

高数值孔径光学光刻成像中的体效应

周 远^{1,3} 李艳秋²

(¹ 中国科学院电工研究所, 北京 100190; ² 北京理工大学, 北京 100081)

³ 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 为有效控制成像线宽,研究了高数值孔径光学光刻中的体效应并提出一种光刻胶膜层优化方法,利用成像中的摇摆效应平衡体效应对成像线宽的影响。首先根据系统数值孔径和照明相干因子确定成像光入射角分布,相对所有入射光求出光刻胶底面单位体积吸收的能量平均值。然后用最小二乘法拟合得到能量平均值随光刻胶厚度变化的解析式并求能量平均值的导数。最后通过优化光刻胶膜层,使能量平均值的导数绝对值最小。按优化结果设计光刻胶膜层,利用商业光刻软件 Prolith 9.0 得到成像线宽随光刻胶厚度的变化。结果表明,该方法能在 30~40 nm 的光刻胶厚度范围,有效地减小由体效应引起的成像线宽的变化。

关键词 光刻; 体效应; 膜层优化; 高数值孔径; 底层抗反膜

中图分类号 TN305.8 **文献标识码** A

Bulk Effects in Hyper-Numerical Aperture Optical Lithography

Zhou Yuan^{1,3} Li Yanqiu²

(¹ Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)
² Beijing Institute of Technology, Beijing 100190, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract To control critical dimension (CD) effectively, bulk effect is studied in hyper-numerical aperture (NA) optical lithography and a novel optimization strategy for resist film stacks is developed to balance bulk effect with appropriate swing effect. Firstly, the incident angle distribution of imaging light is evaluated based on NA and coherence factor σ settings, so that the average energy ($\bar{\Phi}$) absorbed per unit volume in the resist at the resist bottom surface is calculated over the whole range of incident angle. Secondly, the analytic relationship between $\bar{\Phi}$ and resist thickness (d) is obtained by fitting with least-squares procedure and the derivative of $\bar{\Phi}$ with respect to d is calculated. Lastly, the resist film stacks are optimized to minimize the derivative of $\bar{\Phi}$. With the optimized thin-film stack structure design, the CD variation with resist thickness is obtained by using commercial software Prolith 9.0. The results show that the optimization strategy can effectively overcome CD variation from the bulk effect over the thickness range of 30~40 nm.

Key words optical lithography; bulk effect; film stack optimization; hyper-numerical aperture; bottom anti-reflective coating

1 引 言

高数值孔径(Numerical aperture, NA)光学光刻可望实现 65 nm 以下技术节点^[1,2],所允许的线宽误

差容限变小。而高数值孔径使成像光变斜,由薄膜干涉引起的线宽摇摆效应以及由光刻胶吸收引起的体效应显著增强^[2~5],成像线宽值对光刻胶厚度的变化

收稿日期: 2007-10-10; **收到修改稿日期:** 2007-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(10674134)、教育部长江学者和创新研究团队计划(PCSIRT)及国家 973 计划(2003CB716204)资助课题。

作者简介: 周 远(1976—),男,博士研究生,主要从事高数值孔径光刻成像等方面的研究。

E-mail: zhoyuan@mail. iee. ac. cn

导师简介: 李艳秋(1962—),女,研究员,主要从事光学和微纳技术等方面的研究。E-mail: liyanq@mail. iee. ac. cn

更敏感。线宽摇摆效应是指成像线宽值随抗蚀剂厚度成正弦变化的现象,通过在光刻胶顶部和底部设置顶层抗反膜(Topside anti-reflective coating, TARC)和底层抗反膜(Bottom anti-reflective coating, BARC)可有效地抑制摇摆效应^[6]。与摇摆效应表现的线宽随光刻胶厚度波动的现象不同,体效应则表现为成像线宽随厚度单调增加(或减小)。对于高数值孔径光刻,体效应引起的线宽变化变得不可忽略。

为减小体效应对线宽的影响,Shinn-Sheng Yu等^[7]提出用摇摆效应来均衡体效应的影响,没有考虑实际光刻成像中物镜和照明设置(数值孔径和部分相干因子的设置)的影响,也没有探讨优化对体效应引起的线宽变化的改善情况。实际曝光中,成像光的入射角并不是单一的,部分相干照明扩展了成像光的入射角,使其在一定范围连续分布^[8,9]。所以在用摇摆效应均衡体效应时应该综合所有入射角成像光的影响,而系统数值孔径和照明方式(部分相干因子)的设置直接决定了成像光入射角分布情况。优化膜层来均衡体效应时有必要考虑具体曝光中数值孔径和部分相干因子的设置,同时有必要给出优化对成像线宽随抗蚀剂厚度变化的改善情况,以验证其对体效应的均衡效果。

本文针对确定的曝光中物镜和照明设置来优化抗蚀剂膜层,利用成像中的摇摆效应均衡体效应的影响。按优化结果设计光刻胶膜层,利用商业光刻软件 Prolith 研究得到线宽随光刻胶厚度的变化。

2 高数值孔径光刻中的体效应

光刻胶膜层结构如图 1 所示,当一定入射角 θ 的横电(TE)、横磁(TM)或非偏振成像光射入光刻胶膜层时,光刻胶底面单位体积吸收的能量 Φ 随光刻胶厚度 d 的变化关系都可表示为^[10]

$$\Phi(d) = C \exp(-\alpha d) \{1 + 2|r_r| \exp(-\alpha d) \times$$

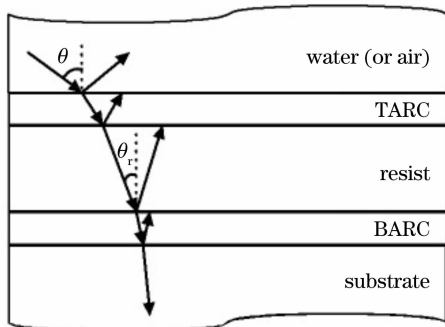


图 1 光刻胶膜层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of resist film stack structure

$$\cos[2\pi(d/p) + \gamma_r] \langle I_{fz}^+ \rangle \Delta t,$$

式中 C 为比例系数, $\alpha = 2K_{0z}^+$ 为光刻胶有效吸收系数, K_{0z}^+ 为光刻胶中光波矢的虚部, $|r_r| = |r_A^-| |r_B^+|$, $\gamma_r = \gamma_A^- + \gamma_B^+$, $|r_A^-|$ 和 γ_A^- 分别为光刻胶顶部界面反射系数及相位延迟量, $|r_B^+|$ 和 γ_B^+ 分别为光刻胶底部界面反射率及相位延迟量, $p = \pi/K_{0z}^R$ 为摇摆效应的周期, K_{0z}^R 为光刻胶中光波矢的实部, $\langle I_{fz}^+ \rangle$ 为入射光强垂直于界面的分量, Δt 为曝光时间。由(1)式可见,除 $\{1 + 2|r_r| \exp(-\alpha d) \cos[2\pi(d/p) + \gamma_r]\}$ 所表示的摇摆效应外,还有 $\exp(-\alpha d)$ 对应的体效应。体效应表明 Φ 随 d 指数衰减,衰减的指数为光刻胶有效吸收系数 α , K_{0z}^+ 的大小反映了体效应的强弱,其与光线入射角 θ 的关系为^[10]

$$K_{0z}^+ = \text{Im}[(2\pi/\lambda)(N_r^2 - n_t^2 \sin^2 \theta)^{1/2}], \quad (2)$$

式中 λ 为曝光波长, N_r 为抗蚀剂复折射系数, n_t 为浸没液体折射系数。图 2 为 K_{0z}^+ 随 θ 的变化关系, n 为光刻胶实体折射率 $n = 1.71$, 可见对于吸收的光刻胶(即消光系数 $k \neq 0$), 当成像光越斜(即 θ 越大), K_{0z}^+ 越大。对于高数值孔径光刻成像, 参加成像的光线变斜, 光刻胶有效吸收系数 α 将增大, 成像的体效应明显增强。这时即使摇摆效应完全消除, 由较大 α 带来的 Φ 随 d 指数衰减的体效应仍然存在, 最终也将引起较大的成像线宽的变化。在高数值孔径光刻所能允许的线宽误差容限越来越小的情况下, 有必要设法减小体效应对线宽的影响。

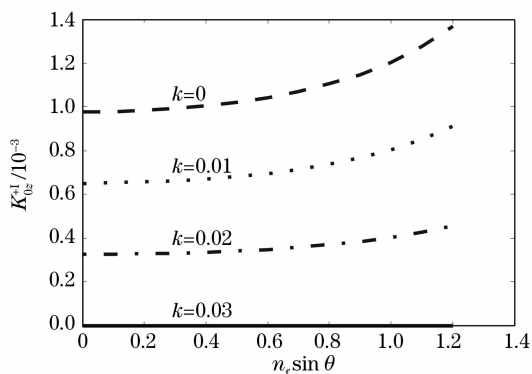


图 2 K_{0z}^+ 随光线入射角 θ 的变化关系

Fig. 2 K_{0z}^+ as a function of incident angle θ

3 在实际曝光中用摇摆效应来均衡体效应

(1)式表示的 $\Phi(d)$ 是针对单个具有确定入射角值 θ 的成像光。实际曝光中成像光入射角值并不单一,而是在一定范围连续分布,其具体分布与光源形状及系统数值孔径有关。所以在分析 Φ 和 d 的关

系时,应考虑入射角 θ 的影响,(1)式中 $\langle I_{\text{te}}^+ \rangle = \langle I_{\text{r}}^+ \rangle \cos^2 \theta$, $\langle I_{\text{r}}^+ \rangle$ 为入射光强。

为研究实际曝光中 Φ 随 d 的变化关系,可根据系统的 NA 和光源的 σ 求 $\Phi(d, \theta)$ 对于 θ 的平均值 $\bar{\Phi}(d)$ 。针对 $NA=1.2$ 的水浸没光刻,采用环形照明,对应的内外部分相干因子 σ 设置为 $\sigma_{\text{in}}=0.82$, $\sigma_{\text{out}}=0.97$,其光源在物镜光瞳坐标中的填充情况如图 3。物镜光瞳坐标采用按 NA/λ 归一化的空间频率坐标。在这样的坐标中,物镜出瞳可用单位圆表示,单位圆内的每一点都代表一个按 NA/λ 归一化的空间频率值(即一个确定的方向)。分析任意一

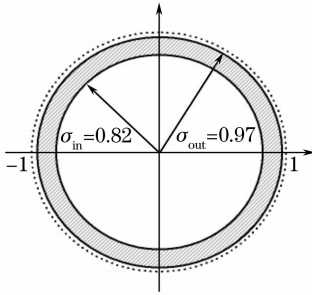


图 3 光瞳面上环形照明的光源形状

Fig. 3 Source shape in pupil plane for annular illumination

坐标点,设其在坐标中离中心点的距离为 σ_r ($\sigma_r \leq 1$),则其代表的空间频率值为 $f_r = \sigma_r NA/\lambda$ 。根据空间频率和传播方向的关系:

$$f_r = n_i \sin \theta / \lambda, \quad (3)$$

由此可得 σ_r 与成像光入射角 θ 对应关系为

$$\theta = \arcsin(\sigma_r NA / n_i). \quad (4)$$

由(4)式可知,在系统 NA 和 n_i 一定的情况下,每个光瞳坐标点的 σ_r 值都与一定的入射角 θ 对应。因此(1)式和(4)式得到

$$\begin{aligned} \Phi(d, \sigma_r) = & C(\sigma_r) \exp[-\alpha(\sigma_r)d] \times \\ & \{1 + 2|r_r(\sigma_r)| \exp[-\alpha(\sigma_r)d] \times \\ & \cos[2\pi d/p(\sigma_r) + \gamma_r(\sigma_r)]\} \langle I_{\text{r}}^+ \rangle \Delta t. \end{aligned} \quad (5)$$

可以根据光源在物镜光瞳坐标中的填充情况求 $\Phi(d, \sigma_r)$ 相对 σ_r 的平均值 $\bar{\Phi}(d)$ 来反应实际曝光中 Φ 随 d 的变化关系。

由图 3 可见, σ_r 所处的范围为 $\sigma_{\text{in}} \leq \sigma_r \leq \sigma_{\text{out}}$ 。离光瞳中心距离相同的坐标点对应的 σ_r 相同,说明可用以 σ_r 为半径的圆周长 $2\pi\sigma_r$ 作为权重因子来表示相同入射角光线的相对数目。假设各方向入射光光强 $\langle I_{\text{r}}^+ \rangle$ 相同,且 $\bar{\Phi}(d)$ 被归一化为无量纲的量, $\Phi(d, \sigma_r)$ 相对 σ_r 的平均值 $\bar{\Phi}(d)$ 可表示为

$$\bar{\Phi}(d) = \frac{\int_{\sigma_{\text{in}}}^{\sigma_{\text{out}}} 2\pi\sigma_r C(\sigma_r) \exp[-\alpha(\sigma_r)d] \left\{ 1 + 2|r_r(\sigma_r)| \exp[-\alpha(\sigma_r)d] \cos\left[\frac{2\pi d}{p(\sigma_r)} + \gamma_r(\sigma_r)\right] \right\} d\sigma_r}{\int_{\sigma_{\text{in}}}^{\sigma_{\text{out}}} 2\pi\sigma_r C(\sigma_r) d\sigma_r}. \quad (6)$$

(6) 式中的 $\bar{\Phi}(d)$ 只能通过计算机程序得到数值解。本文用最小二乘法对 $\bar{\Phi}(d)$ 关系曲线进行拟合,得出 $\bar{\Phi}(d)$ 随 d 的变化解析式。为利于观察摇摆效应和体效应,拟合函数采用如下形式:

$$\bar{\Phi}(d) = \exp[-A_1 d] \{1 + 2A_2 \exp[-A_1 d] \cos[2\pi d/A_3 + A_4]\}, \quad (7)$$

对照(1)式拟合参量 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别对应 α 、 $|r_r|$ 、 p 以及 γ_r 。(7)式中 $\exp[-A_1 d]$ 描述体效应,随 d 单调递减, $\left\{1 + 2A_2 \exp[-A_1 d] \cos\left[\frac{2\pi d}{A_3} + A_4\right]\right\}$ 描述摇摆效应,随 d 波动。用摇摆效应来均衡体效应, d 应满足如下条件:

$$(2m+1)\pi < 2\pi d/A_3 + A_4 < (2m+2)\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

为方便研究,取一定厚度值 d_0 使其满足 $2\pi d_0/A_3 + A_4 = 2m\pi + 3\pi/2$, 在 d_0 处求 $\bar{\Phi}(d)$ 的导数得

$$\bar{\Phi}'(d_0) = \exp(-A_1 d_0) (4A_2 \pi \exp(-A_1 d_0) / A_3 - A_1). \quad (9)$$

对于不同的光刻胶膜层设置,所得到的 $\bar{\Phi}'(d_0)$ 是不同的,可通过优化光刻胶膜层光学参量和厚度,使 $|\bar{\Phi}'(d_0)|$ 最小。

3 对体效应的均衡效果

针对 45 nm 线空密集图形,就两种曝光成像设

置来验证该方法的实际效果。第一种设置(Case I)的 NA 为 1.2,采用环形照明和 6% 衰减相移掩模,内外相干因子分别为 0.82 和 0.97;第二种设置(Case II) NA 为 1.35,采用交叉弧状照明和二元掩模,内外相干因子分别为 0.72 和 0.87。根据每一种设置下具体照明设置,对底层抗反膜的厚度进行

优化。按优化结果设计底层抗反膜,利用商业光刻软件Prolith9.0研究得到线宽随光刻胶厚度的变化。两种情况针对的光刻胶膜层设置如图4所示,双层底层抗反膜材料在实际中都可得到^[1],各膜层的光学参量已确定,需要优化的是底层抗反膜1和

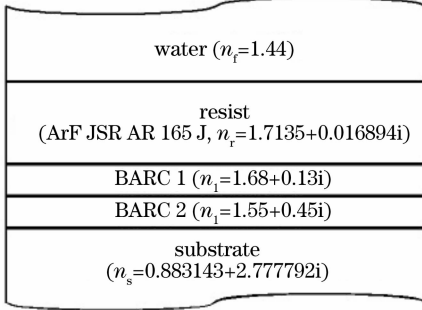


图4 光刻胶膜层的设置

Fig. 4 Configuration of photoresist stack

底层抗反膜2层的厚度分别 d_1 和 d_2 。曝光使用TE 偏振照明。

$|\bar{\Phi}'(d_0)|$ 随厚度 d_1 和 d_2 变化关系如图5所示。第一种曝光设置下(Case I), $|\bar{\Phi}'(d_0)|$ 最小时 $d_1=35\text{ nm}, d_2=38\text{ nm}$; 第二种曝光设置下(Case II)对应的厚度值为 $d_1=38.5\text{ nm}, d_2=39.5\text{ nm}$ 。图6展示了对底层抗反膜厚度值优化后所得的 $\bar{\Phi}$ 随光刻胶厚度变化关系,图中虚线对应的,底层抗反膜厚度值为 $d_1=41\text{ nm}, d_2=53\text{ nm}$,此时虽然摇摆效应已基本消除,但还有体效应, $\bar{\Phi}$ 随 d 变化仍然较大;图中实线是用摇摆效应均衡体效应对底层抗反膜厚度优化后得的 $\bar{\Phi}$ 随 d 的变化。由图6可见,在约40 nm 光刻胶厚度范围内(Case I: 80~120 nm; Case II: 70~110 nm), $\bar{\Phi}$ 随 d 的变化很小,体效应的影响被减弱。

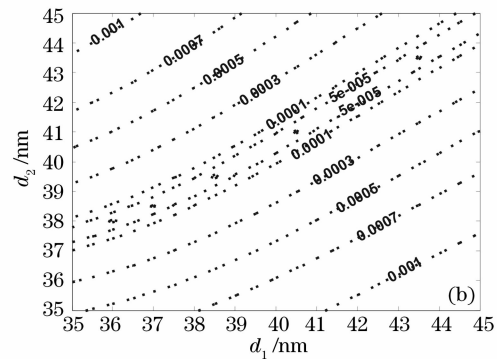
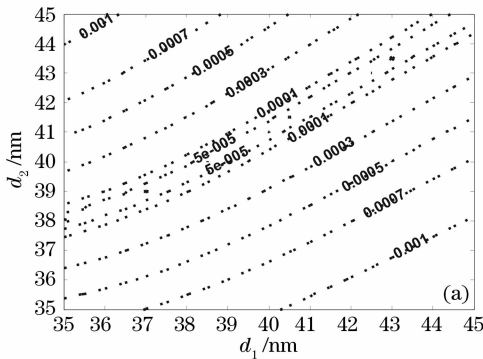


图5 $|\bar{\Phi}'(d_0)|$ 随两底层抗反膜厚度 d_1, d_2 的变化。(a)第一种设置,(b)第二种设置

Fig. 5 Variation of $|\bar{\Phi}'(d_0)|$ versus thicknesses of two BAKCS d_1, d_2 . (a) Case I, (b) case II

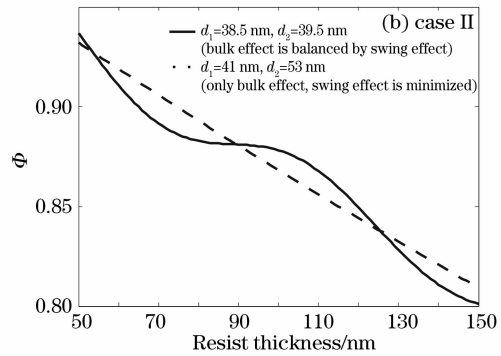
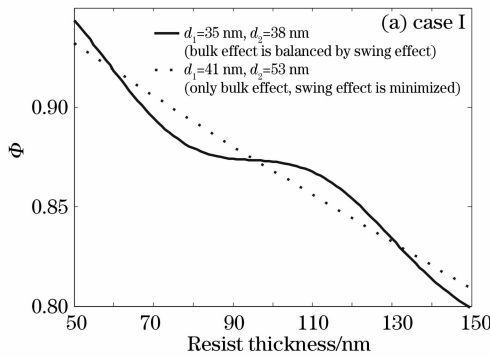


图6 膜层优化后的 $\bar{\Phi}$ 随光刻胶厚度的变化关系

Fig. 6 Variation of $\bar{\Phi}$ versus photoresist thickness for the film optimized

根据优化的底层抗反膜厚度值,利用商业软件Prolith研究得到成像线宽随光刻胶厚度的变化如图7所示。可知,若设计膜层仅为消除成像中的摇摆效应,则体效应使线宽随光刻胶厚度增加而单调递增,

仍将引起较大的线宽变化;实线在30~40 nm的光刻胶厚度范围(Case I: 80~110 nm; Case II: 70~110 nm)保持相对平直。光刻胶厚度在此范围变动时,成像线宽值保持在45 nm附近,有利于工艺控制。

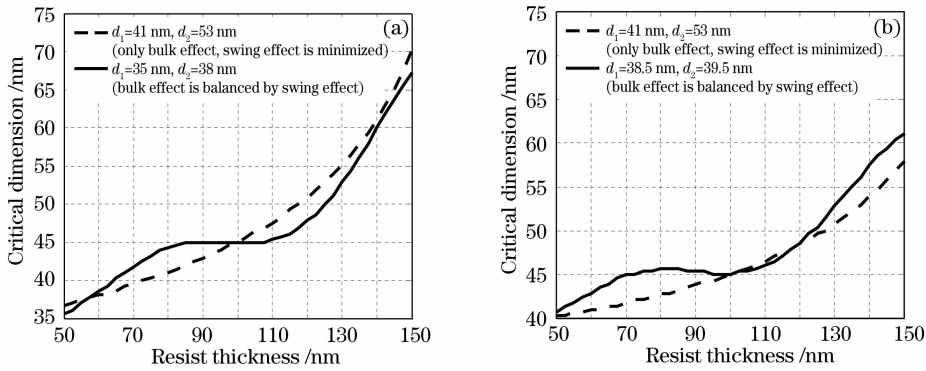


图 7 膜层优化后成像线宽随光刻胶厚度的变化关系

Fig. 7 Variation of line width versus photoresist thickness after film optimization

4 结 论

针对实际曝光中物镜和照明的具体设置来优化抗蚀剂膜层,利用成像中的摇摆效应均衡体效应的影响。首先根据曝光中的数值孔径和部分相干因子确定成像光入射角的分布,求出相对所有成像光的体积吸收能量平均值。用最小二乘法对体积吸收能量平均值与抗蚀剂厚度的关系曲线进行拟合,得出它们之间的变化解析式。按优化结果设计光刻胶膜层,利用商业光刻软件 Prolith 研究得到成像线宽随光刻胶厚度的变化。结果表明,该方法能在相对宽的光刻胶厚度范围内,有效地减小由体效应引起的线宽的变化。在目前高数值孔径光刻所能允许的线宽误差容限越来越小的情况下,该方法可被用于实际光刻工艺控制。

参 考 文 献

- 1 Li Yanqiu. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 865~868
李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 865~868
- 2 Sun Zhiyuan, Li Yanqiu. Spatial frequency analysis of resolution enhancement technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1758~1763
孙知渊,李艳秋. 分辨力增强技术的频谱分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1758~1763

- 3 T. A. Brunner, A. H. Gabor, C. J. Wu *et al.*. High NA swing curve effects[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 1050~1057
- 4 Timothy A. Brunner, Nakgeun Seong, William D. Hinsberg *et al.*. High numerical aperture lithographic imagery at the Brewster angle [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2002, **1**(3): 188~196
- 5 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Optimization of topside antireflective coatings for hyper numerical aperture lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 337~343
周 远,李艳秋. 高数值孔径光刻成像中顶层抗反膜的优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 337~343
- 6 T. A. Brunner. Optimization of optical properties of resist processes[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1466**: 297~308
- 7 Shinn-Sheng Yu, Burn J. Lin, Anthony Yen *et al.*. Thin-film optimization strategy in high numerical aperture optical lithography, part 2: applications to ArF [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2005, **4**(4): 043004-1~043004-9
- 8 Chris A. Mack. *Inside PROLITH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation* [M]. Austin: FINLE Technologies, Inc., 1997. 9~20
- 9 Z. Mark Ma, C. A. Mack. Impact of illumination coherence and polarization on the imaging of attenuated phase shift masks[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 1522~1532
- 10 Shinn-Sheng Yu, Burn J. Lin, Anthony Yen *et al.*. Thin-film optimization strategy in high numerical aperture optical lithography, part 1: principles [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2005, **4**(4): 043003-1~043003-11
- 11 J. B. Claypool, M. Weimer, V. Krishnamurthy *et al.*. New advanced BARC materials for ultra-high NA applications [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5753**: 679~689