

投影光刻离轴照明用衍射光学元件的矢量分析

张 巍 巩 岩*

(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)

摘要 使用衍射光学元件(DOE)作为投影光刻照明系统实现离轴照明(OAI)的光束整形匀光器件,能够在保持较高照明效率的基础上精确控制 OAI 光束的形状及光强分布。在矢量角谱传输方法的基础上,建立了投影光刻用 DOE 的矢量分析模型,并对标量方法设计的 DOE 在偏振照明情况下的匀光与整形性能进行了分析。分析结果表明 DOE 在大角度衍射、单元尺寸与工作波长相近条件下,一般标量近似条件已不满足,仍采用标量迭代方法进行 DOE 设计,则计算结果存在较大误差。

关键词 衍射;衍射光学元件;光束整形;矢量角谱;偏振

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1005002

Vector Analysis of Diffractive Optical Elements for Off-Axis Illumination of Projection Lithographic System

Zhang Wei Gong Yan

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

Abstract Diffractive optical element (DOE) which maintains beam shape and intensity distribution precisely with high efficiency of the source is used as the beam shaping and smoothing element for the off-axis illumination (OAI) of lithographic system. A vector analyzing model of DOE for lithography is established based on vector angular-spectrum method, and the performance of DOE designed by using scalar algorithm such as uniformity and beam shaping is analyzed. The results show that the scalar approximation cannot fit the requirement when the diffraction angle of DOE is large and the dimension of DOE is reduced to the working wavelength, or large error of calculations will be caused.

Key words diffraction; diffraction optical element; beam shaping; vector angular spectrum; polarization

OCIS codes 050.1970; 140.3300; 110.4235

1 引 言

为满足超大规模集成电路特征尺寸不断缩小的需求,投影光刻技术得到了迅速发展。如何提高投影光刻系统的分辨率和成像质量成为研究的热点。由瑞利判据可知,系统分辨率 $R = k_1 \lambda / NA$ ^[1], 式中 k_1 为工艺因子, λ 为曝光波长, NA 为数值孔径。提高投影光刻系统分辨的方法主要是降低 k_1 和 λ , 增大 NA 。但 λ 和 NA 的改变存在诸多的限制, 因此在其一定的情况下必须采用通过降低 k_1 因子的分辨率

增强技术(RET)才能进一步延展系统的分辨率极限^[2]。离轴照明(OAI)作为一种重要的分辨率增强技术最早由日本学者于 1991 年提出^[3,4], 它不仅能提高分辨率而且能够明显改善系统焦深, 因此在投影光刻系统中得到了广泛地应用。常用的 OAI 方式有环形、偶极和四极照明等。近年来, 为满足光刻图形线宽的不断缩小和实现特殊图形曝光的要求, 需要采用一些特殊的 OAI 方式, 如 J. Finders 等^[5]提出的 Bulls-Eye 照明方式, 对于特定的光刻图形

收稿日期: 2011-04-19; 收到修改稿日期: 2011-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(40974110)资助课题。

作者简介: 张 巍(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事衍射光学和短波段光学技术等方面的研究。

E-mail: zhangw@sklao. ac. cn

* 通信联系人。E-mail: gongy@sklao. ac. cn

能够改善曝光的工艺窗口,有效地提高投影曝光的成像质量。OAI 可通过在光刻机照明系统中加入光束整形元件来实现。衍射光学元件(DOE)具有在保持较高照明效率的同时可对光强分布进行精确控制的优点,有利于提高照明均匀性,因此 DOE 成为实现 OAI 的理想光束整形元件。文献[6]采用基于标量衍射理论的迭代方法,设计了能够产生偶极、四极和 Bulls-Eye 等多种复杂照明方式的 DOE,具有良好的光束整形和匀光能力。

目前,用于实现 OAI 的 DOE 设计一般采用基于标量光束传输理论的设计方法,忽略了光束的矢量特性,即不同方向偏振光束传输的差异。但是,随着 DOE 衍射角度增大、单元尺寸不断缩小,这种标量近似会给设计带来较大的计算误差,因此需要对设计的 DOE 进行矢量特性分析。此外,为提高曝光分辨率,偏振照明在投影光刻曝光系统中广泛使用,这也要求在 DOE 设计过程中充分考虑光束的矢量特性,所以分析 DOE 在偏振光束照明情况下的矢量性能有很重要的实际意义。本文基于光束的矢量角谱传输方法建立了实现 OAI 的 DOE 矢量分析模型,并对标量方法设计的 DOE 在偏振照明情况下的匀光与整形性能进行了系统分析。

2 光束矢量角谱传输方法

2.1 平面波角谱方法

平面波角谱方法是一种常用且有效的计算光束传输问题的方法^[7],如对于沿 z 向传播的光场,设 $z = 0$ 处的光场复振幅为 $U(x, y, 0)$,求解 $z = L$ 处的光场复振幅分布 $U(x, y, L)$ 。采用角谱方法首先对复振幅分布 $U(x, y, 0)$ 做傅里叶分解:

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) = \iint U(x, y, 0) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy, \quad (1)$$

则各个空间傅里叶分量 $A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right)$ 可以看作是沿方向余弦为 (α, β, γ) 传播的平面波,其中 $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}$ 。当光场沿 z 向传播距离 L 时,对于 $z = L$ 处的各角谱分量可通过求解无源场的亥姆霍兹方程

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; L\right) = A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} L\right) \quad (2)$$

得到,各平面波分量在 z 向传播距离 L 后只是改变

了角谱分量的相对相位,由于各平面波分量在不同角度上传播,因此传输的距离各不相同,引入的相位延迟也不同。对于 $z = L$ 平面上的光场复振幅分布 $U(x, y, L)$,可以将引入相对相位延迟后的各平面波分量 $A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; L\right)$ 的贡献求和而得到,即利用

$$U(x, y, L) = \iint A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; L\right) \times \exp\left[j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda}, \quad (3)$$

对 $A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; L\right)$ 进行傅里叶逆变换获得。

2.2 矢量角谱方法

平面波角谱方法中并没有考虑光束的偏振特性,因此属于标量理论范畴。矢量角谱方法由 Zhao 等^[8]提出并用于光束整形与均匀照明问题。该方法是在标量角谱理论的基础上加入了对光束偏振方向变化的讨论,从而将标量平面波角谱方法拓展到矢量领域,解决光场的矢量传输问题。其具体方法是在(1)式各角谱分量传输过程中引入偏振变化因子 ψ_{ab} ,其中下标 a 代表入射光偏振分量, b 代表偏折后光束的偏振分量。对于沿 z 方向入射的光场,存在 x , y 方向偏振分量,即 $a = x, y$ 。当光场发生偏折后,偏振方向仍垂直光束传播方向,则相对于原坐标系, $b = x, y, z$ 。 z 方向传播的平面波偏折后,各偏振分量的变化因子 ψ_{ab} 可由偏折后光束的方向余弦 (α, β, γ) 通过简单的几何关系得到,如表 1 所示。

表 1 z 方向传播的平面波沿方向余弦 (α, β, γ) 偏折后各偏振分量的变化因子

Table 1 Polarized components' variable factors of plane wave propagating along the z direction and deflecting along the direction cosine (α, β, γ)			
ψ_{ab}	$b = x$	$b = y$	$b = z$
$a = x$	$1 - \alpha^2 / (1 + \gamma)$	$-\alpha\beta / (1 + \gamma)$	$-\alpha$
$a = y$	$-\alpha\beta / (1 + \gamma)$	$1 - \beta^2 / (1 + \gamma)$	$-\beta$

由于各角谱分量 $A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right)$ 可以看作是入射光束沿一定方向偏折后传播的平面波,其传播的方向余弦为 (α, β, γ) 。因此,各角谱分量的偏振分量 $A_b\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right)$ 可由

$$A_b\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) = \iint U_a(x, y, 0) \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy \cdot \psi_{ab}, \quad (4)$$

得到,将 $A_b\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right)$ 代入到(2), (3) 式即可得到 $z=L$ 处光场复振幅分布的各偏振分量 $U_b(x, y, L)$, 则总的复振幅分布为

$$U(x, y, L) = U_x(x, y, L)\hat{x} + U_y(x, y, L)\hat{y} + U_z(x, y, L)\hat{z}.$$

由于,各偏振方向上的复振幅为非相干叠加,因此该平面的光场强度分布为

$$I(x, y, L) = |U_x(x, y, L)|^2 + |U_y(x, y, L)|^2 + |U_z(x, y, L)|^2.$$

3 DOE 设计及矢量特性分析

3.1 实现偶极照明的 DOE 设计模型

对于已知的输入光场复振幅,通过 DOE 对该光场进行调制,使得在特定输出平面上可以得到所需的光场光强分布。DOE 被简化为仅对入射波相位进行调制且没有厚度的纯相位元件,其相位分布为 ϕ_{DOE} 。

实现 OAI 的 DOE 设计模型如图 1 所示。入射光为沿 z 向传播的平面波,垂直入射到 DOE 上,并在距离 L 处的目标平面上获得所需光强分布,计算中设 DOE 入射光场窗口尺寸为 D_i ,目标平面上光场输出窗口尺寸为 D_o ,DOE 相位单元尺寸为 d ,一维方向上取样点数为 N ,则 DOE 单元总数为 N^2 。对于偶极照明模式,目标平面上所需的理想光场光强分布如图 2 所示,照明区域光斑外半径为 σ_o ,内半径为 σ_i ,极角为 θ ,照明区域光斑的光强为均匀分布。

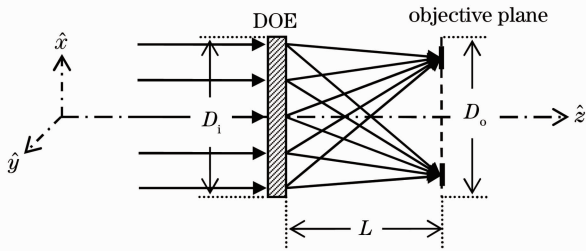


图 1 实现 OAI 的 DOE 光学装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DOE optical setup to realize OAI

由于 DOE 的衍射能力主要取决于元件的单元尺寸 d ,最大衍射角度 φ 可由公式 $d \sin \varphi = \lambda$ 进行估算。为了在相同设计要求及计算精度下,对比最小相位单元尺寸 d 不同时,DOE 光束整形和匀光能力的差异以及光束偏振效应对 DOE 整形和匀光能力的影响,在设计时需使不同单元尺寸 d 的 DOE 具有相同的衍射角度要求,以便于设计结果的对比。即

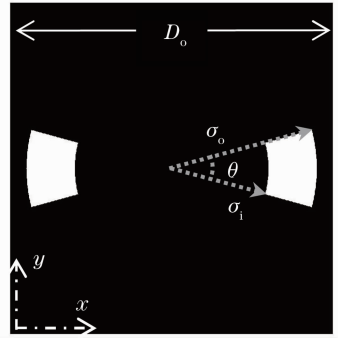


图 2 目标平面理想光强分布

Fig. 2 Ideal intensity distribution on objective plane

在 DOE 设计时,设定输入与输出面采样点数 $N=1000$,则 DOE 单元数目均为 10^6 ;虽然单元尺寸 d 不同使得各输入、输出面窗口尺寸 $D_i = D_o = Nd$ 数值不同,但均取 $L = D_o$,以保证 DOE 的最大衍射角度均为 $\varphi \approx \tan^{-1}(D_o/L) = 45^\circ$ 。本文所设计的 DOE 工作波长均为 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 。目标平面上的偶极照明光斑外半径均取 $\sigma_o = 0.45D_o$,光斑内半径 $\sigma_i = 0.3D_o$,极角 $\theta = 30^\circ$ 。

3.2 标量衍射方法设计结果

采用一般的标量设计方法进行了不同单元尺寸 d 的 DOE 设计。用于 DOE 设计的迭代方法很多,如 GS 算法^[9]、I-O 算法^[10]、相位混合算法^[11]、分步迭代算法^[12] 和自适应加法算法^[13] 等。采用基于标量角谱理论的分步迭代算法进行设计,对于目标平面的光束整形和匀光效果,采用所得光强分布与理想光强分布的均方根误差

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{N^2} (I_{\text{design}} - I_o)^2 / (N^2 - 1)}{}}$$

和照明效率 η (照明区域光斑能量占总能量的比) 来进行评价,其中 I_{design} 为设计所得目标平面上的光强分布, I_o 为目标平面上的理想光强分布。由于上述均方根误差的计算是对整个输出面的光场分布与目标光强分布的偏差进行评价,因此该均方根值同时包含了输出面均匀性与整形形状的偏差。

根据上述 DOE 设计模型,当设定最大衍射角 $\varphi \approx 45^\circ$ 的大角度衍射时,由 $d \sin \varphi = \lambda$ 估算,单元尺寸 $d_o \approx 273 \text{ nm}$ 。因此,在标量设计中 DOE 单元尺寸 d 在 $270 \sim 400 \text{ nm}$ (约 $1.5d_o$) 每间隔 10 nm 取值进行设计,迭代次数均为 200 次,设计结果如图 3 所示。由图 3 可见,随着 DOE 单元尺寸 d 的减小,DOE 对于入射光束的调制能力增强,对光束整形匀光能力及照明效率都明显提高,光强均方根误差由 400 nm 的 0.0801 降为 270 nm 时的 0.0359 ,照明

效率由 400 nm 的 73.47% 提高为 270 nm 时的 82.73%。因此,从标量方法的角度,对于大角度衍

射情况,减小 DOE 单元尺寸 d 来提高 DOE 性能是十分有效的。

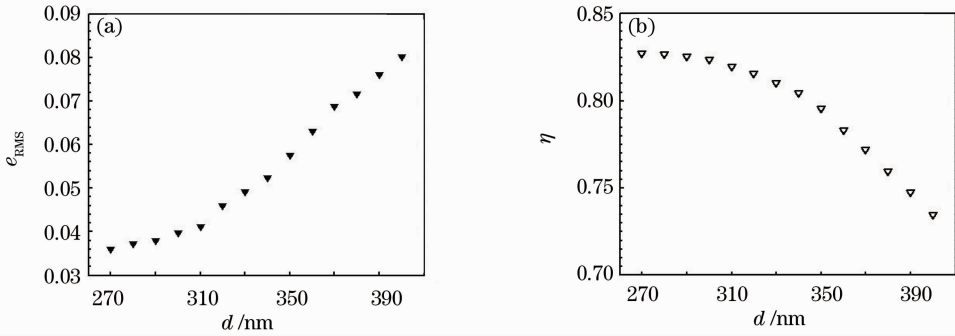


图 3 不同单元尺寸 DOE 的 (a) 光斑均方根误差和 (b) 照明效率

Fig. 3 Comparison of the (a) e_{RMS} and (b) η with different DOE dimensions

$d=270$ nm 的 DOE 在目标平面上的光强分布如图 4 所示,在目标平面上光斑形状得到了很好地控制,过中心沿 x 方向的光强分布显示在 OAI 区域实现了均匀照明。从以上数据结果看,采用标量方法设计得到的 DOE 已较为理想。

面的光强分布。分析中设入射平面的平面波为 y 方向偏振情况,由图 5 可见,矢量计算结果光斑形状依然得到良好的控制,DOE 的光束整形能力与标量方法计算结果基本一致,照明效率为 82.63%,与标量方法计算结果的 82.73% 相差不大。但是矢量计算结果的光斑均匀性却呈现明显的劣化,OAI 光斑区域各空间采样点上光场强度的差异幅度明显加大,矢量计算结果光强均方根误差为 0.0595,较标量计算结果 0.0359 劣化了 65.74%。这说明在该种情况下,标量设计方法中的标量近似误差较大,标量设计结果与实际 DOE 的性能可能会出现较大的偏差。

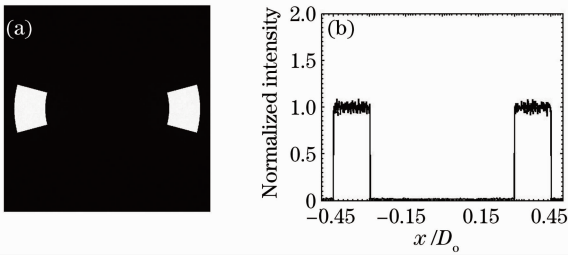


图 4 用于实现偶极照明的 DOE 标量设计结果 (a) 目标平面光强分布和 (b) 通过其中心的水平方向一维光强分布
Fig. 4 (a) Intensity distribution on objective plane and (b) one-dimensional intensity distribution of DOE through the centre of which for dipole illumination by scalar design

3.3 设计结果的矢量分析

未考虑入射光束的偏振特性的标量衍射方法理论设计结果比较理想,但是在在大角度衍射、单元尺寸 d 与工作波长相近情况下,标量衍射理论中的标量近似所引起的计算误差将增大,上述结果是否真实反应了各矢量方向上的光场分布情况,在 d 减小到何值时计算误差究竟有多大,需要对上述标量设计结果进行矢量性能分析来加以确定。此外,在实际投影光刻曝光系统中一般需要采用偏振光束照明,如对于 x 方向的偶极照明主要用于 y 方向的线条曝光,为进一步提高分辨率,通常配合 y 方向的偏振照明使用,因此对于 DOE 的矢量性能分析是十分必要的。采用基于矢量角谱理论的光束传输方法,分析了已设计的 $d=270$ nm 的 DOE 在目标平

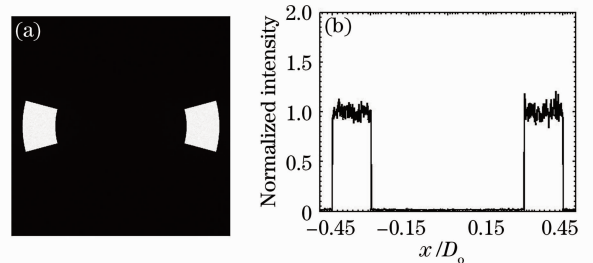


图 5 用于实现偶极照明 DOE 矢量分析结果。(a) 目标平面光强分布及 (b) 通过其中心的水平方向一维光强分布
Fig. 5 (a) Intensity distribution on object plane and (b) one-dimensional intensity distribution of DOE through the centre of which for dipole illumination by vector analyzing

由图 4 和 5 可见,标量理论引入的标量近似所导致的计算误差主要影响目标光场光斑的均匀性,而对于照明效率和 DOE 整形后光斑的形状影响不大。因此,重点对不同 d 值的 DOE 在目标平面的光强均方根误差进行了矢量方法的分析。由图 6(a) 可见,矢量分析得到的 e_{RMS} 与标量设计结果的误差随着 DOE 单元尺寸 d 的减小而不断增大。

从矢量分析结果的 e_{RMS} 随 d 的变化规律来看, $d = 270 \text{ nm}$ 的 DOE 光强均方根误差在考虑光束偏振的实际情况下其性能还不如更大单元尺寸的 DOE。当然这并不与上述大角度衍射时, 减小 DOE 单元尺寸, 能够增加元件对入射光束的衍射能力, 提高 DOE 性能这一结论相矛盾, 而仅是说明当前的标量

设计结果误差较大, 需要利用矢量分析和设计方法进一步优化。由图 6(b) 可见, 随着 d 值的不断增大, 标量方法获得的光强分布均方根值误差的相对误差逐渐缩小。当 $d = 400 \text{ nm}$ 时相对计算误差已小于 1%, 即此时标量近似所引入的相对计算误差较小, 一般已可以忽略。

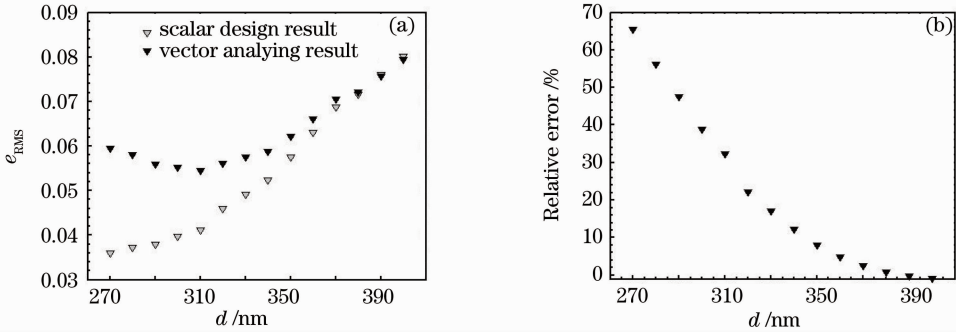


图 6 不同单元尺寸 DOE。(a) 使用两种方法设计的 e_{RMS} 对比和 (b) 标量方法的相对计算误差

Fig. 6 (a) Comparison of the tow methods' e_{RMS} and (b) relative error of e_{RMS} is scalar design of different DOE dimension

4 结 论

减小 DOE 单元尺寸, 能够增加 DOE 对入射光束的衍射能力, 有利于缩短照明系统尺寸、满足不同的照明数值孔径要求。同时, 在相同衍射角情况下, DOE 单元线宽越窄, 元件对入射光束的整形和匀光能力越强, 可以有效提高 DOE 的性能。但是在在大衍射角度条件下, 如 $\varphi \approx 45^\circ$ 时, 需要 DOE 单元尺寸与工作波长相近, 光束偏振效应对 DOE 整形和匀光效果的影响已不能忽略。采用标量设计方法虽然可以获得好的数值设计结果, 但是通过矢量方法的验证, 由于标量方法的近似使得设计结果存在较大计算误差, 特别是照明均匀性存在明显的劣化, 总的光强分布的 e_{RMS} 的相对计算误差已超过 60%, 已不能真实反映出实际光场的分布情况。因此, 在实际的光刻 OAI 用 DOE 的设计以及考察偏振照明条件下 DOE 的性能时, 可以采用上述的矢量分析方法对 DOE 的矢量性能进行评估, 为矢量化设计和照明系统的矢量分析提供量化的数值参考。此外, 在矢量分析模型的基础上, 基于矢量角谱理论可以进一步结合相关优化算法^[14~16], 开展投影光刻 OAI 用 DOE 矢量迭代设计方法的研究, 实现 DOE 的矢量化设计。

参 考 文 献

- 1 H. J. Levinson. Principles of Lithography [M]. Bellingham Washington, SPIE Press, 2001. 19~38
- 2 Ronse Hurt, Luc Van Den Hove. Resolution enhancement

- techniques in optical lithography [C]. Semiconductor Fabtech, London, Henley Publishing Trans-world House, 1999; 241~244
- 3 M. Noguchi, M. Muraki, Y. Iwasaki *et al.*. Sub-half micron lithography system with phase shifting effect [C]. *SPIE*, 1992, **1674**: 92~96
- 4 N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi *et al.*. New imaging technique for 64M-DRAM [C]. *SPIE*, 1992, **1674**: 741~746
- 5 J. Finders, A. Engelen, G. Vadenberghe *et al.*. Experimental evaluation of bulls-eye illumination for assist-free random contact printing at sub-65nm node [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 615412
- 6 Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffraction optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(11): 2081~2086
- 张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2081~2086
- 7 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kecheng Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 50~53
- J. W. Goodman. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 50~53
- 8 Y. Zhao, Y. Li, Q. Zhou. Vector iterative algorithm for the design of diffractive optical elements applied to uniform illumination[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 664~666
- 9 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237~246
- 10 J. R. Fienup. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms [J]. *Optical Engineering*, 1980, **19**(3): 297~305
- 11 X. G. Deng, Y. P. Li, Y. Qiu *et al.*. Phase-mixture algorithm applied to design of pure phase elements [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **B4**(5): 447~454
- 12 Zhang Wei, Zhang Xiaobo, Shu Fangjie *et al.*. Design of diffractive optical elements by step iterative algorithm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**: 1665~1668
- 张巍, 张晓波, 舒方杰等. 采用分步迭代法设计制作衍射光学元件[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**: 1665~1668
- 13 Wen Changli, Ji Jiaorong, Dou Wenhua *et al.*. The ameliorated adaptive-additive method and its applying in the designing of

- diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2473~2477
- 温昌礼, 季家镛, 窦文华 等. 改进的自适应加法算法及其在衍射光学元件设计中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2473~2477
- 14 W. Wang, T. Li, Y. P. Li. A hybrid algorithm for the design of DOE in uniform illumination [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **18**1(4-6): 261~265
- 15 Zhang Wei, Shu Fangjie, Zhang Xiaobo *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive optical elements in uniform illumination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 张 巍, 舒方杰, 张晓波 等. 均匀照明用衍射光学器件的空间频域优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1388~1392
- 16 Cheng Kan, Tan Qiaofeng, Zhou Zhehai *et al.*. Design of three-dimensional superresolution diffractive optical elements for radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3295~3299
- 程 侃, 谭峭峰, 周哲海 等. 径向偏振光三维超分辨衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3295~3299