

文章编号: 0253-2239(2006)06-0885-6

照明光瞳非对称性对光刻成像质量的影响*

郭立萍^{1,2} 王向朝¹ 黄惠杰¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了照明光瞳非对称性对光刻成像质量的影响。通过 PROLITH 软件计算了环形与四极照明条件下, 光瞳非对称性对图形位置偏移量、曝光图形内水平线条与垂直线条的宽度差、曝光图形上密集线条与孤立线条之间线宽偏差的影响。研究表明, 光瞳非对称性主要影响曝光图形的位置偏移量, 光瞳非对称性引起的图形位置偏移量与光瞳非对称性的大小成线性关系。根据套刻精度的误差分配原则, 计算得到光瞳非对称性的容限为 5%。

关键词: 仪器; 光刻; 光刻仿真; 离轴照明; 光瞳非对称性
中图分类号: TN350.7 文献标识码: A

Impact of Illumination Pupil Filling Unbalance on Imaging Performance of Lithography

Guo Liping^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Huang Huijie¹

(¹ Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The impacts of pupil filling unbalance on image CD placement error, H-V bias (the size difference between the vertical lines and the horizontal lines) and I-D bias (the size difference between the isolated lines and the dense lines) are calculated using software PROLITH under annular and quardupole illumination settings. Calculations show that the main effect of pupil filling unbalance on imaging performance of lithography is the image CD placement error. The image CD placement error caused by pupil filling unbalance is proportional to the pupil filling unbalance. The tolerance of the pupil filling unbalance of 5% is achieved according to the budget of the overlay accuracy.

Key words: instrument; optical lithography; lithography simulation; off-axis illumination; pupil filling unbalance

1 引 言

随着光刻特征尺寸的不断减小, 对光刻机的套刻精度与临界尺寸(Critical dimension, CD)均匀性的要求不断提高。集成电路的制造包括几十道光刻工艺, 为了确保各层间相对位置关系, 必须要求与光刻特征尺寸相匹配的套刻精度^[1,2]。ITRS 曝光图形的实际位置与期望位置之间的偏差, 即图形位置偏移量, 是影响光刻机套刻精度的重要因素。临界尺寸均匀性是指硅片上实际曝光线宽与期望线宽的

标准偏差。一般认为临界尺寸均匀性应该为线宽临界尺寸的 10%。曝光图形内水平线条与垂直线条的宽度之差(H-V bias)与曝光图形上密集线条与孤立线条之间的线宽偏差(I-D bias)是影响临界尺寸均匀性的重要因素。

图形位置偏移量、H-V bias 与 I-D bias 受多种因素的影响, 例如投影物镜的像差、照明系统中部分相干因子的设置与照明均匀性等。随着光刻分辨率的不断提高, 照明光瞳对套刻精度与临界尺寸均匀性的影响变得越来越突出。特别是多种离轴照明方

* 国家 863 计划(2002AA4Z3000)资助课题。

作者简介: 郭立萍(1975~), 女, 山东莱芜人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光学投影光刻机曝光系统相关技术的研究。E-mail: guo_liping666@sohu.com

收稿日期: 2005-07-01; 收到修改稿日期: 2005-09-06

式的引入,照明光瞳已经成为影响光刻成像质量不可忽视的因素。目前人们更多关注于照明光瞳检测方法^[3~8],通过光瞳检测来评价照明系统的设计与调整是否达到要求。非理想的照明光瞳光强分布对光刻质量产生的影响,目前尚未见报道。深入分析照明光瞳光强分布对光刻成像质量的影响,无论是对于充分发挥现有光刻设备作用,还是提高照明系统的性能都具有重要意义。

本文用光瞳非对称性来描述一种非理想的照明光瞳光强分布。为定量描述光瞳非对称性对套刻精

度与临界尺寸均匀性的影响,本文将利用国际上公认的半导体行业专用光刻仿真软件 PROLITH 计算光瞳面上光强非对称性引起的图形位置偏移量、H-V bias 与 I-D bias。

2 基本概念

在投影光刻成像系统中,当振幅透过率为 t_0 的掩模被一个部分相干光源照明时,硅片上光强分布 I 的表达式为

$$I(u', v') = \iiint J_0(u_1 - u_2, v_1 - v_2) t_0(u_1, v_1) t_0^*(u_2, v_2) \times h_s(u' - u_1, v' - v_1) h_s^*(u' - u_2, v' - v_2) du_1 dv_1 du_2 dv_2, \quad (1)$$

其中 (u_1, v_1) 与 (u_2, v_2) 是物平面内点的坐标, (u', v') 是像平面内点的坐标, $J_0(u_1 - u_2, v_1 - v_2)$ 是物平面内的互相关强度, $*$ 表示复共轭, h_s 为成像系统的传递函数。

根据部分相干成像原理^[9],照明光瞳函数 $P(m, n)$ 的傅里叶变换即为物平面内的互相关强度分布,即

$$J_1(u_1 - u_2, v_1 - v_2) = \iint_{\Sigma} P(m, n) \exp\{-i2\pi[m(u_1 - u_2) + n(v_1 - v_2)]\} dmdn, \quad (2)$$

这里 Σ 代表光瞳的大小, (m, n) 为光瞳面内点的坐标。将(2)式代入(1)式得到

$$I(u', v') = \iint P(m, n) \left| \iint t_0(u, v) h_s(u' - u, v' - v) \exp[-i2\pi(mu + nv)] dudv \right|^2 dmdn. \quad (3)$$

(3)式表明,部分相干成像系统中,像强度分布是光源中每一点源相干成像结果的权重之和。在光学投影光刻机中,曝光系统通常采用柯拉照明方式,照明光源在投影物镜光瞳面上所成的像也称为等效光源,通常用照明光瞳函数 $P(m, n)$ 表示。(3)式给出了硅片面上的光强分布与照明光瞳函数 $P(m, n)$ 之间的关系。图 1 是环形与四极照明情况下,理想光瞳面上光强分布示意图。在理想情况下,环形与四极照明的

光瞳函数 $P(m, n)$ 满足以下条件:

$$P(m, n) = \begin{cases} 1, & \sigma_i \leq \sigma \leq \sigma_o \\ 0, & \text{other} \end{cases} \text{ 环形照明}$$

$$P(m, n) = \begin{cases} 1, & \sigma - \sigma_c \leq \sigma_r \\ 0, & \text{other} \end{cases} \text{ 四极照明}$$

光瞳面上实际的光强分布与理想情况存在一定偏差。光瞳非对称性是衡量光瞳面上光强分布的一个重要参量。用 U_x 与 U_y 分别描述 X 与 Y 轴上的光瞳非对称性。 U_x 与 U_y 的具体定义如下^[10]:

$$U_x = \left| \frac{\sum_{x<0} I - \sum_{x>0} I}{\sum_{x<0} I + \sum_{x>0} I} \right| \times 100\%, \quad (4)$$

$$U_y = \left| \frac{\sum_{y<0} I - \sum_{y>0} I}{\sum_{y<0} I + \sum_{y>0} I} \right| \times 100\%, \quad (5)$$

在环形照明与四极照明情况下,存在非对称性的光瞳光强分布如图 2(a)与图 2(b)所示。图中给出的光强是归一化的。假设 $X > 0$ 的光强之和 $\sum_{x>0} I =$

1, $X < 0$ 的光强之和 $\sum_{x<0} I$ 分别为 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 根据(4)式与(5)式计算得到 U_x 的大小分别为 17.65%、14.29%、11.11%、8.10%、5.26%、2.56%, U_y 的大小为零。

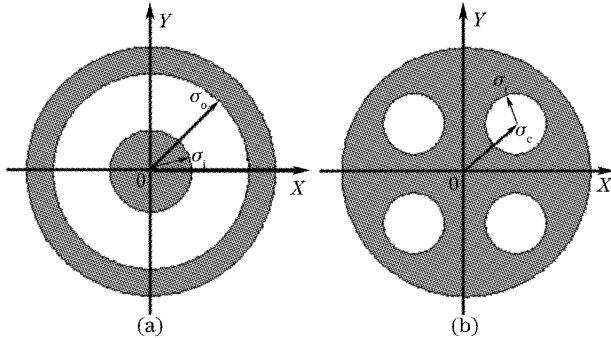


图 1 投影物镜光瞳面上的光强分布示意图。
(a) 环形照明, (b) 四极照明

Fig. 1 Light intensity distribution in the projective objective lens pupil plane under annular illumination (a) and quadrupole illumination (b) conditions

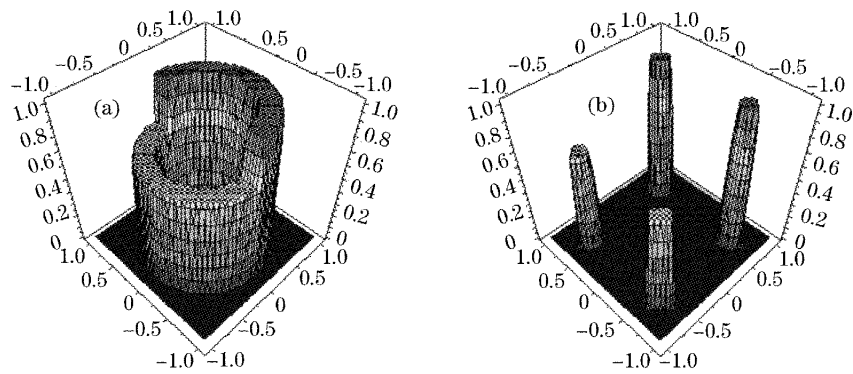


图 2 存在光瞳非对称性的光强分布示意图。(a) 环形照明, (b) 四极照明

Fig. 2 Light intensity distribution in the lens pupil plane with pupil filling unbalance under annular illumination (a) and quadrupole illumination (b) conditions

3 PROLITH 仿真实验与分析

PROLITH 光刻仿真软件是 KLA-Tencor 公司推出的一种可精确确定光刻过程及效果的仿真软件, 已成为国际上大型半导体公司光刻过程模拟分析的必备工具。在 PROLITH 计算中, 采用 LPM 与全标量衍射模型, 并假设投影物镜是无像差的理想光学系统。具体仿真条件见表 1。表 2 列出了计算中所用到的 NA/σ 设置。其中 Setting 1 与 Setting 3 是针对 100 nm 密集线条对焦深(DOF)^[11] 进行最优化得到的 NA/σ 设置。

表 1 PROLITH 仿真参量

Table 1 PROLITH simulation parameters with LPM model

CD size	100 nm
Wavelength	193 nm
Reticle type	Binary
Resist contrast	17
Aerial image diffusion length	20 nm
Effective resist absorption coefficient	0.2

表 2 仿真计算中的 NA/σ 设置

Table 2 NA/σ settings under annular and quadrupole illumination conditions

	NA	Annular		Quadrupole	
		σ_i	σ_o	σ_i	σ_o
Setting 1	0.82	0.51	0.81	—	—
Setting 2	0.75	0.51	0.81	—	—
Setting 3	0.76	—	—	0.15	0.9
Setting 4	0.7	—	—	0.15	0.9

3.1 光瞳非对称性对图形位置偏移量的影响

选择一组 100 nm 的垂直(平行于 Y 轴)密集线

条作为仿真图形, 在不同的离焦量下计算照明光瞳非对称性引起的图形位置偏移量。图 3 给出了图形位置偏移量相对照明光瞳非对称性的变化曲线, 图 3(a)~图 3(d)分别是在 setting 1、setting 2、setting 3、setting 4 设置下的仿真结果。每个图中的 7 条曲线分别表示在离焦量为 0、0.05 μm 、0.1 μm 、0.15 μm 、0.2 μm 、0.25 μm 与 0.3 μm 下计算得到的图形位置偏移量。由图 3 可以看出, 在一定的离焦量下, 图形位置偏移量随照明光瞳非对称性增大而增大, 并且成线性关系。直线的斜率随离焦量的增大而增大。在最佳焦面上, 图形位置偏移量为零。通过曲线拟合, 能够得到不同离焦量下的直线斜率, (表 3)。在一定的离焦量下, 任何大小的光瞳不均匀性乘以直线斜率, 可得到引起的图形位置偏移量。

表 3 图形位置偏移量随光瞳非对称性线性变化的斜率
Table 3 Slope of the image placement error versus pupil filling unbalance under settings 1~4

Defocus	Setting 1	Setting 2	Setting 3	Setting 4
/ μm	/ nm	/ nm	/ nm	/ nm
0	0	0	0	0
0.05	1.78	2.53	0.71	1.04
0.10	3.53	5.08	1.45	2.08
0.15	5.20	7.72	2.24	3.12
0.20	6.78	10.47	3.11	4.17
0.25	8.11	13.37	4.13	5.21
0.30	9.05	16.49	5.29	6.25

图 3(a)与图 3(b)是在环形照明条件下的仿真结果, 图 3(c)与图 3(d)是在四极照明条件下的仿真结果。由图 3 可以看出, 光瞳非对称性在同样的离焦量下, 环形照明情况下所引起的图形位置偏移量明显大于四极照明的情况。比较图 3(a)与图 3(b), 图 3(c)

与图 3(d),可以看出,图 3(b)与图 3(d)中的图形位置偏移量对照明光瞳非对称性的灵敏度分别相对于图 3(a)与图 3(c)都有明显增大。这是因为 setting1 与 setting3 是 100nm 密集线条在环形照明与四极照

明下的最优参量设置。由此可见 NA/σ 会影响图形位置偏移量对照明光瞳非对称性的灵敏度,在最优参量设置下,图形位置偏移量对照明光瞳非对称性的灵敏度最低。

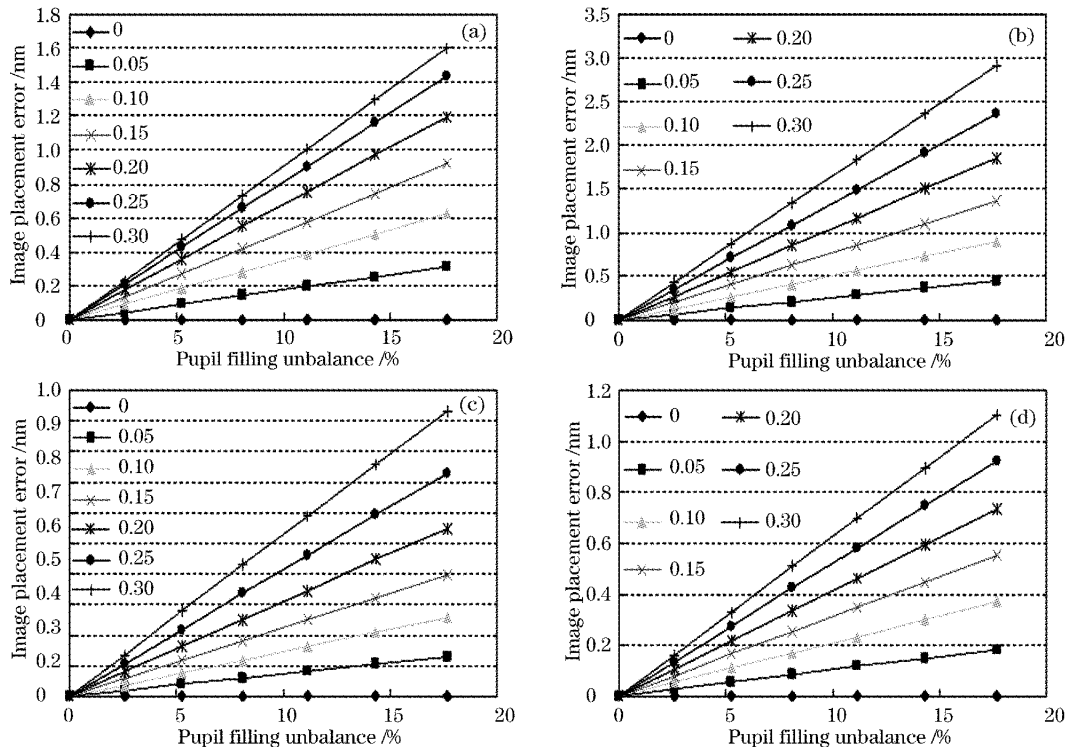


图 3 在 setting 1 (a), setting 2 (b), setting 3 (c)与 setting 4 (d) 的照明设置下,不同离焦量下,图形位置偏移量随光瞳非对称性的变化曲线

Fig. 3 Image placement error versus pupil filling unbalance at different defocus at setting 1 (a), setting 2 (b), setting 3 (c) and setting 4 (d)

在投影曝光系统中,图形位置偏移量是影响套刻精度的重要因素。通过对套刻精度误差容限的分配^[12],认为光瞳非对称性引起的套刻误差必须控制在 0.5 nm 范围内。针对 100 nm 的密集线条,假设光学曝光设备能够达到的最大焦深大约为 0.4 μm ,即离焦量在 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 范围内。在上述 settings 1~ settings 4 4 种参量设置下,在离焦量为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$,光瞳非对称性必须分别小于 7%,5%,16%,12%才能满足套刻误差为 0.5 nm 的要求。因此,在上述 4 种参量设置下,对 100 nm 密集线条进行曝光,能够容许的光瞳非对称性的最大容限为 5%。

3.2 光瞳非对称性对 H-V bias 的影响

H-V bias 是临界尺寸均匀性的一个重要方面。针对水平方向与垂直方向的密集线条,在四种照明设置下,计算了照明光瞳非对称性在不同的离焦量下引起的 H-V bias,计算结果如图 4 所示。图中的

六条曲线分别在照明光瞳非对称性的具体数值为 17.65%、14.29%、11.11%、8.10%、5.26%、2.56% 的情况下的计算结果。由图 4 可以看出,H-V bias 会随着照明光瞳非对称性的增大而增大,当离焦量在 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ 范围内时,离焦量的增大对 H-V bias 影响不大。在计算的四种照明设置下,照明光瞳非对称性引起的 H-V bias 最大不超过 0.1 nm。

3.3 光瞳非对称性对 I-D bias 影响

在上述四种照明设置下,对 100 nm 的密集线条(栅距为 200 nm)与 100 nm 的孤立线条(栅距为 500 nm),计算了 I-D bias。由于离轴照明自身的特点,孤立线条与密集线条的临界尺寸偏移量比较大。由图 5 中的结果可以看出,在仿真的四种离轴照明设置下,都大于 25 nm。照明光瞳非对称性的存在导致 I-D bias 增大,但变化幅度并不大,变化幅度最大为 0.1 nm。

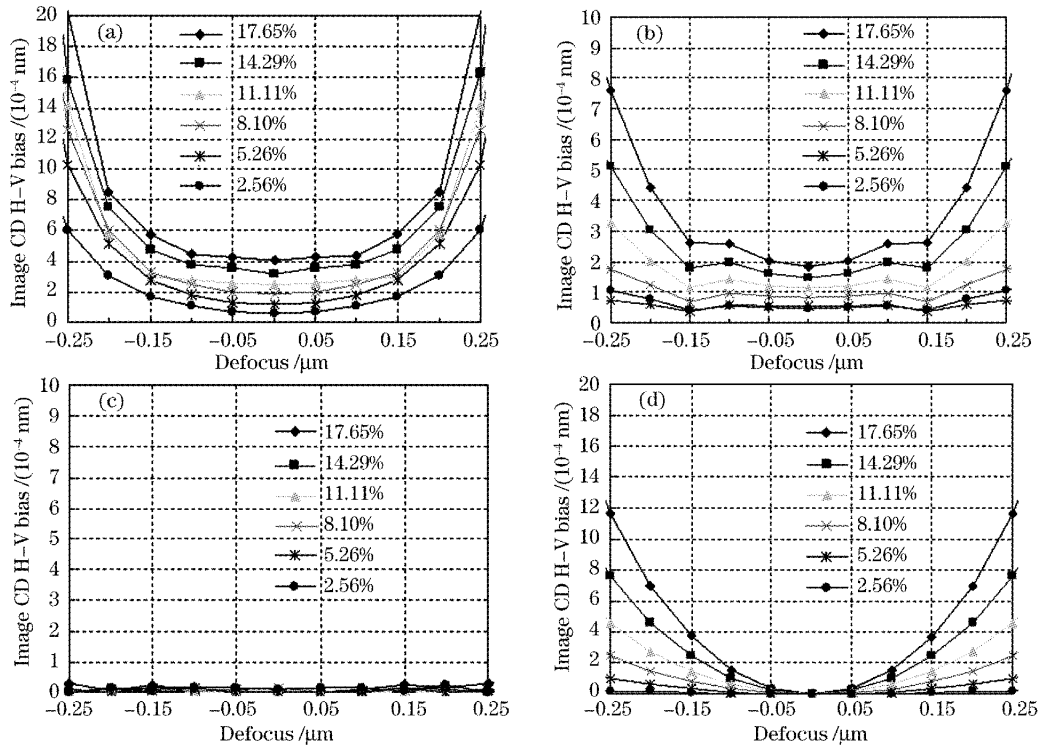


图 4 在 setting 1 (a), setting 2 (b), setting 3 (c)与 setting 4 (d) 的照明设置下,在不同光瞳非对称性下, H-V bias 随离焦量的变化曲线

Fig. 4 Image CD H-V bias vs. defocus at different illumination pupil filling unbalance at setting 1 (a), setting 2 (b), setting 3 (c) and setting 4 (d)

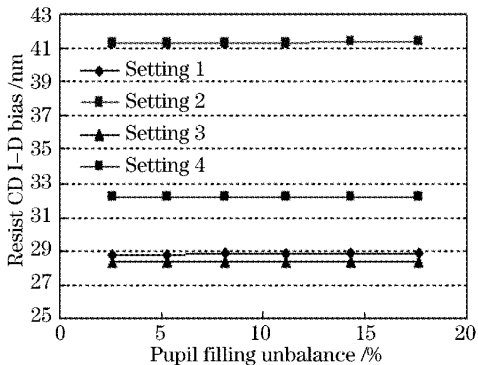


图 5 在不同的照明设置下, I-D bias 随光瞳非对称性的变化曲线

Fig. 5 I-D bias versus pupil filling unbalance for settings 1~settings 4

4 结论

研究了环形照明与四极照明情况下,照明光瞳非对称性对光刻成像质量的影响。结果表明,光瞳非对称性主要影响图形的位置偏移量,对 H-V bias 与 I-D bias 影响非常小,在本文的仿真条件下, H-V bias 与 I-D bias 均小于 0.1 nm。在无像差的理想光学系统中,图形的位置偏移量与照明光瞳非对称

性所描述的光瞳非对称性成线性关系,直线的斜率随着离焦量的增大而增大。由此可以得到任意大小的照明光瞳非对称性引起的图形位置偏移量,从而能够快速评价光瞳参量对光刻质量的影响。根据套刻精度的误差分配原则,计算了光瞳非对称性的容限为 5%。

参 考 文 献

- 1 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying *et al.*. In-situ measurement methods of lens aberrations [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(6): 33~37 (in Chinese)
王帆,王向朝,马明英等. 光刻机投影物镜像差现场测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(6): 33~37
- 2 Zhang Dongqing, Wang Xiangzhao, Shi Weijie *et al.*. A new technique for aberration measurement of a lithographic projection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 679~684 (in Chinese)
张冬青,王向朝,施伟杰等. 光刻机投影物镜的像差原位检测新技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 679~684
- 3 J. P. Kirk, C. J. Proglar. Pupil illumination: in-situ measurement of partial coherence[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3334**: 281~288
- 4 Kazuya Sato, Satoshi Tanaka, Tadahito Fujisawa *et al.*. Measurement of effective source shift using a grating-pinhole mask[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3679**: 99~107
- 5 Stephen P. Renwick, Steve D. Slonaker, Ivan Lalovic *et al.*. Influence of laser spatial parameters and illuminator pupil-fill performance on the lithographic performance of a scanner[C].

- Proc. SPIE*, 2002, **4691**: 1400~1411
- 6 Gary Zhang, Changan Wang, Colin Tan *et al.*. Illumination pupil fill measurement and analysis and its application in scanner V-H bias characterization for 130 nm node and beyond[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5040**: 45~56
- 7 Donis G. Flagello, Robert Socha, Xuelong Shi *et al.*. Optimizing and enhancing optical systems to meet the low k_1 challenge[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5040**: 139~150
- 8 Christopher Progler, Hong Du, Greg Wells. Potential causes of across field CD variation [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3051**: 660~671
- 9 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th ed. Cambridge: Pergamon Press, 1999. 599~606
- 10 Jin-Ha Kim, Seok-Hwan Oh, Dong-Sean Lee. Pattern deformation induced from intensity-unbalance off-axis illumination[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3051**: 54~65
- 11 Jarry J. Levinson. *Principles of Lithography* [M]. Bellingham Washington, SPIE Press, 2001. 36~52
- 12 Aaron Hand. Mix-and-match lithography tackles tighter requirements[J]. *Semiconductor International*, 2003. 15~23

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自2004年5月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款2800元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn