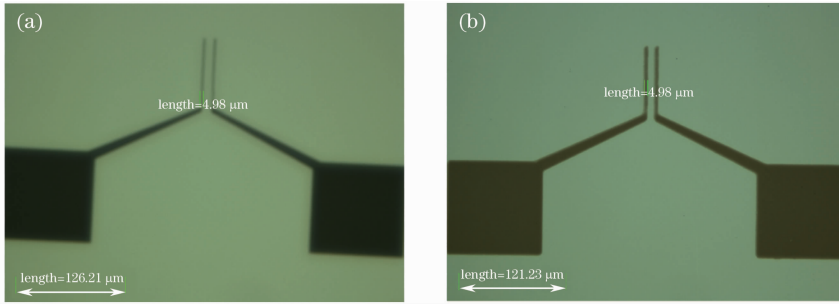


图 4 掩模板(a)和显影所得光刻胶图形(b)的显微镜像

Fig. 4 Microscopic images of (a) the mask and (b) developed resist pattern

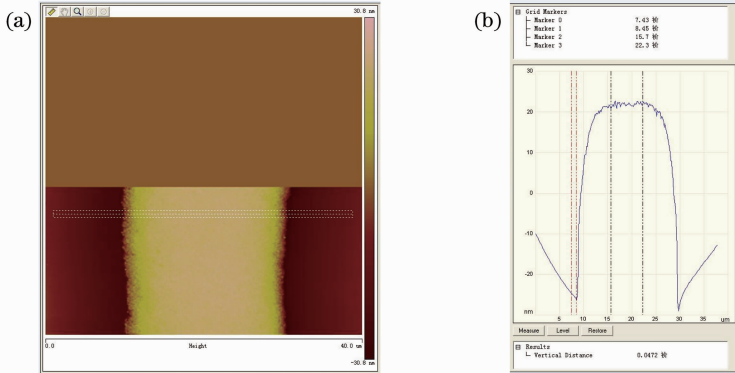


图 5 (a)光刻图形中电极斜线部分的 AFM 像；(b) (a)中画线部分的截面分析

Fig. 5 (a) AFM image of developed resist pattern of oblique line part of electrode;

(b) sectional analysis along line drawn in (a)

厚度与涂胶速度的关系。可以看出,光刻胶薄膜厚度随涂胶速度的增加而减小,在 3000~8000 r/min 的涂胶速度范围内,30%质量分数的光刻胶膜厚小于 80 nm,最薄可达 47 nm。通过该实验进一步说明了基于 365 nm 紫外 LED 阵列光源的光刻方案的可行性。

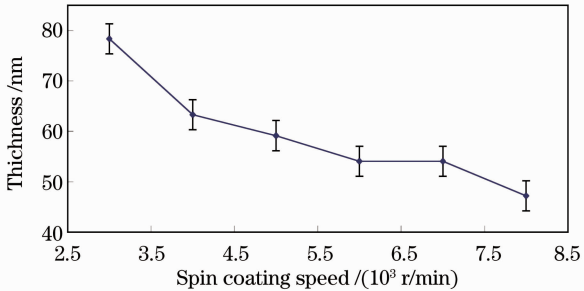


图 6 光刻胶薄膜厚度与旋涂速度的关系

Fig. 6 Thickness of resist versus spin coating speed

## 4 结 论

优化设计了 4×4 平面排布的 365 nm 紫外 LED 点光源阵列和透镜组结构,实现了工作距离处辐照分布均匀的面光源。利用优化的线宽 10 nm 的 365 nm LED 面光源进行了接触式曝光光刻实

验,得到了与掩模板图形一致的光刻图形。结果表明,紫外 LED 阵列光源可用于实现高效、节能、环保的光学刻写,有望在微电子、微纳光子器件制备等领域得到广泛应用。

## 参 考 文 献

- Gan Fuxi, Wang Yang. Breaking through the optical diffraction limits, developing the nano-optics and photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900104  
干福熹,王 阳. 突破光学衍射极限,发展纳米光学和光子学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900104
- Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebing *et al.*. Micro- and nano-metal structures fabrication technology and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900128  
谢常青,朱效立,牛洁斌等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900128
- Li Feng, Chen Sihai, Lai Jianjun *et al.*. Design and fabrication of polymer microlens array with self-written waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0310003  
李 风,陈四海,赖建军等. 自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0310003
- Zhou Yuan, Li Yanqiu, Liu Guangcan. Study on pellicle optimization and polarization aberration induced by pellicle in hyper numerical aperture lithography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0407001  
周 远,李艳秋,刘光灿. 超大数值孔径光刻中掩模保护膜优化及偏振像差研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0407001
- C. Wagner, N. Harned. Lithography gets extreme[J]. *Nat. Photonics*, 2010, **4**: 24~26

- 6 Wang Xiangxian, Ming Hai, Zhang Douguo *et al.*. One Kind Lithography Machine Based on Ultraviolet LED Source [P]. Patent of China, 201120292158.2  
王向贤, 明海, 张斗国等. 一种基于紫外 LED 光源的光刻机 [P]. 中国专利, 201120292158.2
- 7 Allen Jong-Woei Whang, Yi-Yung Chen, Yuan-Ting Teng. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, **5**(3): 94~103
- 8 Ivan Moreno, Rumen I. Tzonchev. Effects on illumination uniformity due to dilution on arrays of LEDs[C]. *SPIE*, 2004, **5529**: 268~275
- 9 Ivan Moreno, Jesús Muñoz, Rumen Ivanov. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(3): 033001
- 10 Zhao Huan, Xu Wenhai, Lu Yongjun. An UV curing source system with LED arrays[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(11): 1314~1316  
赵欢, 许文海, 芦永军. LED 阵列型紫外光固化光源系统[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(11): 1314~1316
- 11 Lu Yongjun, Xu Wenhai, Zhao Huan *et al.*. Design a single spot UV-curing system with two-dimensional UV-LED array [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(1): 16~19  
芦永军, 许文海, 赵欢等. 二维空间紫外 LED 阵列实现单光斑辐照固化系统的设计[J]. *应用光学*, 2009, **30**(1): 16~19

栏目编辑: 谢婧