

# 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计

宋 强<sup>1,2</sup> 朱 菁<sup>1,2</sup> 王 健<sup>1,2</sup> 张 方<sup>1,2</sup> 吕向博<sup>1,2</sup> 杨宝喜<sup>1,2</sup> 黄惠杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 深紫外(DUV)光刻机照明系统普遍采用衍射光学元件(DOE)实现光瞳整形。根据光刻机的指标要求,衍射光学元件应具有高衍射效率和高均匀性的特点。传统的相位恢复算法如 Gerchberg-Saxton (GS)及其改进算法,一般只能通过降低均匀性来提高衍射效率,无法得到最优的解。而全局优化算法如模拟退火法、遗传基因法等需要大量的计算时间,难以实现像素数目多的深紫外 DOE的设计。为了克服上述困难,提出了一种基于GS的混合梯度下降算法,在迭代过程中对每次迭代的振幅进行加权反馈修正,在加快收敛速度的同时,减少误差,同时实现高效率和高信噪比。利用该算法对光刻需要的传统、四极照明光瞳、定制照明光瞳的DOE进行了设计,结果表明,实现传统和四极照明光瞳的16阶量化相位DOE的衍射效率均超过92%,而非均匀性分别为3.98%和2.3%。实现定制照明光瞳的DOE的衍射效率为91%,图形恢复误差为5.8%。该方法为获得高性能深紫外DOE提供一条可行的途径。

**关键词** 光学设计;光学光刻;光瞳整形;衍射光学元件设计;部分相干光

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0122005

## A Mixed Gradient Algorithm for High Performance DOE Design in Off-Axis Lithography Illumination System

Song Qiang<sup>1,2</sup> Zhu Jing<sup>1,2</sup> Wang Jian<sup>1,2</sup> Zhang Fang<sup>1,2</sup> Lü Xiangbo<sup>1,2</sup>  
Yang Baoxi<sup>1,2</sup> Huang Huijie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The diffractive optical element (DOE) is widely used to generate various illumination pupils in the deep ultraviolet (DUV) projection lithography system. According to the specifications of DUV lithography machines, the designed DOE should possess high diffraction efficiency and high uniformity. Traditional algorithms such as Gerchberg-Saxton (GS) algorithm (GSA) and modified GSA get high diffraction efficiency with low non-uniformity. Global searching methods such as gene algorithm and simulated annealing algorithm need huge computing effort to receive high diffraction efficiency and high uniformity. To address these issues, a mixed gradient algorithm based on GSA is proposed. It can accelerate the rate of convergence and improve the signal to noise ratio simultaneously, and the phase retrieval image is improved. The DOEs generating conventional, quadrupole and customized illumination modes are designed and analyzed based on the proposed method, then the phase is quantized with 16 levels. The diffraction efficiency will reach 92%, and the non-uniformities of the proposed algorithm can reach 3.98% and 2.3% for the conventional and quadrupole illumination modes, respectively. The received efficiency for customized DOE is 91%, and its pattern recovery

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2014-08-30

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX020402)、国家国际科技合作专项(2011DFR10010)、上海市青年科技英才扬帆计划(14YF1406300)

作者简介: 宋 强(1987—),男,硕士研究生,主要从事光刻机光瞳整形技术和全息显示技术方面的研究。

E-mail: songqiang@siom.ac.cn

导师简介: 朱 菁(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光刻技术和微光学元件与系统方面的研究。

E-mail: zhuj@siom.ac.cn(通信联系人)

error is 5.8%. It provides a practical method of DOE design in projection lithography system.

**Key words** optical design; optical lithography; pupil shaping; diffractive optical element design; partial coherence

**OCIS codes** 220.2945; 050.1970; 110.3960; 260.1960

## 1 引 言

光刻技术的发展深刻影响了超大规模集成电路的集成水平。随着光刻特征尺寸不断减小,科研人员提出了多种分辨率增强技术,如相移掩模技术、离轴照明技术、光学邻近效应校正和偏振光照明等,使得光学光刻技术的生命力不断延伸。而目前应用最广且最有效的方法是通过离轴照明达到分辨率增强的目的<sup>[1]</sup>。光刻机需要针对不同的掩模结构,采用源掩模优化方法设计出最有效的照明模式,以增强光刻分辨率、增大焦深、提高成像对比度,从而提高光刻性能,而这些照明模式就是通过光瞳整形技术来实现的<sup>[2]</sup>。光刻机中常见的照明模式有传统照明、环形照明、二极照明、四极照明、自由照明等。目前,主流光刻机都采用衍射光学元件(DOE)实现各种照明光瞳,主要原因在于 DOE 是纯相位元件,其自由度比较大,针对复杂的图像也能够较为容易实现,这是普通折射或者反射器件所不能具备的特点。DOE 对于入射光束振幅的扰动不敏感,有利于提高照明光场的稳定性。但是,现有光瞳整形用 DOE 依然存在效率提升以及降低散斑噪声的性能要求,以满足日益减小的光刻特征尺寸<sup>[3-4]</sup>。

光瞳整形用 DOE 设计是一种相位恢复过程,即在已知输出振幅、输入振幅和相位条件下求解 DOE 的相位。由于光瞳整形 DOE 的数值孔径(NA)通常小于 0.2,因此可以认为是标量衍射条件下的相位恢复过程。针对这种 DOE 设计,早在 20 世纪 70 年代,Gerchberg 和 Saxton 就提出了 GS 算法,GS 算法是一种投影映射迭代算法,设计结果依赖于初始相位,针对简单的图像收敛速度较快,但是图案稍微复杂时其收敛速度变慢,图案的均匀性不高。许多学者针对以上问题提出了多种修正的 GS 算法,以控制误差、提高均匀性<sup>[5-12]</sup>。但是这些算法均未对相位优化方向进行控制,迭代过程容易陷入局部极值。此外,在实际的光刻机系统中,光源是空间部分相干的,针对相干光的整形已经有很多研究,而针对部分相干光的整形还相对较少。针对以上问题,本文提出了一种混合梯度下降与振幅反馈修正的算法,通过在迭代的过程中引入控制变量,既加快了收敛速度,又提升了衍射效率和信噪比。仿真表明,利用该算法下设计的光瞳整形 DOE 具有较高的衍射效率和较高的光瞳均匀性,适用于高端光刻机的光瞳整形系统。

## 2 理论模型

准分子激光属于空间部分相干光场,其空间相干性可以用部分相干度函数来描述:

$$\gamma(P_1, P_2) = \frac{J(P_1, P_2)}{[J(P_1, P_1)J(P_2, P_2)]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中  $P_1, P_2$  如图 1 所示,是 DOE 上的两个位置,  $J$  代表 DOE 上两位置的互强度。部分相干度表征两个位置光束的相关程度,对于相干光入射来说,部分相干度函数是 1,对于非相干光入射部分相干度是 0,而对于文中的光源准分子激光器,它的值则介于 0~1 之间。

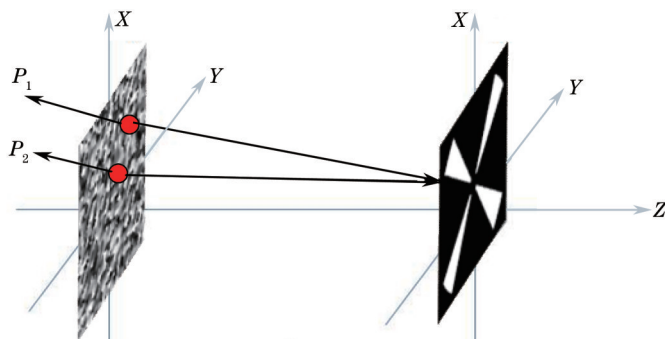


图 1 部分相干光整形原理图

Fig.1 Schematic of beam shaping of partially coherent light

由于光瞳整形单元的 NA 比较小,根据麦克斯韦方程可以知道,此条件下的光场传输满足标量衍射近似。因此部分相干光的传输过程可以利用 Wolf 的衍射积分公式描述<sup>[13]</sup>:

$$I(x_i, y_i) = \iint_{\Omega} \exp[i\varphi_{\text{DOE}}(x_1, y_1)] \exp[-i\varphi_{\text{DOE}}(x'_1, y'_1)] \times \frac{\exp[ik(r_1 - r_2)]}{\lambda^2 r_1 r_2} \gamma(x_1, y_1; x'_1, y'_1) dx_1 dy_1 dx'_1 dy'_1. \quad (2)$$

对(2)式中的指数项进行泰勒展开,并利用傍轴近似,经过一系列推导,可以得到远场光强分布的简化表达式如下:

$$I(x_i, y_i) = \text{FFT}\{\exp[i\varphi_{\text{DOE}}(x_1, y_1)] \exp[-i\varphi_{\text{DOE}}(x'_1, y'_1)]\} \otimes \text{FFT}[\gamma(x_1, y_1; x'_1, y'_1)], \quad (3)$$

(3)式表明部分相干光远场的强度分布是相干光场与部分相干度函数傅里叶变换的卷积,因此将(3)式作为部分相干光远场的衍射传输算子,式中 FFT 代表快速傅里叶变换。光的部分相干性相当于对相干光场进行了低通滤波,对相干光场进行了平滑,因此在光瞳整形领域是有益的。在已知输入场和输出复振幅的情况下,可以先利用相干光通过迭代算法求解出待求相位,再利用(3)式得到部分相干光场的整形结果。基于迭代思想的 DOE 设计,科研人员已经开发出了多种相位恢复算法,例如 GS 算法、混合输入输出算法、自适应加法等其他算法<sup>[5]</sup>。在顾全设计速度和相位恢复质量的情况下,提出一种混合梯度下降与振幅反馈修正的算法。梯度下降是一种加速收敛的算法,已经被应用于相位恢复领域,具体算法可以参见文献[8,11]。振幅反馈修正是一种误差补偿算法,平常设计 DOE 的自由度只关注相位自由度,而没考虑振幅自由度。在介绍该算法之前,定义输出面的信号窗口(S)和噪声窗口(N),如图 2 所示。信号窗口包含理想得到的光强信息。在迭代过程中,将信号区域通过填充零扩展得到一个较大的矩阵。

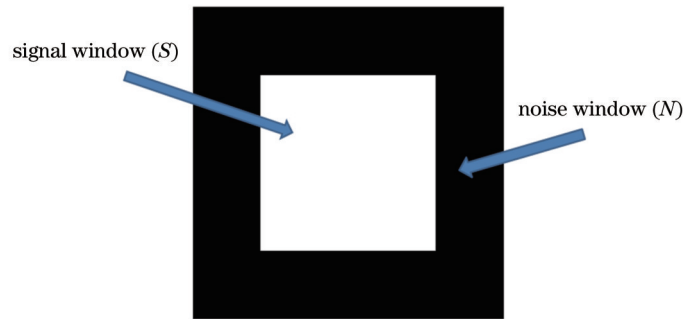


图 2 信号窗口与噪声窗口定义

Fig.2 Definition of signal window and noise window

算法流程图如图 3 所示。入射面的复振幅记为  $E_0$ , 目标面的复振幅记为  $E_2$ 。每次迭代的加权振幅反馈修正振幅  $\rho_{\text{mod}}$  可以记为

$$\rho_{\text{mod}} = (2K|U_{\text{ideal}}| - |E_1|) \exp(i\varphi_1^k) c + (1 - c) U_{\text{ideal}}, \quad (4)$$

式中  $c$  为权重因子,  $U_{\text{ideal}}$  为目标光场振幅分布,  $E_1$  为迭代过程得到的光场振幅分布,  $K$  为

$$K = \frac{\sum |E_1 \in S|}{\sum |U_{\text{ideal}} \in S|}, \quad (5)$$

此外,在流程图中,  $\alpha_k$  和  $h_k$  分别为

$$\begin{cases} \alpha_k = \varphi^k(x_i, y_i) - \varphi^{k-1}(x_i, y_i) \\ t_k = \psi^k(x_i, y_i) - \psi^{k-1}(x_i, y_i) \\ h_k = \sum t_k t_{k-1} / \sum t_{k-1} t_{k-1} \end{cases} \quad (6)$$

该算法可以大致概括为如下步骤:

- 1) 第  $K$  次迭代完成时,取出此时输入面的相位信息,利用已知的输入面振幅构建第  $K+1$  次迭代的初始复振幅;
- 2) 利用 FFT 求得输出面(即傅里叶域)的复振幅,得到幅值信息和相位信息;
- 3) 利用得到的幅值和理想输出面幅值得到新的振幅约束条件,同时保持相位不变,得到新的复振幅;

4)对流程图中  $E_2$  进行逆快速傅里叶变换 (IFFT) 计算,得到输入面的复振幅分布,并提取出此时的相位信息;

5)利用得到的相位信息结合梯度下降理论构建新的相位信息,并将其作为下一次迭代的输入面相位;

6)按照算法流程图进行迭代[即重复步骤 1)~5)],直到目标面的评价函数(在流程图中为  $E$ )达到预期误差或者达到设置的最大迭代次数为止。

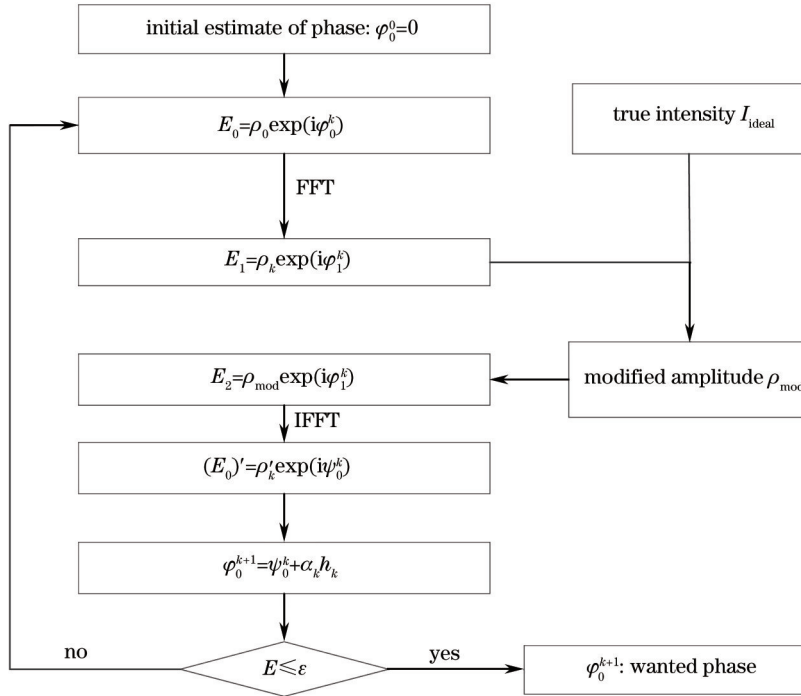


图 3 混合梯度下降算法流程图

Fig.3 Diagram of mixed gradient decent algorithm

对于 DOE 性能的评价包括衍射效率和光强均匀性。其中衍射效率定义为目标区域上的能量分布于总观察区域的能量之比<sup>[14]</sup>:

$$\eta = \frac{I \in S}{I_{total}}, \quad (7)$$

均匀性可以描述为

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_S \left( \frac{I_n - I_{mean}}{I_{mean}} \right)^2}, \quad (8)$$

式中  $I_{mean}$  是目标区域光强的平均值。考虑到衍射效率与均匀性的权衡,在设计中需要综合考虑,满足两者者最优。误差函数定义为

$$E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_S \left( \frac{I_n - I_{ideal}}{I_{ideal}} \right)^2} + \sum_N \left[ \left( \frac{I_n - I_{ideal}}{I_{ideal}} \right)^2 \right], \quad (9)$$

式中  $S$  代表信号窗口区域,  $N$  为噪声窗口区域。当误差函数的数值小于预设误差  $\epsilon$  时,得到 DOE 的相位分布,否则继续迭代过程。

### 3 仿真实验与讨论

根据第二节的原理和设计思想,设计了产生传统照明和四极照明光瞳的 DOE,并分析了其光学性能。考虑到 DOE 的实际加工需要相位台阶化,选取合适的量化台阶数目,文献中研究表明 16 台阶量化时对 DOE 加工的误差敏感度较低<sup>[15]</sup>,因此对设计完成的相位进行了 16 台阶量化。假设远场观察区域大小为 20 mm×20 mm,

远场采样间隔 $\Delta x$ 根据奈奎斯特采样定理表示为

$$\Delta x = \frac{\lambda f}{L}, \quad (10)$$

式中 $\lambda$ 是入射激光波长, $f$ 是傅里叶透镜焦距, $L$ 是 DOE 的通光尺寸。入射光束采用部分相干函数,满足高斯形式:

$$\gamma = \exp\left[-\pi\left(\frac{r}{l}\right)^2\right], \quad (11)$$

式中 $r$ 代表入射面的极坐标, $l$ 是准分子激光器的空间相干长度。

设计一个传统照明的 DOE。激光波长为 193 nm,光束半径为 4 mm,空间相干长度为 100  $\mu\text{m}$ ,傅里叶变换透镜的焦距 $f=1$  m,选取 DOE 的特征尺寸为 1.8  $\mu\text{m}$ 。本次迭代算法中采用权重因子 $c=0.8$ ,迭代过程中的修正振幅 $\rho_{\text{mod}}$ 由每次迭代步骤得到的输出面复振幅 $E_1$ 和目标光场振幅分布 $U_{\text{ideal}}$ 通过(4)式得到, $E_0$ 和 $E_2$ 是每次迭代步骤产生的输入面和输出面的复振幅分布。经过 25 次迭代后,得到如图 4 所示的相位分布。

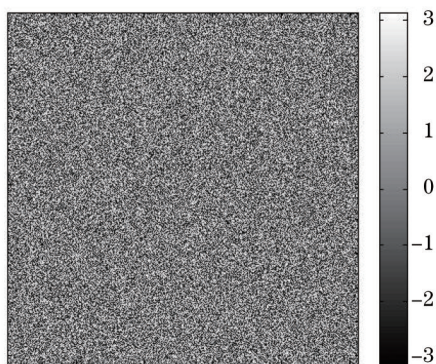


图 4 设计的传统照明光瞳 DOE 的相位分布(未经过台阶量化处理)

Fig.4 Phase map of designed DOE for conventional illumination pupil (without phase quantification)

现在高性能 DOE 的加工主要采用套刻掩模曝光的方法, $n$ 次掩模套刻会形成 $2^n$ 个台阶,考虑到多次套刻会产生套刻误差,因此普遍采用 3~4 次套刻制作 DOE。采用 4 次套刻即 16 台阶进行 DOE 的台阶量化处理,得到相位分布如图 5(a)所示。在台阶化后,对 DOE 的光学性能进行评估。由于光源是部分相干光,远场的分布是相干光场与部分相干函数的卷积。经过计算可以知道此时的传统照明光瞳的非均匀性为 3.98%,衍射效率为 93%,能够满足光刻机光瞳整形系统的设计要求。从图 5(b)中可以发现在迭代过程误差曲线中会出现一些振荡,这些振荡是由这种混合算法特点决定的,目的是为了跳出一些局部极小点,最终优化算法会实现收敛。优化得到的照明光场在图 5(c)和(d)中显示。图 5(d)是对角线上的一维光强分布曲线,可以发现该照明光场具有很好的均匀性,这是由于该 DOE 工作在部分相干光场的准分子激光条件下,因此照明均匀性得到了改善。可见,部分相干照明光场会提高照明的均匀性,有利于降低散板噪声,提高均匀性。此外,所得到的传统照明具有很高的信噪比,有利于减少光刻曝光时产生的杂散光。

设计四极照明 DOE 时,定义四极照明的光瞳参数,如图 6 所示。其中, $\sigma_o$ 是外半径, $\sigma_i$ 是内半径, $\alpha$ 是四极照明光瞳的张角, $\beta$ 是极方位角。假定四极照明光瞳的外半径为 $\sigma_o=4$  mm,内半径 $\sigma_i=2$  mm,极张角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ ,极方位角 $\beta$ 为 $45^\circ$ 。入射光束尺寸和 DOE 的特征尺寸与环形照明的 DOE 一致。

四极照明的入射激光选用和传统照明一样的参数。四极照明 DOE 的特征尺寸为 1.8  $\mu\text{m}$ 和权重因子 $c=0.8$ ,迭代次数 25 次。四极照明 DOE 的设计结果如图 7 所示。结果表明四极照明光瞳的非均匀性为 2.3%,衍射效率为 92%。能够满足光刻机光瞳整形系统的要求。相比此前的混合分区算法<sup>[4]</sup>,在节约设计时间的同时也能够获得可观的照明均匀性,是一种有效的设计方法。和传统照明相比,四极照明光瞳整形具有更好的均匀性,但是效率略有下降。这是由于在评价四极照明非均匀性的时候并未包含照明中心亮点,而传统照明却需要包含中心亮点,由于中心亮点的光强在台阶化后会有所加强,所以传统照明的均匀性有所下降。

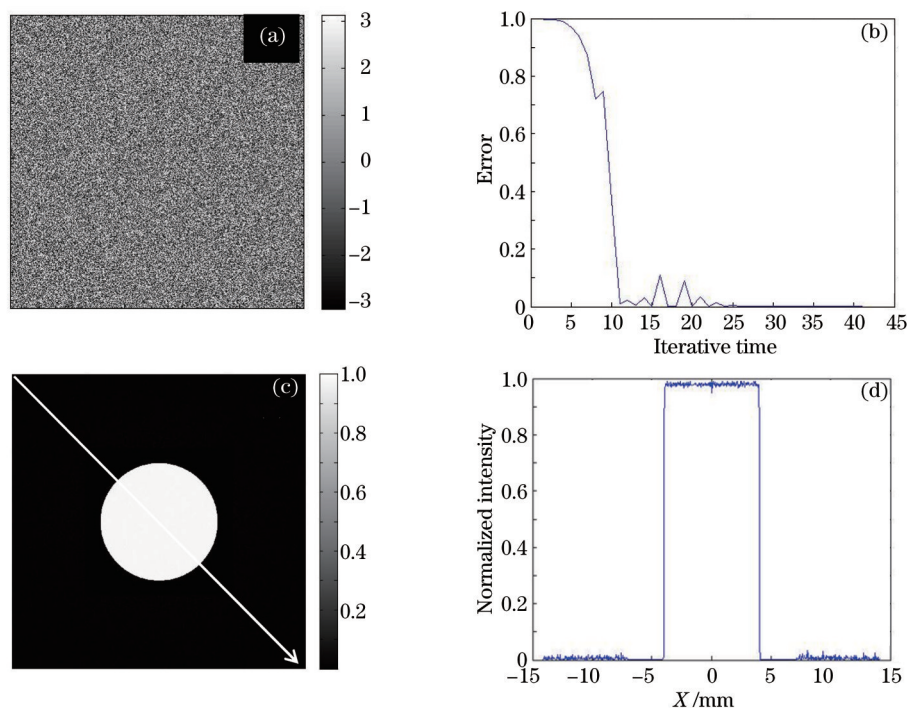


图5 传统照明光瞳 DOE 设计结果。(a)经过 16 台阶量化后的相位分布;(b)评价函数随迭代次数的变化;(c)传统照明光瞳整形效果;(d)传统照明光瞳的一维分布

Fig.5 Design results of conventional illumination pupil DOE. (a) Phase map of conventional illumination pupil after phase quantification with 16 steps; (b) error curve against iterative times; (c) far field intensity distribution; (d) intensity distribution along diagonal of designed conventional illumination pupil

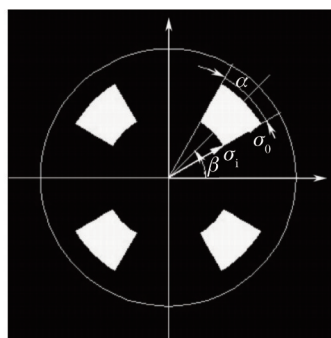


图6 四极照明光瞳参数

Fig.6 Definition of the quadrupole illumination pupil

在混合梯度下降算法中,权重因子  $c$  的选择将影响设计的结果。以(9)式作为评价函数,根据(4)式中的修正振幅表达式,选择了不同的权重因子。以四极照明为例,经过计算得到的信号窗口误差随迭代次数的变化如图 8 所示,可以发现当权重因子  $c$  为 1 和 0.5 时,曲线振荡剧烈,要经过多次迭代才能收敛,即便这种情况下误差能收敛到一个很好的结果,但是这种情况下每次迭代前后相位变化较为剧烈。而经过多次尝试,当  $c$  为 0.8 时,误差的下降曲线较为平滑,收敛速度明显加快,因此在设计中选择  $c=0.8$  为权重因子。与传统的 GS 迭代算法相比,大大减少了设计时间的同时并且能收敛到一个好的结果。

梯度下降的主要思想是将当次的迭代值和上一次的迭代值之差作为梯度方向,将作为迭代的附加值,寻找迭代过程中误差最小的下降方向,从而达到加速算法快速收敛的目的。同时梯度下降算法的引入有可能为减少衍射光学元件相位突变提供了帮助,从而有利于图像恢复的准确性<sup>[6]</sup>。另一方面,振幅限制的主要思想是利用当次迭代得到的振幅值和期望得到的理想振幅值获取一个输出面(即傅里叶域)新的振幅约束条件,其中的表达式为(4)式。振幅限制在本质上可表述为,在每次迭代过程中,当得到的输出面信号窗口振

幅小于信号窗口理想振幅分布时,利用调制因子得到一个较大的,更加接近信号窗口理想振幅分布的振幅分布;同样,当得到的输出面信号窗口振幅大于理想信号窗口的振幅分布式,利用调制因子得到一个较小的,更加接近信号窗口理想振幅分布的振幅分布,从而提高相位恢复图像的准确度<sup>[17]</sup>。

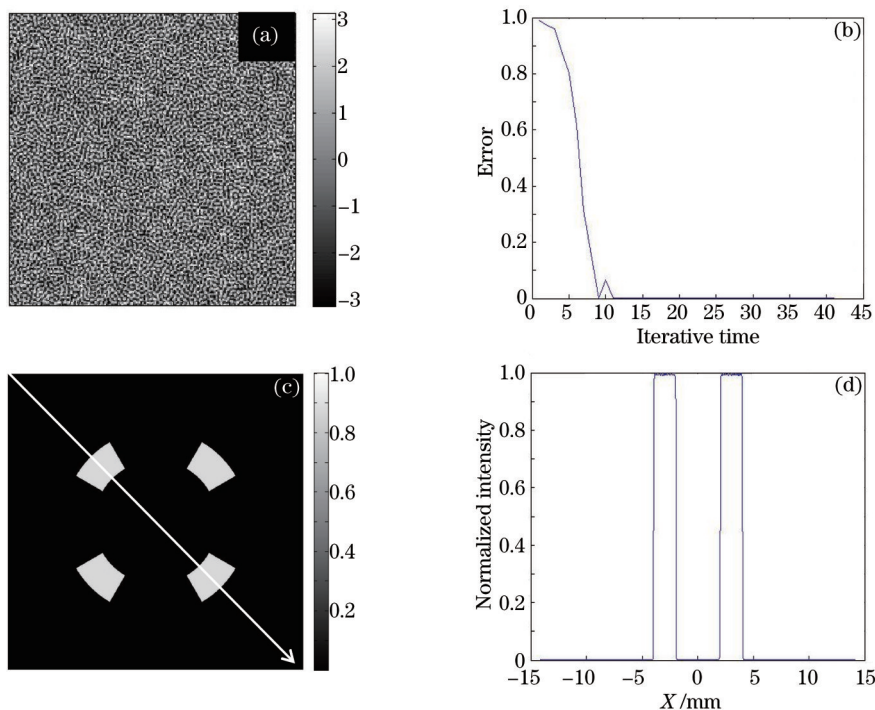


图7 四极照明光瞳设计结果。(a)经过 16 台阶量化后四极照明的相位;(b)评价函数随迭代次数的变化;(c)四极照明光瞳整形效果;(d)四极照明光瞳沿对角线分布

Fig.7 Design results of quadrupole illumination pupil. (a) Phase map of quadrupole illumination pupil after phase quantification with 16 steps; (b) error curve against iterative times; (c) far field intensity distribution; (d) intensity distribution along diagonal of designed quadrupole illumination pupil

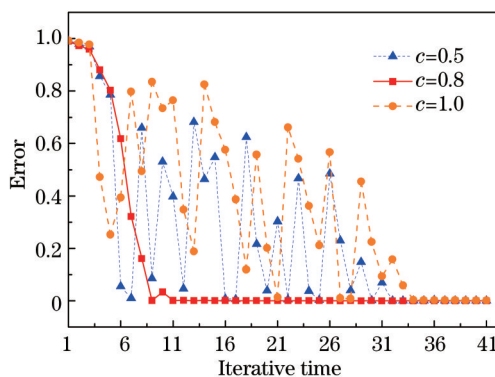


图8 选取不同权因子时,信号区域的误差随迭代次数的变化

Fig.8 Error in signal area against iterate times with different weight factor

针对 45 nm 以下曝光节点如 22 nm 节点的光刻机,照明光瞳需要利用源掩模优化方法得到,采用这种定制的照明光瞳来提高曝光分辨率和焦深。但是随着曝光节点的不断缩小,光瞳的不匹配也将引起 CD 均匀性的变化以及曝光焦深的改变,因此对照明光瞳的图形准确性也提出了很高的要求<sup>[18]</sup>。采用本算法对文献中提供的定制照明模式进行了 DOE 设计。激光器的参数和传统照明一样,定制照明 DOE 的特征尺寸为 1.8  $\mu\text{m}$ ,权重因子  $c=0.8$ ,迭代次数 40 次,结果如图 9 所示,图 9(a)是 16 台阶量化后的相位分布。图 9(b)是理想的定制照明光瞳分布,图 9(c)是得到的定制照明光瞳分布,从图 9(b)和(c)的对比可以看出所得到的光瞳分布具有图形恢复准确度高和杂散光少的特点,从图 9(d)中也可以看出迭代算法实现了快速收敛,并且迭代 40 次后,通过(9)式计算

得到图形误差为 5.8%, 此外衍射效率为 91%。该算法设计结果表明, 本算法能够为 22 nm 节点光刻的自由照明光瞳设计提供一个可供参考的思路。下阶段将对实际设计的光瞳分布进行光刻仿真, 研究是否能够满足 90~22 nm 的光刻要求。

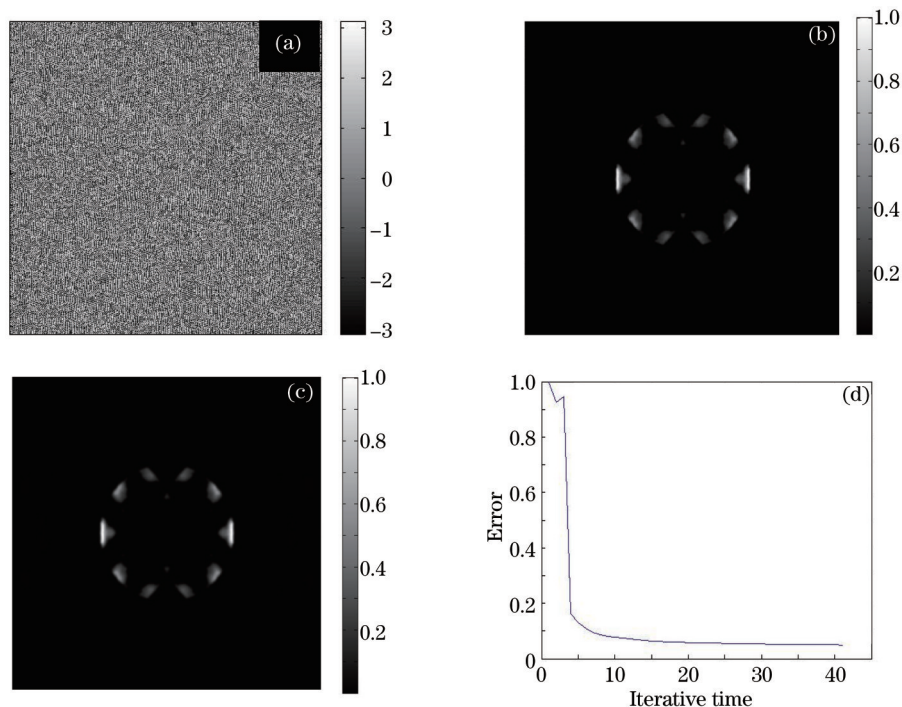


图9 定制照明光瞳设计结果。(a)经过 16 台阶量化后定制照明 DOE 的相位;(b)目标定制照明光强分布;(c)设计得到的定制照明光强分布;(d)评价函数随迭代次数的变化。

Fig.9 Design results of customized illumination pupil. (a) Phase map of customized illumination pupil after phase quantification with 16 steps; (b) expected far field intensity distribution; (c) designed far field intensity distribution; (d) error curve against iterative times

## 4 结 论

为了加速迭代过程并且获取高的整形质量, 提出了一种混合梯度下降算法。设计结果表明, 利用该算法设计的 DOE 能够获得较高的光瞳均匀性和衍射效率。传统照明光瞳的非均匀性为 3.98%, 四极照明光瞳的非均匀性为 2.3%, 衍射效率均大于 92%, 自由照明光瞳的图形恢复误差为 5.8%, 衍射效率为 91%, 在较少的迭代次数内得到可观的设计结果。设计结果表明, 该算法解决了深紫外光刻机光瞳整形衍射光学元件不能同时提高衍射效率和信噪比的问题。

## 参 考 文 献

- 1 Hu Zhonghua, Yang baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Pupil shaping techniques in high resolution projection exposure tools [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111101.  
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 高分辨投影光刻机光瞳整形技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111101.
- 2 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography [J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23~25  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-15.
- 3 Zhang Wei, Gong Yan. Vector analysis of diffractive optical elements for off-axis illumination of projection lithography system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005002.  
张 巍, 巩 岩. 投影光刻离轴照明衍射光学元件的矢量分析[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005002.
- 4 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.  
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 5 Oliver Ripoll, Ville Kettunen, Hans Peter Herzig. Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping application [J].



- Opt Eng, 2004, 43(11): 2549–2556.
- 6 Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical element for off-axis illumination in projection lithography [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2081–2086.  
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明衍射光学元件设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2081–2086.
- 7 R W Gerchberg, W Q Saxton. A practical algorithm for determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237–246.
- 8 J R Fineup. Iterative method applied to image reconstruction and to computer generated holograms [J]. Opt Eng, 1980, 19(3): 297–306.
- 9 F Wyrowski, O Bryndahl. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography [J]. J Opt Soc Am A, 1986, 5(7): 1058–1065.
- 10 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. New methods for improving the quality of laser beam shaping [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0116002.  
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0116002.
- 11 Huang Lixin, Yao Xin, Cai Dongmei, *et al.*. A high accuracy and fast iterative algorithm for phase retrieval [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1218–1221.  
黄利新, 姚新, 蔡东梅, 等. 一种快速高精度的相位恢复迭代算法[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1218–1221.
- 12 J S Liu, M.R. Taghizadeh. Iterative algorithm for the design of diffractive phase element for laser beam shaping [J]. Opt Lett, 2002, 27(16): 1463–1465.
- 13 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. Oxfordcity: Cambridge University Press, 1999. 512–512.
- 14 Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, *et al.*. Measurement of diffraction efficiency of diffractive optical elements [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412007.  
杨亮亮, 崔庆丰, 刘涛, 等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412007.
- 15 Keiji Fuse, Takayuki Hirai, Toshihiko Ushiro, *et al.*. Design and performance of multilevel phase fan-out diffractive optical element for laser materials processing [J]. Journal of Laser Application, 2003, 15(4): 246–254.
- 16 Lü Yanfei, Dong Yuan, Li Shutao, *et al.*. Modified algorithm for designing of diffractive optical element to decrease the phase singular spots [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0505001.  
吕彦飞, 董渊, 李述涛, 等. 一种用于减少相位突变点的衍射光学元件改进设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0505001.
- 17 Yin Shen, Tao Shaohua. Technique based on image superposition for optical image storage and reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1205002.  
尹坤, 陶少华. 基于图像叠加的光学图像存储与恢复[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1205002.
- 18 Christof Bodendorf, Ralph E Schliefl, Ralf Ziebold. Impact of measured pupil illumination fill distribution on lithography simulation and OPC models [C]. SPIE, 2004, 5377: 1130–1145.

栏目编辑: 韩峰