

文章编号: 0253-2239(2007)10-1758-7

分辨力增强技术的频谱分析*

孙知渊^{1,2} 李艳秋¹

(¹ 中国科学院电工研究所, 北京 100083)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 离轴照明和衰减型相移掩模作为重要的分辨力增强技术,不仅可以提高光刻的分辨力,同时还可以改善成像焦深,扩大光刻工艺窗口,实现 65~32 nm 分辨成像。从频谱的角度分析了离轴照明和衰减型相移掩模对成像系统交叉传递函数和像场空间频率分布的影响,研究这两种技术的物理光学本质,由此进一步优化光学成像系统设计、分辨力增强技术和确定设备使用的参量。对分辨力增强技术的频谱分析研究表明,分辨力增强技术通过调整像场频谱分布,改善了光学光刻的图形质量。对于 65 nm 密集图形,离轴照明和相移掩模结合后可以使成像衬比度最高达到 0.948,工艺窗口在 5% 曝光范围内焦深达到 0.51 μm 。

关键词: 成像系统; 光学光刻; 分辨力增强技术; 频谱分析

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Spatial Frequency Analysis of Resolution Enhancement Technology

Sun Zhiyuan^{1,2} Li Yanqiu¹

(¹ *Institute of Electrical Engineering, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)
(² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Abstract: As two of the most important resolution enhancement technology (RET), off-axis illumination (OAI) and attenuated phase-shift mask (AttPSM) can not only improve image quality, but also improve the depth of focus (DOF) to get a better process window which make a great contribution to the realization of 65~32 nm technological mode. A consistent frequency-space analysis of the off-axis illumination and attenuated phase-shift mask is presented here to explain its influence to the transmission cross coefficient (TCC) and image frequency distribution. Study on the optical mechanism of these resolution enhancement technology can benefit the design of projection lens optical system, optimization of resolution enhancement technology and the parameter setting of lithographic tool. It shows resolution enhancement technology can adjust image frequency distribution to enhance the lithographic resolution and image quality. As for 65 nm node pattern, off-axis illumination and phase-shift mask can improve image contrast to 0.948, process window to depth of focus 0.51 μm while exposure latitude is 5%.

Key word: imaging system; optical lithography; resolution enhancement technology; spatial frequency analysis

1 引 言

分辨力增强技术 (Resolution enhancement technology, RET) 是提高光刻分辨力的重要手段,其主要分为: 离轴照明 (Off-axis illumination, OAI)、相移掩模 (Phase-shift mask, PSM)、临近效应纠正 (Optical proximity correction, OPC) 和偏振

照明 (Polarization illumination)^[1]。其中,离轴照明和相移掩模已经得到了广泛的应用,并且国际半导体协会预测,它们将在 65~45 nm 技术节点继续发挥重要作用^[2]。

对成像系统进行频谱分析,可以把握成像本质规律。分辨力增强技术的频谱分析主要研究不同分

* 国家自然科学基金(10674134)和国家 973 计划(2003CB716204)资助课题。

作者简介: 孙知渊(1982-),女,陕西人,硕士研究生,主要从事分辨力增强技术方面的研究。E-mail: szy@mail. iee. ac. cn

导师简介: 李艳秋(1962-),女,吉林人,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

收稿日期: 2007-01-31; 收到修改稿日期: 2007-04-03

分辨力增强技术对成像系统物空间、像空间频谱的影响。从频谱分析的角度认识和理解光刻成像和分辨力增强技术本质,从而实现光刻系统、分辨力增强技术、图形结构和设备参量设置之间的协同设计。分辨力增强技术的频谱分析研究表明,ArF 激光干式光刻结合分辨力增强技术具有获得高质量 65 nm 密集线条成像的能力。

2 干式光刻的成像模型

对于投影曝光系统来说,频谱分析研究的是掩模频谱在通过光学成像系统之后所形成的像场频谱

分布。掩模图形空间透射率函数是 $t(x, y)$, 其频谱 $M(f, g)$ 为透射率函数的傅里叶变换, 即:

$$M(f, g) = \mathcal{F}\{t(x, y)\}, \quad (1)$$

$M(f, g)$ 为系统的输入信号的频谱, 光学系统对这个频谱的响应最终形成像场的空间频谱分布。对于带照明的光学成像系统, 都是在部分相干条件下工作的。描述部分相干系统的传递函数有: 部分相干传递函数、交叉传递函数、表观传递函数^[3], 近年又有学者提出部分相干系统的光学传递函数^[4]。这里采用霍金斯(Hopkins)的成像理论^[5,6], 用交叉传递函数(TCC)处理光学投影系统。像平面的空间频谱为

$$I(f, g) = \iint_{-\infty}^{\infty} C_{TC}(f_1, g_1, f + f_1, g + g_1) M(f_1, g_1) M'(f + f_1, g + g_1) df_1 dg_1, \quad (2)$$

$$C_{TC}(f_1, g_1, f_2, g_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} S_s(f, g) K(f + f_1, g + g_1) K'(f + f_2, g + g_2) df dg, \quad (3)$$

C_{TC} 为部分相干系统的交叉传递函数, (f_1, g_1) , (f_2, g_2) 是投影光瞳面上不同位置的两点坐标。 $S_s(f, g)$ 是照明光源的光强分布。 $K(f, g)$ 为投影系统的光瞳面。交叉传递函数计算的实际上是三个函数的交叠面积。

可以看到, 影响 $I(f, g)$ 每一个频率振幅大小的不仅是掩模的相应频率, 它还同交叉传递函数有关。 $I(f, g)$ 的各空间频率的能量分布直接影响到成像的质量。因此可通过协同设计掩模[优化 $M(f_1, g_1)$]和光源的强度分布(优化交叉传递函数)来得到较好的像频谱分布。

3 离轴照明与相移掩模对成像频谱的影响

光学成像系统是低通系统, 只有频率小于截止频

率的衍射光才能通过投影物镜, 最终在像平面上干涉成像。这时携带图形细节信息的高频衍射光则被挡在光瞳之外。由于这部分信息的缺失, 引起物像之间的偏差。传统照明系统的截止频率为 NA/λ 。而离轴照明可以使这一数值最大扩展为 $2NA/\lambda$ ^[7]。更多的高频衍射光进入系统参与成像, 使所成的像更加逼近被成像的物体, 从而提高系统成像分辨力。离轴照明另一个优点是采用双光束成像, 减少了离焦带来的相位差, 可以有效地提高焦深^[8,9]。

离轴照明不改变掩模频谱, 它通过改变交叉传递函数来最终影响像空间的频谱分布。相移掩模直接影响掩模频谱的分布。下面以 65 nm 密集线条为例, 通过对掩模图形频谱、交叉传递函数、空间成像频谱的分析对比, 详细说明两种分辨力增强技术对像频谱的影响, 如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Table 1 Simulation condition

Illumination	Conventional	Annular	Dipole
Wavelength λ /nm	193.368	193.368	193.368
NA	0.93	0.93	0.93
Coherent factor	0.8	0.9 (out) 0.7 (in)	0.8 (center) 0.1 (radius)
Reduction ratio*	1	1	1
Mask	BIM (Binary mask)	BIM	BIM
Mask pattern	65 nm dense pattern	65 nm dense pattern	65 nm dense pattern

* 为了减少计算量, 模型采用的缩小比例为 1, 这种设置并不影响物像频谱的分布。

3.1 掩模频谱

对衰减型相移掩模,随着透射率的提高,0级衍射能量逐渐降低,±1级衍射能量逐渐增加。图1是衰减型相移掩模的频谱分布(t :衰减型相移掩模的透射率)。掩模模型为一维线空周期条纹(线空比为65 nm/65 nm)。透射率达到100%时,0级衍射衰

减为零^[10]。离轴照明通过引入倾斜光,在像平面上形成0级与1级、0级与-1级衍射光的双光束干涉, $t=100%$ 的衰减型相移掩模缺少0级衍射光,因此并不适合与离轴照明技术结合使用。提高1级/0级衍射能量比可以有效提高成像衬比度。

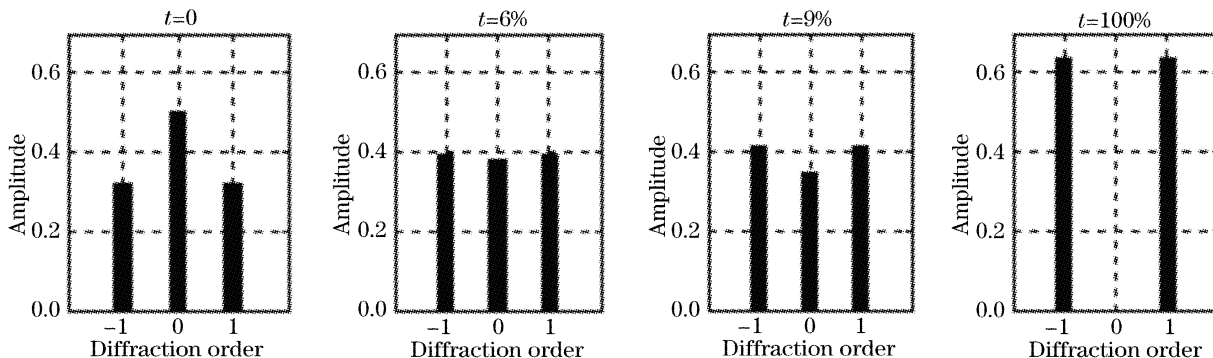


图1 65 nm 密集图形的掩模频谱分布(入射光复振幅为1)

Fig.1 Mask in Fourier space of 65 nm dense pattern (consume the incidence light is plane wave of a unit amplitude)

3.2 离轴照明对交叉传递函数的影响

交叉传递函数综合了照明系统的所有信息。它由任意两个空间频率的交叉系数构成,但最主要成分是物镜的入瞳面上其他各点相对于中心原点(空间频率为零)的交叉传递函数,即 $C_{TC}(x, y, 0, 0)$ 。(x,y)是光瞳面上其他点的坐标;(0,0)是中心原点坐标。

图2是根据(3)式计算得到传统照明与离轴照明的 $C_{TC}(x, y, 0, 0)$ 结果($-1 < x < 1, -1 < y < 1$)。

图2上部分是照明光源在投影物镜入瞳上的照明分布,其下方为对应的 $C_{TC}(x, y, 0, 0)$ 。可以看到传统照明与离轴照明的交叉传递函数存在的很大的

不同。这里计算得到的交叉传递函数不能直接反映成像质量,需要结合成像公式(2)进一步计算像空间的频谱分布,下一节详细研究离轴照明对像空间频谱的最终影响结果。

在研究65 nm密集线条成像频谱分布时,仅需要通过计算光瞳面上0,+1,-1级衍射光之间的交叉系数。图3中白色重叠部分面积为0级/1级衍射光之间的交叉系数 $C_{TC}(0,1)$ (注:这里用0表示0级衍射光的空间频率,1表示1级衍射光空间频率)。表2为三种照明情况下计算得到的3束衍射光0级、±1级之间的交叉传递函数。从最后成像结果可以得到,0级与±1级衍射重叠面积越多,焦

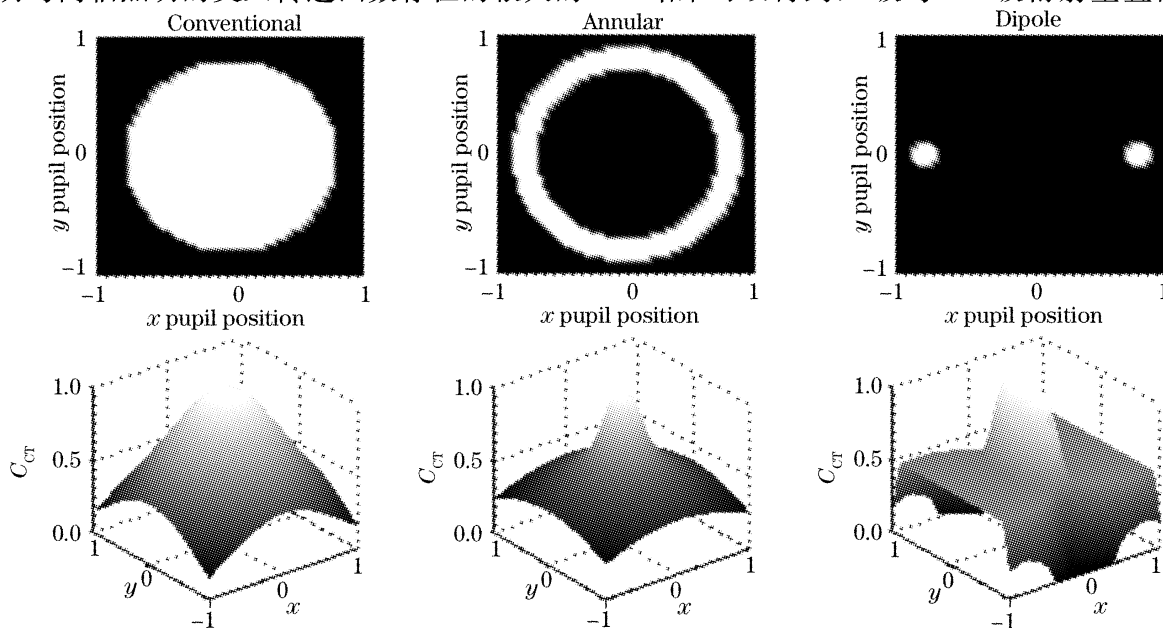


图2 传统照明、环形照明、双极照明的 $C_{TC}(x, y, 0, 0)$

Fig.2 The $C_{TC}(x, y, 0, 0)$ comparison in Conventional, Annular and Dipole illumination

深(Depth of focus,DOF)越大,成像质量越好。

叉系数, $C_{TC}(1,0)$ 表示 1 级衍射相对 0 级的交叉系数,以此类推。

表 2 中 $C_{TC}(0,0)$ 表示 0 级衍射相对 0 级的交

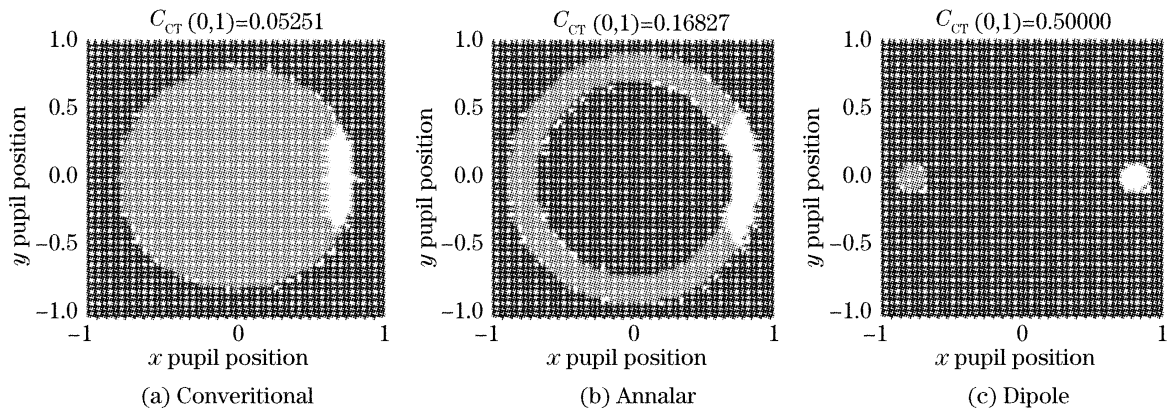


图 3 上:0/1 级衍射光之间的交叉系数 $C_{TC}(0,1)$ (白色部分:两级衍射重叠部分的面积)
Fig. 3 The C_{TC} between the 0 and 1 diffraction order (white region:the overlapped area)

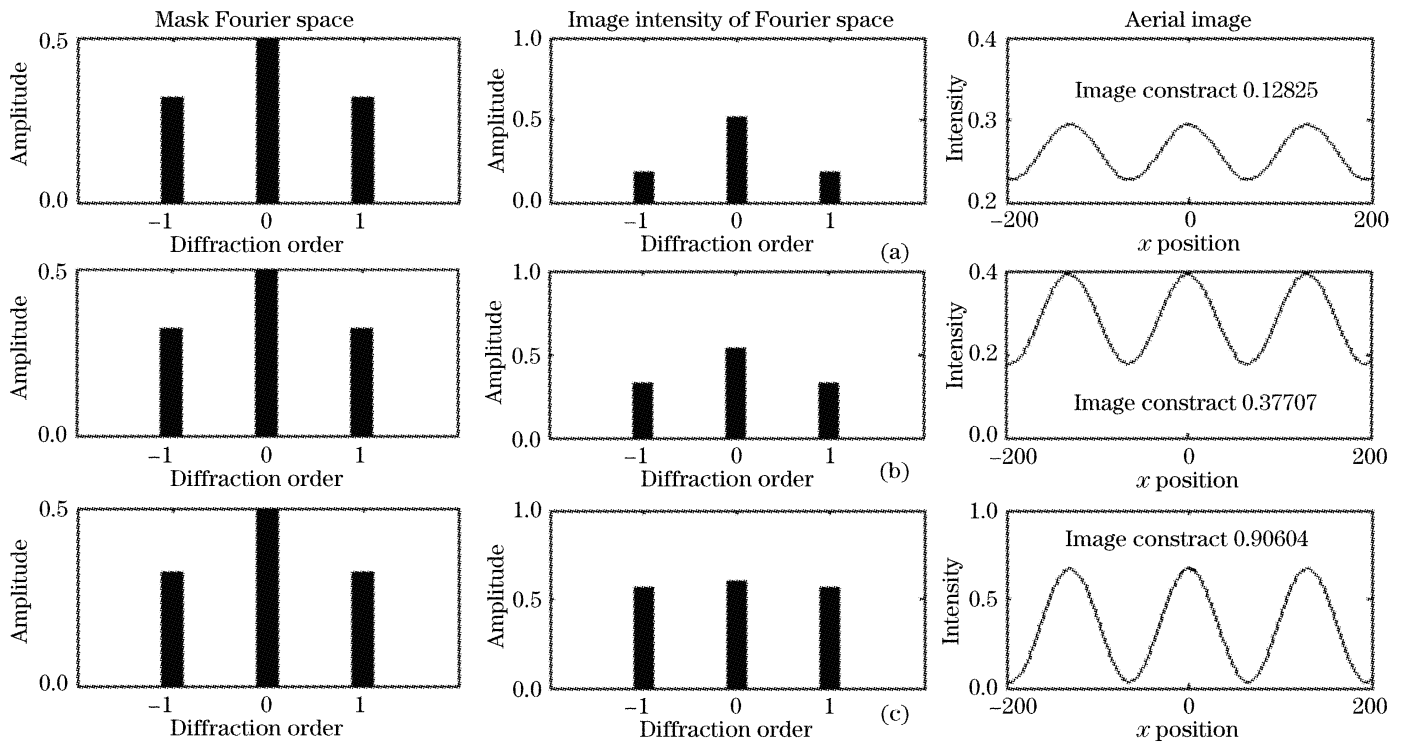


图 4 二元掩模结合不同照明情况下,掩模频谱、空间成像频谱和衬比度。(a)传统照明,(b)环形照明,(c)双极照明
Fig. 4 The mask in Fourier space, image intensity in Fourier space and aerial image under different illumination.
(a) Conventional illumination, (b) annular illumination, (c) dipole illumination

表 2 0、±1 级衍射光之间的交叉传递函数系数

Table 2 Transmission cross coefficient in 0, ±1 diffraction order

	Conventional	Annular	Dipole
TCC(0,0)	1	1	1
$C_{TC}(0,1)$	0.05251	0.16827	0.50000
$C_{TC}(0,-1)$	0.05251	0.16827	0.50000
$C_{TC}(1,0)$	0.05251	0.16827	0.50000
$C_{TC}(1,1)$	0.05251	0.16827	0.50000
$C_{TC}(1,-1)$	0	0	0
$C_{TC}(-1,0)$	0.05251	0.16827	0.50000
$C_{TC}(-1,1)$	0	0	0
$C_{TC}(-1,-1)$	0.05251	0.16827	0.50000

3.3 空间成像

像频谱表现的是空间成像的频谱特性。将 3.1 节计算的掩模频谱和 3.2 中的交叉传递函数代入(2)式,计算得到二元掩模结合不同照明条件时,掩模频谱、空间成像频谱和衬比度,如图 4 所示。结果表明:当采用离轴照明之后,像场的一级衍射分量的能量增大,成像的衬比度(Image Contrast)从 0.128 提高到 0.906。从成像的衬比度和成像的归一化对数斜率(Normalized Image Log Slope, NILS,也是确定成像质量的一个重要指标)的定义可知,成像的衬比度的提高必然带来成像的归一化对数斜率的提

高。通过仿真分析,当 0 级/1 级衍射光在像面干涉时的能量比达到 1:1 时,获得最大成像衬比度(采用了归一化处理)。

对于上述周期图形,随着 $C_{TC}(0,1)$ 的增大,到达像平面参与成像的高级衍射光能量逐渐增加,成像的衬比度也随之提高。离轴照明改善了光刻系统对各级衍射光能量的分布特性,提高了高频分量透

射率,抑制了低频分量透射率。

若在离轴照明的基础上采用衰减型相移掩模,可进一步调制成像频谱,提高成像质量。图 5 所示为衰减相移掩模结合不同照明的成像效果。空间成像衬比度均比同样照明条件下的图 4 所示的结果有较大的改善。

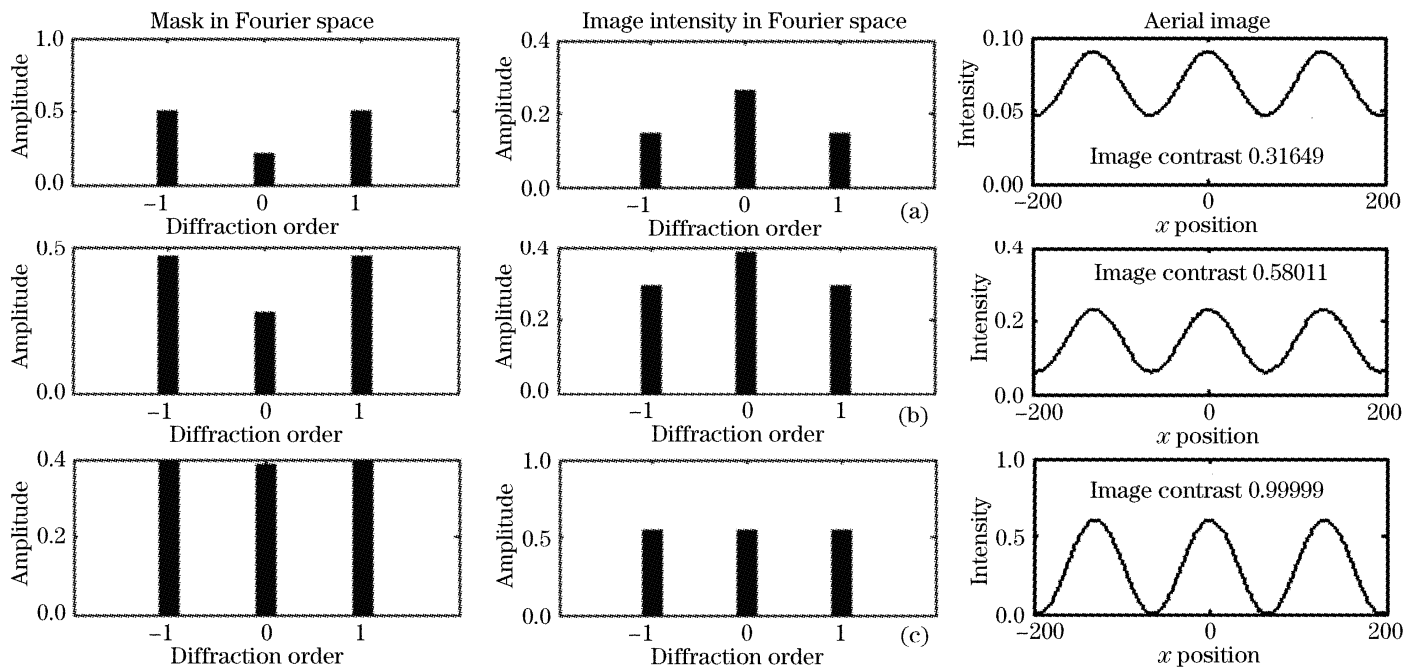


图 5 衰减相移掩模结合不同照明情况下,掩模频谱、空间成像频谱和衬比度。(a)传统照明,衰减相移掩模 $t=35\%$, (b)环形照,衰减相移掩模 $t=21\%$, (c) 双极照明,衰减相移掩模 $t=5\%$

Fig. 5 The aerial image under different illumination in conjunction with attenuated phase-shift mask. (a) Conventional illumination, attenuated phase-shift mask $t=35\%$, (b) annular illumination, attenuated phase-shift mask $t=21\%$, (c) dipole illumination, attenuated phase-shift mask $t=5\%$

3.4 Prolith 光刻仿真结果

通过以上的频谱分析,环形与双极照明结合衰减相移掩模能够获得高衬比度 65 nm 密集线条成像。这一节,我们利用商品化光刻模拟软件 Prolith9.0 进行对比研究,并验证上述研究的分辨力增强技术频谱分布对应的 65 nm 密集线条的光刻性能。仿真参量设置如表 3 所示,空间成像计算

结果如图 6 所示。

在 65 nm 节点,要求光刻性能满足:1)线宽均匀性 $\Delta L_w < \pm 10\% L_w = \pm 6.5 \text{ nm}$, 2)图形侧壁陡度 (Sidewall angle) $S_A > 85^\circ$, 3)抗蚀剂损耗 (Resist lost) $R_L < 10\%$ 。获得满足上述条件的 65 nm 密集线条所允许的离焦范围和曝光量变化范围构成的窗口,称为工艺窗口(Process window)。图 7 中环形

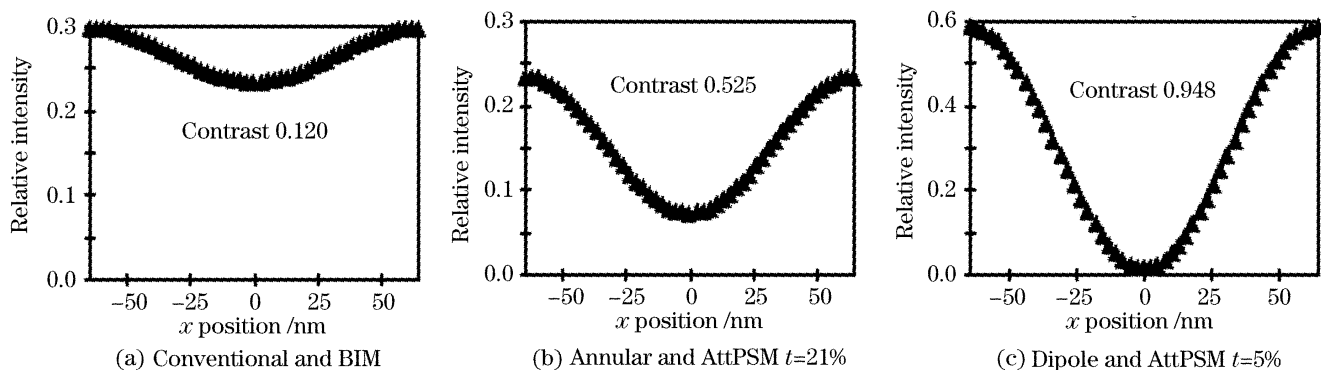


图 6 三种照明方式下的空间成像

Fig. 6 Spatial image under three different illuminations

与双极照明与衰减相移掩模结合后的光刻工艺窗口： $E_L=5\%$ ，焦深分别为 $0.28\ \mu\text{m}$ ， $0.51\ \mu\text{m}$ 。由此可见，干式 ArF 光刻中利用环形或双极照明结合衰

减相移掩模分辨力增强技术，可以获得具有较好成像质量的 $65\ \text{nm}$ 密集线条的光刻成像。

表 3 Prolith 仿真参量设置

Fig. 3 Simulation condition in Prolith

Illumination	Conventional	Annular	Dipole
Wavelength λ /nm	193.368 nm	193.368 nm	193.368 nm
Coherent factor	0.8	0.9 (out)/0.7 (in)	0.8 (center)/0.1 (radius)
NA	0.93	0.93	0.93
Reduction ratio	4	4	4
Image calculation mode	Full Scalar	Full Scalar	Full Scalar
Resist	ArF JSR AR165 J, 130 nm $n=1.7135, k=0.0169,$ $A:0\ (\mu\text{m}^{-1}), B: 1.1\ (\mu\text{m}^{-1}),$	ArF JSR AR165 J, 138 nm $n=1.7135, k=0.0169,$ $A:0\ (\mu\text{m}^{-1}), B: 1.1\ (\mu\text{m}^{-1}),$	ArF JSR AR165 J, 110 nm $n=1.7135, k=0.0169,$ $A: 0\ (\mu\text{m}^{-1}), B: 1.1\ (\mu\text{m}^{-1}),$
BARC	C: 0.0434 (cm^2/mJ) Shipley AR2, 40 nm $n=0.843, k=0.42$	C: 0.0434 (cm^2/mJ) Shipley AR2, 51 nm $n=0.843, k=0.42$	C: 0.0434 (cm^2/mJ) Shipley AR2, 45 nm $n=0.843, k=0.42$
Mask	BIM	AttPSM ($t=21\%$)	AttPSM ($t=5\%$)
Mask pattern	65 nm dense pattern	65 nm dense pattern	65 nm dense pattern

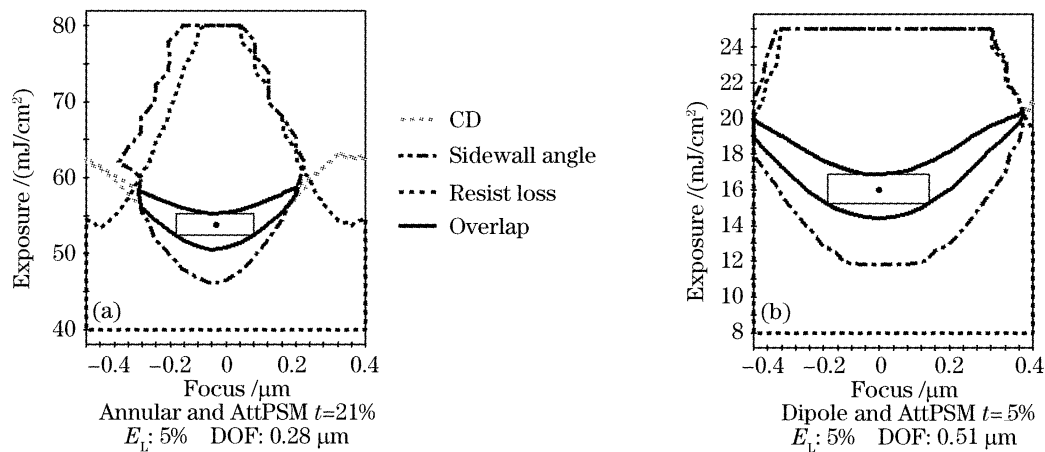
图 7 环形和双极照明结合衰减相移掩模的光刻工艺窗口 ($65\ \text{nm}$ line /space)

Fig. 7 The process window of lithography with annular and dipole illumination in conjunction with attenuated phase-shift mask

4 结 论

分辨力增强技术频谱分析研究表明，离轴照明和相移掩模使像场的各级衍射光能量重新分布。在双极照明与 5% 衰减相移掩模条件下，0 级/1 级衍射光能量比达到 1:1，此时获得最高的成像衬比度：0.948，工艺窗口为 5% 曝光范围内焦深达到 $0.51\ \mu\text{m}$ 。

频谱分析研究了离轴照明和相移掩模的物理光学本质，这种方法有助于从目标频谱出发，确定合理的照明—掩模系统设计方案，最大可能地提高当前设备性能。

参 考 文 献

- Franklin M. Schellenberg. Resolution enhancement technology the past, the present, and extensions for the future[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5377**: 1~20
- ITRS2005[S] (EB/OL), 2005. <http://www.itrs.net/>
- Zhuang Songlin, Qian Zhenbang. *Optical Transfer Function* [M]. Beijing: China Machine Press, 1981. 156~176 (in Chinese)
庄松林, 钱振邦. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 156~176
- Xiang Yang, Xiang Caixin. Optical transfer function and image evaluation criterion of an optical system with partially coherent illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **22**(11): 1375~1381 (in Chinese)
向阳, 向才新. 部分相干光学成像系统的光学传递函数和像质评价准则[J]. 光学学报, 2002, **22**(11): 1375~1381

