

共轭距可变的光刻投影物镜光学设计

蔡燕民 王向朝 黄惠杰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 一种用于印刷电路板(PCB)的激光直接成像(LDI)光刻设备,需要加工高密度互连(HDI)基板的厚度变化范围为 0.025~3 mm,为此设计了一种共轭距可变的光刻投影物镜。采用双远心光路结构,通过压缩物方和像方远心度误差的办法,可以有效地实现共轭距变化范围达 3 mm。采用正负光焦度合理匹配,可以有效地在共轭距变化范围内很好地校正波像差、畸变等像差,实现良好的成像质量。以光刻投影物镜光学设计的具体实例,证实了通过压缩物方和像方远心度误差的办法,可以有效地获得共轭距变化一定范围的光刻投影物镜,并在该变化范围内保证实际光刻设备所要求投影物镜的成像质量。

关键词 光学设计;成像系统;光刻投影物镜;远心光路;共轭距

中图分类号 O439; TB851 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0416003

Optical Design of Lithography Projective Lens with Variable Total Track

Cai Yanmin Wang Xiangzhao Huang Huijie

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

Abstract The printed circuit board (PCB), such as the high density interconnection (HDI), can be exposed by the laser direct image (LDI) lithography tool when the thickness range of the HDI substrate is from 0.025 mm to 3 mm. Accordingly, it is designed that the total track of a lithography projective lens is variable. The double telecentricity layout is used and the range of variable total track is 3 mm by reduction of double telecentricity error. The image quality of this projective lens, such as wave front error (WFE), distortion and modulation transfer function (MTF), is very good when the range of the variable total track is from 0 to 3 mm by the reasonable match between positive lenses and negative lenses. It is confirmed that a lithography projective lens with a variable total track is available by this method of reduction of double telecentricity error, and the image quality of this projective lens with the variable total track meet the actual requirements of the LDI lithography tool.

Key words optical design; imaging systems; lithography projective lens; telecentricity; total track

OCIS codes 220.3620; 110.3960; 220.3740; 080.3620

1 引 言

目前电子产品的功能日趋复杂化,电子元件的封装向小型化及阵列化方向发展,各种先进封装方式,例如球栅阵列(BGA)、芯片级封装(CSP)、直接芯片接合(DCA)等的出现,促使印刷电路板(PCB)逐渐采用高密度线路配置及微孔技术。一般将这种印刷电路板称为高密度互连板,即高密度互连(HDI)板。HDI板目前广泛应用于手机、数码相

机、数码摄像机、MP3、MP4、笔记本电脑、汽车电子和其他数码产品中,其中以手机的应用最为广泛。HDI板(例如3G板、IC载板)代表着PCB的技术发展方向。目前用于加工HDI板的光刻设备领域,采用激光直接成像(LDI)光刻技术的以色列Orbotech公司占有最大的市场份额。Orbotech公司的LDI光刻设备的最小线宽由50 μm ,提高到25 μm ,甚至到12 μm 。而其他LDI光刻设备主要是由日本公司

收稿日期: 2013-10-08; **收到修改稿日期**: 2013-11-27

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFR10010)

作者简介: 蔡燕民(1971—),男,博士,高级工程师,主要从事光刻设备技术方面的研究。E-mail: caiyanmin@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

提供,如 FUJIFILM 公司型号为 IP-3600H 的光刻机最小线宽为 15 μm 、Dainippon Screen 公司型号为 Ledia 的光刻机的最小线宽为 15 μm 、HITACHI 公司型号为 DE-H 的光刻机最小线宽为 10 μm 等,因此,这些 LDI 光刻设备对能提供最小线宽为 10 μm 的光刻投影物镜的需要急剧增加。

为了提高产率,目前半导体光刻设备一般采用双工件台^[1]的方法,仅采用一个投影物镜,投影物镜共轭距的设计是固定不变的。而在各种不同工艺条件、照明设置、曝光图形等条件下,投影物镜最佳焦面是不同的。一种解决方法是测量得到投影物镜最佳焦面的位置,通过驱动工件台来补偿最佳焦面的变化;另一种解决方法是在投影物镜内部设计有可动组元,通过驱动可动组元来补偿最佳焦面的变化,这相当于变焦光学系统^[2]。一般可动组元变化范围是比较小的,为微米量级,可补偿的焦面变化也是比较小的,为微米量级。

同样为了提高产率,新近开发的 LDI 光刻设备一般采用多个光刻投影物镜的方法,例如 6 个、8 个、甚至 14 个^[3]等,而仅采用一个工件台。LDI 光刻设备的加工对象,例如 HDI 板,目前已经从十几层发展到几十层,例如 32 层等,其厚度的变化范围很大,例如板厚最大达到 7.6 mm。在一台 LDI 光刻设备上完成多种厚度 HDI 板的曝光,沿用前面提到的补偿技术有相当的挑战性,例如,当板厚变化达到 3 mm 时,难以保证这多个投影物镜焦面变化一致,并由工件台的移动同时补偿,另外采用驱动物镜内部可动组元的补偿办法也将使机械结构设计十分复杂并难以实现。这样用一台 LDI 光刻设备满足多种不同厚度 HDI 板的曝光需求,应该设计成工件台不需要补偿机构。另外,作为曝光图形产生装置的掩模版,例如数字微镜阵列(DMD)^[4],也应该设计成固定不动的。这样当曝光不同厚度的 HDI 基板时,基板厚度的变化意味着投影物镜共轭距的变化,这与一般的变焦物镜是不同的,当变焦物镜变焦时一般共轭距保持不变。针对上述问题,本文设计了一种共轭距可变的光刻投影物镜,提出了一种投影物镜整体移动而改变共轭距的方法,采用双远心光路结构,通过压缩物方和像方远心度误差的办法,可以有效地实现共轭距变化范围达到 3 mm。采用正负光焦度合理匹配,可以在共轭距变化范围内很好地校正波像差、畸变等像差,实现良好的成像质量,以满足 HDI 基板厚度变化范围 0.025~3 mm 的曝光要求。

2 光学设计

2.1 光刻投影物镜设计约束

光刻投影物镜应用于 LDI 光刻设备,采用高功率半导体激光器,中心波长为 405 nm,带宽为 10 nm。像方数值孔径表示为

$$NA = k_1 \times \frac{\lambda}{W_{\text{CD}}}, \quad (1)$$

式中 NA 表示像方数值孔径, W_{CD} 表示最小线宽, k_1 表示工艺因子, λ 表示工作波长。该光刻设备的最小线宽为 10 μm ,如果选择工艺因子 k_1 大于 1.0(工艺比较容易实现),这样根据(1)式^[5]选定像方数值孔径为 0.0432,其他约束参数如表 1 所示。

该 LDI 光刻设备要求待曝光 HDI 基板厚度从 0.025 mm 增加到 3 mm,确定光刻投影物镜共轭距变化范围为 3 mm,并约定 1.5 mm 厚度基板对应于 425 mm 共轭距,如表 1 所示。

$$d_{\text{DOF}} = k_2 \times \frac{\lambda}{NA^2}, \quad (2)$$

式中 d_{DOF} 表示焦深, k_2 表示与焦深有关的工艺因子。根据(2)式可以计算投影物镜成像焦深为 217 μm ,HDI 基板厚度变化范围远大于该焦深。

表 1 LDI 光刻设备要求的光刻投影物镜设计要求

Table 1 Specifications of projective lens required by LDI lithography tool

Items	Specifications	HDI substrate thickness
Working wavelength/ nm	410, 405, 400	
NA at image side	0.0432	
Field diameter at object side /mm	26.53	
Magnification	1/2.16	
Absolute of magnification error / 10^{-6}	<50	
Wave front error (RMS) / $m\lambda$	<71	
Distortion / μm	<2	
Absolute of telecentricity at both side /mrad	<0.5	
Working distance at image side /mm	>50	
Working distance at object side /mm	>150	
Total track /mm	425	1.5
Total track /mm	423.5	3
Total track /mm	426.5	0

2.2 共轭距固定时的光学设计

根据上面的设计约束,并根据初级像差理论^[6],比较几种光刻投影物镜初始的双远心结构^[7-9]。这种双远心光路结构,能保证放大倍率不随着物面和像面沿光轴方向的移动而变化,这一点对投影光刻技术非常重要。然后通过 CODE_V 软件进行优化设计,对球差、彗差、像散、场曲、畸变、波像差进行约束设计,并且使各项参数满足上面设计约束(见表1)的要求。其中,波像差和调制传递函数(MTF)反

映了各个像差对成像质量的综合影响。通过优化设计,最后得到的光刻投影物镜的光路如图1所示,每一片透镜的具体设计参数如表2所示。图2是该光刻投影物镜的衍射MTF,其成像质量接近衍射极限。其畸变的校正程度如图3所示,场内最大畸变为1.8 μm。物方和像方远心度误差校正程度如图4和5所示。场内最大放大倍率误差为 0.03×10^{-6} ,场内最大波像差[均方根值(RMS)]为11.7 mλ。

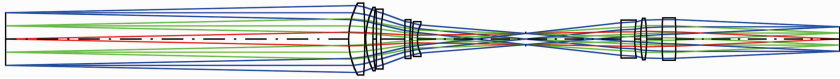


图1 光刻投影物镜的光路图

Fig. 1 Layout of lithography projective lens

表2 每一片透镜的具体设计参数

Table 2 Detailed parameters of each projective lens

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi aperture /mm
Object	1.00×10^{18}	174.7806		
1	38.1554	8.2134	ZK9_CHINA	16.8788
2	-287.1378	0.5290		16.2104
3	36.5676	3.5966	ZK9_CHINA	14.8177
4	89.6716	1.8945		14.2152
5	-373.7334	2.1089	ZK9_CHINA	13.9456
6	75.1455	12.2065		12.9508
7	217.1448	2.6490	ZF10_CHINA	8.9106
8	73.1338	1.1967		8.2707
9	53.1112	2.6054	ZF10_CHINA	7.8794
10	16.9086	55.1992		7.0474
Stop	1.00×10^{18}	48.5176		2.8000
12	1298.2227	7.0000	ZF10_CHINA	8.2030
13	50.9313	3.0643		8.6757
14	60.8348	3.0753	ZK11_CHINA	9.4175
15	-61.8003	7.8291		9.5427
16	166.4660	7.0000	ZK11_CHINA	9.7837
17	-205.3619	83.5232		9.7385
Image	1.00×10^{18}	0.0000		6.1412

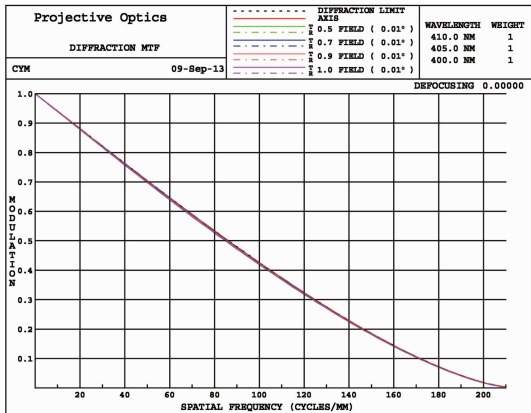


图2 光刻投影物镜的调制传递函数

Fig. 2 MTF of lithography projective lens

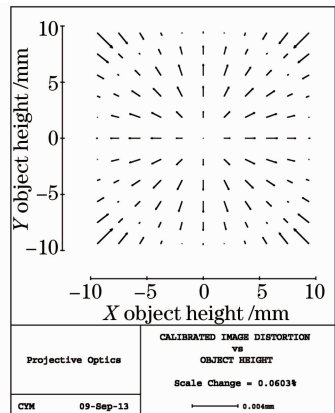


图3 光刻投影物镜的畸变

Fig. 3 Distortion of lithography projective lens

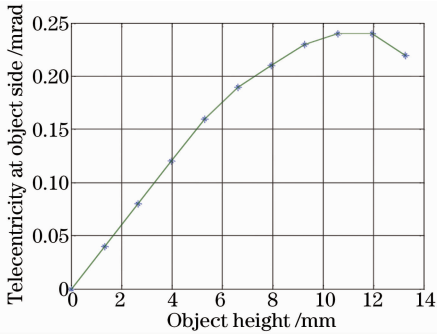


图 4 光刻投影物镜的物方远心度误差
Fig. 4 Telecentricity error at object side of lithography projective lens

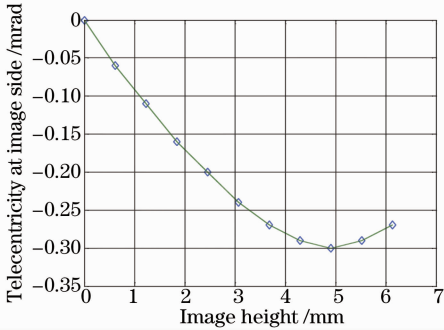


图 5 光刻投影物镜的像方远心度误差
Fig. 5 Telecentricity error at image side of lithography projective lens

2.3 共轭距变化时的光学设计

假设待曝光 HDI 基板厚度从 0 增加到 3 mm，共轭距变化方法是该光刻投影物镜整体沿着光轴方向远离物平面移动或者靠近物平面移动，以实现共轭距的变化。当共轭距变化时，用 CODE_V 软件计算的物距和像距，及成像质量情况如下表 3 所示。当共轭距变化在 3 mm 范围内时，用 CODE_V 软件计算的 MTF 均接近于衍射极限。

待曝光 HDI 基板厚度与物距变化的关系如图 6 所示，其中横轴表示基板的厚度，从 0~3 mm；纵轴表示物距的变化，单位为 mm。根据表 1，以 1.5 mm 厚基板对应共轭距 424.9893 mm 时物距 174.7806 mm 为零点，基板取不同厚度值时对应的物距减去零点物距(174.7806 mm)即为物距变化。物距变化为正值，表示“该物镜沿着光轴方向远离物平面移动”，物距变化为负值，表示“该物镜沿着光轴方向靠近物平面移动”。图 6 的数据点是根据表 3 中的数据(蓝色点)，红线表示做了线性拟合，在本次计算范围内，基板厚度与物距变化呈现线性关系。

表 3 共轭距变化情况及相应的成像质量

Table 3 Variation of total track and corresponding image quality

Scenes	Substrate / mm	Total track /mm	Object distance /mm	Image distance /mm	Magnification error / 10^{-6}	WFE / mλ	Distortion / μm
1 st	0.0	426.4893	176.6903	83.1135	23.6	11.34	1.80
2 nd	1.0	425.4893	175.4172	83.3866	7.87	11.32	1.83
3 rd	1.5	424.9893	174.7806	83.5232	0.03	11.7	1.84
4 th	2.0	424.4893	174.1440	83.6598	-7.81	12.35	1.85
5 th	3.0	423.4893	172.8709	83.9330	-23.6	14.20	1.87

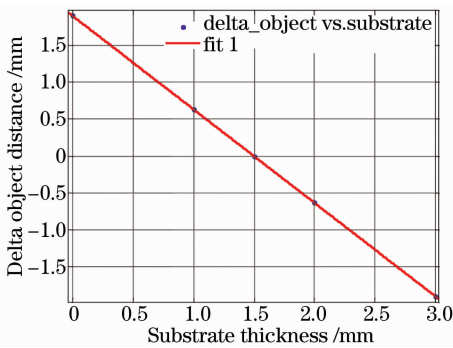


图 6 物距变化与基板厚度的关系
Fig. 6 Delta object distance versus substrate thickness

中横轴表示基板的厚度，从 0~3 mm；纵轴表示放大倍率误差，图 7 的数据点是根据表 3 中的数据(蓝色

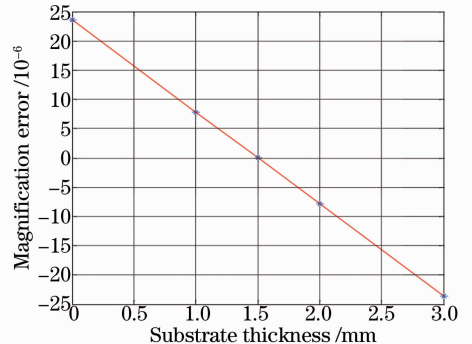


图 7 放大倍率误差与基板厚度的关系
Fig. 7 Magnification error versus substrate thickness

放大倍率误差与基板厚度的关系如图 7 所示，其

点),红线表示用 Matlab 软件做了线性拟合,基板厚度与放大倍率误差呈现线性关系,拟合方程为

$$f(x) = -15.73x + 23.61, \quad (3)$$

式中 $f(x)$ 表示放大倍率误差, x 表示基板厚度,单位为 mm。

波像差与基板厚度的关系如图 8 所示,其中横轴表示基板的厚度,从 0~3 mm;纵轴表示波像差(是指场内最大均方根波像差),单位为 $m\lambda$ 。图 8 的数据点是根据表 3 中的数据(蓝色点),都满足表 1 中成像质量的要求。

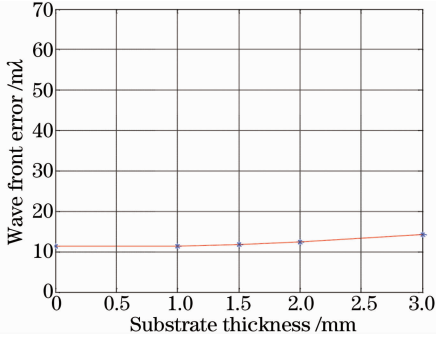


图 8 波像差与基板厚度的关系

Fig. 8 Wave front error versus substrate thickness

畸变与基板厚度的关系如图 9 所示,其中横轴表示基板的厚度,从 0~3 mm;纵轴表示畸变(是指

场内最大畸变),单位为 μm 。图 9 的数据点是根据表 3 中的数据(蓝色点),都满足表 1 中成像质量的要求。

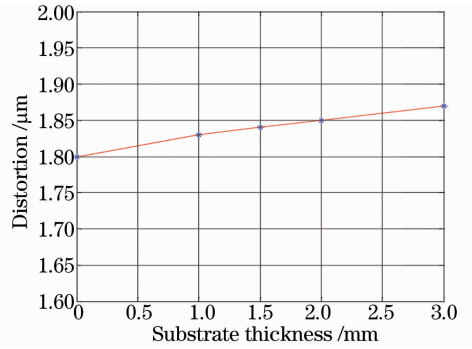


图 9 畸变与基板厚度的关系

Fig. 9 Distortion versus substrate thickness

2.4 设计结果

提出一种应用于 LDI 光刻设备的光刻投影物镜光学设计,其成像质量及结构尺寸满足实际使用条件的要求。另外,为了满足待曝光 HDI 基板厚度从 0.025 mm 增加到 3 mm 的要求,提出一种投影物镜整体移动而改变共轭距的方法,采用本方法在共轭距 3 mm 变化范围内,该光刻投影物镜成像质量优良,如表 4 所示,满足 HDI 基板厚度变化范围 0.025~3 mm 的曝光要求。

表 4 共轭距可变光刻投影物镜设计结果

Table 4 Design results of projective lens with variable total track

Item	Specification	Design results thickness of substrate /mm				
		0.0	1.0	1.5	2.0	3.0
Working wavelength /nm	410, 405, 400			410, 405, 400		
NA at image side	0.0432			0.0432		
Field diameter at object side /mm	26.53			26.53		
Magnification	1/2, 16			1/2, 16		
Magnification error / 10^{-6}	<50	23.6	7.87	0.03	-7.81	-23.6
Wave front error (RMS) / $m\lambda$	<71	11.34	11.32	11.7	12.35	14.20
Distortion / μm	<2	1.80	1.83	1.84	1.85	1.87
Telecentricity at object side /mrad	<0.5			0.24		
Telecentricity at image side /mrad	<0.5			0.30		
Image distance /mm	>50	83.1135	83.3866	83.5232	83.6598	83.9330
Object distance /mm	>150	176.6903	175.4172	174.7806	174.1440	172.8709
Total track /mm	426.5~425~423.5	426.4893	425.4893	424.9893	424.4893	423.4893

3 结 论

设计了一种共轭距可变的光刻投影物镜,采用双远心光路结构,并且远心角误差校正良好(最差值小于 0.3 mrad),可以有效地实现共轭距变化达到 3 mm。可以用于 PCB 的激光直接成像 LDI 光刻设备,可以加工厚度变化范围为 0.025~3 mm 的 HDI

基板。该光刻投影物镜采用正负光焦度合理匹配,可以有效地在共轭距变化范围内很好地校正波像差、畸变等像差,实现良好的成像质量。

目前有报道称按照上述提供的方法,当 HDI 基板厚度在 7.6 mm 附近变化时,波像差、传递函数和畸变都可以校正到系统要求范围内;而对于倍率误

差,根据拟合方程(3)式,设定基板厚度 x 从 -2.3 mm 增加到 5.3 mm ,可以计算得到倍率误差为从 59.79×10^{-6} 到 -59.76×10^{-6} ,不满足小于 50×10^{-6} 的技术要求。对此,可以通过压缩远心角误差的办法,将倍率误差减少到满足要求的程度。因此,有理由相信提供的共轭距变化方法可以适应 HDI 基板更大厚度变化的曝光要求。

参 考 文 献

- 1 Li Jinlong, Hu Song, Zhao Lixin. Control technique of wafer surface in dual-stage lithographic system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1223002.
李金龙,胡松,赵立新. 双工件台光刻机中的焦面控制技术[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1223002.
- 2 Lü Bo, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of all spherical surfaces zoom lithographic system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622001.
吕博,刘伟奇,康玉思,等. 全球面变焦距光刻系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622001.
- 3 砂川宽,石川弘美,冈崎洋二,等. 富士胶片株式会社. 曝光头以及曝光装置: 中国, 03141106. 1[P]. 2007-01-31.

- 4 Zhu Jiangping, Hu Song, Yu Junsheng, *et al.*. A graphic matching method for digital micromirror device maskless photolithography[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0616002.
朱江平,胡松,于军胜,等. 一种适用于数字微镜无掩模光刻的图形拼接方法[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0616002.
- 5 Michael Quirk, Julian Serda. Semiconductor Manufacturing Technology[M]. Han Zhengsheng Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 358—359.
迈克尔·夸克,朱利安·瑟达. 半导体制造技术[M]. 韩郑生译. 北京: 电子工业出版社, 2009. 358—359.
- 6 Zhang Yimo. Applied Optics (The second edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 275—305.
张以谟. 应用光学(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 275—305.
- 7 蔡燕民,周畅,刘国淦. 上海微电子装备有限公司. 一种对称式双远心投影光学系统: 中国, 200710038508. 0[P]. 2009-01-28.
- 8 蔡燕民,储兆祥,刘国淦,等. 上海微电子装备有限公司. 一种投影光学系统及投影曝光装置: 中国, 200710170750. 3[P]. 2009-10-07.
- 9 蔡燕民,司徒国海,步扬等. 中国科学院上海光学精密机械研究所. 共轭距可变的光刻投影物镜、光刻方法: 中国, 201310422537. 2[P]. 2013-09-16.

栏目编辑: 韩峰