

基于有限元分析方法的深紫外波段熔石英应力双折射分析

刘志帆¹, 蔡燕民², 步扬^{2*}, 张建华¹, 王向朝²

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

摘要 提出一种深紫外波长条件下熔石英光学元件应力双折射的评估方法。该方法利用有限元仿真技术获取熔石英光学元件内若干截面的应力数据, 结合三维插值拟合法、琼斯矩阵和路径积分方法计算光学元件引入的总相位延迟量和总方位角。在忽略样品平行度误差的情况下, 所提方法对熔石英薄板样品在 632.8 nm 波长下相位延迟量和方位角的数值计算结果和实验结果基本一致, 验证了所提方法的准确性和有效性。在此基础上, 推导出相同载荷条件下, 熔石英薄板在 248 nm 和 193 nm 波长下的应力双折射变化量, 所得计算结果可用于分析光学元件内部应力双折射对光学系统偏振性能的影响。

关键词 物理光学; 光刻机; 应力双折射; 熔石英; 有限元; 相位延迟量; 方位角

中图分类号 O302; TB125

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1226001

Stress Birefringence Analysis in Fused Silica at Deep Ultraviolet Waveband Based on Finite Element Simulation Method

Liu Zhifan¹, Cai Yanmin², Bu Yang^{2*}, Zhang Jianhua¹, Wang Xiangzhao²

¹School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In this paper, we proposed a method of evaluating the stress birefringence of fused silica in the deep ultraviolet waveband, in which the stress at several cross sections in the optical element was obtained by finite element simulation. Furthermore, the total phase retardation and azimuth introduced by the mechanical stress were calculated by three-dimensional interpolation fitting, Jones matrix, and path integration. Without considering the parallelism error of the element, the numerical results of phase retardance and azimuth at 632.8 nm were in good agreement with the experimental results, which verified the accuracy and effectiveness of the proposed method. On this basis, we derived the variation in the stress birefringence at 248 nm and 193 nm under the same loads, which can be used to analyze the effect of stress birefringence in optical elements on the polarization of optical systems.

Key words physical optics; lithography tools; stress birefringence; fused silica; finite element; phase retardance; azimuth

OCIS codes 120.5050; 260.1440; 260.5430

1 引言

光刻机是集成电路制造的核心装备之一, 其光

刻分辨率决定了集成电路图形的特征尺寸^[1-4]。随着偏振离轴照明和光源掩模优化等分辨率增强技术^[5-6]的应用, 深紫外 (DUV) ArF 浸没式光刻机可

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2020-12-16; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205-001, 2016ZX02201-001)、上海市科委项目(18511104500)、广西高校光电信息处理重点实验室开放基金(KFJJ2016-03)

* E-mail: buyang@siom.ac.cn

用于 45~7 nm 工艺节点芯片的制造。在深紫外光刻机照明系统和投影物镜系统中,光学元件在热应力^[7-8]、加工残余应力和工装夹持应力^[9-10]等作用下产生的双折射会改变传输光波的偏振态,进而影响光学系统成像质量与光刻性能^[11-13]。因此,精确分析和测量光学元件内部的应力双折射,对保证光刻成像质量与光刻性能具有重要意义^[14]。

Ladison 等^[15]研究了 HPFS 牌熔石英坯料在 632.8 nm 激光的作用下残余应力对波前的影响。Doyle 等^[16-17]基于光机分析软件包 SigFit,通过应力场光线追迹和琼斯积分评估了应力对透射光学元件光学性能的影响。岑兆丰等^[18]采用矢量微分算法对光线在介质中的传输进行了模拟,计算了简化的平行平板的温度和热应力分布,预测了接收面上的光强分布和条纹形状。Chen 等^[19]采用综合光机模拟方法,分析了表面变形、折射率变化和应力双折射三种热效应对系统热像差的影响。现有的应力双折射分析技术大多在 632.8 nm 波长下结合光线追迹进行测量或评估,如光学设计软件 CODE V 基于平均折射率计算相位延迟和方位角的干涉图,而对深紫外波长下光刻熔石英材料的应力双折射分析技术鲜有报道。一方面,深紫外波长(如 248 nm 和 193 nm)下,偏振检测涉及的准分子激光器、光学偏振元件和检测器件等硬件设备价格十分高昂;另一方面,光刻照明分系统和投影物镜通常包含大量光学镜片,对系统各组镜片进行精细网格有限元分析和高密度光线追迹往往需要耗费大量的时间成本,且只能得到单稳态应力双折射分析结果。对于深紫外波段下光刻照明分系统和投影物镜分系统的研发,准确分析工作波长下光学元件内部应力双折射及其对照明光波偏振态的影响,并确保偏振态满足

设计指标要求,是保障光学系统成像质量与光刻性能的基础与前提。

为解决无法直接获得深紫外工作波长下熔石英光学元件的应力双折射数据,以及现有应力双折射计算过程中存在的有限元仿真和光线追迹耗时等问题,本文提出一种快速评估深紫外波段下熔石英光学元件应力双折射的分析方法。首先通过有限元仿真得到熔石英光学元件内若干截面上的应力分布数据,再结合三维插值、琼斯矩阵和路径积分方法即可计算各网格点的等效输出相位延迟量和方位角。为验证所提方法的有效性和准确性,对一施加载荷的熔石英薄板样品进行应力双折射数值仿真和实际测量。在此基础上,对薄板样品在深紫外波长下的相位延迟和方位角变化进行评估。

2 基本原理

2.1 理论模型

对于非晶态各向同性材料熔石英,由于在材料成形、退火、零件精加工或装调过程中引入了应力,熔石英材料通常表现为各向异性,即不同方向的折射率之间存在差异。应力双折射引入的光学误差会影响光束穿过光学材料过程中的偏振态,例如:在恒定应力场下,光学材料的主光轴方向旋转至应力主轴方向;由于两个正交应力主轴折射率之间的差异,入射光束将分解为两束正交光束,且两束正交偏振光束之间存在相位延迟。

为准确、快速地计算光学元件内的应力双折射,定义系统坐标系($O-XYZ$)、折射坐标系($O'-X'Y'Z'$)和应力坐标系($O''-X''Y''Z''$)3 个坐标系统,如图 1 所示。

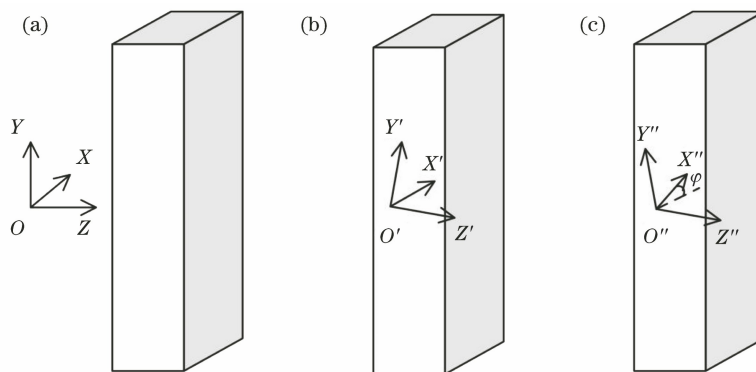


图 1 3 种坐标系示意图。(a) 系统坐标系;(b) 折射坐标系;(c) 应力坐标系

Fig. 1 Schematic of three coordinate systems. (a) System coordinate; (b) refraction coordinate; (c) stress coordinate

在坐标系变换过程中,系统坐标系与折射坐标系通过折射定律建立联系,即 Z 与 Z' 的方向满足折射定律;折射坐标系的 Z' 与应力坐标系的 Z'' 方向保持不变,但 X' 与 X'' 或 Y' 与 Y'' 之间存在相同的旋转角度 φ , 旋转角 φ 的大小由该点的应力决定, $O''X''$ 轴和 $O''Y''$ 轴分别对应 $X''O''Y''$ 面内最大和最小主折射率的方向,同时也是最大和最小主应力的方向。

为分析光学元件内部各点的应力状态,基于连续性定理提出应力三维拟合方法。假设光学材料本身满足连续均匀分布,线性弹性、微小位移和微小形变理论(对于缺陷等级不超过 $0.03 \text{ mm}^2/100 \text{ cm}^3$ 的光刻熔石英光学材料,在微小应力条件下该假设成立),通过有限元仿真可获得光学元件在给定载荷下的应力分布,并导出给定截面处的正应力和剪切应力数据。由于体积元存在微小形变,各截面的应力节点坐标往往不同。为便于编程实现快速计算,需定义截面求解网格坐标,并通过已知节点应力拟合得到给定网格点的应力数据。根据连续性定理假设,在光学元件厚度方向上各点的应力也是连续的,因此将拟合得到的截面应力数据沿厚度方向进行数值拟合,得到给定截面上的应力数据。

通过三维插值拟合得到光学元件内部的三维应力数据,结合光弹理论由各截面网格点处的应力分量计算得到对应点处的应力主轴方位角和相位延迟量。应力主轴方位角和相位延迟量计算方法主要有解析法^[20-21]和基于应力张量矩阵的特征值法^[22-23]。两种方法分别从数学角度和矩阵角度给出方位角和相位延迟与应力分量之间的关系,两者所得到的计算结果一致。本研究采用特征值法进行应力双折射的计算。

在折射坐标系,应力张量 \mathbf{T}' 定义为

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{x'y'} & \sigma_{y'} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\sigma_{x'}$ 和 $\sigma_{y'}$ 为折射坐标系下 $X'O'Y'$ 面内 $O'X'$ 轴和 $O'Y'$ 轴方向的正应力; $\tau_{x'y'}$ 为 $X'O'Y'$ 面内的切应力。

在应力坐标系,应力张量 \mathbf{T}'' 定义为

$$\mathbf{T}'' = \begin{bmatrix} \sigma_{x''} & 0 \\ 0 & \sigma_{y''} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\sigma_{x''}$ 和 $\sigma_{y''}$ 为应力坐标系下 $X''O''Y''$ 面内 $O''X''$ 轴和 $O''Y''$ 轴方向的主应力。

对(1)式的应力张量 \mathbf{T}' 求解特征值和特征向量,其特征值 λ_1, λ_2 就是(2)式的主应力 $\sigma_{x''}$ 和 $\sigma_{y''}$; 特

征向量为 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$, 以每个特征向量为列构成的矩阵 $\mathbf{P} = [\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2]$, 即

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: φ 为特征向量的方向角,即应力坐标系的 $O''X''$ 轴与系统坐标系 OX 轴之间的夹角,同时也是应力主轴的方位角。

应力双折射和主应力之间的关系为

$$\Delta n = n_{x''} - n_{y''} = B \times (\sigma_{x''} - \sigma_{y''}), \quad (4)$$

式中: B 为光学玻璃材料的光弹系数,单位为 $\text{nm}/(\text{cm} \cdot \text{MPa})$ 。

光学玻璃材料的光弹系数 B 与材料种类和波长有关。光学玻璃材料光弹系数 B 和材料应力光学常数 q_{11} 和 q_{12} 的关系为

$$B = \frac{n_0^3}{2} \times (q_{11} - q_{12}), \quad (5)$$

式中: n_0 为光学玻璃材料的各向同性折射率。

由应力双折射引起的相位延迟为

$$\delta = \Delta n \times d \times \frac{2\pi}{\lambda} = B \times (\sigma_{x''} - \sigma_{y''}) \times d \times \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (6)$$

式中: d 为光学元件沿光线传播方向的厚度,单位为 cm ; λ 为工作波长,单位为 nm 。

光学元件内每个截面及微小间隔可等效为具有特定方位角和相位延迟量的波片,采用波片的琼斯矩阵^[24]形式可方便描述波片,并可编程计算波片方位角和相位延迟量。波片截面各网格点的琼斯矩阵 $\mathbf{M}_{ij}(\delta_{ij}, \varphi_{ij})$ 可分解为相位延迟矩阵 $\mathbf{R}_{ij}(\delta_{ij})$ 与旋转矩阵 $\mathbf{R}_{ij}(\varphi_{ij})$ 的乘积,且

$$\mathbf{R}_{ij}(\delta_{ij}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_{ij}) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{ij}(\varphi_{ij}) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{ij} & \sin \varphi_{ij} \\ -\sin \varphi_{ij} & \cos \varphi_{ij} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_{ij}(\delta_{ij}, \varphi_{ij}) = \mathbf{R}^T(\varphi_{ij})\mathbf{R}(\delta_{ij})\mathbf{R}(\varphi_{ij}), \quad (9)$$

式中: i 和 j 分别表示波片截面网格点在 $O''X''$ 轴和 $O''Y''$ 轴方向上的序号; δ_{ij} 为波片截面网格点 (i, j) 处应力主轴方向两束偏振光之间的相位差; φ_{ij} 为截面网格点 (i, j) 处应力主轴 $O''X''$ 与系统坐标轴 OX 之间的夹角。

多个波片的琼斯矩阵可表示为各波片的琼斯矩阵按光线传播相反方向的乘积,因此,光学元件截面网格点 (i, j) 处总的琼斯矩阵 $\mathbf{M}(\delta_{ij}, \varphi_{ij})$ 与各截面网格点 (i, j) 处的琼斯矩阵 $\mathbf{M}_m(\delta_{ij}, \varphi_{ij})$ 存在如下关系

$$\mathbf{M}(\delta_{ij}, \varphi_{ij}) = \mathbf{M}_m(\delta_{ij}, \varphi_{ij}), \dots,$$

$$\mathbf{M}_1(\delta_{ij}, \varphi_{ij}) \mathbf{M}_0(\delta_{ij}, \varphi_{ij}), \quad (10)$$

式中: m 表示沿光线传播方向上光学元件各截面的序号。

得到光学元件截面网格点 (i, j) 处总的琼斯矩阵 $\mathbf{M}(\delta_{ij}, \varphi_{ij})$ 后, 便可利用其特征值和特征向量得到对应处的相位延迟量和方位角, 以及相位延迟量和方位角在系统坐标下的二维分布。

2.2 仿真

为验证所提方法的有效性和准确性, 对一块直径为 160 mm, 厚度为 25 mm 的光刻 Corning 7980 熔石英平行平板样品分别进行应力双折射仿真计算和实测实验。样品载荷条件为在中心厚度处沿圆周六等分位置各施加 12 N 的侧应力。在上述载荷条件下, 利用有限元工具对样品内的各应力分量进行仿真计算, 各应力分量在通光孔径内的分布如图 2 所示。

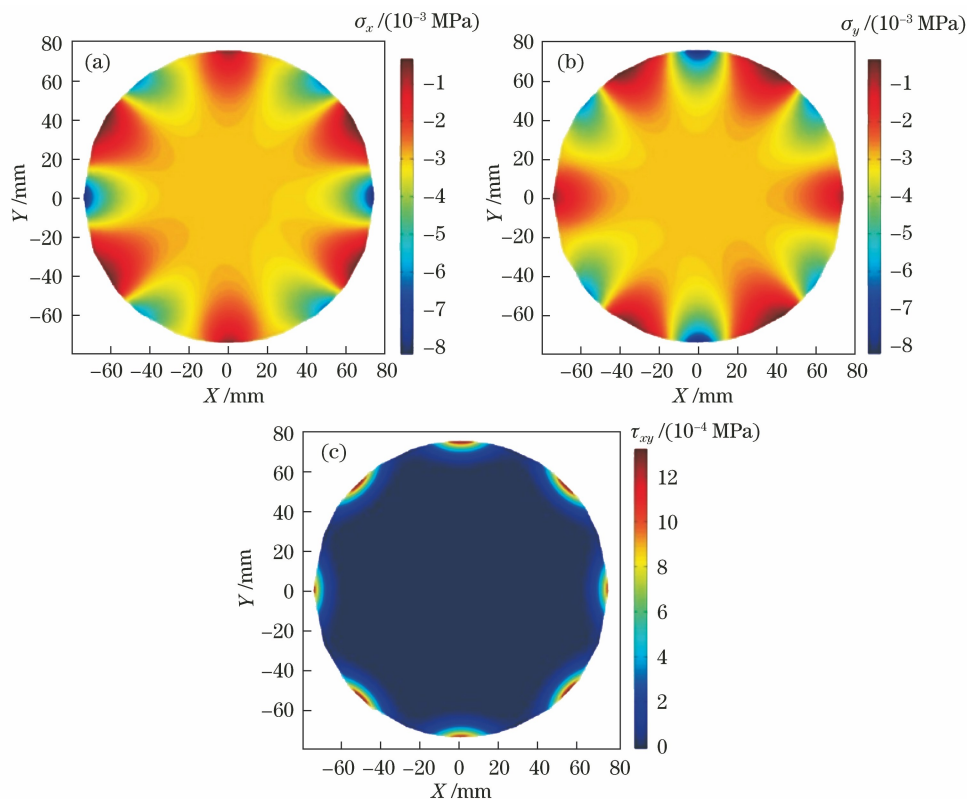


图 2 应力分量的等值图。(a) 正应力 σ_x ; (b) 正应力 σ_y ; (c) 切应力 τ_{xy}

Fig. 2 Stress components coloring contours. (a) Normal stress σ_x ; (b) normal stress σ_y ; (c) shear stress τ_{xy}

根据得到的应力分量数据, 采用所提应力双折射评估方法计算得到 632.8 nm 波长下样品内的总相位延迟和总方位角, 分别如图 3 的色值和矢量线段所示。

作为对照, 利用有限元分析方法结合光线追迹方法对上述样品内的应力双折射进行计算, 图 4 为所得到的样品出射面的波前图。波前图反映了光程差的变化, 同时光程差与相位差之间存在简单的倍率关系。进一步分析可知, 图 3 较图 4 对应点相位延迟量偏大, 对应点最大偏差约 0.4 mrad, 即 $6.4 \times 10^{-5} \lambda$, 可满足光学系统偏振分析需求。

基于光线追迹方法与所提方法的运行时间对比如表 1 所示。其中, 有限元结合光线追迹方法的主要设置参数包括: 有限元尺寸为 0.2 mm, 光线数量

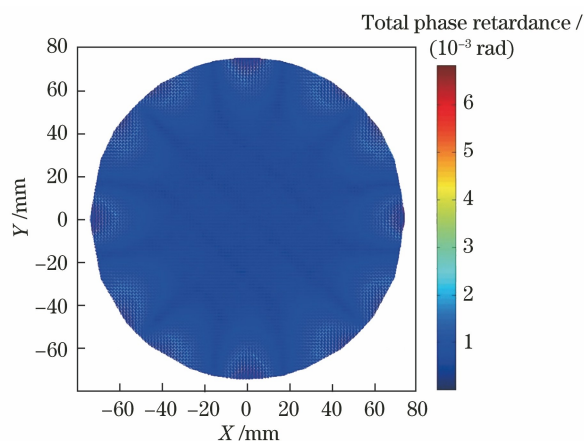


图 3 632.8 nm 波长处应力双折射仿真计算结果
Fig. 3 Stress birefringence simulation results at 632.8 nm wavelength

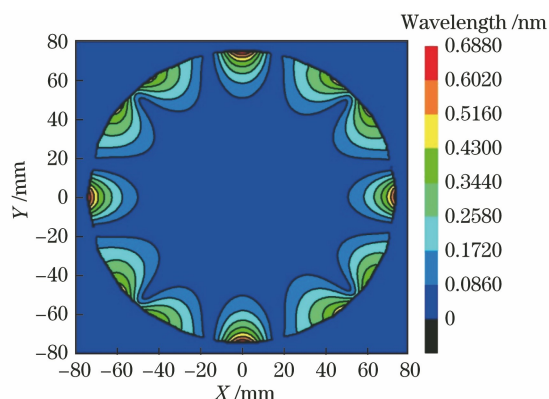


图 4 632.8 nm 波长处样品出瞳面波前图

Fig. 4 Wavefront map of exit pupil at 632.8 nm wavelength of 30000 条。所提方法中有限元尺寸为 0.8 mm, 插值方法为双线性插值, 插值后的网格尺寸为 0.2 mm (即所使用的平行六面体的边长不超过 0.2 mm)。采用所提应力双折射分析方法, 可同时计算得到样品出射面的相位和快轴角参数, 与现有基于光线追迹方法计算得到的相位延迟量偏差约为 0.4 mrad, 计算速度提高了 21.5%。

表 1 两种应力双折射分析方法运行时间的对比

Table 1 Runtime analysis results of the two stress birefringence analysis methods unit: s

| Method | Finite element with ray tracing method | Proposed method |
|------------------------|--|-----------------|
| Finite element meshing | 343 | 260 |
| Ray tracing | 15 | / |
| Post calculation | / | 21 |
| Total time | 358 | 281 |

2.3 实验

利用 Hinds 仪器公司生产的 Exicor © 150 AT 型、工作波长为 632.8 nm 的双折射测量系统, 对该熔石英平板样品在上述载荷条件下进行双折射测量实验, 结果如图 5 所示, 其中, 不同的颜色对应不同的相位延迟量, 每个网格点的矢量线段表示该点的方位角。对比图 3 和图 5 可以看出: 在应力载荷区附近, 仿真计算结果与实测结果之间存在相似性; 仿真计算得到的相位延迟量较实测值小。

3 分析与讨论

对比图 3 和图 5 所示的熔石英样品在 632.8 nm 波长下分别采用所提应力双折射评估方法的仿真结果和实际测量结果, 对通光孔径内对应节点的最大偏差进行分析。仿真计算得到的通光孔径内对应节

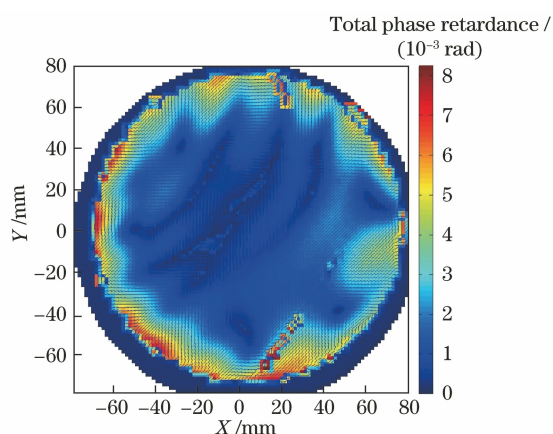


图 5 632.8 nm 波长处应力双折射测量结果

Fig. 5 Measuring results of stress birefringence at 632.8 nm wavelength

点的相位延迟量最大偏差为 0.001 rad; 仿真计算得到的通光孔径内对应节点的方位角最大偏差为 0.147 rad。仿真计算结果与实测结果之间存在差异的主要原因包括: 熔石英平板玻璃存在一定的平行度偏差和粗糙度。尽管所提方法计算得到的偏振参数与实测结果之间存在偏差, 但该偏差满足偏振检测需求。因此可认为所提方法对 632.8 nm 波长下熔石英样品的应力双折射仿真计算结果与实测结果基本一致, 验证了所提应力双折射评估方法的有效性和准确性。

根据图 2 所示的应力数据, 对深紫外波长 248 nm 和 193 nm 下应力引起的相位延迟量和方位角进行仿真计算, 结果分别如图 6 和图 7 所示。

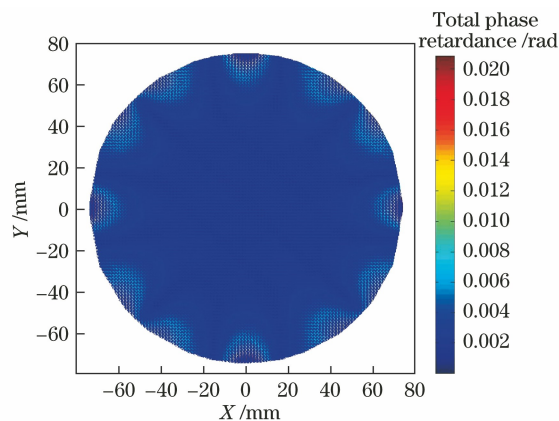


图 6 248 nm 波长下应力双折射仿真结果

Fig. 6 Simulation result of stress birefringence at 248 nm wavelength

从图 6 可以看出: 相位延迟量与方位角变化较大的区域主要集中在应力载荷区域附近; 距离受力点较远的样品中心区域, 应力所引起的应力双折射变化量最小。仿真结果表明: 248 nm 波长下, 六等

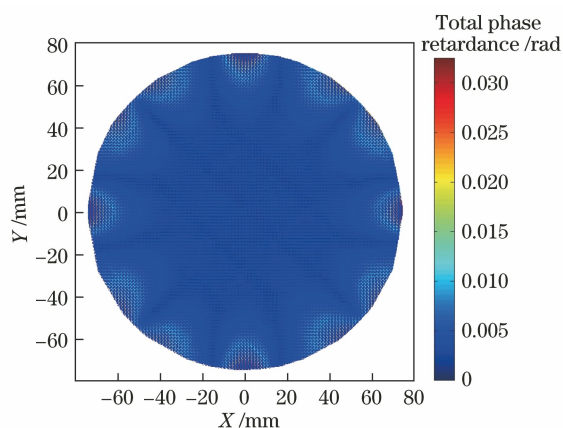


图 7 193 nm 波长下应力双折射仿真结果
Fig. 7 Simulation result of stress birefringence at 193 nm wavelength

分 12 N 侧应力夹持方式下样品内由应力引起的相位延迟的最大变化量不超过 0.020 rad,方位角变化量不超过 1.579 rad。

从图 7 可以看出:应力载荷附近的相位延迟与方位角变化量较大;在距离受力点较远的样品中心区域,应力所引起的应力双折射变化量最小。仿真结果表明:193 nm 波长下,六等分 12 N 侧应力夹持方式下样品内由应力引起的相位延迟量的最大变化量不超过 0.032 rad,方位角变化量不超过 1.579 rad。

4 结 论

针对快速、准确计算深紫外波长下熔石英光学元件内应力双折射问题,基于有限元应力数据及连续性理论,建立了应力分量三维插值拟合模型,结合应力张量矩阵和琼斯矩阵计算了给定载荷下熔石英薄片的应力双折射变化量,并得到通光孔径内的相位延迟量分布和方位角分布。在 632.8 nm 波长下,对给定载荷下的熔石英薄板样品进行了应力双折射仿真计算,对比 Hinds 仪器公司的 Exicor © 150 AT @632.8 nm 双折射分析仪的测量结果,两者具有较好的一致性;对应节点的相位延迟量最大偏差为 0.001 rad,方位角最大偏差为 0.147 rad,验证了所提方法的有效性和准确性。此外,对相同载荷条件下,应力在深紫外波长下引入的相位延迟量和方位角进行了评估,仿真结果表明:应力载荷附近的相位延迟与方位角变化量较大;在距离受力点较远的样品中心区域,应力所引起的应力双折射变化量最小。在 248 nm 和 193 nm 工作波长下,六等分 12 N 侧应力夹持方式下熔石英样品内产生的相位延迟分别为 0.020 rad 和 0.032 rad,方位角均不超

过 1.579 rad。所得数值计算结果可用于分析实际光学元件内部应力双折射对光学系统偏振性能的影响。

参 考 文 献

- [1] Li Z Z, Li S K, Wang X Z. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911002.
李兆泽, 李思坤, 王向朝. 基于随机并行梯度速降算法的光刻机光源与掩模联合优化方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911002.
- [2] Yang C X, Li S K, Wang X Z. Source mask optimization based on dynamic fitness function [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111006.
杨朝兴, 李思坤, 王向朝. 基于动态适应度函数的光源掩模优化方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0111006.
- [3] Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Lithographic tool-matching method based on differential evolution algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222002.
茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分进化算法的光刻机匹配方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222002.
- [4] Liu Z F, Chen M, Bu Y, et al. Blade edge's penumbra measurement for scanning slit of lithographic tools [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004005.
刘志帆, 陈明, 步扬, 等. 光刻机扫描狭缝刀口半影宽度测量技术 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004005.
- [5] Sheats J R, Smith B W. Microlithography science and technology [M]. New York: Marcel Dekker, 1998: 195-268.
- [6] Liu W, Liu S Y, Wu X F, et al. Parametric analytical model for off-axis illumination sources based on Sigmoid function [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(5): 054213.
刘巍, 刘世元, 吴小飞, 等. 基于 Sigmoid 函数的离轴照明光源全参数解析模型 [J]. 物理学报, 2011, 60(5): 054213.
- [7] Uehara Y, Matsuyama T, Nakashima T, et al. Thermal aberration control for low-k1 lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65202V.
- [8] Fan Z G, Zhang Y P, Pei Y W, et al. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aero-dynamic thermal environment [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(5): 396-400.

- 范志刚, 张亚萍, 裴扬威, 等. 气动热环境下高速飞行器光学窗口光传输数值仿真研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(5): 396-400.
- [9] Yoder P R, Jr. Mounting optics in optical instruments[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2008.
- [10] Yan F P, Wei Y, Fu Y J, et al. Study on the performance of stress area mismatched Panda polarization-maintaining fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(1): 321-327.
延凤平, 卫延, 傅永军, 等. 熊猫型保偏光纤中应力区失配对光纤性能影响的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(1): 321-327.
- [11] Totzeck M, Graupner P, Heil T, et al. How to describe polarization influence on imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 23-37.
- [12] de Klerk J, Wagner C, Droste R, et al. Performance of a 1.35 NA ArF immersion lithography system for 40-nm applications[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65201Y.
- [13] Meng Z J, Li S K, Wang X Z, et al. Jones pupil measurement method of lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0312004.
孟泽江, 李思坤, 王向朝, 等. 光刻投影物镜的琼斯光瞳检测方法[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0312004.
- [14] Wang B L, Oakberg T C. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(10): 3847-3854.
- [15] Ladison J L, Ellison J F, Allan D C, et al. Achieving low-wavefront specifications for DUV lithography: impact of residual stress in HPFS fused silica [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 1416-1423.
- [16] Doyle K B, Bell W M. Thermo-elastic wavefront and polarization error analysis of a telecommunication optical circulator [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4093: 18-27.
- [17] Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. Numerical methods to compute optical errors due to stress birefringence[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4769: 34-42.
- [18] Cen Z F, Li X T. Light transmission in thermal stress-induced birefringent medium[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5784-5790.
岑兆丰, 李晓彤. 热应力双折射介质中的光传输研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5784-5790.
- [19] Chen H, Yang H J, Yu X F, et al. Simulated and experimental study of laser-beam-induced thermal aberrations in precision optical systems[J]. Applied Optics, 2013, 52(18): 4370-4376.
- [20] Yiu Y C, Meyer A R. Computation of optical errors in transparent optical elements due to three-dimensional photoelastic effect [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1303: 206-216.
- [21] Timoshenko S P, Goodier J N, Abramson H N. Theory of elasticity [J]. Journal of Applied Mechanics, 1970, 37(3): 888.
- [22] Cotte E, Selle M, Bubke K, et al. Study of stress birefringence for 193-nm immersion photomasks[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5853: 10-19.
- [23] Li K W, Wang Z B, Chen Y H, et al. High sensitive measurement of optical rotation based on photoelastic modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 184206.
李克武, 王志斌, 陈友华, 等. 基于弹光调制的高灵敏旋光测量[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184206.
- [24] Xu J, Chen L X, Zheng G L, et al. Wavecoupling theory of optical activity in birefringent crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4615-4621.
许婕, 陈理想, 郑国梁, 等. 双折射晶体中旋光效应的耦合波理论[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4615-4621.