

深紫外光刻投影物镜温度特性研究

姚长呈^{1,2} 巩岩¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 透镜材料对激光能量的吸收导致深紫外光刻投影物镜温度升高, 产生热像差。离轴照明模式下, 温度呈非对称分布, 研究温度场对热像差的仿真预测和补偿具有十分重要的意义。提出了温度分布函数模型描述 4 种照明模式下物镜的三维温度分布; 研究了温度的时间特性, 并通过计算预测了光刻物镜的热稳态温度值以及达到稳态所需的时间。结果表明, 利用该温度分布模型描述多种常见照明模式下投影物镜的空间温度分布, 平均拟合误差约为 10^{-3} °C 量级; 通过温度时间关系函数预测热稳态温度的误差约为 10^{-4} °C, 时间误差不超过 3 min。通过该温度分布模型计算得到的热像差结果与基于 SigFit 的仿真结果一致, 但计算效率提升了三个数量级。

关键词 光学制造; 光刻投影物镜; 温度分布模型; 仿真分析; 热像差

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0516001

Research on Temperature Distribution of Deep Ultraviolet Lithographic Projection Objective

Yao Changcheng^{1,2} Gong Yan¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract As for the deep ultraviolet (UV) lithographic projection objective, the laser energy absorbed by the lens material causes temperature rise, which induces thermal aberration. Under the off-axis illumination mode, the temperature distribution is non-symmetric, and thus the research on the temperature distribution is significant for thermal aberration simulation, prediction and compensation. A temperature distribution function model is proposed to describe the three-dimensional temperature distribution of the lens in four illumination modes. Simultaneously, the relationship between temperature and exposure time is studied, and the temperature at the thermal steady state and the consumed time to get steady is calculated. The results show that the temperature distribution models perform well for describing the spatial temperature distribution of projection lens under several commonly used illumination modes with an average fitting error of about 10^{-3} °C. The error of thermal steady temperature predicted via the relationship between temperature and time is about 10^{-4} °C, and the time error is less than 3 min. The thermal aberration results calculated by the proposed model agree with the simulation results by SigFit, while the time cost shows a decrease of three orders of magnitude.

Key words optical fabrication; lithographic projection objective; temperature distribution model; simulation analysis; thermal aberration

OCIS codes 220.3630; 120.6810; 110.4235; 350.6830

收稿日期: 2015-12-29; 收到修改稿日期: 2016-01-31

基金项目: 科技部中白合作项目(2011DFR10010)、吉林省自然科学基金(20140203001GX)

作者简介: 姚长呈(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光刻物镜热仿真和主动矫正技术等方面的研究。

E-mail: yaochangcheng18@126.com

导师简介: 巩岩(1968—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事短波光学和光机一体化设计与仿真等方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

1 引 言

随着对集成电路芯片集成度的需求持续增大,对光刻工艺的要求越来越高,特征线宽或者节点越来越小。投影物镜作为光刻机最关键的部件,其特征线宽或节点的减小意味着投影物镜分辨率的增大。瑞利判据描述的分辨率指出,有三种途径可增大光刻投影物镜分辨率,即减小工艺因子、增大数值孔径和减小工作波长^[1]。为了获得接近衍射极限的分辨率,现代光刻工艺发展出了多种离轴照明模式^[2]和光学邻近效应矫正^[3-4]等减小工艺因子的技术,同时采用像方浸液增大数值孔径,主流深紫外光刻机的工作波长也缩短至 193 nm。对于这个波段的激光,透镜材料的吸收不可忽略。投影物镜吸收激光能量使温度升高,引起折射率改变、热应力以及热变形,这些热效应的综合作用使得投影物镜热像差显著^[5],进而影响分辨率。因此,投影物镜需要精密的温控系统,将系统温度维持在 $(22 \pm 0.01) \text{ }^\circ\text{C}$ ^[6]。然而工作过程中,透镜局部温度升高不可避免,并引起随时间变化的热像差,影响系统性能,因此发展出热像差主动补偿技术^[7-11],主要针对偶极照明等离轴照明模式下随时间变化的热像差。热像差的补偿采用前馈和反馈的方式进行,国外模拟瞳面衍射图来计算热像差,并通过长期积累的光刻机实际工作中现场测量的波前数据建立数据库,再根据数据库修正预测值,指导补偿工作^[12]。国内深紫外高精度光刻机尚处于研制阶段。采用仿真的方式进行热像差预测,而仿真过程中最重要的是热折射率模型的建立。根据折射率与温度的线性关系,探究投影物镜温度分布对热像差的快速、准确预测至关重要。相关研究国内外鲜有报道,文献^[13]针对投影物镜的温度空间分布,采用了 6 次三维多项式进行拟合^[13],传统照明模式下拟合精度满足温控指标要求,而离轴照明模式下拟合精度相对较低。

针对光照分布最不均匀的偶极照明模式,本文提出了近似的温度空间分布模型;通过已知有限元节点的温度进行拟合,获得温度的空间分布函数和时间变化函数;分析了拟合误差,并对比通过仿真和计算预测的稳态温度以及到达稳态所需的时间。同时,对比分析基于温度分布函数模型和基于 SigFit 仿真计算热像差的结果。最后,推广了温度分布函数,用于描述另外三种常见照明模式下的温度分布规律。

2 光刻投影物镜温度分布

2.1 温度场的求解

高精度光刻投影物镜结构复杂,通常含有约 30 片光学元件,包含数个非球面。为了减小重力以及装配应力对透镜面型的影响,多采用固定支撑和多弹片挠性支撑相结合的透镜支撑方式。同时,为了矫正装配误差引起的倾斜和离焦等低阶像差,系统内多个透镜的支撑具有微调功能,使得支撑结构更为复杂。为了便于仿真分析,对透镜的支撑方式进行简化,在文献^[14]的研究基础上,在仿真中采取侧面 6 点支撑的方式支撑透镜。为了对透镜进行温度控制,镜筒外侧缠绕恒温水套,建立恒温水套冷却装置作为热边界条件的模型。秦硕等^[15]的研究显示,在系统温度达到稳态的过程中,光学元件和机械元件接触区域温度变化较小,温度始终维持在 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,因此,本文将这些区域约束为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$,作为有限元求解的恒温边界条件。同时考虑氮气对流换热以及膜层对能量吸收的影响。有限元分析的网格划分如图 1 所示。

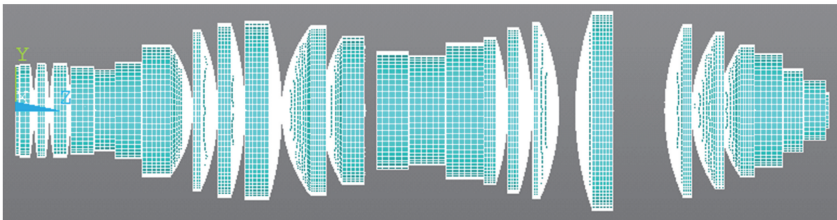


图 1 有限元模型和网格

Fig. 1 Finite element analysis model and meshes

光刻工况主要涉及三个过程,图元循环、硅片循环以及批循环。以硅片循环为例,时间流程如图 2 所示。曝光一个硅片耗时 20 s,接着切换硅片、调焦对准等耗时 10 s,此过程中光刻机处于冷却状态。类似地,一个图元循环时间为 $0.2 \text{ s} + 0.2 \text{ s}$,一个批循环为 $750 \text{ s} + 30 \text{ s}$ 。实际工作包含上述三个过程,然而同时考虑

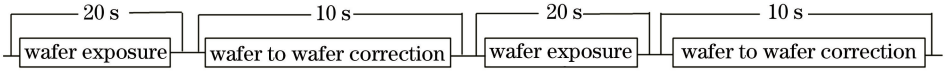


图 2 硅片循环时间框图

Fig. 2 Flow chart of wafer loop

以上三个过程,求解至热稳态需要占用大量计算机内存和计算时间,因此,仿真中忽略图元循环,分别仿真硅片循环和批循环下投影物镜的温度分布。

2.2 偶极照明模式下物镜温度的空间分布

对于一般边界条件的三维热传导问题,其数学表述为^[16]

$$\begin{cases} \nabla^2 T + \frac{1}{k}g(\mathbf{r},t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, & t > 0, t \in R \\ \text{B.C.} \quad k_i \frac{\partial T}{\partial n_i} + h_i T = f_i(\mathbf{r},t), & t > 0, t \in S_i, i = 1, 2, \dots, s \\ \text{I.C.} \quad T = F(\mathbf{r}), & t = 0, t \in R \end{cases} \quad (1)$$

式中第二项为边界条件(B.C.),第三项为初始条件(I.C.), T 为温度, t 为时间, g 为 \mathbf{r} 处的微元体单位时间单位体积的产热量, α 为热扩散系数, k 为导热系数, h 为换热系数。不同的 k 和 h 定义了不同的三类边界条件:定温、定流和按牛顿冷却定律的对流换热。由于支撑方式、温控方式、增透膜的能量吸收的影响,物镜表面同时包含了恒温边界、定流边界、对流换热三种边界条件。复杂的热模型导致光刻投影物镜的温度场无解析解,有限元求解是唯一途径,因此耗时长。研究温度的时间和空间分布特点,找到近似模型描述温度场可以大大提高温度及热像差的预测效率。

偶极照明模式下,照明光分布最不均匀,其温度空间分布呈现与照明模式一致的偶极分布特点。批循环工况在某一时刻的温度分布如图 3 所示。

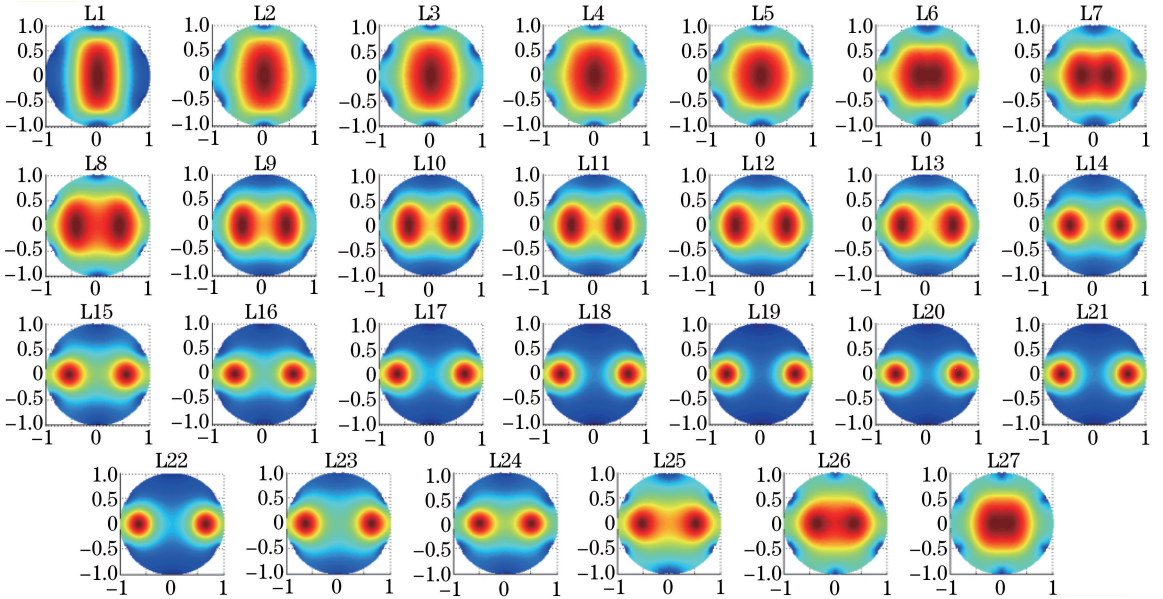


图 3 温度分布(X, Y 坐标均为归一化值)

Fig. 3 Temperature distribution with normalized X and Y coordinates

根据仿真结果,图 3 描绘了系统中全部 27 片透镜入射面上的温度分布。如图所示,对于远离系统两端的大部分透镜,温度分布在 X 方向有两个错开的峰值,对应于透镜表面的光照区域,沿光照区域向外温度逐渐降低。而对于靠近系统两端的透镜,高温区域集中在光轴附近,不能明显区分出两个峰。这是由于系统两端分别靠近掩模(物面)和硅片(像面),光线较为集中,因此偶极分布的特点不明显,但作为温度分布模型研究,仍可以将其看作两个互相靠近、重合的峰。此外,图 3 显示等温线截面近似为两个椭圆,其中心位于 X 轴上。根据以上特点,构建一个双高斯函数拟合此面上的温度分布,函数表达式为

$$T = a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x-b}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x+b}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + m. \quad (2)$$

(2)式由两个对称的二维高斯函数和常数项 m 组成,高斯函数的截面为椭圆。椭圆中心在 X 轴上,偏离坐标原点距离为 b ($b > 0$),结合图 3, b 代表透镜表面光照区域与光轴的偏离程度,与照明参数有关(相关定义如图 4 所示)。对于系统中不同位置的透镜,光束与光轴的偏离程度不一致,因此 b 值不同。

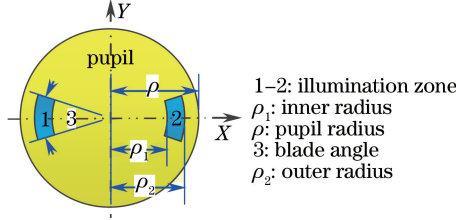


图 4 照明参数的定义

Fig. 4 Definition of illumination parameters

部分相干因子定义为光瞳面上光斑孔径与瞳面孔径之比,内部分相干因子 $\sigma_{\text{inner}} = \rho_1/\rho$, 外部分相干因子 $\sigma_{\text{outer}} = \rho_2/\rho$ 。对于 X 方向的偶极照明, c 的大小反映了内、外部分相干因子的差异,即光斑在透镜表面的径向宽度; d 则反映了光源的张角大小。不同的透镜, c 和 d 有差异; a 和 m 则在一定程度上反映了光源功率的大小。曝光时间不同,透镜积累的热量、温度也不同,散热作用也有差异,因此(2)式中的参数随时间稍有变化。

合理选取初始值,即可获得(2)式中待定的参数 a, b, c, d 和 m 。另一方面,光线在投影物镜中不完全与光轴平行,使得同一透镜体内的不同截面位置上 b 值也不同。考虑到光束的直线传播特性, b 值的变化应与 Z (平行于光轴,透镜局部坐标系)呈线性关系,即

$$b = kz + l, \quad (3)$$

式中 k 为斜率, l 为常数项, k 与 l 可由透镜两个表面的温度拟合方程求得。在物理意义上, k 代表了中心光线在不同透镜上与光轴的偏离程度, l 则反映了透镜入射面上的中心光线偏离光轴的距离。作为近似,分别取透镜两个表面温度拟合方程中的参数 a, c, d, m 的平均值,同时忽略光轴方向的温度差异,则透镜体内的三维空间分布可以表示为

$$T = a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x - (kz + l)}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x + (kz + l)}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + m. \quad (4)$$

若考虑透镜体内沿光轴方向的温度差异,则修正温度分布函数为

$$T = \left\{ a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x - (kz + l)}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x + (kz + l)}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + m \right\} w_{(z)}, \quad (5)$$

式中 $w_{(z)}$ 为权重因子,代表了温度沿光轴方向的差异。为了确定 $w_{(z)}$ 与 Z 的关系,图 5 中描绘了某一透镜体内光轴上的采样点温度增量随 Z 值的变化,透镜局部坐标系下, Z 为相对于透镜顶点的值。

如图 5 所示,沿光轴方向透镜温度的增量与 Z 呈非线性关系。通过二次多项式拟合温度增量与 Z 的关系,相关性达到 0.9999。即沿光轴方向,可用 Z 的二次函数近似表示温度增量的变化:

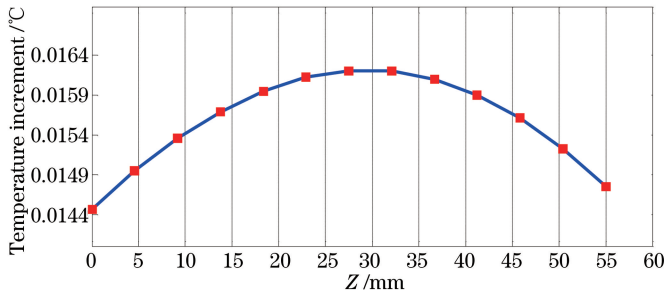


图 5 沿光轴方向的温度变化(参考温度为 22 °C)

Fig. 5 Temperature variation along optical axis (reference temperature is 22 °C)

$$dT_z = p_1 z^2 + p_2 z + p_3, \quad (6)$$

式中 p_1, p_2, p_3 为拟合参数。则权重函数可以近似表示为

$$w_{(z)} = \frac{dT_{\max} + 22}{dT_z + 22} = \frac{dT_{\max} + 22}{p_1 z^2 + p_2 z + p_3 + 22} \quad (7)$$

由于散热发生在透镜表面,越靠近透镜内部,温度越高;透镜越厚,温度差异越大,(7)式用于近似调制沿光轴方向的温度差异。至此,透镜体内空间温度分布可以表示为

$$T = \frac{\left\{ a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x - (kz + l)}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + a \exp\left\{-\left[\left(\frac{x + (kz + l)}{c}\right)^2 + \left(\frac{y}{d}\right)^2\right]\right\} + m \right\}}{p_1 z^2 + p_2 z + p_3 + 22}, \quad (8)$$

式中所有参量均具有明确的物理含义,与照明参数以及系统中光学元件的物理参数相关联。对于横向不同位置,沿光轴方向的温度拟合函数 T_z 中的参数不同,但差异在 $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ 量级。这些参数与 X, Y 的关系异常复杂,无法精确表达,以透镜中心位置的拟合参数作近似已足够。

2.3 物镜温度的时间特性

在温度达到稳态的过程中,提取每个载荷步下每个透镜体内的最大温度值,以透镜 L20 和 L10 为例,其温度变化与时间的关系如图 6 所示。

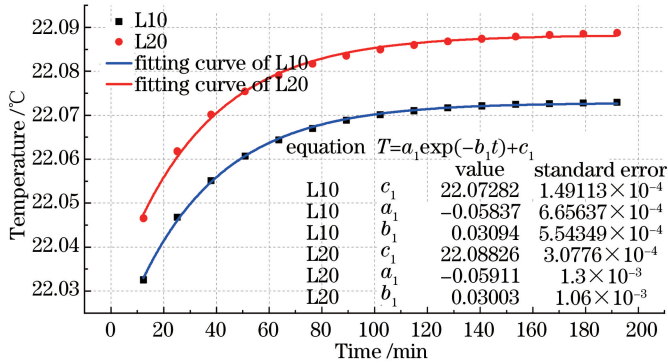


图 6 温度与曝光时间的关系

Fig. 6 Relationship between temperature and exposure time

图 6 所示为每一次曝光结束时的温度值,舍去了步进间隙停止曝光的载荷步的温度值(冷却状态),即实际图中相邻数据点中有一个相对较低的温度值。在曝光开始的一段时间内,温度迅速升高。由于对流换热作用与温度差有关,随着温度的升高,对流作用越来越强,导致温度增速下降,最终达到热平衡状态。数据拟合结果显示温度随时间的变化符合

$$T = a_1 \exp(-b_1 t) + c_1, \quad (9)$$

式中 c_1 为稳态的温度值。常数项的拟合误差均在 $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ 量级,因此由(9)式可以比较准确地获得稳态的温度值,同时也可以获得曝光过程中任意时刻的温度。当改变热仿真参数时,理论上只需要仿真曝光开始的几个载荷步,获得节点温度值后即可根据(9)式预测热稳态的最大温度以及达到稳态所用的时间,从而大幅提高效率。由于关系式由数据拟合而来,因此采样点越多,拟合数据越符合仿真结果。

3 结果和讨论

3.1 偶极照明模式下温度分布的拟合误差

以 L20 和 L10 为例,图 7 描绘了温度拟合误差分布。

如图 7 所示,两个透镜的温度拟合误差略有不同,但都在 $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ 量级。靠近透镜边缘光机接触位置,温度拟合误差较大。主要原因在于,有限元分析中光机接触面设置为恒温边界条件,导致温度突变。而实际上温度分布函数是一个连续函数,温度不可能陡然变化。根据光刻投影物镜的设计参数,部分相干因子范围为 $0.5 \sim 0.9$,因此靠近透镜边缘处温度的变化对光刻系统像质影响较小,这些温度奇异点可以作为坏点舍去,

作为对热像差量级和趋势的预测,由此造成的误差不会造成本质的影响。另一方面,相对于 L10, L20 更靠近光瞳,其温度偶极分布特点最突出,高温区域更靠近透镜边缘(图 3),恒温边界条件对其影响更显著,因此这些区域拟合误差更大。而 L10 高温区域相对更靠近光轴,恒温边界的影响较小,因此拟合表现更好,温度拟合误差分布更均匀。

表 1 所示为系统全部 27 片透镜在温度稳定时的平均拟合误差以及误差均方根(RMS)。

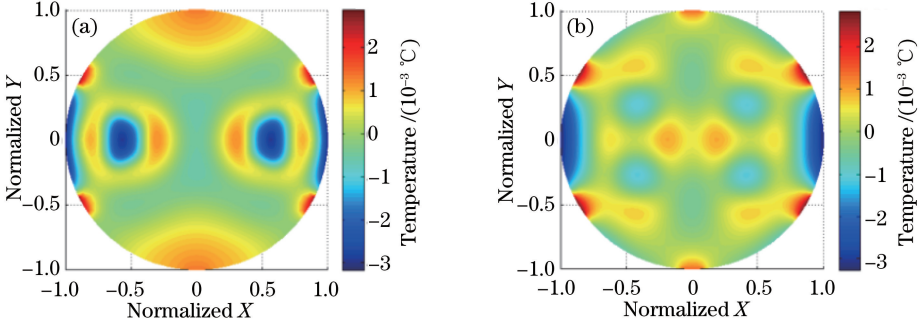


图 7 拟合误差图。(a) L20; (b) L10

Fig. 7 Maps of fitting error. (a) L20; (b) L10

表 1 各透镜温度平均拟合误差及 RMS 值

Table 1 Average fitting error and RMS of each lens

Lens No.	Temperature increment / $^{\circ}\text{C}$	Fitting error / $^{\circ}\text{C}$	Error RMS / $^{\circ}\text{C}$	Lens No.	Temperature increment / $^{\circ}\text{C}$	Fitting error / $^{\circ}\text{C}$	Error RMS / $^{\circ}\text{C}$
L1	0.0326	-2.0×10^{-4}	8.6×10^{-5}	L15	0.0479	-1.6×10^{-3}	1.1×10^{-4}
L2	0.0762	-1.2×10^{-4}	1.4×10^{-4}	L16	0.0385	-1.5×10^{-3}	1.1×10^{-4}
L3	0.0776	-3.9×10^{-4}	1.2×10^{-4}	L17	0.0285	-6.0×10^{-4}	6.8×10^{-5}
L4	0.0949	-7.1×10^{-3}	1.5×10^{-4}	L18	0.0238	-5.2×10^{-4}	5.6×10^{-5}
L5	0.0763	-1.1×10^{-3}	1.4×10^{-4}	L19	0.0208	-5.1×10^{-4}	4.8×10^{-5}
L6	0.0692	-7.0×10^{-4}	1.3×10^{-4}	L20	0.0251	-7.9×10^{-4}	5.5×10^{-5}
L7	0.0592	-1.5×10^{-3}	1.3×10^{-4}	L21	0.0217	-5.3×10^{-4}	5.2×10^{-5}
L8	0.0629	-2.3×10^{-3}	1.7×10^{-4}	L22	0.0253	-7.4×10^{-4}	6.3×10^{-5}
L9	0.0362	-5.9×10^{-4}	5.7×10^{-5}	L23	0.0377	-1.2×10^{-3}	8.8×10^{-5}
L10	0.0333	-5.9×10^{-4}	5.2×10^{-5}	L24	0.0419	-1.4×10^{-3}	1.0×10^{-4}
L11	0.0379	-1.0×10^{-3}	5.7×10^{-5}	L25	0.0708	-1.5×10^{-3}	1.5×10^{-4}
L12	0.0383	-1.0×10^{-3}	6.6×10^{-5}	L26	0.0972	-1.5×10^{-3}	1.4×10^{-4}
L13	0.0423	-1.3×10^{-3}	8.3×10^{-5}	L27	0.0662	-2.2×10^{-5}	7.7×10^{-5}
L14	0.0427	-1.2×10^{-3}	9.0×10^{-5}				

从表 1 可以看出,采用所提出的函数拟合透镜的空间温度分布函数,误差均在 10^{-3}°C 量级,比原始数据小约一个量级,误差均方根比原始数据小约两个量级。对比文献[12]中的方法,温度拟合精度提高约一个量级。物镜系统结构中两个“肚子”附近的透镜 L9~L14, L17~L23,整体拟合表现更好,误差均方根约在 10^{-5}°C 量级,原因在于这些位置的透镜口径相对较大,两个照明区域附近的热传导相对更独立,彼此之间影响更小,更符合温度分布模型的特点。

通常采用光机集成分析软件 SigFit 进行热光学效应的仿真分析,分析原理为利用有限元仿真的节点温度数据,插值计算光线追迹中节点处的折射率。大型系统如光刻投影物镜的计算需要大量时间。图 8 对比了采用 SigFit 和基于温度分布模型结合 CODE V 计算的热像差结果。

结果表明,两种方法的计算结果热像差项分布一致,偶极照明模式下的特征热像散非常吻合,验证了提

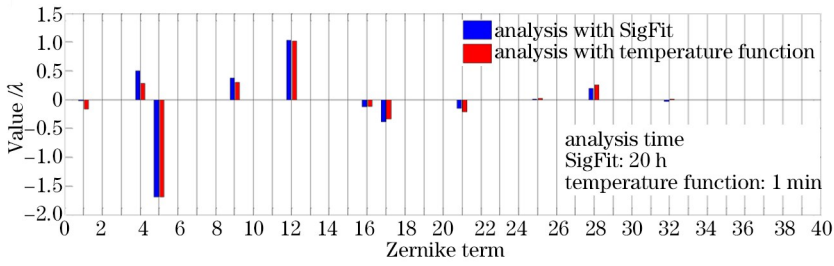


图 8 两种分析方法的结果对比

Fig. 8 Comparison of results obtained by two approaches

出的温度分布模型进行热像差预测的有效性。同时,采用 SigFit 计算耗时约 24 h,而采用提出的温度分布模型耗时约 1 min,时间缩短了三个量级,大幅提高了热像差的预测效率,这对于光刻投影物镜光学、机械的设计和优化以及不同照明参数下的热像差预测具有指导意义。

3.2 热稳态预测

探究温度的时间关系时,选取的数据为批循环的仿真结果,由于其每一个载荷步代表的曝光时间相对较长,因此达到热稳态时数据采样点较少。为了验证时间分布函数,进一步细化了工况,以硅片循环模式进行仿真,一共曝光 250 片硅片,仿真耗时 3 d,结果显示系统已达到热稳态。选择曝光前 50 片硅片的仿真数据进行拟合,获得参数 a_1, b_1, c_1 ,进而预测温度随时间的走势。当相邻两次求解中温度变化值小于 $5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ 时,即认为温度场已稳定。表 2 列出了系统全部 27 片透镜达到稳态所需的时间。使用(9)式进行预测计算时,假设相邻两次求解的时间步长为 30 s。

表 2 热稳态下仿真和预测结果对比

Table 2 Comparison between simulated and predicted results at thermal steady state

Lens No.	Simulated		Predicted		Lens No.	Simulated		Predicted	
	$T / ^\circ\text{C}$	t / min	$T / ^\circ\text{C}$	t / min		$T / ^\circ\text{C}$	t / min	$T / ^\circ\text{C}$	t / min
L1	22.03851	22.8	22.03808	24.5	L15	22.07889	71.3	22.07884	70.5
L2	22.08892	62.3	22.08890	62.1	L16	22.07084	74.3	22.07078	73.4
L3	22.09216	66.3	22.09214	66.2	L17	22.05759	61.3	22.05766	61.3
L4	22.10893	80.3	22.10892	80.3	L18	22.05130	60.8	22.05136	60.6
L5	22.08927	63.8	22.08923	63.4	L19	22.04859	58.8	22.04868	58.6
L6	22.07125	55.8	22.07121	55.4	L20	22.05656	82.8	22.05628	79.7
L7	22.06538	62.3	22.06537	62.3	L21	22.04932	60.8	22.04939	60.4
L8	22.06647	105.3	22.06626	103.6	L22	22.05125	63.3	22.05128	62.8
L9	22.04715	77.3	22.04710	76.8	L23	22.06367	77.3	22.06356	75.8
L10	22.04296	78.8	22.04292	78.3	L24	22.06631	66.8	22.06631	66.7
L11	22.04982	99.3	22.04953	97.0	L25	22.08601	70.8	22.08599	70.6
L12	22.05076	91.8	22.05055	89.9	L26	22.10541	55.3	22.10538	54.8
L13	22.05562	85.3	22.05550	84.1	L27	22.07171	18.8	22.07115	25.5
L14	22.06387	66.3	22.06385	65.8					

从表 2 可以看出,由于光刻物镜中各透镜位置和尺寸的差别,吸收热量和散热效果不同,达到稳态时各自的温度和耗时有差异。系统中温度最大增量约为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。靠近像面的最后一块透镜达到稳态时耗时最短,这是一个小尺寸平板,其表面光斑最小,散热效果也最明显,耗时不到 20 min。系统中最晚达到稳态的透镜所消耗的时间即为投影物镜的稳态时间,约为 105 min。通过对比,采用公式预测各透镜的稳态温度,与仿真结果相比,误差不到 $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$,远小于光刻物镜温度变化 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 的控制要求。同时,稳态时间略有差别,主要原因在于拟合公式为一个随时间连续变化的函数,而仿真采样时间节点为离散数据。除最后一块透镜之外,误差均不超过 3 min。可以预见,如果放宽稳态温度差异的条件,误差会更小。

4 温度分布模型的推广

根据之前的探讨,(5)式的温度分布模型描述偶极照明模式下的温度分布时具有较高的精度。为了使温度分布模型具有更好的普适性,将偶极照明模式下的温度分布模型加以推广,用以描述另外三种常用的照明模式,即传统照明、环形照明和四极照明。模拟得到的光瞳面光照度分布和透镜温度分布如图9所示。

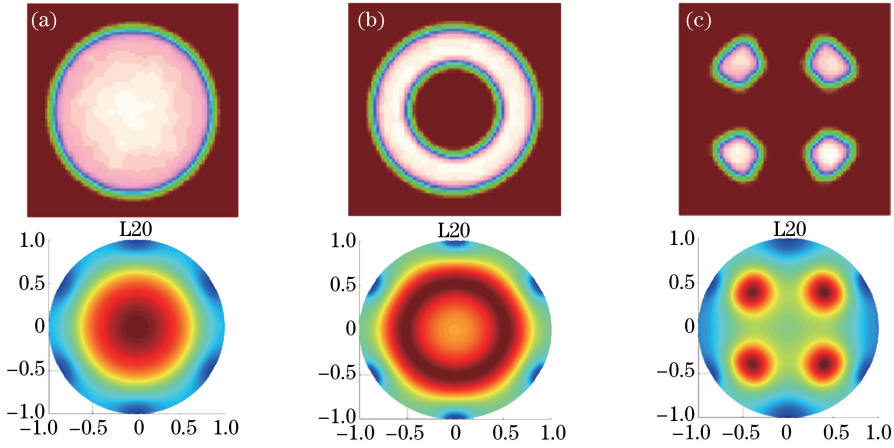


图9 光瞳面附近光照度分布和温度分布。(a) 传统照明;(b) 环形照明;(c) 四极照明

Fig. 9 Illuminance distribution and temperature distribution near the pupil plane. (a) Traditional illumination; (b) annular illumination; (c) quadrupole illumination

图9说明光瞳附近的温度分布与照明模式特点一致。传统照明模式下,温度分布关于光轴对称,且越靠近光轴温度越高。(5)式中令偏移量 $b=0$,同时截面由椭圆退化为圆,则温度分布函数表示为

$$T = \left\{ a \exp \left[- \left(\frac{x^2 + y^2}{c} \right) \right] + m \right\} \omega_{(z)}, \quad (10)$$

c 的大小反映系统中不同位置光斑的尺寸,对于光瞳附近的透镜, c 则代表照明孔径的大小。(10)式也可以看作偶极照明模式下温度分布函数的一种特殊形式,每个光斑均可看作两个互相重合的光斑,因此偶极照明模式下温度分布模型亦可直接用来描述传统照明模式的温度分布。

环形照明模式下,温度分布同样关于光轴旋转对称,与传统照明模式不同,温度的峰值远离光轴。环形照明的环带大小同样由 σ_{inner} 和 σ_{outer} 控制。热传导时,温度沿光照环带向透镜边缘和光轴方向逐渐减小,为了适应不同的 σ_{inner} 和 σ_{outer} ,同样可以由(5)式中彼此错开的两个高斯函数表示其空间温度分布,不同的是以极坐标形式表示其二维空间位置。

$$T = \left\{ a \exp \left\{ - \left[\frac{r - (k_1 z + l_1)}{c} \right]^2 \right\} + a \exp \left\{ - \left[\frac{r + (k_2 z + l_2)}{d} \right]^2 \right\} + m \right\} \omega_{(z)}, \quad (11)$$

式中 r 为空间位置与光轴的距离; c 和 d 共同反映系统不同位置的光斑特点,而靠近光瞳附近, c 和 d 值更是直观地反映照明因子 σ_{inner} 和 σ_{outer} 的大小。

图9(c)所示为 45° 方向的四极照明,可以看作坐标系旋转之后,新坐标系下 X 和 Y 两个方向的偶极照明模式的叠加态。而4个光源的参数也由 σ_{inner} 和 σ_{outer} 控制,通常4个光源的参数相同,通过(5)式进行拓展,其温度分布模型可以表示为

$$T = \left\{ a \exp \left\{ - \left\{ \left[\frac{x - (kz + l)}{c} \right]^2 + \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right\} \right\} + a \exp \left\{ - \left\{ \left[\frac{x + (kz + l)}{c} \right]^2 + \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right\} \right\} + a \exp \left\{ - \left\{ \left[\frac{y - (kz + l)}{c} \right]^2 + \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right\} \right\} + a \exp \left\{ - \left\{ \left[\frac{y + (kz + l)}{c} \right]^2 + \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right\} \right\} + m \right\} \omega_{(z)}, \quad (12)$$

式中 (x, y) 为新坐标系,其对应关系为

$$\begin{cases} x = y_0 \sin \theta + x_0 \cos \theta \\ y = y_0 \sin \theta - x_0 \cos \theta \end{cases}, \quad (13)$$

式中 (x_0, y_0) 为系统原始坐标系, θ 为四极照明的角度,通过(12)式和(13)式可以描述任意方向的四极照明

模式下透镜体内的三维温度分布。

对于“公牛眼”等照明模式,其温度场均可由以上模型的组合、延伸加以描述。以靠近光瞳的 L20 为例,表 3 列出了曝光 1 h 时 4 种照明模式下透镜温度的拟合误差(工况为批循环)。

表 3 不同照明模式下的温度拟合误差
Table 3 Temperature fitting error of different illumination modes

Illumination mode	Temperature increment /°C	Fitting error /°C	Error RMS /°C
Traditional	0.0378	9.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
Dipole	0.0202	-4.8×10^{-4}	1.4×10^{-4}
Annular	0.0342	-3.3×10^{-3}	2.0×10^{-4}
Quadrupole	0.0385	-1.8×10^{-3}	3.4×10^{-4}

从表 3 可以看出,对比 4 种常见的照明模式,采用提出的温度分布函数描述透镜三维温度分布,温度平均拟合误差约在 10^{-3} °C 量级,均方根达到 10^{-4} °C。

5 结 论

以偶极照明模式下深紫外光刻投影物镜的非旋转对称的空间温度分布为目标,提出了一个近似的三维温度分布函数模型,该函数模型由两个二维高斯函数和常数项构成,同时引入了关于 Z 向位置的权函数。通过数据拟合得到的温度场可以近似表示透镜体内的温度分布,全部 27 片透镜平均拟合误差均在 10^{-3} °C 量级,误差均方根在 10^{-4} °C 量级。探究了温度场的时间特性,指出温度与曝光时间成 e 指数关系;通过提出的表达式计算热稳态的温度值和稳态时间,与仿真数据对比,热稳态温度误差小于 10^{-4} °C,时间误差约为 3 min,可以准确预测温度走势。利用温度分布模型,结合 CODE V 进行热像差计算,将结果与 SigFit 结果进行对比,结果显示热像差计算结果一致,证明了温度分布模型进行热像差预测的准确性,同时,计算时间缩短至原耗时的 0.1% 左右,热像差预测效率提高了三倍。为了增加温度分布函数的普适性,对偶极照明模式下的温度分布函数模型进行了延伸,结果表明,推广的温度分布模型对于常见的传统照明、环形照明、偶极照明和四极照明的温度拟合误差约在 10^{-3} °C 量级。针对不同照明参数下的光刻投影物镜,采用提出的温度分布函数模型对热像差的预测效率比 SigFit 高三个量级,为热像差的补偿提供重要的前馈信息。

参 考 文 献

- Chen Xunan, Luo Xiangang, Lin Wumei, *et al.*. Design of 193 nm projection lithography lens [J]. Microfabrication Technology, 2001, (2): 24-26.
陈旭南, 罗先刚, 林妩媚, 等. 工作波长 193 纳米投影光刻物镜研究设计 [J]. 微细加工技术, 2001, (2): 24-26.
- Rigolli P, Capetti G, De Chiara E, *et al.*. High-order distortion effects induced by extreme off-axis illuminations at hyper NA lithography [C]. SPIE, 2009, 7274: 72742T.
- Lucas K, Montgomery P, Litt L C, *et al.*. Process, design and optical proximity correction requirements for the 65 nm device generation [C]. SPIE, 2003, 5040: 408-419.
- Flagello D G, Geh B, Socha R, *et al.*. Understanding illumination effects for control of optical proximity effects (OPE) [C]. SPIE, 2008, 6924: 69241U.
- Chiou J Y, Chen M F, Liu C L, *et al.*. Lens temperature and performance correlation analysis [C]. SPIE, 1999, 3892: 372-376.
- Zeng Yi. Thermal structure design of fine water temperature control system for the photo-etching machine [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 8.
曾 毅. 光刻机精密水温控制系统的热结构设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 8.
- Nakashima T, Ohmura Y, Ogata T, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens [C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.
- Uehara Y, Matsuyama T, Nakashima T, *et al.*. Thermal aberration control for low k1 lithography [C]. SPIE, 2007, 6520: 65202V.
- Chen H, Yang H, Yu X, *et al.*. Simulated and experimental study of laser-beam-induced thermal aberrations in precision optical systems [J]. Applied Optics, 2013, 52(18): 4370-4376.

- 10 Moon E E, Chandorkar S A, Sreenivasan S V, *et al.*. Thermally controlled alignment for wafer-scale lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2013, 12(3): 031109.
- 11 Chen Hua, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.*. Active compensation of thermal aberrations in lithographic projection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0811001.
陈 华, 苏东奇, 隋永新, 等. 光刻机投影物镜热像差主动补偿方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0811001.
- 12 Fukuhara K, Mimotogi A, Kono T, *et al.*. Solutions with precise prediction for thermal aberration error in low-k1 immersion lithography[C]. *SPIE*, 2013, 8683: 86830U.
- 13 Luo Cong. Simulation research of thermal aberration on the DUV lithography projection objective [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 42-43.
骆 聪. 深紫外光刻投影物镜热像差仿真研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015: 42-43.
- 14 Shen Yiping. Investigation on thermo/opto/mechanical analysis methods of the projection lithographic lens [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 39.
沈意平. 投影光刻物镜的光机热分析方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 39.
- 15 Qin Shuo, Gong Yan, Yuan Wenquan, *et al.*. High precision temperature control for projection lens with long time thermal response constant[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 108-114.
秦 硕, 巩 岩, 袁文全, 等. 大时间热响应常数投影物镜的超高精度温度控制[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1): 108-114.
- 16 Hu Hanping. Theory of heat transfer [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010: 102-103.
胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 102-103.