

文章编号: 0253-2239(2008)03-0472-06

高数值孔径光刻成像中双层底层抗反膜的优化

周 远^{1,3} 李艳秋²

(¹ 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 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 在高数值孔径光学光刻中, 成像光入射角分布在较大范围内, 传统的单底层抗反膜不足以控制抗蚀剂-衬底界面反射率(衬底反射率)。考虑照明光源形状以及掩模的影响, 提出了一种新的双层底层抗反膜优化方法, 依据各级衍射光光强求衬底反射率的最小权重平均值来配置膜层。针对传统掩模、衰减相移掩模以及交替相移掩模的情况, 用该方法优化双层底层抗反膜。结果表明, 如果成像时进入物镜光瞳的高阶光越多, 高阶光光强越大, 则掩模对底层抗反膜优化的影响越大。在某些成像条件下, 如使用交替相移掩模实现成像, 有必要在底层抗反膜优化中考虑掩模的影响。

关键词 光学光刻; 衬底反射率; 底层抗反膜(BARC); 高数值孔径

中图分类号 TN305.8 **文献标识码** A

Optimization of Double Bottom Antireflective Coating for Hyper Numerical Aperture Lithography

Zhou Yuan^{1,3} Li Yanqiu²

¹ *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*
² *Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*
³ *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Abstract In hyper numerical aperture lithography, the incident angle of imaging rays varies in a wide range. Conventional single bottom antireflective coatings (BARC) cannot control reflectivity (substrate reflectivity) at the resist-substrate interface. A novel dual BARC optimization method is developed by taking into account light source shape and mask diffraction for specific applications. A weighted average of the substrate reflectivity for the 0st order as well as a higher order is used when optimizing the dual BARC. BARC structures are optimized with the new method in the cases of binary mask, attenuated phase-shift mask and altering phase-shift mask. The results show that, the higher diffraction orders are captured by the objective lens (or larger the intensity of high orders is), more noteworthy the influence of mask is for BARC optimization. In some cases, such as imaging with altering phase-shift mask, it is indispensable to take the mask into account in BARC optimization.

Key words optical lithography; substrate reflectivity; bottom antireflective coatings (BARC); hyper-numerical aperture

1 引 言

浸没式 ArF 光刻(数值孔径 $NA > 1$)可以实现 65 nm 以下技术节点集成电路的制备^[1~5]。短波长(193 nm)、大数值孔径成像导致抗蚀剂-衬底界面反射(衬底反射)增强, 带来显著的薄膜干涉效应, 包括驻波效应、摇摆效应等, 使抗蚀剂线条轮廓变形、

成像线宽(CD)难以控制^[6]。在衬底和抗蚀剂间设置底层抗反膜(BARC)可控制衬底反射率^[7~8], 但在高数值孔径光刻成像中, 成像光入射角分布在较大范围, 传统使用的单层底层抗反膜不足以控制衬底反射率^[9]。为有效压低衬底反射率, 尽量减弱薄膜干涉效应, 对双层底层抗反膜参量进行合适地优

收稿日期: 2007-05-15; 收到修改稿日期: 2007-09-19

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, 湖南浏阳人, 博士研究生, 主要从事高数值孔径光刻成像方面的研究。

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

导师简介: 李艳秋(1962-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学和微纳技术方面的研究。

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

化配置是必要的。

优化底层抗反膜光学系数和结构系数,使数值孔径在确定的范围内所有入射角光线的平均衬底反射率最小^[10,11]。该方法没考虑曝光成像中光源和掩模对成像光线入射角分布的影响,入射角范围过宽,优化效果不佳。商业光刻软件 Prolith 根据光源具体形状确定光线入射角的分布,求出所有入射角光线的衬底反射率权重平均值,使其最小。该方法考虑了光源对成像光线入射角分布的影响,其优化效果较好,但没考虑掩模的影响。照明系统发出的光通过掩模后,衍射出 0 级衍射光和高阶衍射光,一部分高阶衍射光(如±1 级)进入物镜光瞳参加成

像,在底层抗反膜优化时需考虑高阶衍射光的作用。

本文在对双层底层抗反膜进行优化时考虑了光源和掩模的影响,将各级衍射光光强作为一个权重因子,求进入物镜光瞳的所有衍射光(包括 0 级和高阶)衬底反射率的最小权重平均值,并依此对两层底层抗反膜光学和结构参量进行优化。

2 优化方法

2.1 衬底反射率相对光线入射角的依赖关系

双层底层抗反膜结构如图 1。对光路逐层分析可得抗蚀剂中向下(正向)和向上(负向)的光电矢量振动振幅 E_r^+ 和 E_r^- ^[12]:

$$\begin{bmatrix} E_r^+ \\ E_r^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{r1}} \begin{bmatrix} 1 & r_{r1} \\ r_{r1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_1) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_1) \end{bmatrix} \frac{1}{t_{12}} \begin{bmatrix} 1 & r_{12} \\ r_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_2) \end{bmatrix} \frac{1}{t_{2s}} \begin{bmatrix} 1 & r_{2s} \\ r_{2s} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^+(0) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 r_{r1} 、 r_{12} 、 r_{2s} 分别为抗蚀剂-底层抗反膜 1、底层抗反膜 1-底层抗反膜 2 以及底层抗反膜 2-衬底界面的反射系数; t_{r1} 、 t_{12} 、 t_{2s} 为对应的界面透射系数; δ_1 、 δ_2 分别为光在底层抗反膜 1 和底层抗反膜 2 膜层中的相位延迟; $E_s^+(0)$ 为衬底中向下(正向)的光电矢量振动振幅。整个抗蚀剂-基底界面反射系数 r_{rs} 为

$$r_{rs} = \frac{E_r^-}{E_r^+} = \frac{r_{r1} + r_{12} \exp(i2\delta_1) + r_{2s} \exp[2i(\delta_1 + \delta_2)] + r_{r1} r_{12} r_{2s} \exp(i2\delta_2)}{1 + r_{r1} r_{12} \exp(i2\delta_1) + r_{r1} r_{2s} \exp[2i(\delta_1 + \delta_2)] + r_{2s} r_{12} \exp(i2\delta_2)}, \quad (2)$$

相应衬底反射率 $R_{rs} = |r_{rs}|^2$, 可得衬底反射率对入射角 θ_r 的依赖关系 $R(\theta_r)$ 。

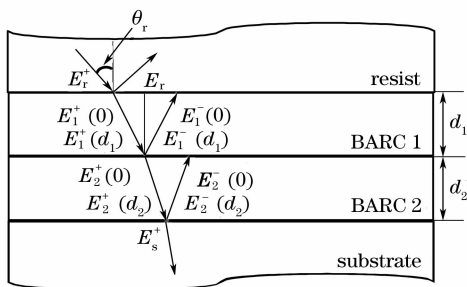


图 1 双层底层抗反膜结构示意图

Fig. 1 Structure of resist-substrate interface for double bottom antireflective coating

2.2 物镜光瞳面上的掩模衍射图样

光源每一源点发出的光经照明系统后都以固定单一的入射角照射掩模分出多级衍射光。根据基尔霍夫衍射理论,0 级衍射光与入射光方向相同,高级(±1 级,±2 级等)衍射光发生偏转。由于物镜数值孔径的限制,仅 0 级和一部分高级衍射光能进入光瞳参加成像,成像光入射角 θ_r 的分布可以通过物镜光瞳坐标进行分析。

物镜光瞳坐标是按 NA/λ 归一化的空间频率坐

标, λ 为曝光波长,物镜出瞳用单位圆表示。参加成像的各级衍射光在光瞳面上必分布在单位圆内,单位圆内每坐标点代表空间频率值(即确定方向)。设其离坐标中心的距离为 σ_r ($\sigma_r \leq 1$), 则其代表的空间频率值为 $f_r = \sigma_r (NA/\lambda)$ 。由空间频率和传播方向的关系 $f_r = n_t \sin \theta_t / \lambda$ 可得 $n_t \sin \theta_t = \sigma_r NA$, 其中 n_t 和 θ_t 为液体折射系数及其中的入射角。光通过液体-抗蚀剂界面时,满足菲涅耳折射定律: $N_r \sin \theta_r = n_t \sin \theta_t = \sigma_r NA$, N_r 为光刻胶的折射率,则

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\sigma_r NA}{N_r}\right). \quad (3)$$

光源上每源点发出的光经掩模衍射后在光瞳坐标内对应一组离散点(离散的 σ_r 值),即每一级衍射光对应一 σ_r 值。

高分辨力光刻成像仅 0 级和±1 级衍射光能进入物镜参加成像^[13],以线空(L&S)掩模图形为例,分析±1 级衍射光在光瞳面上相对 0 级衍射光的位置侧移量 σ_s 。对于二元掩模(BIM)和衰减相移掩模(attPSM),1 级衍射光的空间频率为 $f_s = 1/p$, p 为线条周期。对于交替相移掩模(altPSM),1 级衍射光的空间频率为 $f_s = 1/(2p)$ 。对应的光瞳面上坐标偏移为

$$\sigma_s = \frac{f_s}{NA/\lambda} = \frac{\lambda}{NAp}, \quad (\text{BIM, attPSM}) \quad (4)$$

$$\sigma_s = \frac{f_s}{NA/\lambda} = \frac{\lambda}{2NAp}, \quad (\text{altPSM}), \quad (5)$$

为得到衍射光相对光强,可分析掩模的频谱.若 l 为线条宽度, s 为线条间隙, k 为衰减相移掩模的透射率,则三类掩模透射率函数为

$$\begin{aligned} m(x) &= \text{rect}(x/l)\text{comb}(x/p), \quad (\text{BIM}) \\ m(x) &= \text{rect}(x/l)\text{comb}(x/p) - \\ & \quad k\text{rect}(x/s)\text{comb}[(x-p/2)/p], \quad (\text{attPSM}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} m(x) &= \text{rect}(x/l)\text{comb}(x/2p) - \\ & \quad \text{rect}(x/l)\text{comb}[(x-p)/2p], \quad (\text{altPSM}) \end{aligned}$$

对 $m(x)$ 作傅里叶变换可得掩模频谱:

$$\begin{aligned} A(f_x) &= \frac{l}{p}\text{sinc}(lf_x)\text{comb}(pf_x), \quad (\text{BIM}) \\ A(f_x) &= \frac{l}{p}\text{sinc}(lf_x)\text{comb}(pf_x) - \\ & \quad \frac{ks}{p}\text{sinc}(sf_x)\text{comb}(pf_x)\exp(-j\pi pf_x), \quad (\text{attPSM}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A(f_x) &= \frac{l}{2p}\text{sinc}(lf_x)\text{comb}(2pf_x) - \\ & \quad \frac{l}{2p}\text{sinc}(lf_x)\text{comb}(2pf_x)\exp(-j2\pi pf_x), \quad (\text{altPSM}) \end{aligned}$$

所以三种掩模 1 级衍射光的电矢量振幅(相对与入射光)为

$$\begin{aligned} A\left(\frac{1}{p}\right) &= \frac{l}{p}\text{sinc}\left(\frac{l}{p}\right), \quad (\text{BIM}) \\ A\left(\frac{1}{p}\right) &= \frac{l}{p}\text{sinc}\left(\frac{l}{p}\right) - \frac{ks}{p}\text{sinc}\left(\frac{s}{p}\right)\exp(-j\pi), \quad (\text{attPSM}) \\ A\left(\frac{1}{2p}\right) &= \frac{l}{2p}\text{sinc}\left(\frac{l}{2p}\right) - \frac{l}{2p}\text{sinc}\left(\frac{l}{2p}\right)\exp(-j\pi), \quad (\text{altPSM}). \end{aligned} \quad (7)$$

实际光刻曝光成像系统一般使用部分相干扩展光源,采用柯勒照明^[14,15].光源上所有源点照明使不同衍射级次成像光在光瞳坐标中一定范围内出现连续分布,形成光瞳衍射图样^[14].各级图样形状由光源形状(相应 σ 设置)决定^[13], ± 1 衍射图样相对 0 级衍射图样发生位置侧移.各级衍射光相对光强可根据掩模结构由(7)式确定.因此不同的照明和掩模设置,对应在物镜光瞳面上的衍射图样不同,导致 σ_r 值的分布不同.以环形照明方式为例,设其内

外相干因子分别为 σ_{in} 和 σ_{out} ,其经过线空掩模衍射,在物镜光瞳面上的投影如图 2,虚线表示光瞳边界,区域 A 代表 0 级光,两侧 B 区代表 1 级衍射光,其图样位置由于掩模衍射而相对 0 级光发生侧移.

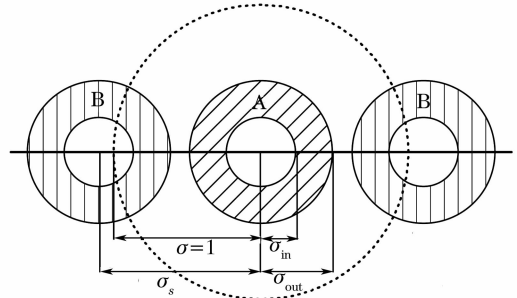


图 2 环形照明在物镜光瞳面上衍射图样示意图

Fig. 2 Schematic of diffraction pattern at the pupil of objective lens for annular illumination

2.3 优化方法

在确定的数值孔径、光源设置及掩模设置情况下,按图 3 所示的流程对底层抗反膜进行优化.首先求出 $R(\theta_r), R(\sigma_r)$.然后,由光源设置确定光瞳面上衍射图样形状及大小;确定高阶(± 1 级)衍射光在光瞳面上的位置侧移量 σ_s 以及 0 级衍射光和高阶(± 1 级)衍射光相对光强 I_k ;确定各级衍射图样中 σ_r 范围($\sigma_{min} \sim \sigma_{max}$).以光瞳面上 σ_r 为圆心的同心圆圆周与衍射图样交叠区的弧长 $L(\sigma_r)$ 来表征 σ_r 所对应的光线.最后,在 σ_r 的分布范围内,结合 $R(\sigma_r)$,以 $L(\sigma_r)$ 和 I_k 为权重,求出针对所有成像光衬底反射率的权重平均值:

$$\bar{R} = \sum_k I_k \int_{\sigma_{k_{min}}}^{\sigma_{k_{max}}} R(\sigma_r)L(\sigma_r)d\sigma_r / \left[\sum_k I_k \int_{\sigma_{k_{min}}}^{\sigma_{k_{max}}} L(\sigma_r)d\sigma_r \right], \quad (8)$$

式中 $\sigma_{k_{min}}, \sigma_{k_{max}}$ 分别为第 $k(k=0, +1, \dots)$ 级光在光

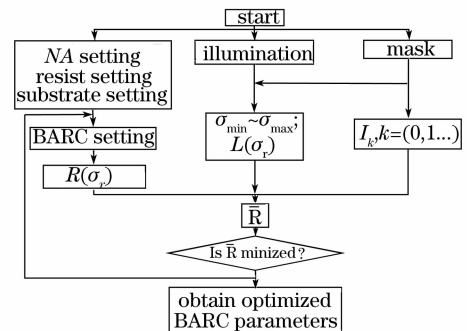


图 3 考虑掩模的底层抗反膜优化流程图

Fig. 3 Flow chart of bottom antireflective coatings optimization taking the mask into account

瞳坐标上的填充区离光瞳中心的最小和最大距离。优化底层抗反膜光学参量和结构参量使权重平均值最小。该方法考虑了光源和掩模的影响,相对全入射角范围底层抗反膜优化方法和 Prolith 底层抗反膜优化方法,更准确。

3 优化结果及对光刻性能的改善

为比较三种方案的优化结果,针对 45 nm 线宽密集线条,就三种情况进行研究:1)传统照明(CI, $\sigma_{\text{out}}=0.12$)结合交替相移掩模(altPSM);2)环形照明(AI, $\sigma_{\text{out}}=0.97, \sigma_{\text{in}}=0.82$)结合二元掩模(BIM);3)环形照明($\sigma_{\text{out}}=0.97, \sigma_{\text{in}}=0.82$)结合衰减相移掩模(attPSM)。采用水浸没光刻($NA=1.2$)和横电偏振照明。抗蚀剂膜层复折射率为:抗蚀剂为 $1.7135-i0.0169$,顶层抗反膜为 $1.68-i0.13$,底层抗反膜为 $1.55-i0.45$,硅衬底为 $0.883-i2.778$ 。

按全入射角范围底层抗反膜优化方法优化双层抗反膜厚度,得到顶层抗反膜和底层抗反膜的优化厚度分别为 $d_1=41 \text{ nm}, d_2=47 \text{ nm}$ 。由于该方法的优化结果不依赖光源和掩模设置,三种情况的优化结果相同。三种优化方法的双底层抗反膜衬底反射率随双底层抗反膜厚度变化如图 4,对应的双底层抗反膜厚度的优化值见表 1。

比较图 4(a),图 4(b),在传统照明结合交替相移掩模情况下,采用 Prolith 底层抗反膜优化方法和提出的底层抗反膜优化方法所得的衬底反射率完全不同,底层抗反膜厚度优化值也不同,说明掩模对底层抗反膜优化结果影响很大。图 4(c)~图 4(f)相差很小,说明在环形照明结合二元掩模,以及环形照明结合衰减相移掩模情况下,掩模对底层抗反膜优化结果的影响很小。

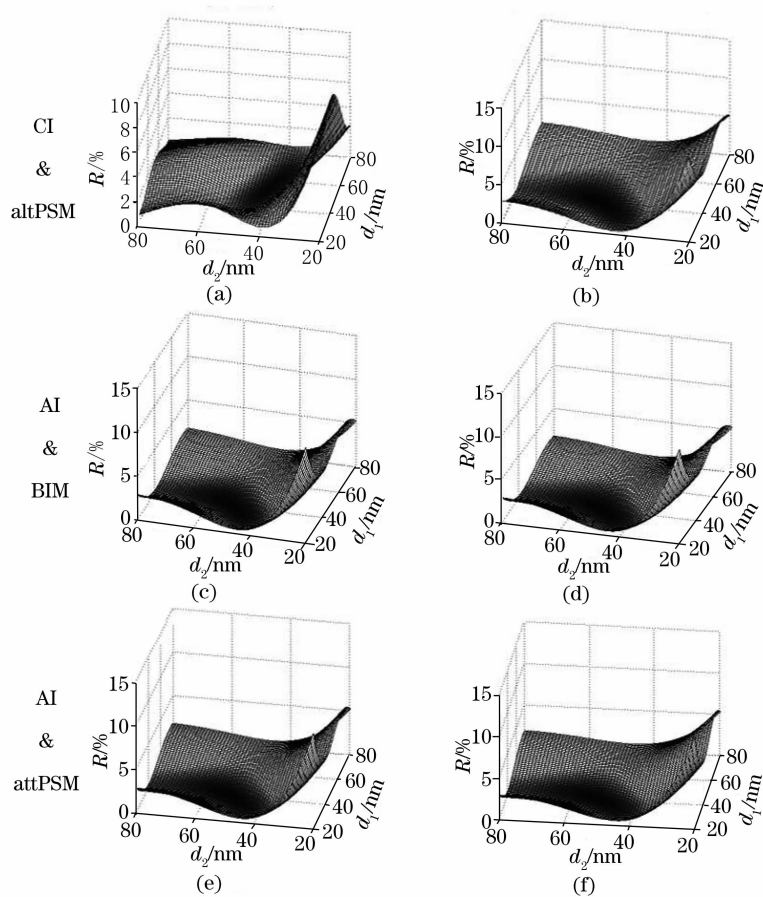


图 4 衬底反射率随双底层抗反膜厚度的变化。(a),(c),(e) Prolith 底层抗反膜优化方法,(b),(d),(f)考虑掩模的底层抗反膜优化方法

Fig. 4 Relationship between substrate reflectivity and thickness of double BARCs. (a),(c),(e) Prolith BARC optimization method, (b),(d),(f) our BARC optimization method

表 1 双底层抗反膜厚度的优化值

Table 2 Optimized thickness of double bottom antireflective coatings

| Illumination mask | Total-incidence optimization | | Prolith optimization | | Novel optimization | |
|-------------------|------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | d_1/nm | d_2/nm | d_1/nm | d_2/nm | d_1/nm | d_2/nm |
| CI& altPSM | 41 | 47 | 55 | 41 | 42 | 54 |
| AI& BIM | | | 41 | 53 | 42 | 53 |
| AI& attPSM | | | | | 42 | 54 |

从光刻胶成像中驻波的角度来研究三种底层抗反膜优化方法对光刻性能的改善效果。依据三种方法优化得到的膜层厚度设置底层抗反膜,用商业光刻软件 Prolith 9.0 进行曝光仿真,得到的抗蚀剂成像线条轮廓如图 5 所示。

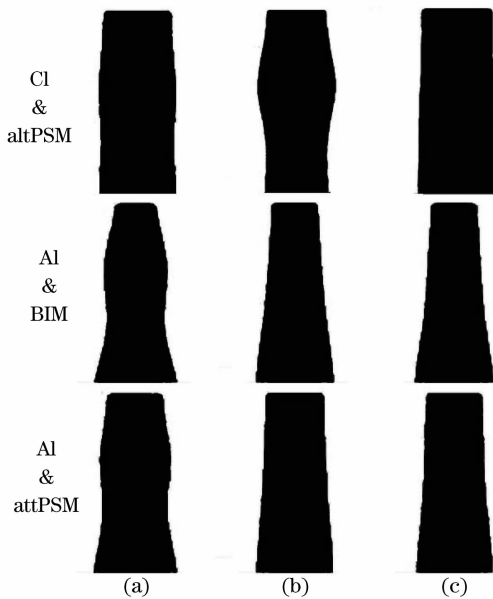


图 5 设置底层抗反膜后得到的抗蚀剂线条轮廓。(a)全入射角范围优化方法,(b) Prolith 优化方法,(c)本文的优化方法

Fig. 5 Resist profiles after bottom antireflective coating optimization. (a) Total incidence angle optimization method, (b) Prolith optimization method, (c) our optimization method

由图 5 可知,采用传统照明结合交替相移掩模实现光刻成像时,若采用 Prolith 底层抗反膜优化方法,得到的成像图形驻波效应很明显。采用全入射角范围底层抗反膜优化方法,驻波效应有所改善。新底层抗反膜优化方法对驻波效应的消减最明显。采用环形照明结合二元掩模(或衰减相移掩模)实现光刻成像时,采用全入射角范围底层抗反膜优化方法,驻波效应还较明显。采用 Prolith 底层抗反膜优化方法与新底层抗反膜优化方法优化结果差别很小,都对驻波效应有明显的消减。

4 比较三种优化方案

图 5 没有考虑到由照明形状或掩模衍射所确定的人射角的分布范围。

新底层抗反膜优化方法与 Prolith 底层抗反膜优化方法的主要差别是考虑了掩模衍射。由于 0 级衍射光与入射光方向相同,0 级光在光瞳面上的衍射图样只反应了照明形状对入射角分布的影响。掩模对入射角分布的影响主要表现在 1 级光的引入。因此,如果进入物镜光瞳参加成像的 ± 1 级光越多,1 级光相对 0 级光的光强比越大,则掩模对底层抗反膜优化结果的影响越大。

在传统照明结合交替相移掩模曝光成像的情况下,图 6(a)、图 6(b)分别为无掩模时、有掩模时光瞳面上的光强分布,两种情况下光的入射角的分布差别很大。这解释了软件 Prolith 优化方法没考虑掩模对底层抗反膜优化时,得到的成像图形驻波效应很明显的的原因。新的底层抗反膜优化方法考虑了掩模影响,能有效地消减驻波效应。

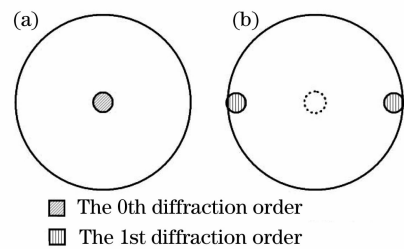


图 6 传统照明结合交替相移掩模时物镜光瞳面上衍射图样分布。(a)无掩模,(b)有掩模

Fig. 6 Distribution of diffraction pattern at the pupil plane of objective lens for conventional illumination and altering phase-shift mask. (a) No mask, (b) mask

由于照明设置相同,环形照明结合二元掩模及衰减相移掩模曝光成像情况下光瞳面上衍射图样分布形状是相同的,如图 7,只是 0 级衍射光和 1 级衍射光的相对光强不同。由图 7 可知,相对于 0 级衍射光,进入物镜光瞳的 ± 1 级衍射光很少,且 ± 1 级光比 0 级光的光强小,因此掩模对底层抗反膜优化结果的影响很小。这解释了在环形照明结合二元掩模及衰减相移掩模曝光成像时,考虑了掩模影响的

底层抗反膜优化方法与 Prolith 底层抗反膜优化方法所得结果相差很小的原因。

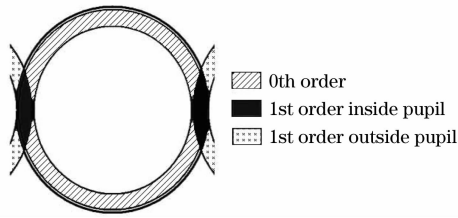


图 7 环形照明结合二元掩膜及衰减相移掩膜时物镜光瞳面上衍射图样分布

Fig. 7 Distribution of diffraction pattern at the pupil plane of objective lens for annular illumination and binary mask or attenuated phase-phase mask

5 结 论

针对照明和掩膜设置的曝光成像提出一种新的底层抗反膜优化方法,对底层抗反膜进行优化时,考虑掩膜衍射的影响。将该方法对底层抗反膜优化所得结果与全入射角范围底层抗反膜优化方法以及 Prolith 底层抗反膜优化方法的结果比较。从全入射角范围底层抗反膜优化方法的优化结果可见,针对数值孔径确定的整个入射角范围内求衬底反射率的平均值最小,没考虑由照明形状或掩膜衍射所确定的入射角分布,对于某些确定照明设置和掩膜的光刻成像,优化效果不佳。Prolith 底层抗反膜优化方法和新底层抗反膜优化方法对比结果表明,在曝光成像时进入物镜光瞳参加成像的 ± 1 级光越多,1级光相对0级光的光强比越大,则掩膜对底层抗反膜优化结果的影响就越大。

参 考 文 献

1 Guobin Yu, Tingwen Xing, Hanmin Yao. An investigation on capabilities of polarization control for immersion lithography through simulation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(suppl): 198~199

2 Guosheng Huang, Yanqiu Li. Simulation study of the $NA\sigma'$'s dependence of DOF for 193-nm immersion lithography at 65-nm node[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 73~75

3 Yanqiu Li, Guosheng Huang. Resolution enhancement technology in 65 nm ArF immersion lithography[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2004, (118): 9~13
李艳秋,黄国胜. 分辨率增强技术在 65 nm 浸没式 ArF 光刻中的应用[J]. *电子工业专用设备*, 2004, (118): 9~13

4 Sun Zhiyuan, Li Yanqiu. Spatial frequency analysis of resolution enhancement technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1758~1764
孙知渊,李艳秋. 分辨率增强技术的频谱分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1758~1764

5 Wu Longhai. Introduction of immersion photolithography[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2004, (11): 46~48
吴龙海. 浸没式光刻技术[J]. *微纳电子技术*, 2004, (11): 46~48

6 T. A. Brunner. Optimization of optical Properties of resist processes[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1466**: 297~308

7 T. A. Brunner, N. Seong, W. D. Hinsberg. High numerical aperture lithographic imagery at the Brewster angle[J]. *J. Microliith.*, *Microfab.*, *Microsyst.*, 2002, **1**(3): 188~196

8 Victor Huang, T. S. Wu, Mars Yang *et al.*. Dual anti-reflection layers for ARC/hard-mask applications[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6154**: 61543Q1~8

9 D. J. Abdallah, M. Neisser, R. R. Dammel *et al.*. 193 nm dual layer organic BARCs for high NA immersion lithography[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5753**: 417~435

10 Nobuyuki N. Matsuzawa, Boontarika Thunnakart, Ken Ozawa *et al.*. Optimization of dual BARC structures for hyper-NA immersion lithography[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6153**: 61531J~12

11 Sean Burns, Dirk Pfeiffer, Arpan Mahorowala *et al.*. Silicon containing polymer in applications for 193 nm high NA lithography processes[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6153**: 61530K~12

12 Shinn-Sheng Yu, Burn J. Lin, Anthony Yen. Thin-film optimization strategy in high numerical aperture optical lithography, part 1: principles[J]. *J. Microliith.*, *Microfab.*, *Microsyst.*, 2005, **4**(4): 043003-1~11

13 Chris A. Mack. The lithography expert: depth-of-focus and the alternating phase-shift mask[J]. *Microliithography World*, 2004, 20~21

14 Chris A. Mack. *Inside PROLITH: A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation* [M]. Austin: FINLE Technologies, Inc., 1997. 9~20

15 Z. Mark Ma, Chris A. Mack. Impact of illumination coherence and polarization on the imaging of attenuated phase shift masks [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4346**: 1522~1532