

# 基于 Sigmoid 函数的离轴照明光源全参数解析模型\*

刘 巍<sup>1)</sup> 刘世元<sup>1)2)†</sup> 吴小飞<sup>1)</sup> 张传维<sup>1)</sup>

1) (华中科技大学武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

2) (华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

(2010 年 12 月 9 日收到; 2010 年 12 月 29 日收到修改稿)

本文提出一种全面描述光刻机离轴照明光源物理分布特性的全参数解析模型, 该模型采用 Sigmoid 函数作为构造各种主流离轴光源解析模型的核心函数. 提出通过加入光源全参数修正项来表征真实光源的各种物理畸变和偏差, 全参数修正项可展开为傅里叶级数形式, 相应级次的傅里叶系数具有特殊的物理意义, 可分别代表偏心、倾斜、椭圆等形式的光源畸变, 为光刻分辨率增强技术及其相关领域提供了仿真条件与理论依据, 具有重要的应用价值.

**关键词:** 光学光刻, 光源模型, Sigmoid 函数, 离轴照明

**PACS:** 42. 72. - g, 42. 30. - d, 42. 82. Cr, 85. 40. Hp

## 1. 引言

照明光源是光刻机成像系统最基本的构成单元, 随着集成电路制造工艺的关键尺寸发展到 90nm 及以下节点时, 工业界提出了离轴照明 (off-axis illumination, OAI) 技术以抑制光学邻近效应并进一步提高制造成品率<sup>[1-3]</sup>. 广泛应用的离轴照明光源可分为传统圆形光源 (conventional circular source)、环形光源 (annular source)、二极光源 (dipole source) 及四极光源 (quadrupole source). 根据光刻机系统的部分相干成像原理, 各种照明光源的特殊光强分布形式通常用定义在成像光瞳坐标的光源函数 (pupil illumination function) 来表征<sup>[4-6]</sup>. 目前, 在光刻分辨率增强技术及其相关领域, 例如光刻机投影物镜波像差检测、光刻系统交叉传递函数 (transmission cross-coefficient, TCC) 快速计算及光刻掩模图案优化设计等<sup>[7-10]</sup>, 都采用了理想的简化光源模型作为仿真输入. 理想光源模型将真实光源的复杂且连续的光强分布形式表达为极为简单的“0-1”二元分布, 或称之为“高帽”分布<sup>[11]</sup>. 然而, 由于照明光源产生的激光束在空间以连续衰减的形式传播, 照明光源的硬件系统在调试与使用过程中会不可避免

的产生偏心、倾斜、椭圆等形式的光强畸变<sup>[12-14]</sup>, 并且真实光源的光强分布非常复杂, 往往很大程度的偏离简单的二元分布<sup>[11]</sup>. 因此, 为了满足集成电路在线生产及光刻物理仿真中日益增长的精度需求, 很有必要深入研究各种主流光源的光强分布特性, 从而建立精确表征真实光源分布的物理模型, 甚至物理解析模型.

近年来, 国外多家科研机构相继对光刻机照明光源的建模方法开展了研究. Mentor Graphics 公司报道了一种基于像素表征的光源模型<sup>[15]</sup>, Nikon 公司提出可通过光学传递函数 (optical transfer function, OTF) 来表征光源对光学邻近效应的影响<sup>[16]</sup>. 这两种光源模型无法直接解析表征光源在光瞳面分布的物理特性, 实际应用具有一定的局限性. 光刻机厂商 ASML 公司联合国际镜头专门企业 Carl-Zeiss 公司共同从事光刻机的照明光源建模研究, 提出一种解析表征真实光强分布的光瞳拟合模型 (pupil fit model, PFM), 用于精确描述并拟合真实照明光源在光瞳面上的物理分布<sup>[17]</sup>. 虽然 PFM 引入了全参数变量来描述各种因素对环形光源分布造成的影响, 但由于 PFM 的解析表达式包含多个非线性函数的积分, 且为分段函数形式, 因此, PFM 的仿真计算及真实光源的拟合过程非常复杂, 不能

\* 国家自然科学基金 (批准号: 91023032, 51005091, 50775090), 中国博士后科学基金 (批准号: 20100470052), 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2010ZD004) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: shyliu@mail.hust.edu.cn

满足快速、精确的在线设计和检测需求.

为此,本文提出一种描述光源物理分布特性的全参数解析模型,该模型采用 Sigmoid 函数作为构造各种主流离轴光源解析模型的核函数;提出通过加入光源全参数修正项来表征真实光源的各种物理畸变和偏差.全参数修正项可展开为傅里叶级数形式,相应级次的傅里叶系数具有特殊的物理意义,分别代表偏心、倾斜、椭圆等形式的光源畸变.大量的仿真及实验分析表明,该解析模型具备表达形式简洁、仿真计算速度快、实验拟合精度高等诸多优点,能满足真实光源的在线拟合及分析需求,为光刻分辨率增强技术及其相关领域提供了仿真条件与理论依据.

## 2. 光源全参数解析物理建模理论

### 2.1. 基于 Sigmoid 函数的连续光强建模

由于照明光源产生的激光束在空间以连续衰

减的形式传播,光瞳面上的有效光源函数往往很大程度上偏离理想的二元分布形式.考虑到光强空间分布的物理连续性,本文引入 Sigmoid 函数作为构造各种主流离轴光源解析模型的核函数,该函数为无穷次连续可微的连续函数,能实现类似阈值函数的功能. Sigmoid 函数的定义如下:

$$f_s(r_0) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{r_0}{s}\right)}, \quad (1)$$

其中,  $r_0$  代表光瞳面极坐标系的径向距离,  $s$  为表征光源核函数的陡度值.图 1 给出了当  $s = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$  的核函数分布对比.观察图 1 可知,核函数平滑程度随  $s$  值的增大而增大:当  $s = 0$  时,光源核函数退化为具备明显跃变的阈值函数,而当  $s = 1$  时,核函数的平滑度显著增大.因此,通过对 Sigmoid 函数中陡度值的不断调整,可以表征不同陡度的连续光强.充分利用光源核函数的分布特性,可分别构造包括传统圆形光源、环形光源、二极光源及四极光源的连续光强物理模型.

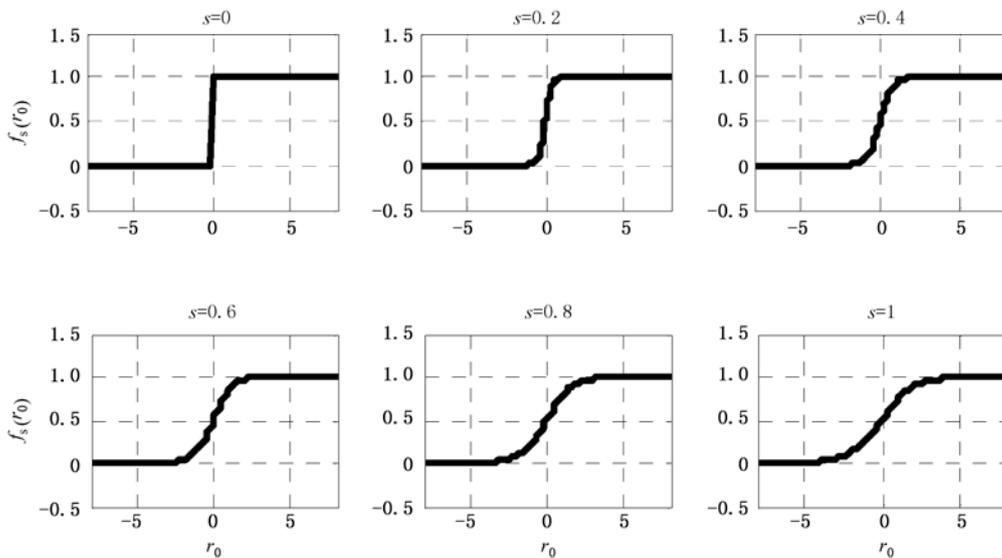


图 1 不同陡度值的光源核函数

由于传统光源的“高帽”模型呈圆形分布、圆形半径大小仅由部分相干因子  $\sigma$  决定,因此传统光源的连续光强分布模型可通过 Sigmoid 函数构造

$$I_C(r) = f_s(\sigma - r), \quad (2)$$

其中,  $I_C(r)$  代表传统圆形光源的连续光强;  $s$  表征传统圆形光源连续光强分布的陡度值;光瞳面直角坐标系  $(x, y)$  对应极坐标为  $(r, \theta)$ ,  $r$  为极坐标系径向位置(本文中  $r$  均为归一化坐标,即  $0 \leq r \leq 1$  无量

纲),  $\theta$  为极坐标系方位角,满足  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

考虑到环形光源相对圆形光源不仅需要定义外圆半径,还需要给出内圆半径大小,因此描述环形光源的部分相干因子有  $\sigma_o$  与  $\sigma_i$  两个参数,环形光源的连续光强  $I_A(r)$  可由两个光源核函数构造:

$$I_A(r) = f_{s_o}(\sigma_o - r) \cdot f_{s_i}(r - \sigma_i), \quad (3)$$

其中,  $s_o$  与  $s_i$  分别表征两个光源核函数的陡度值.观察(2)式及(3)式可知:圆形光源及环形光源的连

续光强仅沿着沿半径  $r$  方向变化,与方位角  $\theta$  无关.考虑到二极与四极光源可以看作在环形光源的基础上沿方位角  $\theta$ “剪切”获得,在数学上可将“剪切”过程表达为关于  $\theta$  的函数,因此二极与四极光源的连续光强模型可写为

$$I_D(r, \theta) = I_A(r)K_D(\theta), \quad (4)$$

$$I_Q(r, \theta) = I_A(r)K_Q(\theta), \quad (5)$$

其中,  $I_D(r, \theta)$  代表二极光源的连续光强,  $I_Q(r, \theta)$  代表四极光源的连续光强;  $K_D(\theta)$  与  $K_Q(\theta)$  均由光源核函数构成,并分别代表二极光源与四极光源沿方位角  $\theta$  的分布特性

$$K_D(\theta) = f_{s_\theta}(\theta_0 - |\theta|) + f_{s_\theta}(\theta_0 - |\pi - \theta|), \quad (6)$$

$$K_Q(\theta) = f_{s_\theta}\left(\theta_0 - \left|\frac{\pi}{4} - \theta\right|\right) + f_{s_\theta}\left(\theta_0 - \left|\frac{3\pi}{4} - \theta\right|\right) + f_{s_\theta}\left(\theta_0 - \left|\frac{5\pi}{4} - \theta\right|\right) + f_{s_\theta}\left(\theta_0 - \left|\frac{7\pi}{4} - \theta\right|\right), \quad (7)$$

其中,  $\theta_0$  为二极或四极光源的半张角;  $s_\theta$  为相应光源核函数的陡度值.

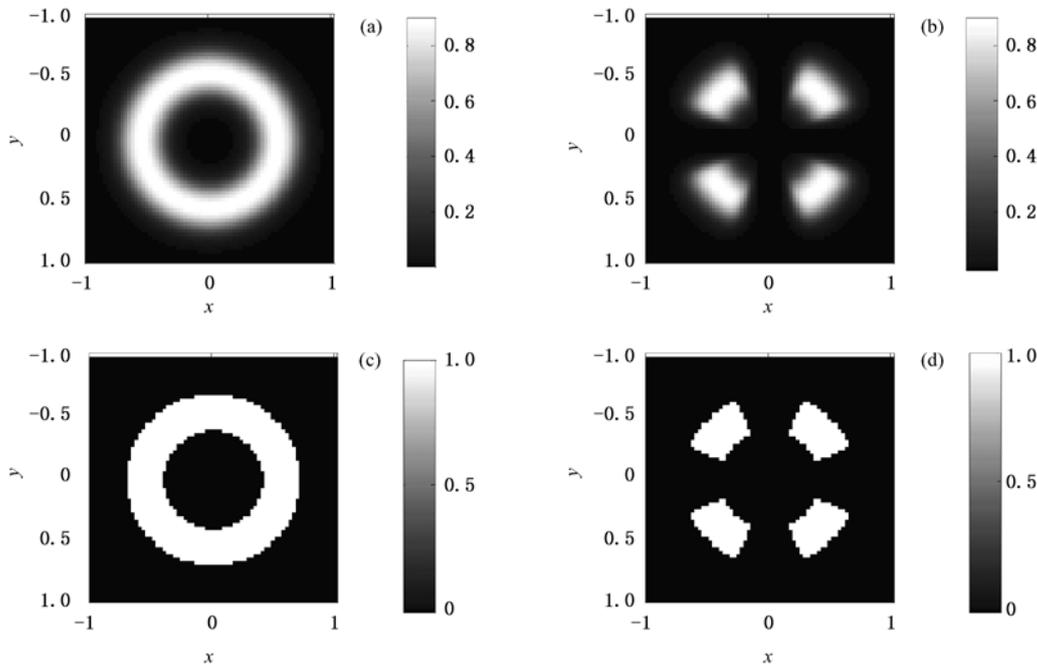


图2 环形及四极光源的光强连续分布与“高帽”分布对比

设置环形光源 ( $\sigma_o/\sigma_i = 0.8/0.45$ )、四极光源 ( $\sigma_o/\sigma_i/\theta_0 = 0.8/0.45/22.5^\circ$ ),且设  $s, s_o, s_i, s_\theta$  均等于 0.05,根据(3)式与(5)式即可获得环形及四极光源的连续光强分布.图2给出了连续光强计算结果与理想“高帽”分布的对比,其中,图2(a)和(b)分别代表环形及四极光源的连续光强分布;图2(c)和(d)分别代表环形及四极光源的“高帽”分布.观察图2可知,该模型可取代理想光源的“高帽”分布,用于描述光强连续分布的各种离轴照明.

### 2.2. 基于全参数修正项的光源物理建模

照明光源的硬件系统在调试与使用过程中会不可避免的产生各种形式的光强畸变.为了描述真实光源的偏心、倾斜及椭偏等多种畸变形式,本文

提出采用全参数修正项进一步完善基于 Sigmoid 函数的连续光强模型,建立精确描述真实光源特性的全参数物理解析模型.根据(2)式与(3)式,加入全参数修正项后的圆形及环形光源的连续光强分别为

$$I_C(x, y) = [1 + \alpha(\theta^*)] f_s[\sigma - r^* + \gamma(\theta^*)], \quad (8)$$

$$I_A(x, y) = [1 + \alpha(\theta^*)] \cdot f_{s_o}[\sigma_o - r^* + \gamma(\theta^*)] \cdot f_{s_i}[r^* - \sigma_i + \beta(\theta^*)], \quad (9)$$

其中,  $r^*, \theta^*$  分别为修正后的半径及方位角,设  $(x_0, y_0)$  为光源中心在光瞳面的坐标(或称为光源的“偏心”位置),则  $r^*, \theta^*$  满足

$$r^* \cos(\theta^*) = x - x_0,$$

$$r^* \sin(\theta^*) = y - y_0, \quad (10)$$

$I_C(x, y), I_A(x, y)$  分别对应修正后的圆形及环形光

源的连续光强;全参数修正项  $\alpha(\theta^*)$ ,  $\beta(\theta^*)$ ,  $\gamma(\theta^*)$  分别为傅里叶级数加和形式

$$\alpha(\theta^*) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^\alpha \cos(n\theta^*) + b_n^\alpha \sin(n\theta^*), \quad (11)$$

$$\beta(\theta^*) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^\beta \cos(n\theta^*) + b_n^\beta \sin(n\theta^*), \quad (12)$$

$$\gamma(\theta^*) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^\gamma \cos(n\theta^*) + b_n^\gamma \sin(n\theta^*), \quad (13)$$

这里,  $\alpha(\theta^*)$ ,  $\beta(\theta^*)$ ,  $\gamma(\theta^*)$  为全参数修正项;  $n$  为傅里叶多项式级次;  $a_n^\alpha$ ,  $a_n^\beta$ ,  $a_n^\gamma$  分别代表修正项  $\alpha(\theta^*)$ ,  $\beta(\theta^*)$ ,  $\gamma(\theta^*)$  中傅里叶级数的余弦系数;  $b_n^\alpha$ ,  $b_n^\beta$ ,  $b_n^\gamma$  为相应修正项中傅里叶级数的正弦系数. 注意到修正后得到的传统及环形光强最大值不等于 1, 需将  $I_C(x, y)$ ,  $I_A(x, y)$  归一化

$$J_C(x, y) = I_C(x, y) / \max[I_C(x, y)], \quad (14)$$

$$J_A(x, y) = I_A(x, y) / \max[I_A(x, y)]. \quad (15)$$

由(4), (5)式可得归一化的二极与四极光源的全参数模型

$$J_D(x, y) = I_C(x, y) / \max[I_C(x, y)], \quad (16)$$

$$J_Q(x, y) = I_Q(x, y) / \max[I_Q(x, y)]. \quad (17)$$

### 3. 仿真分析及实验验证

#### 3.1. 光源全参数修正项仿真分析

(8)式至(17)式给出了各种主流离轴照明光源的全参数物理解析模型. 根据(8)式可知, 圆形光源全参数模型只包含修正项  $\alpha(\theta^*)$  和  $\gamma(\theta^*)$ . 根据(9)式可知, 环形全参数模型囊括了所有的修正项  $\alpha(\theta^*)$ ,  $\beta(\theta^*)$  和  $\gamma(\theta^*)$ , 且二极、四极光源的全参数物理模型均可由相应的环形光源模型“剪切”获得, 见(4)式和(5)式. 因此, 环形光源全参数物理模型不仅应用广泛, 且最具代表性和典型性, 是开展仿真分析和实验拟合的重点. 在真实光源的表征及拟合过程中, 一般只需将修正项的傅里叶级数展开至二阶(取  $n=2$ , 更高阶代表更精细的物理畸变).

图3, 图4分别显示了环形光源全参数物理模型中修正项  $\alpha(\theta^*)$  及  $\beta(\theta^*)$ ,  $\gamma(\theta^*)$  的物理仿真等高线分布. 表1、表2分别为图3、图4的修正项输入参数, 并设置  $x_0=0, y_0=0, \sigma_o/\sigma_i=0.85/0.6, s_o=s_i=0.02$ . 观察图3、图4, 根据不同的修正效果, 全参数修正项  $\alpha(\theta^*)$ ,  $\beta(\theta^*)$ ,  $\gamma(\theta^*)$  可分为两类: 一类为光源光强修正项, 包括  $\alpha(\theta^*)$ ; 另一类为光源形

状修正项, 包括内半径修正项  $\beta(\theta^*)$  及外半径修正项  $\gamma(\theta^*)$ . 表3总结了光源全参数解析模型展开至二阶时, 傅里叶系数  $(a_n^\alpha, b_n^\alpha)$ ,  $(a_n^\beta, b_n^\beta)$ ,  $(a_n^\gamma, b_n^\gamma)$  对应的物理内涵.

表1 环形光源全参数物理模型仿真输入修正项参数1

光源光强修正项 $\alpha(\theta^*)$		光源形状修正项 $\beta(\theta^*)$ , $\gamma(\theta^*)$	
修正参数	数值	修正参数	数值
$a_1^\alpha$	图3(a): 0.5	$a_1^\beta, a_1^\gamma$	0, 0
$a_2^\alpha$	图3(b): 0.5	$a_2^\beta, a_2^\gamma$	0, 0
$b_1^\alpha$	图3(c): 0.5	$b_1^\beta, b_1^\gamma$	0, 0
$b_2^\alpha$	图3(d): 0.5	$b_2^\beta, b_2^\gamma$	0, 0

表2 环形光源全参数物理模型仿真输入修正项参数2

光源光强修正项 $\alpha(\theta^*)$		光源形状修正项 $\beta(\theta^*)$ , $\gamma(\theta^*)$	
修正参数	数值	修正参数	数值
$a_1^\alpha$	0	$a_1^\beta, a_1^\gamma$	图4(a): 0.1, 0.1
$a_2^\alpha$	0	$a_2^\beta, a_2^\gamma$	图4(b): -0.05, 0.05
$b_1^\alpha$	0	$b_1^\beta, b_1^\gamma$	图4(c): 0.1, 0.1
$b_2^\alpha$	0	$b_2^\beta, b_2^\gamma$	图4(d): -0.05, 0.05

表3 光源物理模型中全参数修正项的物理内涵

光源光强修正项 $\alpha(\theta^*)$		光源形状修正项 $\beta(\theta^*)$ , $\gamma(\theta^*)$	
修正参数	物理内涵	修正参数	物理内涵
$a_1^\alpha$	水平光强倾斜	$a_1^\beta, a_1^\gamma$	水平形状偏移
$a_2^\alpha$	水平光强椭圆	$a_2^\beta, a_2^\gamma$	水平形状椭圆
$b_1^\alpha$	垂向光强倾斜	$b_1^\beta, b_1^\gamma$	垂向形状偏移
$b_2^\alpha$	对角光强椭圆	$b_2^\beta, b_2^\gamma$	对角形状椭圆

#### 3.2. 基于环形光源全参数解析模型的实验数据拟合

将环形光源全参数解析模型中的傅里叶级数展开至二阶, 则该解析模型包含了 12 个独立的修正参数. 考虑到模型中还含有其它参数, 例如  $x_0, y_0, \sigma_o, \sigma_i, s_o, s_i$ , 决定环形光源解析模型的独立参数总共有 18 个. 因此, 环形光源的实验数据拟合需要通过实际环形光源检测数据逆求这 18 个独立的模型参数, 从而得到环形光源的模型拟合分布并进一步评价模型拟合误差.

在一台 100 nm 分辨力步进扫描投影光刻机上进行了实验研究, 该光刻机装有 193 nm 波长 ArF 深紫外准分子激光器, 通过调整照明系统可以设置并生成不同的环形光源, 通过使用透过像传感器 (transmission image sensor, TIS) 可以对这些不同的

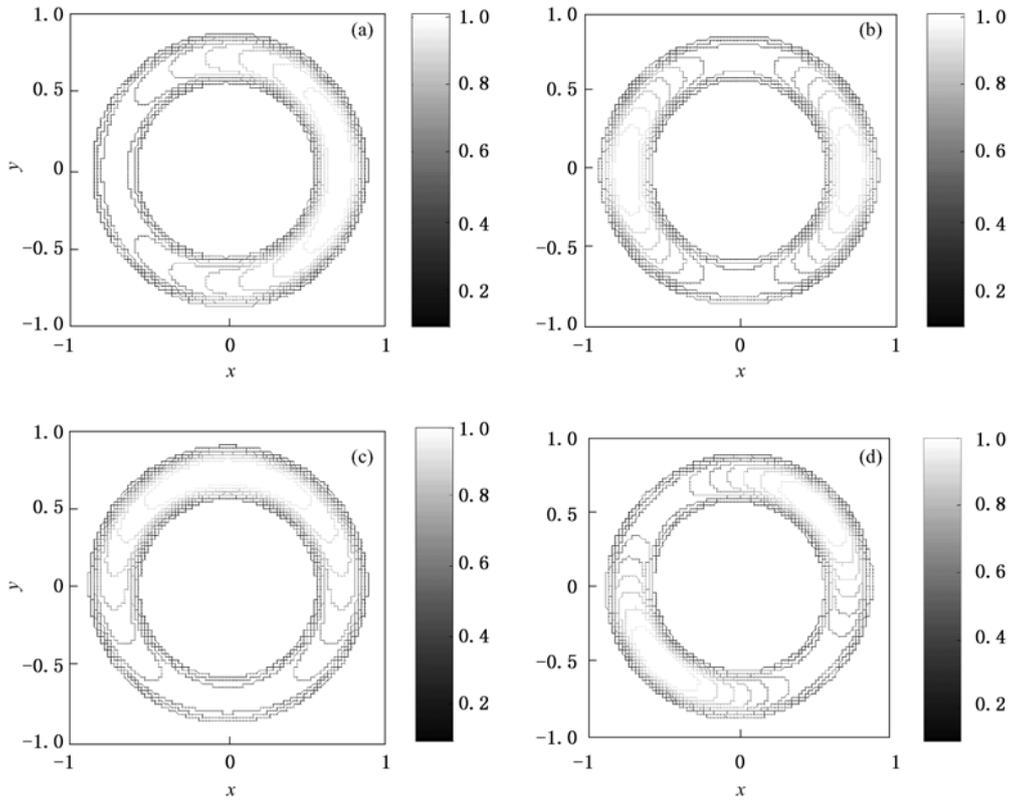


图3 环形光源修正项  $\alpha(\theta^*)$  对应的仿真光强的等高线分布 (a)水平光强倾斜;(b)水平光强椭圆;(c)垂直光强倾斜;(d)对角光强椭圆

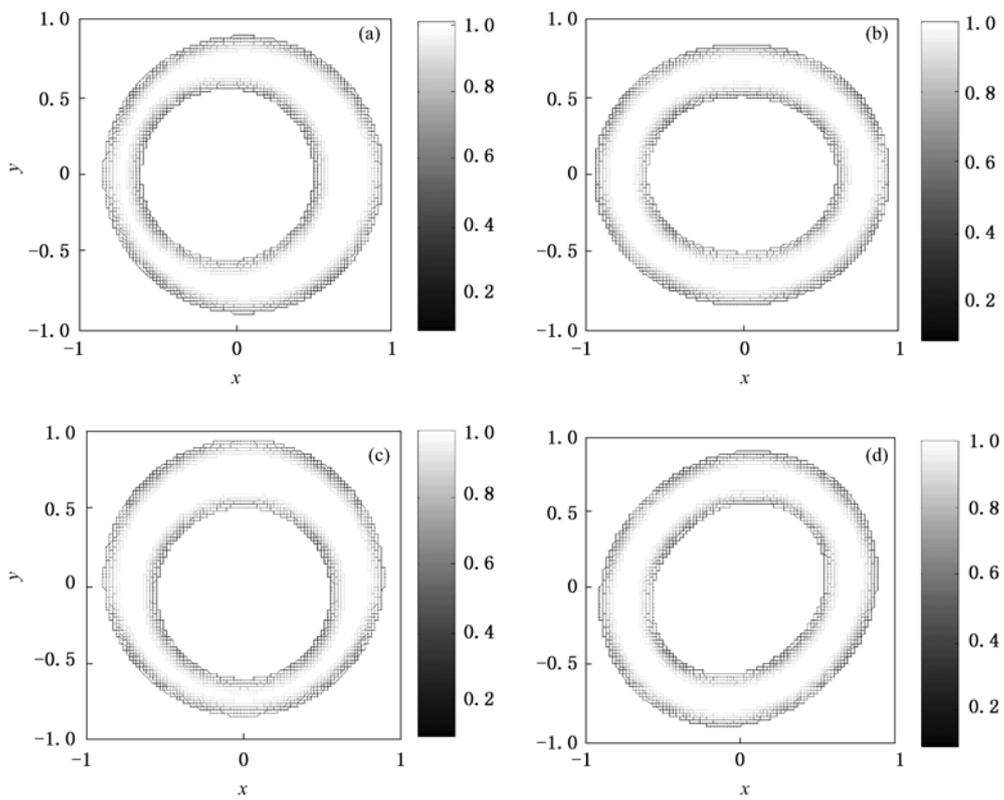


图4 环形光源修正项  $\beta(\theta^*), \gamma(\theta^*)$  对应的仿真光强等高线分布 (a)水平形状偏移;(b)水平形状椭圆;(c)垂直形状偏移;(d)对角形状椭圆

环形光源进行实验检测<sup>[18]</sup>. 图 5 给出了环形光源的 3 组实验检测数据, 分别对应照明参数  $\sigma_o/\sigma_i = 0.95/0.60, 0.90/0.65, 0.97/0.70$ . 由于使用过程中对光刻机照明系统的频繁调试, 照明光源会产生不同程度的“偏心”畸变. 如图 5 所示, 实测数据 1

与实验数据 3 对应的环形光源产生了轻微的“偏心”, 实测数据能表征完整的光源光强分布; 而实测数据 2 对应的环形光源则产生了严重的“偏心”, 这就导致实测数据只能代表残缺的光源光强分布, 从而丢失了大量的光源光强信息.

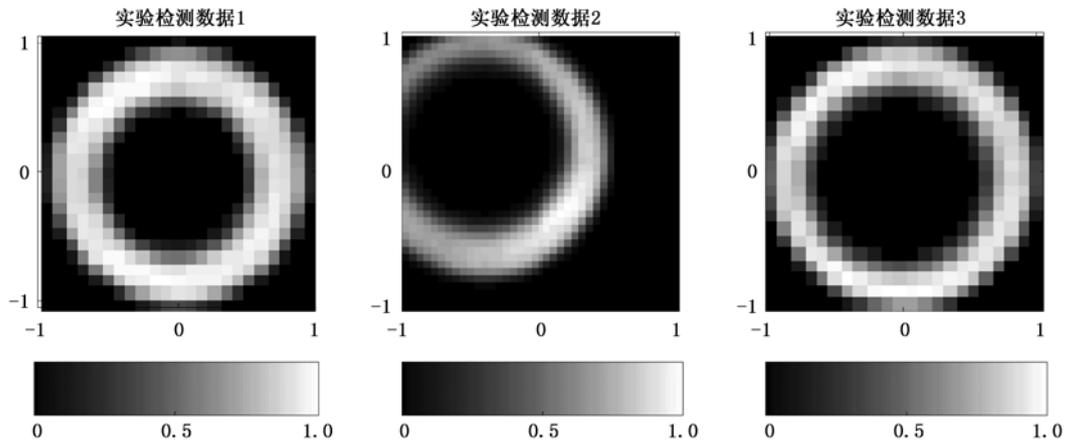


图 5 光刻机照明光源的 3 组实验检测数据

根据(9)及(15)式, 环形光源全参数模型本质上是一个非线性解析模型. 为了拟合获得解析模型中的 18 个参数, 可采用广泛应用的非线性最小二乘拟合算法. 为了验证光源全参数解析模型的正确性与有效性, 对 3 组光刻机照明光源实测数据进行了

拟合, 见图 6 至图 8. 图 6 为完整环形光源检测数据 (光源实测数据 1) 的拟合结果; 图 7 为残缺的环形光源检测数据 (光源实测数据 2) 的拟合结果; 图 8 为光源全参数模型与高帽模型对实测数据 3 的拟合精度对比.

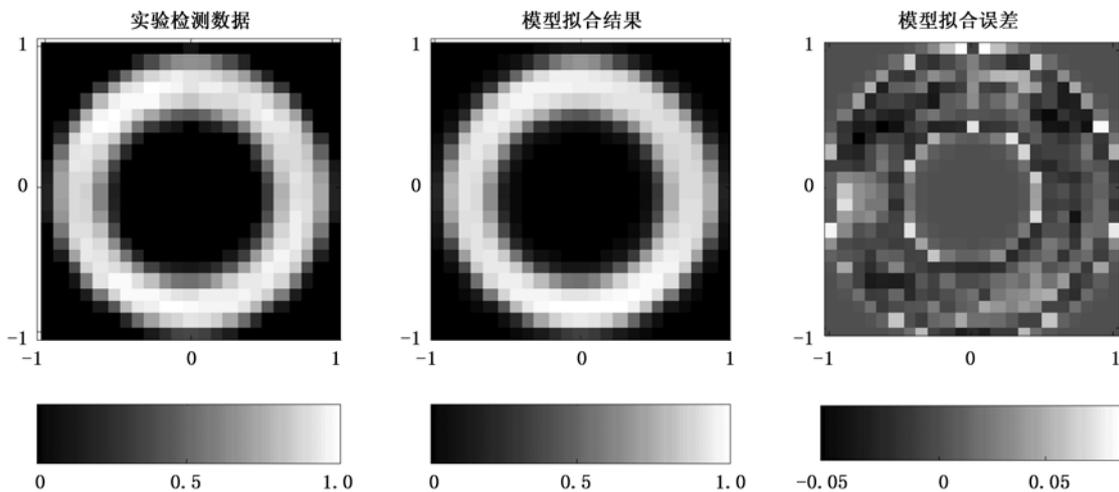


图 6 基于全参数解析模型的环形光源完整检测数据(光源实测数据 1)拟合结果

观察图 6 可以发现, 提出的全参数光源模型可以精确拟合真实光源检测数据, 拟合结果的绝对误差在  $10^{-2}$  数量级 (最大光强已归一化, 无量纲), 能够很好的表征偏心、倾斜、椭圆等形式的光强分布特性. 此外, 拟合误差在光瞳面内呈随机分布, 这是因为实际光源系统的检测过程会引入传感器检测

噪声等随机误差, 不可避免的给检测及拟合结果造成影响. 观察图 7, 对于严重残缺的环形光源检测数据, 全参数解析模型也能够较好的拟合其光强分布, 拟合绝对误差小于 0.13, 大于完整环形光源检测数据的拟合最大误差 (见图 6). 这是由于提出的全参数光源模型是用于解析描述完整的光源光强

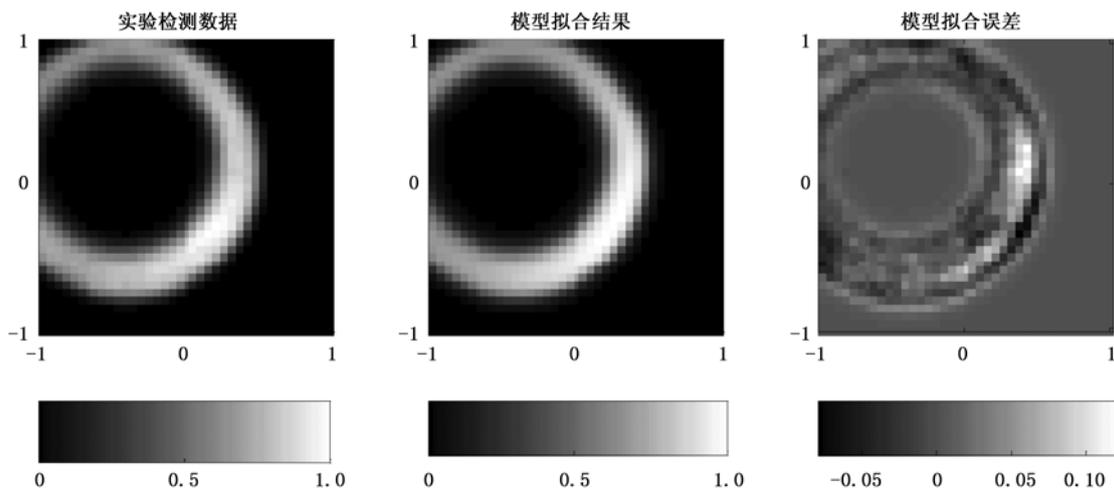


图7 基于全参数解析模型的环形光源残缺检测数据(光源实测数据2)拟合结果

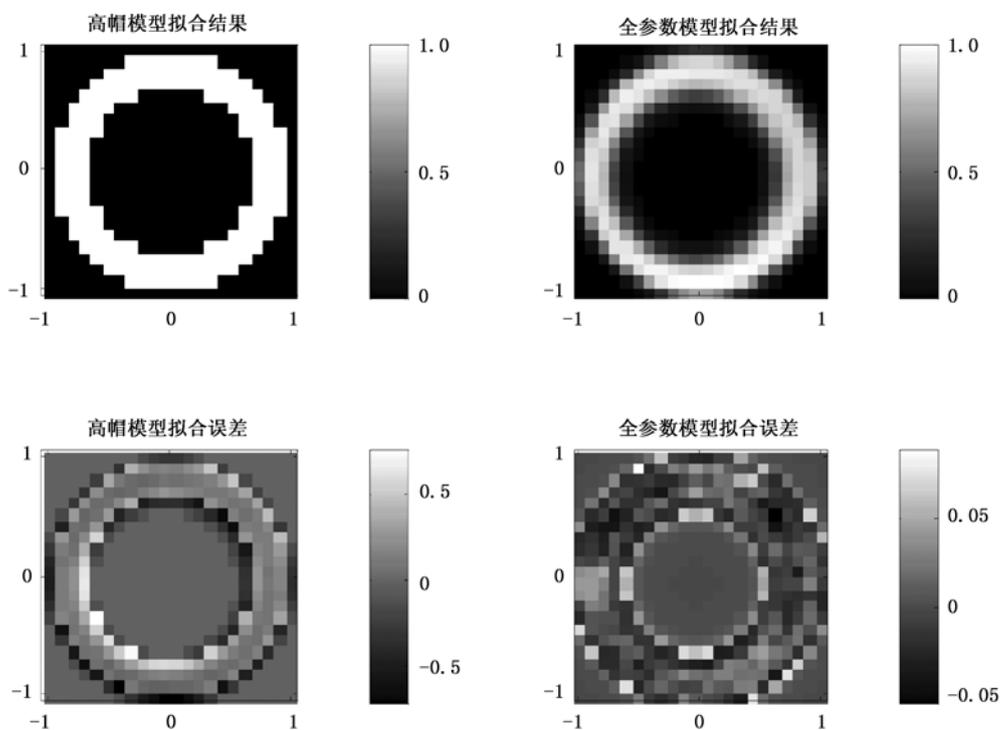


图8 光源全参数模型与高帽模型对实测数据3的拟合精度对比

物理分布,当拟合的光源检测数据严重残缺时,已不具备完整且连续的空间分布特性,从而导致拟合结果存在误差.

目前工业界应用的光刻系统模型中,光源的建模考虑得比较简单,即光源部分的光强分布主要是“高帽”式的二元分布.图8给出了光源全参数模型与高帽模型对实测数据3的拟合精度比较.观察图8,高帽模型的光强拟合误差较大(最大误差高达0.78),说明采用高帽模型对真实光源建模会影响光刻系统中从掩模到光强分布图像的TCC传输函

数的准确性,并导致光刻成像的仿真结果严重失真.相反,基于Sigmoid函数的全参数解析模型能精确的拟合并描述真实光源的各种物理畸变和偏差,拟合误差远小于高帽模型.因此,采用基于Sigmoid函数的全参数解析模型能够促进对硅片上成像的预测,而这种精确的预测是基于模型的光学临近校正或其他分辨率增强技术的先决条件.此外,通过基于Sigmoid函数的全参数解析模型对真实光源进行在线拟合与分析,可以快速获知照明光源的物理状态,并根据拟合模型中的参数值对光刻机的照明

光源进行实时校正与监测.

通过对环形光源在不同照明设置和视场条件下的大量检测数据进行拟合分析,发现提出的全参数解析模型能够精确并快速的拟合实际光源的完整物理分布,拟合精度可达  $10^{-2}$  数量级,单次拟合时间小于 0.086 s(运行在酷睿 i5 - 2.53GHZ CPU, 4G 内存, Win7 64 位操作系统计算机平台上).

#### 4. 结 论

照明光源是光刻机成像系统最基本的构成单

元,为了满足日益增长的集成电路在线生产及光刻物理仿真精度需求,本文提出一种全面描述光源物理分布特性的全参数解析新模型,该模型采用 Sigmoid 函数作为构造各种主流离轴光源解析模型的核函数,通过加入光源全参数修正项来表征真实光源的各种物理畸变和误差.大量的仿真及实验分析表明,该解析模型具备表达形式简洁、仿真计算速度快、实验拟合精度高等诸多优点,为光刻分辨率增强技术及其相关领域提供了仿真条件与理论依据,具有重要的应用价值.

- 
- [1] Schellenberg F M 2005 *Opt. Rev.* **12** 83
  - [2] Cao P F, Cheng L, Zhang X P 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 6946 (in Chinese) [曹鹏飞、程琳、张晓萍 2008 物理学报 **57** 6946]
  - [3] Li H H, Chen J, Wang Q K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 114203
  - [4] Perçin G, Sezginer A, Zach F X 2006 *J. Microlith. Microfab. Microsyst.* **5** 023006
  - [5] Zhang S L, Zheng Q 1985 *Acta. Phys. Sin.* **34** 439 (in Chinese) [庄松林、郑权 1985 物理学报 **34** 439]
  - [6] Zhang S L, Chen X Z 1979 *Acta. Phys. Sin.* **28** 657 (in Chinese) [庄松林、陈祥祯 1979 物理学报 **28** 657]
  - [7] Liu W, Liu S Y, Zhou T T, Wang L J 2009 *Opt. Express* **17** 19278
  - [8] Liu W, Liu S Y, Shi T L, Tang Z R 2010 *Opt. Express* **18** 20096
  - [9] Yamazoe K 2010 *Appl. Opt.* **49** 3909
  - [10] Ma X, Arce G R 2008 *Opt. Express* **16** 20126
  - [11] Bodendorf C, Schlieff R E, Ziebold R 2004 *Proc. SPIE* **5377** 1130
  - [12] Barrett T C 2000 *Proc. SPIE* **4000** 804
  - [13] Phillips M C, Slonaker S D, Treadway C, Darby Greg 2005 *Proc. SPIE* **5754** 1562
  - [14] Guo L P, Wang X Z, Hang H J 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 237
  - [15] Granik Y 2004 *Proc. SPIE* **5524** 217
  - [16] Renwick S P, Nishinaga H, Kita N 2006 *Proc. SPIE* **6154** 615400
  - [17] Flagello D G, Geh B, Socha R, Liu P, Cao Y, Stas R, Natt O, Zimmermann J 2008 *Proc. SPIE* **6924** 69241U
  - [18] Laan H van der, Dierichs M, Greevenbroek H van, McCoo E, Stoffels F, Pongers R, Willekers R 2001 *Proc. SPIE* **4346** 394

# Parametric analytical model for off-axis illumination sources based on Sigmoid function \*

Liu Wei<sup>1)</sup> Liu Shi-Yuan<sup>1)2)†</sup> Wu Xiao-Fei<sup>1)</sup> Zhang Chuan-Wei<sup>1)</sup>

1) (*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

2) (*State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 9 December 2010; revised manuscript received 29 December 2010)

## Abstract

This paper proposes a parametric analytical source model for overall representation of the physical distribution property of off-axis illumination sources in lithographic tools. A Sigmoid function is adopted as a kernel function to construct the analytical model for the multiple mainstream off-axis sources. Corrected parametrical terms are subsequently presented for characterization of different physical distortions and deviations of real illumination sources. The corrected parametrical terms can be decomposed into Fourier series which have the special physical meaning of respectively indicating different distortion types including shift of the center, tilt, ellipticity, etc. The proposed analytical model provides both simulation condition and theoretical basis for the resolution enhancement technique and the related research fields, thus has important applications.

**Keywords:** optical lithography, source model, Sigmoid function, off-axis illumination

**PACS:** 42. 72. - g, 42. 30. - d , 42. 82. Cr, 85. 40. Hp

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91023032, 51005091, 50775090), the Postdoctoral Science Foundation of China (Grant No. 20100470052), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. 2010ZD004).

† Corresponding author. E-mail: shyliu@mail.hust.edu.cn.