

光纤点衍射干涉仪中球面参考源偏振控制系统的设计

代晓珂^{1,2} 金春水¹ 王丽萍¹ 于 杰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 极紫外光刻光学检测通常使用光纤点衍射干涉仪, 光纤衍射的圆偏振态光束可以提高干涉条纹的对比度、减小衍射球面波的像散, 对于提高检测精度有十分重大意义。用穆勒矩阵分析了相位控制型偏振控制器的工作原理, 得到只需两个控制通道就可以调控到圆偏振态的结论。设计了光纤点衍射干涉仪球面参考源的偏振控制系统, 并用琼斯矩阵分析了光束经过偏振控制系统后的光强变化, 得到光强最小时两个控制通道的控制电压。在理论分析基础上搭建了球面参考源的偏振控制系统, 获得了圆偏振态所需的控制电压, 并将其输入偏振控制器调控得到圆偏振光, 实验结果表明此方法可以在不引入额外误差的同时, 快速地实现圆偏振态的调节, 并且理论计算与实际的误差不超过 7.5%, 证明了该方法的可行性。

关键词 光学设计; 极紫外光刻; 光纤点衍射; 球面参考源; 偏振控制

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1112001

Design of Polarization Control System for the Wavefront Reference Source of Fiber Point Diffraction Interferometer

Dai Xiaoke^{1,2} Jin Chunshui¹ Wang Liping¹ Yu Jie¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Fiber point diffraction interferometer meets the accuracy of optical test for extreme ultraviolet lithography (EUVL). Wavefront reference source which emits circularly polarization state light can enhance the contrast of interference fringes and reduce the astigmatism of wavefront reference source. The principle of phase-controlled polarization controller is analyzed by Mueller matrix and found to obtain circularly polarization by only using the first two control channels. A polarization control system has been designed, and the light intensity is analyzed after propagating from the polarization control system by Jones matrix. The control voltage of the first two control channels are obtained. A polarization control system is built and a circularly polarization light is achieved. The error between theory and reality is about 7.5%, which is verified by analyzing the first two control channel before polarization control test. The polarization of wavefront reference source is controlled into circularly polarization quickly, thus the problem of polarization control is solved for fiber diffraction interferometer.

Key words optical design; extreme ultraviolet lithography; fiber point diffraction interference; wavefront reference source; polarization control

OCIS codes 120.3180; 050.1940; 060.2420; 260.5430

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)技术被广泛认为是最具潜

力的下一代光刻技术之一, 它最大程度地承袭了现有光刻技术的发展成果。EUVL 是用 13.5 nm 的

收稿日期: 2014-03-27; 收到修改稿日期: 2014-06-09

基金项目: 应用光学国家重点实验室基金(09Q03FQM90)

作者简介: 代晓珂(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: daixk1989@163.com

导师简介: 金春水(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事紫外、极紫外光学技术等方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

极紫外光将掩模上的图形成像在涂敷有光刻胶的硅片上,为实现投影光学系统衍射极限的分辨率,根据 Marachel 判据,要求投影物镜系统的波像差小于 $\lambda/14$ (λ 为波长),即 1 nm 均方根(RMS)值。要达到如此高的检测精度,传统的菲索干涉仪等由于受参考元件面型精度的限制很难满足要求,利用小孔、光纤等衍射产生的高质量球面波的点衍射干涉仪已成为 EUVL 光学检测的主流^[1-5]。

在 EUVL 光学初检测中通常使用的是可见光光纤点衍射干涉仪。在干涉仪中,干涉光束的偏振态会对干涉图样对比度造成比较大的影响:两束偏振方向相同的线偏振光或者旋向相同的圆偏振光才有可能使干涉条纹的对比度达到 1^[6]。另外在大数值孔径的 EUVL 光学检测中,光纤衍射球面波数值孔径已不能满足要求,因此需要将光纤衍射球面波准直聚焦到小孔上,衍射出大数值孔径的球面波^[7]。小孔的尺寸和可见光波长是同一数量级,在计算小孔衍射波前时标量衍射理论已经不再适用,卢增雄等^[8-10]用矢量瑞利-索末菲公式对不同偏振态照射下小孔衍射波前质量进行过研究,结果发现,线偏振光照射下,衍射波前存在较大的像散,球面波的像散会在 EUVL 光学检测中引入很大的误差,而圆偏振光照射下小孔衍射球面波前主要存在的是旋转对称的球差,对 EUVL 光学检测的影响很小。综上所述,在 EUVL 光学检测中选用圆偏振光干涉对于提高检测精度具有十分重要的意义。

传统的圆偏振态获得方法是使用一偏振片和 1/4 波片的组合,但是在 EUVL 光学检测中,对球面波的偏差要求不大于 $8.85 \times 10^{-5} \lambda$,波片及偏振片面形对波前质量有很大的影响且无法标定,因此需要寻找无额外误差的圆偏振态获得方法。本文选用偏振控制器调控圆偏振态,偏振控制器一般设计有四个控制通道,以实现偏振态的遍历性及无复位连续调节。为了得到圆偏振态,传统的调节方法需要耗费大量时间进行漫无目的的调节,或者需要加入复杂的电学反馈系统^[11],比较麻烦,因此需要在简化系统的同时找到一种快速调节到圆偏振态的方法,本文在对偏振控制器的原理进行研究的基础上,提出了一种可以在不引入额外误差的前提下快速获得圆偏振态的方法。

2 圆偏振态的调控分析

2.1 偏振控制器原理

偏振控制器通常使用在光纤通信中,用于消除

光纤不规则、外界压力等引起的偏振模色散^[12],在光纤点衍射干涉仪中,为了使光束干涉条纹的对比度最大,同时使衍射球面波的误差尽可能小,也需要用偏振控制器对光纤出射光束的偏振态进行调控。常见的偏振控制器有方位角变化型、延迟量变化型和方位角及延迟量都变化的偏振控制器。选用了 OZ Optics 生产的延迟量变化型全光纤偏振控制器,它具有插入损耗小、响应速度快、需加电压低等优点,通过四个电压通道(每个通道在 ± 5 V 范围变化,最小调节幅度为 1 mV)控制对光纤产生压力的大小,从而产生延迟相位,使光纤中传输光束的偏振态发生变化。

如图 1 所示,四个通道分别与参考方向成 0° 、 45° 、 0° 、 45° 施加压力,根据光纤光学的知识,施加压力相当于在压力处形成一个波片,且快轴方向和压力垂直,也即四个压力处相当于四个偏振光学元件,求出它们的穆勒矩阵就可以得到光纤挤压型偏振控制器的控制原理。

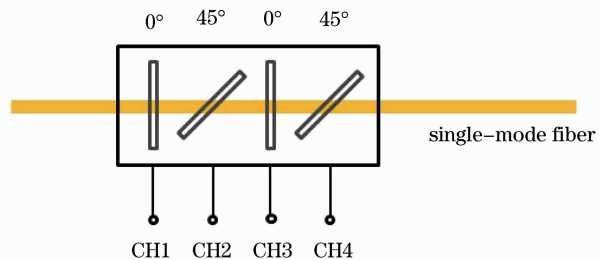


图 1 OZ Optics 相位控制型偏振控制器控制原理示意图
Fig. 1 Phase-controlled polarization controller of OZ Optics

用邦加球上的斯托克斯矢量 (S_0, S_1, S_2, S_3) 来表示偏振态^[13]的变化,示意图如图 2 所示。

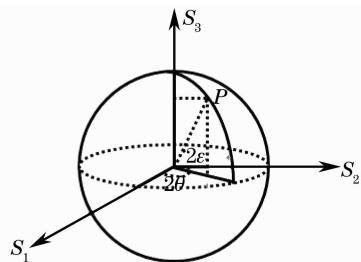


图 2 偏振态在邦加球上的表示
Fig. 2 Polarization state on Poincare sphere
坐标 (S_0, S_1, S_2, S_3) 可分别表示为

$$\begin{cases} S_1 = S_0 \cos 2\epsilon \cos 2\theta \\ S_2 = S_0 \cos 2\epsilon \sin 2\theta, \\ S_3 = S_0 \sin 2\epsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中 S_0 为邦加球半径, S_0^2 为光束能量的大小, θ

为偏振椭圆的长轴取向, $\tan \epsilon$ 为偏振椭圆的椭圆度, 因此有坐标即可确定光束的偏振状态。对于圆偏振态, $\epsilon = \pm \pi/4$, 代入(1)式可得 $S_1 = S_2 = 0$, 因此圆偏振态位于邦加球上南北极点, 且北极点表示右旋圆偏振光, 南极点表示左旋圆偏振光。

对于与参考方向成 0° 和 45° 方向的波片, 当相位延迟量为 δ , 穆勒矩阵^[14] 分别为 $\mathbf{J}_0(\delta)$ 和 $\mathbf{J}_{45}(\delta)$ 时, 有

$$\mathbf{J}_0(\delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_{45}(\delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & 0 & -\sin \delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta & 0 & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设斯托克斯矢量为 $(S_{0in}, S_{1in}, S_{2in}, S_{3in})$ 的入射光经过只有一个 0° 挤压的偏振控制器时, 输出为 $(S_{0out}, S_{1out}, S_{2out}, S_{3out})$:

$$\begin{pmatrix} S_{0out} \\ S_{1out} \\ S_{2out} \\ S_{3out} \end{pmatrix} = \mathbf{J}_0(\delta) \begin{pmatrix} S_{0in} \\ S_{1in} \\ S_{2in} \\ S_{3in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{0in} \\ S_{1in} \\ S_{2in} \cos \delta - S_{3in} \sin \delta \\ S_{2in} \sin \delta + S_{3in} \cos \delta \end{pmatrix}, \quad (4)$$

由(4)式知道, 经过 0° 挤压后, 表示偏振态的斯托克斯矢量的 S_1 分量不变, 也即偏振态绕 S_1 轴旋转。进一步的分析可知, 当挤压压力增大时, 绕 S_1 轴顺时针旋转, 反之逆时针^[15]。

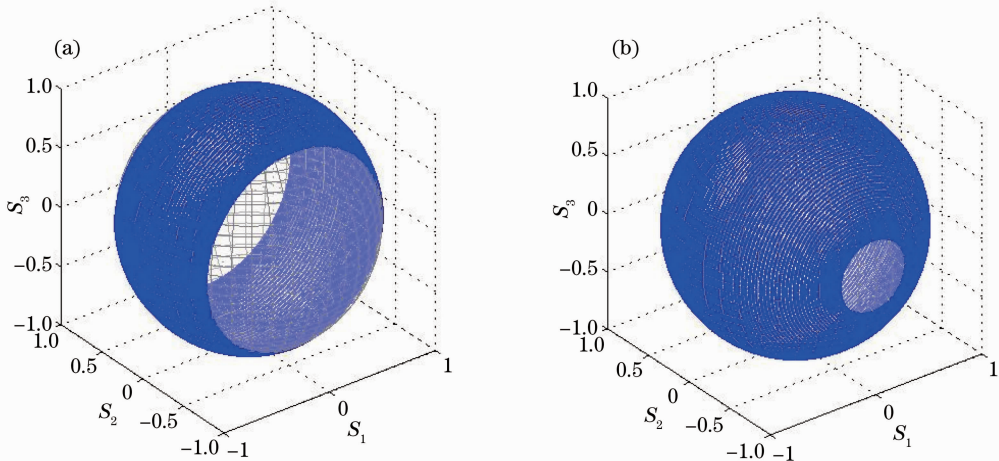


图3 只控制 CH1、CH2 电压时可调控到的偏振态在邦加球上的表示。(a)输入偏振态(1, 0.831, 0.4941, 0.2557); (b)输入偏振态(1, 0.309, 0.9511, 0)

Fig. 3 Polarization state when controlling CH1 and CH2 only. (a) Input (1, 0.831, 0.4941, 0.2557); (b) input (1, 0.309, 0.9511, 0)

同理假设斯托克斯矢量为 $(S_{0in}, S_{1in}, S_{2in}, S_{3in})$ 的入射光经过只有一个 45° 挤压的偏振控制器时, 输出为 $(S_{0out}, S_{1out}, S_{2out}, S_{3out})$:

$$\begin{pmatrix} S_{0out} \\ S_{1out} \\ S_{2out} \\ S_{3out} \end{pmatrix} = \mathbf{J}_{45}(\delta) \begin{pmatrix} S_{0in} \\ S_{1in} \\ S_{2in} \\ S_{3in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{0in} \\ S_{1in} \cos \delta - S_{3in} \sin \delta \\ S_{2in} \\ S_{1in} \sin \delta + S_{3in} \cos \delta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

对(5)式进行同样的分析可知, 在 45° 挤压时, 表示偏振态的斯托克斯矢量绕 S_2 轴旋转, 同样地, 当挤压压力增大时, 顺时针旋转, 反之逆时针旋转。

2.2 偏振控制器控制通道选择

当只对 CH1、CH2 控制电压进行控制时, 输出光束斯托克斯矢量随输入变化为

$$\begin{pmatrix} S_{0out} \\ S_{1out} \\ S_{2out} \\ S_{3out} \end{pmatrix} = \mathbf{J}_{45}(\delta_2) \mathbf{J}_0(\delta_1) \begin{pmatrix} S_{0in} \\ S_{1in} \\ S_{2in} \\ S_{3in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{0in} \\ S_{1in} \cos \delta_2 - S_{2in} \sin \delta_1 \sin \delta_2 - S_{3in} \cos \delta_1 \sin \delta_2 \\ S_{2in} \cos \delta_1 - S_{3in} \sin \delta_1 \\ S_{1in} \sin \delta_2 + S_{2in} \sin \delta_1 \cos \delta_2 + S_{3in} \cos \delta_1 \cos \delta_2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

相位延迟量在 $(0, 2\pi)$ 之内, 输入任意偏振态如: $(1, 0.831, 0.4941, 0.2557)$ 、 $(1, 0.309, 0.9511, 0)$ 分别代表椭圆偏振光和线偏振光。可调控到的偏振态在邦加球上用蓝线表示, 如图3所示。

由图 3 以及多次其他数值模拟知道,虽然调节前两个相移量并不能实现偏振态的遍历性调控,但在需要的南北极点上,只调节 CH1、CH2 电压值即可以实现,即将圆偏振态调控的自由度降低到两个。

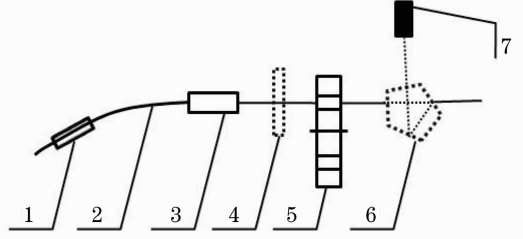
2.3 偏振控制系统的分析设计

使用旋转偏振片法来测量初始光束的偏振态:根据偏振光学的知识,当完全偏振光束经过一可以旋转的偏振片时,光强最小的位置即是偏振椭圆的短轴位置,光强最大即为椭圆长轴位置,因此可以根据光功率计示数的大小确定偏振椭圆的长、短轴大小以及方位,为后续工作提供数据支持。

大部分情况下初始光束的偏振态并不是圆偏振态,因此需要用偏振控制器对光束的偏振状态进行调控,并用圆偏振光检测系统即 1/4 波片和偏振片的组合检测调控结果。不同的是,由于在检测时不允许引入波片误差,此圆偏振光检测系统应能够移出球面参考源的光路,因此选择了双层密度盘安放波片和单轴位移平台安放能量检测系统。

综上所述,光纤衍射球面波在经过准直后,通过一个放在单轴位移台上的偏振片来确定初始光束的状态;经过由两个转轮构成的双层密度盘,系统的前

一个转轮上有一快轴与 x 轴成 45° 的 1/4 波片,后一个转轮上有两个透振方向分别与 y 轴和 x 轴重合的偏振片,用于检测左旋和右旋圆偏振光,检测完成后,可将转轮转至通孔;经过放在位移台上的五棱镜将光束偏转到功率计上以检测光强。在偏振态调控完成后,利用位移台将偏振片和五棱镜移出光路,以免在检测时引入其他误差。此系统如图 4 所示。



1: polarization controller; 2: fiber; 3: collimate lens; 4: rotated polaroid; 5: double layers runner; 6: pentaprism; 7: optical power meter

图 4 偏振控制系统原理图

Fig. 4 Schematic of polarization control system

以右旋圆偏振光调控为例说明,双层密度盘上有偏振方向互成 90° 的两个偏振片,左旋圆偏振光也可以用同样方法得到。当初始偏振态检测完毕后,调控后偏振光经过此系统后出现消光的即为圆偏振态,用琼斯矩阵法对经过偏振控制系统的光强进行计算,输入和输出琼斯矩阵之间转换如下:

$$\mathbf{E}_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_2/2 & i \sin \delta_2/2 \\ i \sin \delta_2/2 & \cos \delta_2/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta_1) \end{bmatrix} \mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} \cos \delta_2/2 - \sin \delta_2/2 & i \exp(-i\delta_1)(\cos \delta_2/2 + \sin \delta_2/2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{E}_{in}, \quad (6)$$

对输入光束偏振态进行判定,就可以得到输出光束琼斯矩阵,进而得到光强,假设输入光束为线偏振态,偏振角度为 30° ,则入射光束琼斯矩阵可表示为 $\begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ 1/2 \end{bmatrix}$,代入可得到输出光束琼斯矩阵为

$$\mathbf{E}_{out} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2(\cos \delta_2/2 - \sin \delta_2/2) + 1/2 \cdot i \exp(-i\delta_1)(\cos \delta_2/2 + \sin \delta_2/2) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

可知光束为线偏振光,光强即为

$$Q = \left| \sqrt{3}/2(\cos \delta_2/2 - \sin \delta_2/2) + 1/2 \cdot i \exp(-i\delta_1)(\cos \delta_2/2 + \sin \delta_2/2) \right|^2. \quad (8)$$

用 Matlab 编程后得到光强随 CH1、CH2 相位延迟量变化图(光强单位可取为任意的,如图 5 所示。进而可以得到光强最小时 CH1、CH2 对应相位值为 (4.7124, 0.5027),再换算为电压即可得到偏振控制器初调节的值。

3 圆偏振态调控实验

实验图如图 6 所示,采用的光功率计是 Gentec-EO 的低功率探测器 XLPF12-3S-H2-DO,实验步骤如下:

1) 将旋转偏振片放入光路中,双层密度盘转到通孔,五棱镜也在光路中以实现光束偏折,用旋转偏振片法测初始光的偏振态后,用单轴位移台移出旋

转偏振片；

2) 根据初始光偏振态计算出只调整 CH1、CH2 电压时得到右旋圆偏振光的相位延迟和电压值；

3) 将 CH1、CH2 控制电压调到步骤 2) 的电压值，并将双层密度盘转到右旋圆偏振光检测的位置，观察功率计示数；

4) 微调 CH3、CH4 控制电压直至完全消光，则光纤衍射光束为右旋圆偏振态，移出五棱镜并将双层密度盘恢复至通孔状态。

实验中用旋转偏振片法进行初始光束偏振态确定时，采用五次求平均的方法得到偏振椭圆长短轴方位角 θ_a 、 θ_b 及对应光功率 P_a 、 P_b ，结果如表 1 所示。

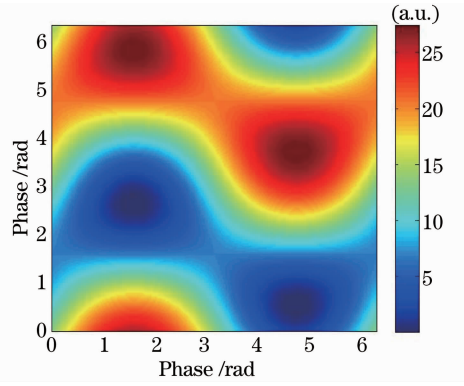


图 5 光强随 CH1、CH2 延迟相位变化图
Fig. 5 Light intensity varies by phase

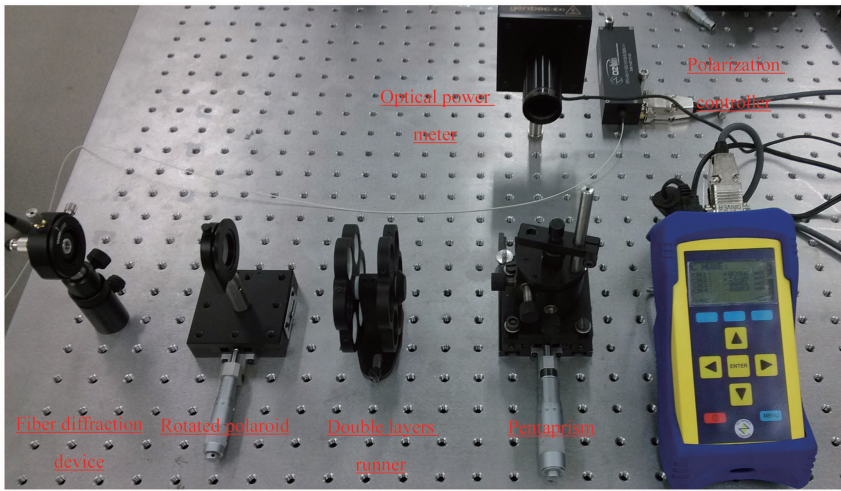


图 6 偏振控制系统实验装置图

Fig. 6 Polarization control system device

表 1 旋转偏振片法确定光束初始偏振态数据

Table 1 Data of getting polarization state by rotated polaroid

Times	1	2	3	4	5	Average
θ_a	163	160	164	158	162	161.4
P_a /mW	0.039	0.045	0.030	0.050	0.046	0.042
θ_b	70	73	72	69	75	71.8
P_b /mW	0.546	0.509	0.563	0.528	0.536	0.536

由表 1 可将初始光束偏振态方位角和椭圆度确定，即椭圆长轴和 x 轴夹角为 71.8° ，短轴和 x 轴夹角为 161.4° ，椭圆度为 $\sqrt{0.536/0.042}=3.57$ ，故初始光束的琼斯矩阵即可由长短轴分解在 x 、 y 轴上得到，旋转偏振片法并不能确定光束的旋向，因此求得的琼斯矩阵有两个，分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= \begin{bmatrix} -0.9478 + 1.1387i \\ 0.3190 + 3.3835i \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_2 &= \begin{bmatrix} -0.9478 - 1.1387i \\ 0.3190 - 3.3835i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

将(9)式两个输入矩阵代入(6)式即可得到光强

随相位延迟量变化图，如图 7 所示。

得到光强最小时的延迟相位分别是 $(0.7854, 3.8956)$ 和 $(2.3562, 3.8956)$ ，对于所用的偏振控制器，控制电压与相位延迟量大致呈线性关系，产生 2π 延迟相位需要 3300mV 的控制电压，可将相位延迟量分别换算为电压值： $(413 \text{ mV}, 2046 \text{ mV})$ 和 $(1238 \text{ mV}, 2046 \text{ mV})$ 。将偏振控制器前两个控制电压分别设为以上数据，发现当电压为 $(413 \text{ mV}, 2046 \text{ mV})$ 时，功率计读数较小，即此时光束接近圆偏振态，因此初始输入状态为 \mathbf{E}_1 。随后继续调节 CH3、CH4 控制电压直至消光，至此就得到了需要的圆偏振态光

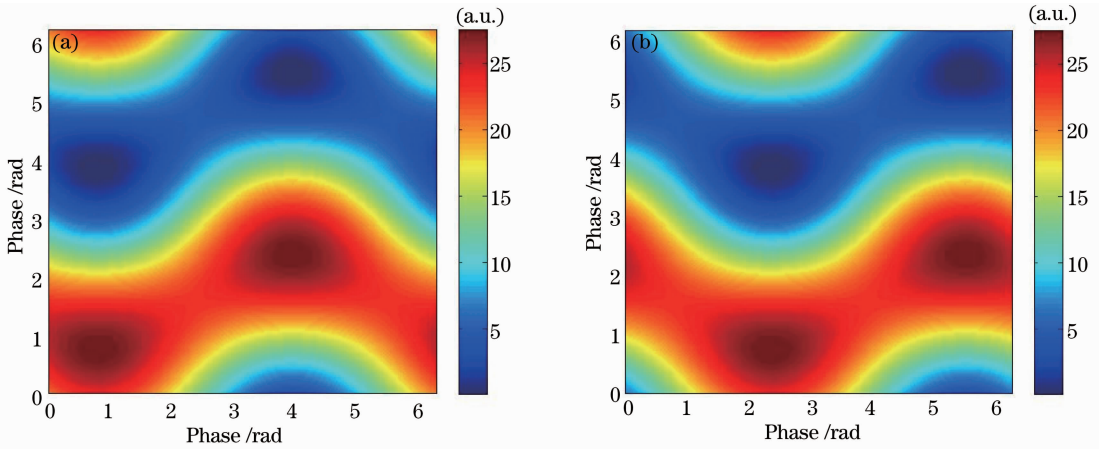


图 7 输入两种可能初始光束时光强变化图。(a)初始输入 E_1 ; (b) 初始输入 E_2

Fig. 7 Light intensity varies by two possible inputs. (a) Originally input E_1 ; (b) originally input E_2

束,最终偏振控制器的四路电压为(413 mV, 2046 mV,130 mV,226 mV)。

4 结果分析

以消光时 CH3、CH4 通道电压值相对于能产生 2π 相位延迟的 3300 mV 的比例即微调量的相对大小可以表示此方法调控的速度及误差,此值越小,表明理论计算的准确性越高,调控越快。在 CH1、CH2 输入理论计算值的基础上,完全消光时 CH3、CH4 两路控制电压的数值相对的 3300 mV 分别只有 3.94% 和 6.85%。多次扰动光纤产生不同偏振态初始光束,用上述方法对进行调控,以来衡量误差,进行了 20 次偏振态调节实验,以 CH3、CH4 中大者相对 3300 mV 的比例表示误差,每次误差如图 8 所示。

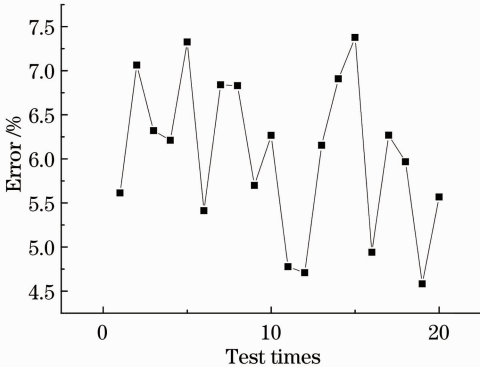


图 8 20 次调控实验的误差分布

Fig. 8 Error distributing of 20 tests

由图 8 可知,此方法进行圆偏振态调控时,理论和实验的误差不超过 7.5%,即最终所需的控制电压和理论计算结果具有较好的吻合性,可以实现圆偏振态的快速调控。并且此方法可在圆偏振态的调

控过程之后可以将调控装置移出光路,使其不对微孔衍射球面波质量产生影响,最终球面波的质量只和小孔对准精度和微孔制作质量有关,配合高质量的三维调整台和圆度、边缘粗糙度符合要求的微孔,即可产生符合要求的球面波。

实验的误差主要存在两方面:一方面是由于在旋转偏振片角度和功率计读数方面存在误差,导致确定光束初始偏振状态时有误差;另一方面由于光纤纤芯本身固有的椭圆形状会引入固有相位延迟,而理论计算时认为所有的相位延迟都是经过挤压光纤产生,导致计算结果与实际有偏差。

5 结 论

通过分析偏振控制器工作原理,得出只需两个控制通道即可调控出极紫外光刻光学检测中所需的圆偏振态光,有效减小了调控圆偏振态的自由度。利用旋转偏振片的方法得出初始光束的偏振态,经过理论计算得到调节圆偏振态所需的前两路电压值,实现了在不引入额外误差的情况下,快速调节到圆偏振态光束,进而可以有效地提高了干涉条纹对比度和检测精度,可以满足 EUVL 光学检测对于高精度球面波源的需求。

参 考 文 献

- 1 K Otaki, T Yamamoto, Y Fukuda, *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror [J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20 (1): 295-300.
- 2 Gary E Sommargren, Donald W Phillion, Michael A John, *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL [J]. SPIE, 2002, 4688: 316-328.
- 3 John S Taylor, Gray E Sommargren, Donald W Sweeney, *et al.*. The fabrication and testing of optics for EUV projection

- lithography [J]. 1998, 3331: 580–590.
- 4 Seiji Takeuchi, Osamu Kakuchi, Kenji Yamazoe, *et al.*. Visible light point-diffraction interferometer for testing of EUVL optics [C]. SPIE, 2006, 6151: 61510E.
- 5 Zheng Meng, Li Yanqiu, Liu Ke. Design of mask for phase-shifting point diffraction interferometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 031201.
郑 猛, 李艳秋, 刘 克. 相移点衍射干涉仪用衍射板结构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 031201.
- 6 Cai Lüzhong. Study on the interference fringe contrast between circularly polarization light and linearly polarization light or two circularly polarization lights [J]. College Physics, 2004, 23(1): 16–18.
蔡履中. 两圆偏振光以及线偏振光和圆偏振光干涉图样的衬比度[J]. 大学物理, 2004, 23(1): 16–18.
- 7 Michael A Johnson, Donald W Phillion, Grey E Sommargren, *et al.*. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems [J]. SPIE, 2005, 5869: 58690P.
- 8 Lu Zengxiong. Research on the Deep Sub-Nanometer Accuracy Reference Wavefront in Phase Shifting Point Diffraction Interferometer [D]. Changchun: Changchun Insitute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
卢增雄. 相移点衍射干涉仪深亚纳米精度参考波前研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- 9 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei. Rigorous vector analysis of the effect of illumination objective lens aberration on the quality of far-field diffracted wave front [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0812001.
卢增雄, 金春水, 马冬梅. 照明物镜像差对远场衍射波前质量影响的严格矢量分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0812001.
- 10 Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Study of calibrating algorithm for wavefront reference source of point diffraction interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0308001.
张 宇, 金春水, 马冬梅, 等. 点衍射干涉仪波前参考源标定算法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0308001.
- 11 Li Weiwen. Study of the Transparent Electro-Optic Ceramics Based Polarization Controller and Its Control Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
李伟文. 基于透明电光陶瓷偏振控制器及其算法设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- 12 C D Poole, N S Bergano, R E Wagner, *et al.*. Polarization dispersion and principal states in a 147 km undersea lightwave cable [J]. J Lightwave Technol, 1988, 6(7): 1185–1190.
- 13 M Born, E Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 14 K Kim, L Mandel, E Wolf. Relationship between Jones and Mueller matrices for randommedia [J]. J Opt Soc Am A, 1987, 3(4): 433–437.
- 15 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Research on the polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506001.
张启业, 朱 勇, 苏 洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器“极地盲区”问题研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506001.

栏目编辑: 何卓铭