

文章编号: 1003-501X(2015)03-0083-06

2 μm 分辨 DMD 光刻系统镜头设计

郭 华, 周金运, 刘志涛, 雷 亮

(广东工业大学 物理电子学, 广州 510006)

摘要:针对 2 μm 分辨力的光刻, 在以数字空间微反射器(DMD)为空间光调制器(SLM)的光刻系统中, 采用一种新的非对称式结构组合, 使用较少的透镜组成了一个高分辨力、大孔径的投影光刻镜头。利用 ZEMAX 光学设计软件对其进行了建模和优化, 最终得到其全视场波像差小于 $\lambda/10$, 畸变小于 0.02%, 像方数值孔径 $NA=0.158$, 最小分辨力为 2 μm , 近轴缩小倍率 $\beta=-0.217$, 其结果有效的减少了 DMD 栅格效应对空间数字掩模图形的影响, 满足数字投影光刻光学系统的各项指标要求。最后, 对设计结果进行了公差分析, 在修改过少数几个默认公差后, 采用 Monte Carlo 方法进行模拟装配, 证明了这种新结构镜头加工和校装的可行性。

关键词: DMD 无掩模光刻; 栅格效应; 投影镜头; 光学设计

中图分类号: TN305

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2015.03.014

Design of 2 μm Resolution Projection Lens for DMD Lithography

GUO Hua, ZHOU Jinyun, LIU Zhitao, LEI Liang

(School of Physics & Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: For the 2 μm resolution lithography, in the lithography system with the digital micro-mirror device as space light modulator, we design a high resolution and large-area projection lens with new asymmetric structure assembly and fewer lens. By using ZEMAX optical design software to simulation-design and optimize, the results show that its optical path difference for entire field of view is less than $\lambda/10$, its distortion is less than 0.02%, its image space numerical aperture $NA=0.158$, its resolution is 2 μm , its paraxial reduced ratio is $\beta=-0.217$. This can effectively reduce the DMD grid effect for the digital space mask and meet all kinds of requirement for projection lens optical system. Finally, we analyze the tolerance of the design results. By amending a few default tolerances and using the Monte Carlo method, it is verified the assembling and fabricating feasibility of this kind of new structure projection lens.

Key words: DMD maskless lithography; grid effect; projection lens; optical design

0 引 言

薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD), 广泛应用于平板电脑、触屏手机和其他电子显示产品中。在 TFT-LCD 的生产工艺中 TFT 制造的核心部分是光刻工艺, 它是决定整个 LCD 的品质和生产成本的关键因素^[1]。光刻工艺主要是针对 TFT 掩模板的制作, 与传统的掩模板制作相比, 采用 DMD 的无掩模光刻技术制作 TFT 掩模板就有十分明显的优势^[2], DMD 是一种全数字化空间光调制器, 采用微电子机械(MEMS)原理, 作为一种数字化的空间动态掩模工具, 可以在输入信号的精确控制下实现高效、实时和低成本的虚拟掩模。为了满足线宽要求及克服 DMD 栅格效应, 设计一组结构简单、加工和校装容易的缩小投影物镜组就变得十分重要。TFT-LCD 的制造工艺在逐渐地减少生产中所需的掩模板的数量的同时, TFT 掩模板的复杂程度和线宽要求也变得越来越复杂, 使得传统工艺在制造高精度及大尺寸 TFT 掩模板时遇到了更大的困

收稿日期: 2014-06-09; 收到修改稿日期: 2014-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61475037); 国家自然科学基金青年基金(61107029)资助项目

作者简介: 郭华(1987-), 男(汉族), 湖北武汉人。硕士研究生, 主要从事光学设计、激光加工和光刻的研究。Email: guohua_optics@163.com。

通信作者: 周金运(1962-), 男(汉族), 河南信阳人。博士, 教授, 博士生导师。从事工程光学研究。E-mail: zhjy@gdut.edu.cn。

<http://www.gdgc.ac.cn>

难^[3]。目前世界上大多数光刻公司都普遍采用的物镜来自阿斯麦(ASML), 尼康(Nikon), 佳能(Canon), 相关设计资料少有报道; 国内光刻物镜的设计大多采用对称结构, 而本文提出一种非对称式结构, 达到了更高的分辨力, 具备优良的装配性能, 能够较好地解决高分辨力及大尺寸 TFT-LCD 中 TFT 掩模板制造中所遇到的成本和效率问题^[4]。

随着人们对平板显示器(FPD)的要求越来越高, TFT-LCD 屏幕中对 TFT 掩模板的尺寸要求已经达到了微米量级^[5]。光刻用光源也不再局限于维护和操作都比较复杂的准分子激光光源, 转而采用较实用的半导体激光光源。本文采用半导体激光器, 并利用 0.7XGA 型 DMD 为空间光调制器, 我们设计了光刻用投影物镜镜头, 光刻的最小线宽是 3 μm , 系统最大分辨力达到 2 μm , 即空间频率为 250 cycles/mm 处调制传递函数(MTF)大于 0.6, 不仅有效的消除了 DMD 栅格效应带来的影响^[6], 而且还很好的满足了光刻线宽要求。为了克服由基板面的离焦和倾斜引起的倍率误差与对准误差, 镜头采用了双远心结构^[7]。我们在符合要求的前提下以更小的像差、更小的光程差和更大的 MTF 响应曲线为目标, 优化得到了满足上述条件的光刻投影物镜镜头, 具有结构简单、易于制造和组装的特点。

1 镜头的设计

1.1 系统各项参数及评价指标

本文中数字无掩模光刻系统拟采用 0.7XGA 型 DMD, 它由 1 024×768 个边长为 13.68 μm 的铝制正方形镜片组成, DMD 的可用波段范围为 400~700 nm, 实际工作区域尺寸为 14.008 mm×10.506 mm, 对角线长 17.205 mm, 考虑到 DMD 实际封装及透镜边缘对成像的影响, 我们选择直径为 18 mm 的圆形区域为物面。由于 DMD 中最小像素为 13.68 μm ×13.68 μm , 要达到 3 μm 的最小线宽, 则系统的放大倍率至少要达到 $\beta = -3/13.68 = -0.219$ 。考虑实际对准、安装及使用方便, 可以设定光刻物镜镜头的共轭 L 在 300 mm 左右, 前工作距离 50 mm 左右, 后工作距离 10 mm 左右。

本系统拟采用 405 nm 半导体激光为光源, 镜头所用材料必须是对紫外波段有较高的透过率。一般玻璃对紫外波段都有较大的吸收, 适合的材料选择较少。常用的融石英和氟化钙, 其中融石英的透过率为 0.25~4 μm , 其热膨胀系数小、价格较低、易于加工^[8], 故本设计拟采用融石英为光学材料, 具体的设计中采用的融石英型号为 F_SILICA, 此型号融石英在波长为 405 nm 时折射率为 1.47, 透过率为 98%以上。

经 DMD 调制的空间光通过微缩投影物镜镜头后, 微镜和栅格被同倍率缩小, 由于栅格尺寸比单个微镜尺寸小得多, 使得栅格结构携带了更多的高频成分, 因此可以在不影响最终成像图形质量的情况下, 提高物镜镜头分辨力, 通过衍射受限成像系统来滤除由栅格产生的高频成分, 消除栅格效应对成像质量的影响。物镜系统必须使得栅格像的尺寸在系统分辨力之下, 使得 DMD 像素的成像尺寸大于系统的分辨力^[6]。由于分辨力越高其物镜结构越复杂, 在满足消除栅格效应的前提下, 我们选择系统最小分辨力为 2 μm 。

可以根据经验公式确定物镜组的大致所选镜片数量 m ^[9]:

$$m = NA(1 - \beta) / i \quad (1)$$

其中: NA 为像方数值孔径, $i \in (0.02 \sim 0.025)$ 表示每个镜片平均承担的光线偏角, 带入相关数据得 $m = 7 \sim 10$, 即所使用的镜片数量可能在 7 片到 10 片之间, 实际设计时可以适当增减来满足各项参数要求。

瑞利判据指出: 当系统的整体波像差不超过 $\lambda/4$ 时, 则认为此系统的实际波像面是满足设计要求的。考虑到加工、材料和装配误差, 系统设计的波像差小于 $\lambda/4$ 。

当物镜镜头系统波像差小于 $\lambda/4$ 时, 可以认为此系统具有衍射极限的成像质量, 对于衍射受限均匀照明圆形孔径的光学系统, 其调制传递函数^[9]:

$$F_{\text{MTF}}(f) = 2\pi(\theta - \cos\theta \cdot \sin\theta) \quad (2)$$

式中: $\cos\theta = f/f_{\text{max}} = f\lambda/(2NA)$, f 为像方空间频率, f_{max} 为像方空间截止频率, 则有:

$$f = 1/2R, R = \lambda/(4\cos\theta \cdot NA) \quad (3)$$

式中: R 为系统分辨力。对于光刻投影物镜一般要求 $F_{\text{MTF}}(f) > 0.5$, 考虑到各种误差, 选择 $F_{\text{MTF}}(f) > 0.6$, 同时调用 Matlab 程序, 解式(2)得: $\cos\theta \leq 0.3157$, 带入式(3)中, 得满足光刻分辨力 R 要求时光刻物镜的

像方数值孔径 $NA = 0.158$ 。根据焦深公式:

$$B = k\lambda / NA^2$$

(4)

式中 k 为工艺因子, 取 $k = 0.6$ [9], 带入式(4)中可以得出系统的最大离焦在 $\pm 9.6\text{ }\mu\text{m}$ 左右。

光刻投影物镜对畸变的要求比较苛刻, 因为畸变的大小直接影响到光刻系统的对位精度, 一般要求对位误差小于分辨力的 $1/5$, 因此光刻物镜全视场内所能容纳的最大畸变约为最小于线宽的 $1/5$ 。由畸变定义:

$$D = \Delta y / y \times 100\%$$

(5)

设计系统中物面像高 $y = 0.219 \times 18 / 2\text{ mm} = 1.971\text{ mm}$, 最大畸变 $\Delta y < 3\text{ }\mu\text{m} \times 1/5 = 0.6\text{ }\mu\text{m}$, 则 $D < 0.0304\%$ 。投影物镜的主要参数如表 1 所示。

表 1 投影物镜主要参数

Table 1 Main parameters of the projection system

Wavelength/nm	Exposure area Φ /mm	Magnification	Resolution/ μm	Numerical number	Depth of focus/ μm	Distortion/%
405	18	-0.219	2	0.158	± 9.7	< 0.0304

1.2 结构选取

前文指出, 为了克服由基板面的离焦和倾斜引起的倍率误差与对准误差, 镜头采用双远心结构。当系统光阑位于前组透镜的后焦面时, 光阑对前组透镜成像于无穷远, 即系统入瞳位于无穷远。当系统光阑位于后组透镜的前焦面时, 光阑对后组透镜成像于无穷远, 即系统出瞳位于无穷远。如此构成双远心结构, 系统的最佳物方位置就位于前组透镜的前焦面, 最佳像方位置就位于后组透镜的后焦面。

考虑制作成本及镜片数目的限制, 同时为了最大限度的减少像差, 决定前组采用库克三分离结构, 它是一种普遍使用的结构, 能在有限的镜片数内很好的控制垂轴和轴向色差、初级球差、初级慧差、初级象散、初级场曲及系统焦距, 因为系统只采用了一种透镜材料, 使得三分离结构不能很好的控制畸变, 为了平衡前组产生的初级和高级像差, 并严格控制畸变, 后组采用了结构稍复杂的匹兹伐(Petzval)结构。考虑到光源为 405 半导体激光光源, 有较窄的光谱宽度, 可以不采用消色散的胶和结构, 而是将它们曲率设置为变量, 增加自由度来抑制高级像差, 优化系统。但是为了更好控制后组系统长度, 原来胶合面之间的间隔不作为变量来平衡像差。考虑到光刻系统有着严格的畸变要求, 我们在匹兹伐结构的后面加上一个简单的平像场物镜[10-11], 它在不影响系统球差、慧差、象散的情况下很好的矫正了系统的初级和高级场曲和畸变。这种非对称式的前后组初始结构如图 1 所示。

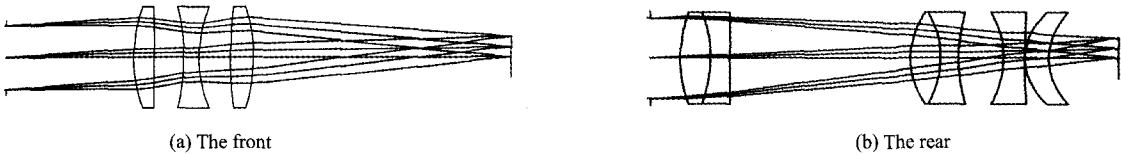


图 1 初始结构图

Fig.1 Initial structure

透镜像方数值孔径 $NA = 0.158$, 由数值孔径的定义:

$$NA = n \sin U_{\max}$$

(6)

其中 n 为像空间折射率, $U_{\max}$ 为最大视场角, 又由最大视场角的定义:

$$\sin U_{\max} = D / 2f$$

(7)

其中 D 为第一面的光束口径, f 为其焦距。系统放大率:

$$\beta = -f_2 / f_1$$

(8)

其中: f_1 、 f_2 为前组和后组透镜焦距。结合物镜设计原则, 我们设定系统光阑两侧透镜组承担大小近似相等的缩小功能和像差平衡功能, 则可以首先设定系统光阑大小 D 在 8 mm 左右, 综合式(6)~式(8), 可以设定透镜前组焦距 $f_1 = 115\text{ mm}$, 后组焦距 $f_2 = 25\text{ mm}$, 基本上可以满足系统放大率和系统总长的要求, 其中的微小误差可以在后期优化时加以解决。由小视场系统的物象空间不变性:

$$nuy = n'u'y'$$

(9)

可以得出像方数值孔径为 $NA=0.034\ 3$ 。优化时分开前组和后组，并将前组倒转，使前组物像空间互换，有利于优化。前后组透镜的参数如表 2。

表 2 前后组透镜主要参数

Table 2 Main parameters of the front and rear groups

	Focal length/mm	Image lane numerical number	The aperture stop position	Image height/mm
Front lens	115	0.158 0	In the object plane	9
Rear lens	25	0.034 3	In the object plane	1.957

2 结果分析

在光学设计软件 ZEMAX 的帮助下，最终设计的光刻镜头镜片数为 9 片，总长 250 mm，前工作距离 55.56 mm，后工作距离 8.53 mm，放大率 $\beta=-0.217$ ，像方数值孔径 $NA=0.158$ 。通过各项分析可知系统已达到了衍射极限。鉴于系统为旋转对称系统，可以仅采用 y 轴方向的物高为 0 mm，3 mm，6 mm，9 mm 四个具有代表性的视场做具体分析。在实际工作时要对系统镜头保护，需在物面前、像面后加入保护玻璃，保护玻璃可以采用熔融石英，保护玻璃的位置及镀膜情况可以根据实际的工作环境来设定，本设计中在物空间及像空间的中间位置加入了未镀膜的保护玻璃。最终系统整体结构图如图 2。



图 2 光学系统二维图

Fig 2 2D layout of optical system

2.1 波像差

我们把有像差的波前与理想球面波前的径向差与所在介质的折射率的乘积称之为波像差，也叫光程差。波像差可以作为衡量该像点质量优劣的指标。瑞利准则指出：一般认为，若最大波像差小于四分之一波长，则系统成像质量与理想光学系统没有显著的差别。由图 3 所示出瞳面上各个视场的波像差图可知，虽然系统中存在较多的高级像差，但是全视场波像差都已经在 $\lambda/10$ 以下，即使实际材料、加工和装配等环节产生了一定的误差，对系统也不会带来多大的影响。

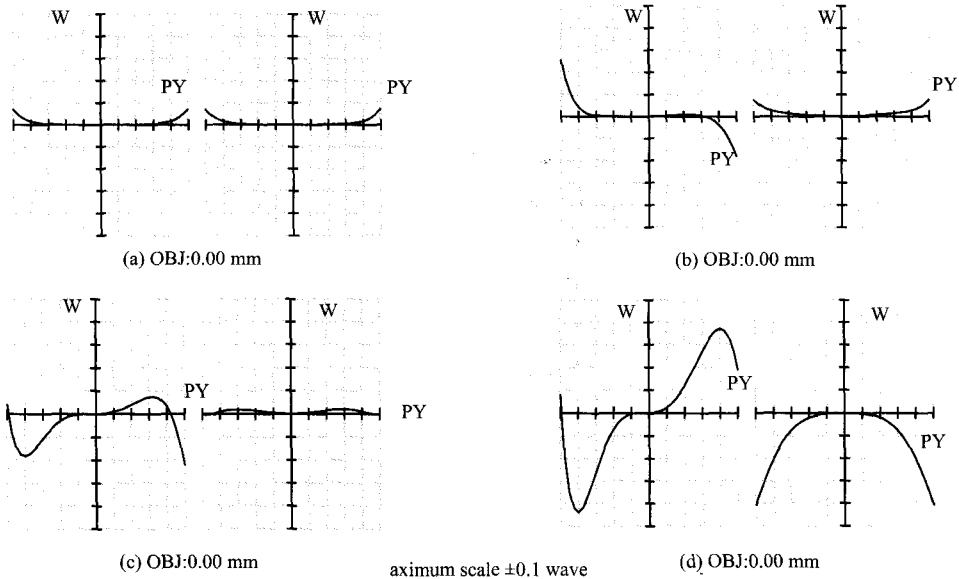


图 3 波像差

Fig.3 Optical path difference

2.2 调制传递函数 MTF

在满足线性和空间不变性的光学系统中, 决定成像质量的主要是振幅调制传递函数(MTF)。从图 4 中的 MTF—频率曲线示意图可以看到, 在空间频率为 250 lines/mm 的光学调制函数约为 0.6, 说明了该镜头具有 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的分辨力, 在空间频率为 166 lines/mm 时的光学调制函数约为 0.72, 即在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时具有很高的分辨力。图 5 是在空间频率为 250 lines/mm 时的 MTF—离焦曲线示意图, 从中看出理想位置 MTF 为 0.6, 一般可以认为光学调制函数的最低标准为 0.4, 对应系统的离焦为 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$, 因此可以认为此系统在焦深为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内均可实现 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的分辨力。

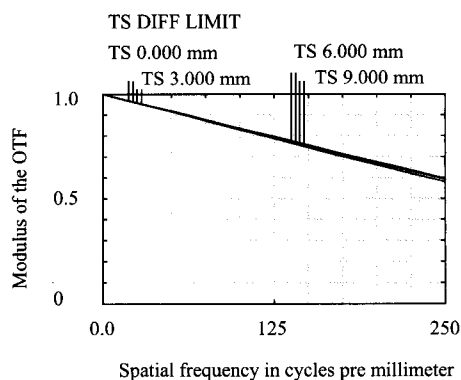


图 4 MTF—频率曲线

Fig.4 Polychromatic diffraction MTF

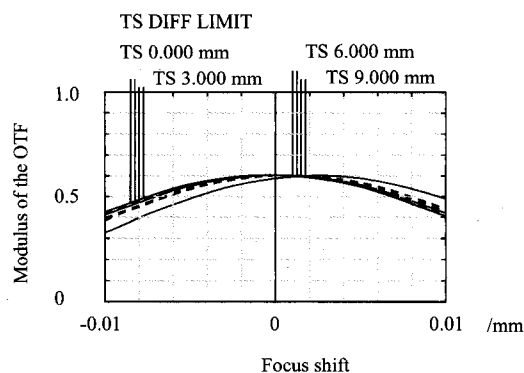


图 5 MTF—焦深曲线

Fig.5 Polychromatic diffraction through focus MTF

2.3 场曲和畸变

微米级光刻物镜镜头对场曲和畸变都有严格的要求。畸变会使成像图形的大小和形状发生改变, 容易发生光刻线条粘连, 影响光刻效果。场曲会使得视场中心和视场边缘不能成像在一个平面上, 在像面上得不到一致清晰的像, 最终造成像面中心或者像面边缘成像模糊。图 6 是该物镜的场曲和畸变图, 由图可以看出该投影物镜的子午场曲(曲线 T)在 $\pm 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 弧矢场曲(曲线 S)在 $\pm 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 远小于系统焦深, 满足光刻物镜的场曲要求。光刻投影物镜对畸变的要求比较苛刻, 因为畸变的大小直接影响到光刻系统的对位精度, 由图可以看出此投影物镜的最大畸变小于 0.018%, 小于上面计算要求的 0.030 4%。满足光刻物镜的场曲要求。

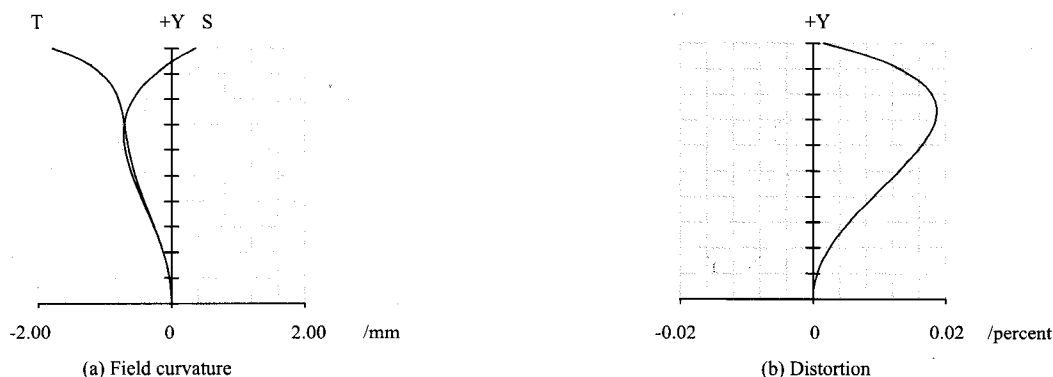


图 6 场曲和畸变

Fig.6 Field curvature and distortion

2.4 公差分析

系统公差分析有助于了解调整和装配误差对系统性能的影响。具有较大公差的系统制作和组装方便, 同时可以克服实际生产中遇到的微小震动或冲击。本系统中首先在灵敏度分析模式下设置投影镜头常用的公差, 如表 3 所示。公差约束条件空间频率为 250 lines/mm 处的平均衍射 MTF 值, 得出了引起 MTF 变化较大的几项。由结果分析知, 在镜头加工时, 4 个曲率较小的面、2 个厚度较小的镜片会对 MTF 影响较大;

在镜头组装时有 2 片镜的镜片偏心误差会对 MTF 影响较大。手动修改上述几个公差, 4 个曲率半径的误差设为 ± 0.01 mm 左右; 2 个厚度误差设为 ± 0.01 mm 左右; 两片镜片偏心误差设为 $\pm 0.015^\circ$ 左右。然后采用 Monte Carlo 分析方法模拟组装加工 100 组镜头, 得到 90% 的镜头 $F_{\text{MTF}} > 0.49$, 得到 80% 的镜头 $F_{\text{MTF}} > 0.54$, 得到 50% 的镜头 $F_{\text{MTF}} > 0.59$ 。可以看出在预设公差范围内可以保证 80% 左右的成品率。

表 3 主要公差

Table 3 Main tolerance

Type		Surface				Element		
Parameter	Radius/mm	Thickness/mm	Decenter/mm	Tilt/(°)	S+A Irreg/fringes	Decenter/mm	Tilt/(°)	Index
Tolerance limit	0.02	0.02	0.01	30	0.5	0.01	60	0.000 2

4 结 论

本文设计了一种分辨力达到 2 μm 的数字光刻投影镜头。首次采用了非对称式结构: 前组透镜采用三分离结构, 后组采用匹兹伐结构与平像场物镜组结构。在只采用了 9 片镜的情况下, 设计出了一套适用于 405 nm 半导体激光光源, 近轴缩小倍率 $\beta = -0.217$, 全视场波像差小于 $\lambda/10$, 子午场曲在 $\pm 1.6 \mu\text{m}$ 以内, 弧矢场曲在 $\pm 0.8 \mu\text{m}$ 以内, 畸变小于 0.018%, 像方数值孔径 $NA = 0.158$, 像方焦深达到 20 μm , 同时有效减少栅格效应的光刻镜头。在经过 Monte Carlo 方法分析后知, 只要加工装配误差范围在设计的公差范围内, 此镜头就能保证有 80% 以上的加工和装配合合格率。在 DMD 数字光刻系统中这种优良性能的镜头, 相信在高精度 TFT 掩模板的制作上会有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 李文波, 王刚, 张卓, 等. TFT 用掩模版与 TFT-LCD 阵列工艺 [J]. 半导体技术, 2010, **35**(6): 522-526.
LI Wenbo, WANG Gang, ZHANG Zhuo, *et al.* Mask Used for TFT and TFT-LCD [J]. **Semiconductor Technology**, 2010, **35**(6): 522-526.
- [2] Kim K R, Yi J S, Cho S H, *et al.* SLM-based Maskless Lithography for TFT-LCD [J]. **Applied Surface Science**(S0169-4332), 2009, **255**(22): 7835-7840.
- [3] 罗丽平, 负向南, 金基用. TFT-LCD 生产及发展概况 [J]. 现代显示, 2012, **134**(3): 31-38.
LUO Liping, YUN Xiangnan, KIM Kiyong. The Manufacturing and Developing of the TFT-LCD [J]. **Advanced Display**, 2012, **134**(3): 31-38.
- [4] Chan K F, FENG Zhiqiang, YANG Ren, *et al.* High-resolution Maskless Lithography [J]. **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers**(S1537-1646), 2003, **2**(4): 331-339.
- [5] Kim J G, Sim Y S, Cho Y, *et al.* Large Area Pattern Replication by Nanoimprint Lithography for LCD-TFT Application [J]. **Microelectronic Engineering**(S1679-9317), 2009, **86**(6): 2427-2431.
- [6] 郭小伟, 杜惊雷, 陈铭勇, 等. 消除数字光刻像素栅格衍射影响的研究 [J]. 光电子学报, 2007, **36**(3): 462-466.
GUO Xiaowei, DU Jinglei, CHEN Mingyong, *et al.* Removal of Pixel Structures by Optimizing the Parameters of Imaging System in Digital Photolithography [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2007, **36**(3): 462-466.
- [7] Shafer D R, Ulrich W. Optical Projection Lens System: US, 6930837 B2[P]. 2004-04-16.
- [8] 胡家升. 光学工程导论 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 290-292.
HU Jiasheng. **Introduction to Optical Engineering** [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005: 290-292.
- [9] Michael Bass. **Handbook of Optics: Volume II** [M]. America: The McGraw-Hill Companies, 2010: 4.1-4.4.
- [10] 安连生. 应用光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 194-196.
AN Liansheng. **Applied Optics** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 194-196.
- [11] Irwin F, West C. Wide Angle Lens with Improved Flat Field Characteristics: US, 4772107 [P]. 1988-09-20.