

用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计

肖艳芬¹ 朱菁¹ 杨宝喜^{1*} 胡中华^{1,2} 曾爱军¹ 黄惠杰¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 均匀照明是投影光刻机中实现光刻线条高度均一性的重要条件。采用微透镜阵列作为照明匀光器件,能够在实现矩形照明光斑的同时获得极高的远场分布均匀性。基于微透镜阵列现有的加工工艺,设计出二维方向分开的柱面微透镜阵列,并通过优化设计,克服了微透镜之间的接缝在远场光场处产生的中心亮线。仿真分析表明,所设计的微透镜阵列的远场分布不均匀性达到 0.85%。

关键词 几何光学;微柱面镜阵列;光学设计;照明均匀性

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0216001

Design of Micro-Cylindrical-Lens Array Used for Illumination Uniformization in Lithography Systems

Xiao Yanfen¹ Zhu Jing¹ Yang Baoxi¹ Hu Zhonghua^{1,2} Zeng Aijun¹ Huang Huijie¹

(¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

Abstract Uniform illumination is an important condition for maintaining high uniformization consistence of lithography lines in projection lithography. Micro-lens array used as the illumination uniformization component can make the rectangular illumination spot as well as acquire high far field uniformization. Based on modern processing technology, the cylindrical micro-lens array divided in two-dimension is designed, and the central bright line in the far field created by the transition area between the micro-lens array is eliminated. Simulation results show that the far field non-uniformity of the designed micro-lens array reaches 0.85%.

Key words geometric optics; micro-cylindrical-lens array; optical design; illumination uniformization

OCIS codes 080.2740; 220.2740; 220.2945

1 引 言

在投影光刻机照明系统中,均匀照明是保证加工出的线条线宽均匀一致的一项重要技术^[1]。通常,用于光刻机照明系统的匀光元件有积分棒、衍射光学元件和微透镜阵列^[2]。积分棒匀光的缺点是,限制了照明最大孔径角,且由于光束在积分棒内多次反射,降低了能量利用率;衍射光学元件由于衍射效应严重降低了能量利用率^[3];微透镜阵列出射孔径角较大,可以实现大面积照明,其匀光基于折射的

原理,能避免高阶衍射造成较大的能量损耗^[4,5],而且它还能保持光的偏振特性^[3]。微透镜阵列进行匀光的原理是对入射光束先微分再积分,即先将入射光束分割成许多子光束,子光束被后面的光学元件叠加到其焦面上,形成均匀的光斑。光刻分辨率的不断提高要求照明系统能实现越来越高的照明均匀性。因此,需要对微透镜阵列的精细结构进行研究,使设计的微透镜阵列符合现有的加工水平。目前,制作微透镜阵列的方法主要有光刻热熔胶法^[6]和离

收稿日期: 2012-08-07; 收到修改稿日期: 2012-10-22

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX02402)和国家国际科技合作项目(2011DFR10010)资助课题。

作者简介: 肖艳芬(1985—),女,硕士,实习研究员,主要从事光学设计和精密测量等方面的研究。

E-mail: yanfenxiao2007@163.com

* 通信联系人。E-mail: yangbx@siom.ac.cn

子束刻蚀法等。光刻热熔胶法和离子束刻蚀法具有工艺简单、成本低廉、工艺参数易于控制和环境污染小等优点^[7,8]。有研究小组采用微透镜回流工艺制作出大尺寸的微透镜阵列^[9]。借助于集成电路制造技术,采用光刻和反应离子束刻蚀两种技术相结合的方法可将许多的折射微透镜阵列制作在同一块基片表面^[10]。

本文参考上述制作工艺,设计了柱面镜结构的微透镜阵列,即微柱面镜阵列,用于光刻机照明均匀化。柱面型微透镜阵列具有很高的填充因子,接近100%^[5]。在光刻机照明系统中,光源通常为高能量的激光光束,球面型微透镜阵列会将光会聚为一个光功率密度很大的焦斑,当会聚焦斑位于或靠近它后面的光学元件时,将导致光学元件由于焦斑照射处局部光强过大而损坏。而柱面型微透镜阵列会聚光后得到一条焦线,能量密度相对较低,不容易损坏其他光学元件。而且,柱面型微透镜阵列可以单独实现一个方向上的光束均匀化^[11]。因此柱面型微透镜阵列是更有利于实现光刻照明均匀化的一种结构。

2 微柱面镜阵列的设计方案与仿真分析

2.1 微柱面镜阵列匀光原理

微柱面镜阵列和聚光镜组合可以实现匀光的功能^[12]。微透镜阵列匀光的原理如图1所示,其中 θ_1 是微透镜阵列后表面的入射角, θ_2 是出射角,输出光斑尺寸为 D ,微柱面镜厚度为 d 。将光束分割再相互叠加,光场分布的均匀程度取决于子光束的个数或者微透镜的个数^[13,14]。图1中仅以一维方向为例,聚光镜位于微透镜阵列的后面,它把经微透镜阵列分割的光束聚焦,形成所需的均匀光场分布。

微透镜阵列后表面位于微透镜阵列前表面的像方焦面和聚光镜物方前焦面,每个微透镜前表面将入射的光束分割为许多尺寸相同的子光束,每个子光束都会会聚在后表面上,后表面上的微透镜阵列起到场镜的作用,以形成远心光路。只有当微透镜阵列的后表面位于聚光镜的物方焦平面时才能形成像方远心光路。

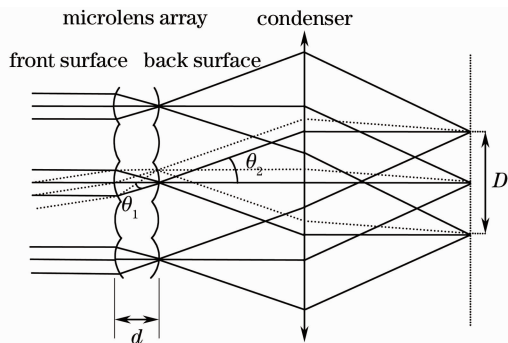


图1 微透镜阵列匀光原理

Fig. 1 Uniformization principle of micro-lens array

微柱面镜阵列匀光的原理与微透镜阵列匀光的原理基本相同,如图2所示分别为 X 方向和 Y 方向匀光原理。入射光束分别被 X 方向和 Y 方向的微柱面镜阵列分割后,再由聚光镜叠加到其像方焦面上。但是,微柱面镜阵列匀光在 X 和 Y 方向的焦点位置不一样,所以聚光镜的前焦面和微柱面镜的后焦面无法严格重合,会对均匀性以及远心度产生一定的影响。但为了使两维方向的远心光路均能满足要求,两块光学基底间的距离应足够小。聚光镜的物方焦面位于两块光学基底后表面的中间平面,由于光学基底的厚度在毫米级,而聚光镜的焦距通常为光学基底厚度的100倍以上,因此基本上能够保证最终的光路是像方远心光路。

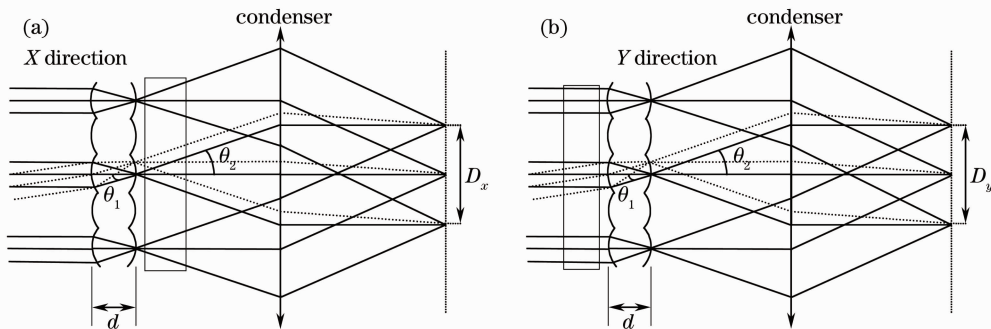


图2 微柱面镜阵列(a) X 方向和(b) Y 方向的匀光原理

Fig. 2 Uniformization principle of micro-cylindrical-lens array in (a) X direction and (b) Y direction

在光刻机照明系统中,衡量微透镜阵列匀光特性的一个指标是不均匀性。不均匀性的定义为^[11]

$$\eta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (1)$$

式中 E_{\max} 和 E_{\min} 分别为强度分布图中光强的最大值和最小值。

2.2 微柱面镜阵列的设计

如图3所示,微透镜阵列包括两个光学基底,分别称为第一光学基底和第二光学基底,两个光学基底均垂直于聚光镜光轴放置,且中心线位于该光轴上。光学基底的前后表面均被微柱面镜阵列所覆盖,微柱面镜阵列的表面为凸柱面镜及其之间的接缝平滑连接的周期排列结构。单块微柱面镜阵列前表面上微凸柱面透镜的面形结构和后表面上的微凸柱面透镜呈镜像对称,且基底的后表面位于前表面微凸柱面镜像方焦面。第一光学基底前后表面上的微凸柱面透镜和接缝的母线方向沿 Y 轴或 X 轴方向;第二光学基底前后表面上的微凸柱面透镜和接缝的母线方向沿 X 轴或 Y 轴方向。两块光学基底之间的距离尽可能地小。

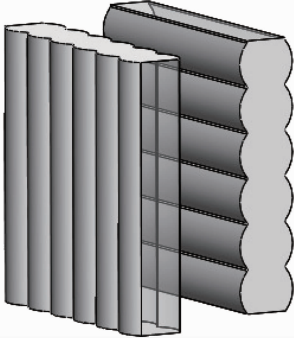


图3 微柱面镜阵列结构

Fig. 3 Structure of micro-cylindrical-lens array

设计微柱面镜阵列前,先确定如下参数:聚光镜的焦距 f_c ,输出光斑尺寸 D ,波长 λ 以及微透镜阵列材料在该波长下的折射率 n_λ 。由几何光学原理可知, $\sin \theta_2 = \frac{D}{2f_c}$, $\sin \theta_1 = \frac{l}{2d}$, $l = l_a + l_b$, 其中 l_a 是微凸柱面镜的口径宽度, l_b 是凹形接缝的口径宽度;由菲涅耳公式可知 $\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = n_\lambda$ 。综合上述4个式子,可以得到微柱面镜的厚度与周期宽度 l 之间的关系:

$$\frac{l_a + l_b}{d} = \frac{D}{f_c n_\lambda}. \quad (2)$$

为了保证远场光强分布的均匀性,通常要求微柱面镜的口径宽度小于入射光束口径 Φ 的 $1/100$ 。如果口径宽度太小,则加工精度不能保证,而且会使微柱面镜的焦距过短,曲率半径过小,加工难以实现。因此,通常取 $(l_a + l_b)$ 小于 $\Phi/100$, 且大于 $100 \mu\text{m}$ 。

当微凸柱面镜的焦距 $f_m = \frac{d}{n_\lambda}$ 时,可以保证光

学基底的后表面位于前表面上微凸柱面镜的像方焦面。微柱面透镜的表面轮廓可表示为^[13]

$$h = \frac{\frac{1}{r}x^2}{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{r^2}(c+1)x^2}}, \quad (3)$$

式中 x 为横坐标, h 为纵坐标,表示截面表面轮廓的矢高。通过确定其中的曲率半径 r 和非球面系数 c , 可以确定微凸柱面镜的表面面形。曲率半径 r 通常约为 $f_m(n_\lambda - 1)$ 。可以利用光学设计软件如CODE V进行光学设计的优化,来确定曲率半径 r 和非球面系数 c 。优化时,首先选取 r 的初始值为 $f_m(n_\lambda - 1)$, c 的初始值为0,通过设定目标函数的值,进行优化。可以选取焦距、厚度和球差作为目标函数,最终优化出曲率半径 r 和非球面系数 c 。

微柱面镜阵列单元由微凸柱面镜及其平台型接缝连接而成,若干微柱面镜阵列单元周期性排列成微柱面镜阵列。举例说明微柱面镜阵列的设计过程。为了产生光斑尺寸为 $40 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 的矩形均匀光场分布,聚光镜的焦距 f_c 为 120 mm , 波长 $\lambda = 193 \text{ nm}$, 采用熔石英材料,它在 193 nm 波长下的折射率 $n_\lambda = 1.5603$, 入射光束的口径为 126 mm 。由(1)式可以得到光学基底的厚度和周期宽度关系为: $\frac{l_a + l_b}{d} = 0.21$ 和 0.07 (分别是 X 和 Y 方向), 考虑到微柱面镜的周期宽度应小于其通光口径的 $1/100$, 所以选取 X 方向和 Y 方向的微柱面镜的周期宽度为 0.5 mm 和 0.17 mm , 那么微凸柱面镜光学基底的厚度 d 的计算值为 2.3 mm , 但考虑到实际加工出的微柱面镜阵列存在一定的加工误差,所以对输出光束的尺寸留有一定的余量,所以厚度取为 2.25 mm 。

微柱面镜的焦距为 1.442 mm , 选取 r 的初始值为 $f_m(n_\lambda - 1)$ 即 0.807 mm , c 的初始值为0, 通过在光学设计软件 CODE V 中设定目标函数的值进行优化。这里选取焦距 $f_m = 1.442 \text{ mm}$ 、厚度 $d = 2.25 \text{ mm}$ 以及球差为0作为目标函数,最终优化出曲率半径 $r = 0.808 \text{ mm}$ 和非球面系数 $c = -0.41$ 。

最后确定平台型接缝的宽度 l_a 。微柱面镜阵列的制作工艺通常采用光刻热熔胶工艺^[15], 该工艺首先将光刻胶按照微柱面镜阵列的分区结构进行刻蚀,接着通过加热方法转移到熔石英上。上述工艺由于首先进行分区处理,因此分区时就会产生微柱面镜阵列之间的接缝,采用平台型接缝形式,接缝的宽度 l_a 通常为微凸柱面镜周期宽度的 $1/50 \sim 1/20$,

选取微凸柱面镜周期宽度在 X 和 Y 方向分别为 0.5 mm 和 0.17 mm , 所以选取平台接缝的宽度 l_a 在 X 和 Y 方向为 0.01 mm 和 0.005 mm 。设计的微柱面镜阵列结构示意图如图 4 所示。

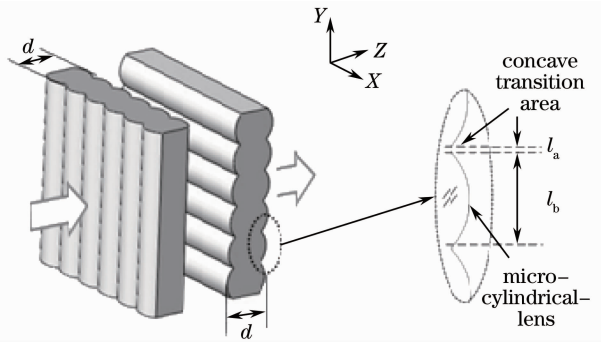


图 4 微柱面镜阵列结构示意图

Fig. 4 Sketch of structure of micro-cylindrical-lens array

2.3 照明均匀性仿真

利用光学软件 Lighttools 对设计的微柱面镜阵列的匀化效果进行仿真。微柱面镜阵列要与聚光镜组合才能实现匀光的效果, 匀光光路图如图 5 所示, 圆形形状的光源发散半角为 1.7° , 波长为

193.368 nm 。聚光镜选型并优化后接近理想聚光镜, 焦距为 120 mm , F 数为 0.95 。沿 Y 方向的微柱面镜阵列后表面位于聚光镜的前焦面, 从而形成远心光路。将微柱面镜阵列与聚光镜组合导入 Lighttools 仿真软件中, 仿真中追迹的光线数为 10^8 根。在聚光镜的像方焦面上得到远场光强分布, 如图 6 所示。图 6(a) 为二维照度分布图, 图 6(b) 为 Y 方向照度分布图, 图 6(c) 为 X 方向照度分布图。可以看出平台型接缝的微柱面镜阵列在视场中间出现了一个十字亮线, 严重影响了照明光场均匀性。

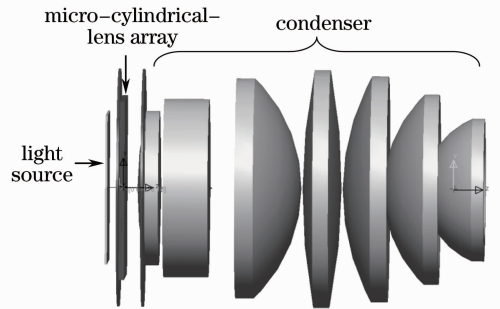


图 5 微柱面镜阵列与聚光镜组合匀光光路图
Fig. 5 Uniformization optical path of micro-cylindrical-lens array and condenser

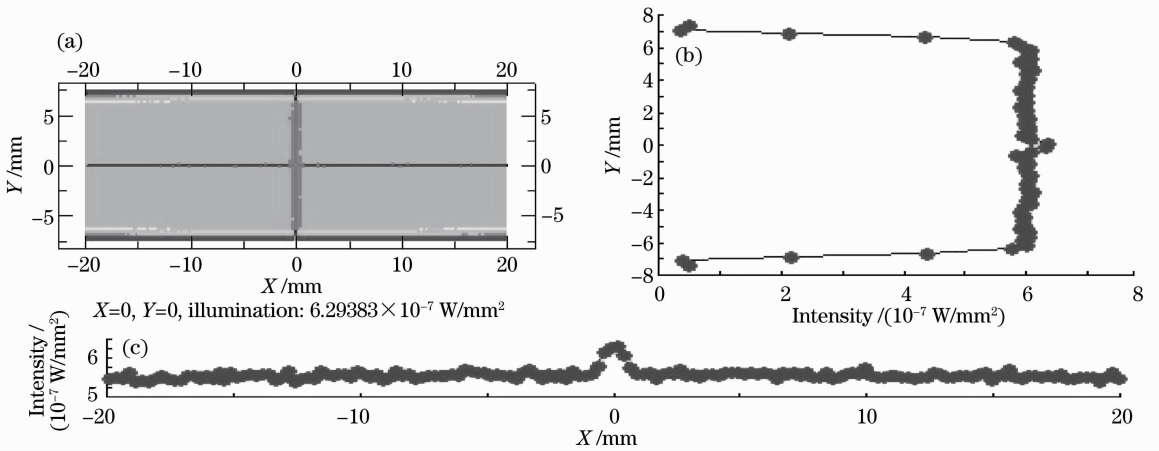


图 6 微柱面镜阵列(平台型接缝)与聚光镜仿真结果。(a) 二维照度分布; (b) Y 方向照度分布; (c) X 方向照度分布
Fig. 6 Simulation result of micro-cylindrical-lens array (flat transition area) and condenser. (a) 2D distribution of illumination; (b) Y direction distribution of illumination; (c) X direction distribution of illumination

分析可以得知, 当接缝为平台型接缝时, 穿过平台型接缝的光束依然是平行光束, 平行光束通过聚光镜后会聚于像方焦面的中心线, 从而造成局部光强过大, 均匀性变差。因此, 考虑将平台型接缝改为凹形接缝的平滑过渡的结构形式, 提高光场的均匀性。

3 微柱面镜阵列的改进与仿真结果

3.1 微柱面镜阵列的改进

由于平台型接缝会造成视场中央出现十字亮

线, 因此考虑将平台型接缝改为凹形接缝的平滑过渡结构形式。设计凹形接缝的宽度 l_a 与前面平台型接缝的宽度相同, 那么只要计算出它的曲率半径 r_a 即可。为了保证凹形接缝和微凸柱面镜之间的平滑过渡, 需要它们之间的连接处的曲线斜率相同, 先根据(2)式确定微凸柱面镜在图 7 中 K 点的斜率, 斜率可通过取 K 点附近的两个点的 h 值之差 Δh 除以 x 的差值 Δx 确定。再由 K 点的斜率可以求出图 7 中的角度 ϕ , 则曲率半径为

$$r_a = l_a / 2 \sin \phi. \quad (4)$$

按照前面的参数,求出二维方向的曲率半径 r_a 分别为 0.0168 mm 和 0.022 mm。

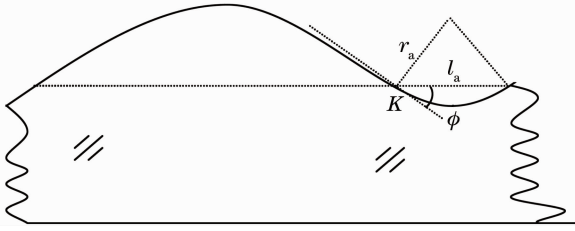


图7 微柱面镜凸面和凹形接缝的截面面形图

Fig. 7 Cross-section view of micro-cylindrical-lens-array and concave transition area

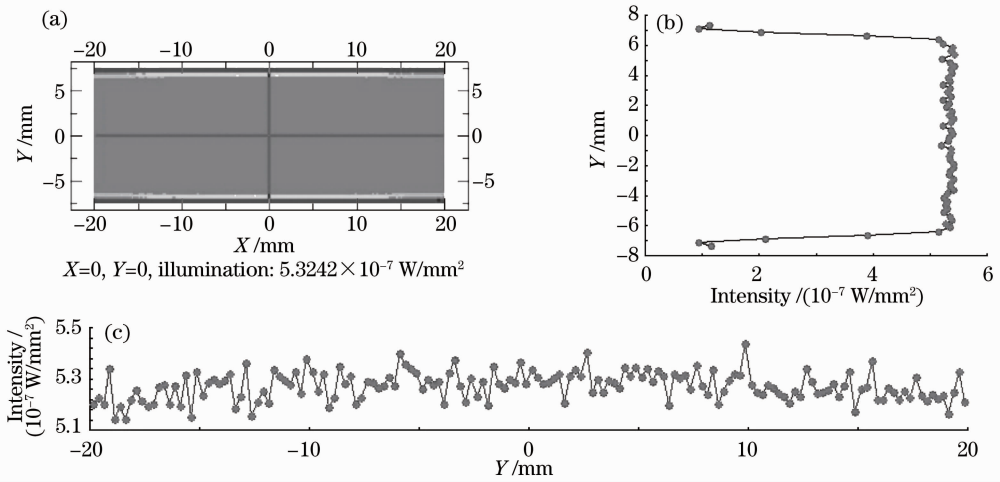


图8 微柱面镜阵列(凹形接缝)与聚光镜仿真结果。(a)二维照度分布;(b)Y方向照度分布;(c)X方向照度分布

Fig. 8 Simulation result of micro-cylindrical-lens array (concave transition area) and condenser. (a) 2D distribution of illumination; (b) Y direction distribution of illumination; (c) X direction distribution of illumination

同时,对该微柱面镜阵列用 CODE V 光学软件进行仿真,可以得到微柱面镜与聚光镜组合后 X 方向的远心度为 0.34 mrad, Y 方向的远心度为 0.26 mrad。照明系统中远心度要求为 2.5 mrad, X 方向和 Y 方向的远心度均能满足照明系统需求。

4 结 论

基于微透镜阵列匀光原理的优越性以及现有的微透镜阵列加工工艺,选择微柱面镜阵列作为匀光器件,可以在形成矩形照明光斑的同时获得极高的远场分布均匀性;而且采用二维方向分开的微柱面镜阵列能分别独立地实现 X 方向和 Y 方向的光束均匀化功能。通过对微柱面镜阵列接缝的模拟仿真,设计出了平滑过渡的凹形接缝,它能够消除平台型接缝导致的中央十字亮线,得到了很高的光强分布均匀性。通过对凹形接缝进行优化设计,保证接缝处的平滑过渡,减小了因散射引起的光强损耗。

3.2 照明均匀性仿真

对凹形接缝微透镜阵列仿真得到照度分布图如图 8 所示,图 8 中追迹了 10^8 根光线,可以看出,凹形接缝的微透镜阵列产生的远场照度分布不均匀性得到了改善。Lighttools 软件模拟仿真中探测器的面积是 40 mm × 15 mm,探测器划分的网格数为 160 × 60,实际照明系统中探测器的分辨率为 1 mm × 1 mm,为了使计算得到的不均匀性符合实际分辨率,将得到的数据加以处理,计算可以得到不均匀性为 0.85%。该不均匀性能够满足光刻照明系统对照明光场的不均匀性要求^[5]。

仿真结果表明,远场分布不均匀性为 0.85%。

参 考 文 献

- 1 W. H. Arnold. Towards 3 nm overlay and critical dimension uniformity: an integrated error budget for double patterning lithography[C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 692404
- 2 H. Ganser, M. Darscht, Y. Miklyaev *et al.*. High-throughput homogenizers for hyper-NA illumination systems [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61542N
- 3 T. Bizjak, T. Mitra, D. Hauschild *et al.*. Novel refractive optics enable multipole off-axis illumination [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69242J
- 4 S. Moller, S. R. Forrest. Improved light out-coming in organic light emitting diodes employing ordered micro-lens arrays[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(5): 3324~3327
- 5 T. Bizjak, T. Mitra, L. Aschke. Novel high throughput micro-optical beam shapers reduce the complexity of macrooptics in Fabrication hyper-NA illumination system [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 65202X
- 6 M. C. Hutley. Optical techniques for the generation of microlens arrays[J]. *J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(2): 253~265
- 7 He Miao, Yi Xinjian, Cheng Zuhai. Fabrication of Si concave microlens array [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2002,

- 21(1): 33~36
何 苗, 易新建, 程祖海. 凹型 Si 微透镜阵列的制作[J]. 红外与毫米波学报, 2002, **21**(1): 33~36
- 8 Zhang Xinyu, Yi Xinjian, Zhao Xingrong. Study of fabricating linear quartz microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(8): 710~714
张新宇, 易新建, 赵兴荣. 石英微透镜阵列的制作研究[J]. 光子学报, 1997, **26**(8): 710~714
- 9 A. Schilling, R. Merz, C. Ossman *et al.*. Surface profiles of reflow microlenses under the influence of surface tension and gravity[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(8): 2171~2176
- 10 M. E. Matamedi, M. P. Griswold, R. E. Knowlden. Silicon microlenses for enhanced optical coupling to silicon focal planets [C]. *SPIE*, 1991, **1544**: 22~32
- 11 J. Fruendt, M. Jarczynski, T. Mitra. Simultaneous multiple uniform spot generation with micro optics [C]. *SPIE*, 2008, **7062**: 70620S
- 12 O. Homburg, D. Hauschild, P. Harten *et al.*. Refractive beam shaping: from Maxwell's equations to products and applications in laser materials processing[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 66630D
- 13 B. G. Crowther, D. G. Koch, J. M. Kunick *et al.*. A fly's eye condenser system for uniform illumination [C]. *SPIE*, 2002, 4832
- 14 Zhou Shuwen, Lin Jinbo. Uniformity of the illumination system with fly's eye lens[J]. *J. Zhejiang University*, 1986, **20**(5): 130~136
周淑文, 林金波. 复眼透镜照明系统的均匀性[J]. 浙江大学学报, 1986, **20**(5): 130~136
- 15 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872
王 伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2869~2872

栏目编辑: 韩 峰