

微细光刻中部分相干系统成像研究*

罗先刚 陈旭南 姚汉民

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

摘 要 分析了投影光刻系统中部分相干成像的过程, 结果表明部分相干成像的像强是相干成像的像强对光源上每一点互相干强度的权重和。得出了近年来改进照明条件提高分辨力的物理本质: 部分相干成像系统是一个空间频率可变的系统, 频率的调制是通过照明函数的变化来实现的。提出了进一步提高光刻分辨力的新途径。

关键词 部分相干成像, 四极照明, 环形照明, 二元光栅照明。

1 引 言

部分相干成像问题是一个较复杂的非线性问题, 微细投影光刻成像的核心组成部分就是一个部分相干系统, 随着超大规模集成电路的飞速发展, 微细光刻技术已经进入到深亚微米领域。进一步提高投影光刻系统的分辨力已成为当前国际上的研究热点^[1], 出现了诸如离轴照明, 相移掩模, 光瞳滤波等新技术, 这些技术能改进系统成像的某些方面如分辨力和焦深, 但会使像质的其它方面受到坏的影响如邻近效应。为了提高成像质量减少负面影响, 本文对部分相干成像系统作了详细的研究。

2 微细光刻部分相干成像系统像质评价的几个重要指标

1) 分辨率 $R = K_1 \lambda / NA$, 表示能分辨的最小线宽, 能分辨的线宽越小, 分辨力越高;

2) 焦深 $F = K_2 \lambda / (NA)^2$, 表示在一定工艺条件下, 能刻出最小线宽时像面偏离理想焦面的范围。焦深越大, 对图形的制作越有利;

3) 对比度 $C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, 是评价成像图形质量的重要指标。对比度越高, 微细光刻出来的图形越好。

上述指标由系统的工作波长 λ 、数值孔径 NA 、工艺因子 K_1 和 K_2 、像差、照明条件和掩模图形等因素决定。

3 部分相干成像原理

实际成像系统中, 从一个扩展光源发出的非相干辐射, 在传递过程中变成了部分相干

* 中国科学院“九五”应用研究与发展重大项目“0.35 μm 分步重复投影光刻关键单元技术研究”编号 KY951-A1-501。

收稿日期: 1997-09-20; 收到修改稿日期: 1997-12-22

光。由 Hopkins 公式知, 部分相干光成像过程是互相干强度在系统中的传递过程, 为了定量研究这种部分相干光在实际的缩小投影光学成像系统中的传递特性, 首先分析物体在完全相干和完全非相干照明这两种极限情况下的成像特点。

3.1 相干成像

当非相干辐射光源对物面上一点的张角(即照明孔径角 $n' \sin u_c'$) 远小于成像系统入瞳对物面一点的张角(即物方孔径角 $n' \sin u_0'$) 时, 可以将该光学成像系统近似看为相干系统。设缩小投影光学成像系统中掩模上的图形是空间频率为 $\nu = \frac{1}{a+b}$ 的光栅, 照明光束为平行于光轴的平行光, 经过掩模衍射后进入成像系统。由光栅衍射公式: $(a+b) \sin \theta = k\lambda$, 假设正负一级衍射光刚好进入成像系统的入瞳, 则

$$\lambda = n_0 \sin u (a+b) = NA(a+b). \quad (1)$$

此时光学成像系统能传递的空间频率为

$$\nu = \frac{1}{a+b} = \frac{NA}{\lambda} = \frac{1}{2} \nu_0 \quad (2)$$

其中, $\nu_0 = 2NA/\lambda$ 是成像系统对空间频率响应的截止频率。从(1)式可看出: 一个完善的成像系统, 当数值孔径 NA 和波长一定时, 相干成像相当于一个频率响应函数为 1/2 截止频率的低通滤波器。

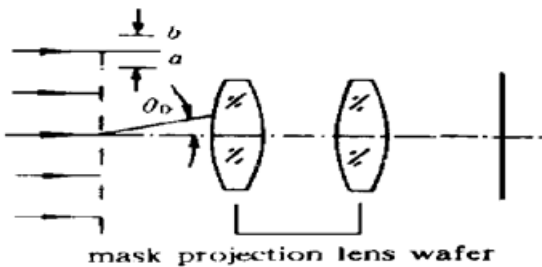


Fig. 1 Coherent illumination

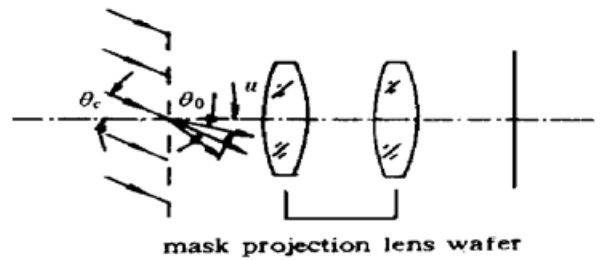


Fig. 2 Incoherent illumination

3.2 非相干成像

当非相干辐射光源对物面上一点的张角 θ_c (即照明孔径角 $n' \sin u_c'$) 不小于成像系统入瞳对物面的张角 θ_0 (即成像系统孔径角 $n' \sin u_0'$) 与物体对垂直入射光衍射的最大衍射角 u 之和时, 可以把实际光学系统近似看成非相干成像系统。设照明光束以 θ_c 角入射到掩模光栅上, 经衍射后, 正负一级衍射光具有偏角 θ_0 , 若满足条件 $\theta_c = \theta_0 + u$, 且 $\theta_0 = u$ 。此时将(1)式代入得衍射公式为

$$N\lambda = n_0(a+b) \sin \theta_c \cong n_0(a+b) 2 \sin u$$

所以

$$\lambda = 2(a+b) NA \quad (3)$$

则系统能传递的空间频率为

$$\nu' = 1/(a+b) = 2NA/\lambda = \nu_0 \quad (4)$$

比较(2)式、(4)式可知, 非相干系统的响应函数的截止频率要高一些, 但由于孔径的限制, 物面上高级次的频谱不能进入系统, 损失了物体一部分细节的信息, 使系统调制传递函数特性急剧下降, 像的对比度变坏。

由此可见, 系统的空间频率传递性能取决于光源对物面上一点的张角(即照明孔径角)和系统入瞳对物面上一点的张角(即成像系统孔径角)之比, 即 $\sigma = n_c \sin u_c' / n_0' \sin u_0'$, 此式亦称为有效光源或照明相干度, 实际成像系统中是部分相干成像系统即 $0 < |\sigma| < 1$ 。

3.3 部分相干成像

在投影光刻机成像系统中, 光源大小有限, 掩模图形经投影系统成像到硅片上, 是部分相干成像过程, σ 一般取值在 0.3 到 0.7 之间。光刻投影成像坐标系统如图 3。当振幅透过率为 t_0 的掩模被一有限大小的光源照明时, 硅片上像强分布表达式为^[2]

$$i(u', v') = \iiint J_0(u_1 - u_2, v_1 - v_2) t_0(u_1, v_1) t_0^*(u_2, v_2) \times h_s(u' - u_1, v' - v_1) h_s^*(u' - u_2, v' - v_2) du_1 dv_1 du_2 dv_2 \quad (5)$$

式中 h_s 为成像系统的振幅脉冲响应函数, $J_0(u_1 - u_2, v_1 - v_2)$ 是物平面内的互相干强度, $*$ 表示复共轭, $t_0(u, v)$ 为成像物体的透射函数。

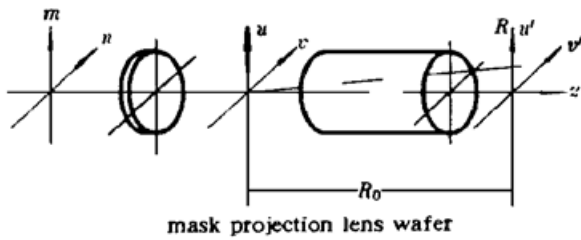


Fig. 3 Coordinate system of partial coherent imagery

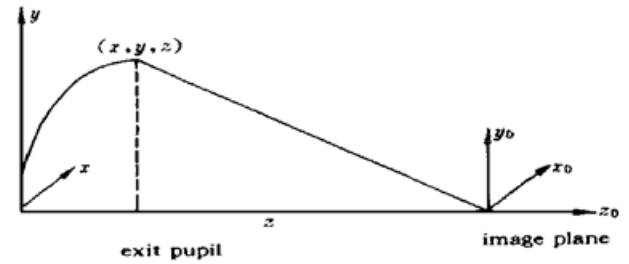


Fig. 4 Coordinate system of pupil

根据泽尼克(Zernike)定理, 光源函数 $P(m, n)$ 的傅里叶变换即为物平面内的互相干强度分布, 即:

$$J_0(u_1 - u_2; v_1 - v_2) = \iint P(m, n) \exp \{(-i2\pi)[m(u_1 - u_2) + n(v_1 - v_2)]\} dmdn \quad (6)$$

式中积分范围 σ 代表有效光源的大小和形状。当光源为矩形时,

$$P(m, n) = \text{rect}(m, n) = \begin{cases} 1 & |m| < a/2, |n| < b/2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

代入(6)式得互相干强度:

$$J_{01} = \frac{2 \sin kp_1 a}{kp_1 a} \frac{2 \sin kp_2 b}{kp_2 b} \quad (7)$$

当光源为圆形时,

$$P(m, n) = \text{circ}(\sqrt{m^2 + n^2}) = \begin{cases} 1 & \sqrt{m^2 + n^2} \leq a \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

代入(6)得互相干强度:

$$J_{02} = \frac{2J_1(v)}{v} \quad (8)$$

其中 $v = 2\pi[(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2]^{1/2} \sigma NA / \lambda$ 。对一般光源, 在确定互相干强度 J_0 时可将其分解为一系列矩形状和环形状的组合来考虑, 即

$$J_0 = \sum_{i=1}^N C_i J_{01} + \sum_{j=1}^M D_j J_{02} \quad (9)$$

式中 C_i 表示第 i 个矩形子光源的强度系数, D_j 表示第 j 个环形状子光源的强度系数。成像系统的振幅脉冲响应函数。 h_s 是反映系统成像特征的量, 其一般表达式为

$$h_s(u' - u_1, v' - v_1) = \frac{i}{\lambda^2} \iint G \frac{\exp[ik(R - R_0)]}{RR_0} dx dy \quad (10)$$

G 为成像系统的像差函数, R, R_0 分别为物上一点到像面上的距离, 如图 3 所示。傍轴条件下

$$R = [(u_1 - u')^2 + (v_1 - v')^2 + z^2]^{1/2} \approx z + [(u_1 - u')^2 + (v_1 - v')^2]^{1/2} / 2z$$

$$R_0 = [(u_1 - u_0')^2 + (v_1 - v_0')^2 + z^2]^{1/2} \approx z + [(u_1 - u_0')^2 + (v_1 - v_0')^2]^{1/2} / 2z$$

存在像差时, (10) 式中

$$G = A(x, y) \exp [ikw(x, y)] \quad (11)$$

波像差 $W(x, y)$ 的表达式为

$$W(x, y) = W_{20}(x^2 + y^2) + W_{40}(x^2 + y^2)^2 + W_{60}y_0(x^2 + y^2) + W_{70}y^2y_0^2 + W_{50}y_0^2(x^2 + y^2) + W_{60}y_0^3 \quad (12)$$

(12) 式中, 六项分别表示离焦、球差、彗差、像散、场曲和畸变。各项系数取值在 $\lambda/8$ 与 $\lambda/16$

之间。在均匀照明时, $A(x, y) = \begin{cases} 1 & \sqrt{x^2 + y^2} \leq 1 \\ 0 & \sqrt{x^2 + y^2} > 1; \end{cases}$ 无像差时, $G = 1$ 。

将(6)式代入(5)式得:

$$i(u', v') = \iint_p P(m, n) \left| \iint_p t_0(u, v) h_s(u' - u, v' - v) \exp [-i2\pi(mu + nv)] dudv \right|^2 dmdn \quad (13)$$

(13) 式表明: 1) 部分相干成像系统中, 像强分布是光源中每一点源相干成像结果的权重和。部分相干成像是建立在相干成像的基础之上。2) 改进像质可从三方面入手: (I) 改变照明函数 $P(m, n)$, 如四极、环形照明, 二元光栅照明等。(II) 改善物函数 $t_0(u, v)$, 如相移掩模等。(III) 改进成像系统的响应函数 h_s , 如光瞳滤波等。

4 改变照明函数提高像质的本质

对(13)式作傅里叶变换得:

$$I(r_i, s_i) = \iint_p P(m, n) \iint_p \mathcal{F}_0(r_0 - m - \frac{r_i}{2}, s_0 - n - \frac{s_i}{2}) \mathcal{H}(r_0 - \frac{r_i}{2}, s_0 - \frac{s_i}{2}) \times T_0^*(r_0 - m + \frac{r_i}{2}, s_0 - n + \frac{s_i}{2}) H_s(r_0 + \frac{r_i}{2}, s_0 + \frac{s_i}{2}) dr_0 ds_0 dmdn \quad (14)$$

式中 $\mathcal{F}_0(r_0, s_0)$ 与 $\mathcal{H}(r_0, s_0)$ 分别表示 $t_0(u, v)$ 和 $h_s(u, v)$ 的傅里叶变换, (r_0, s_0) 与 (r_i, s_i) 分别表示振幅谱和强度谱的坐标, β 表示光瞳大小。上式表明在频率 (r_i, s_i) 处的光强是光源中每一点在频率 (r_i, s_i) 处的相干像的权重和。从(14)中可以得出在任意大小和分布的光源 σ 下的像强谱分布, 因而可以认为(14)式为此成像系统的频域表达式。

当光源很大时, 可以认为 $P(m, n) = 1$, $\sigma \rightarrow \infty$, 此时光源对物面上一点的张角(即照明孔径角 $n' \sin u_c'$) 远大于成像系统入瞳对物面一点的张角(即物方孔径角 $n' \sin u_0'$), 可以将该光学成像系统近似看成非相干系统。将 $P(m, n) = 1$, $\sigma \rightarrow \infty$ 代入(14)式积分得:

$$I(r_i, s_i) = T(r_i, s_i) H(r_i, s_i) \quad (15)$$

式中 $T(r_i, s_i)$ 与 $H(r_i, s_i)$ 分别表示 $\mathcal{F}_0(r_0, s_0)$ 与 $\mathcal{H}(r_0, s_0)$ 的自相关函数。通常情况下, $T(r_i, s_i)$ 称为物强度谱, $H(r_i, s_i)$ 称为光学传递函数。当光源很小时, 可认为 $P(m, n) = \delta(m - m_0, n - n_0)$, 即点光源。此时光源对物面上一点的张角(即照明孔径角 $n' \sin u_c'$) 远小于成像系统入瞳对物面一点的张角(即物方孔径角 $n' \sin u_0'$), 可以将该光学成像系统近似看成相干系统。将相干条件 $P(m, n) = \delta(m - m_0, n - n_0)$ 代入(14)式得:

$$I(r_i, s_i; m_0, n_0) = \iint_{\beta} \mathcal{T}_0(r_0 - m_0 - \frac{r_i}{2}, s_0 - n_0 - \frac{s_i}{2}) \mathcal{H}(r_0 - \frac{r_i}{2}, s_0 - \frac{s_i}{2}) \times \\ \mathcal{T}_0(r_0 - m_0 + \frac{r_i}{2}, s_0 - n_0 + \frac{s_i}{2}) \mathcal{H}(r_0 + \frac{r_i}{2}, s_0 + \frac{s_i}{2}) dr_0 ds_0 \quad (16)$$

从(15)式和(16)式两式结果知道, 这里也得到了非相干和完全相干条件下的频谱强度^[3]。

理想情况下, 光瞳 β 无限大, 所有频率成份均对成像有贡献, $\mathcal{H}(r_0, s_0) = 1$, 此时(14)式变成:

$$I(r_i, s_i) = T(r_i, s_i) \quad (17)$$

(17)式表明, 在理想情况下, 像强度谱与物强度谱相同, 与照明相干度无关, 是一个线性成像系统。

实际情况下, 从(5)式可以看出, 光强的传递与成像物体的透射函数、系统脉冲响应函数、以及物平面内的互相干强度分布有关, 部分相干成像实际上是一个非线性过程。物经过实际透镜成像时, 由于投影光刻物镜的数值孔径有限, 高频部分肯定有损失, 影响成像质量, 数值孔径越大, 高频部分损失越小, 像与物差别越少; 然而对微细光刻系统而言, 随着数值孔径的增大, 焦深将迅速缩短, 使实际分辨力得不到提高, 这是一对难以调和的矛盾。在现有光刻工艺条件下, 焦深是限制实际分辨力进一步提高的重要因素, 因此在提高分辨力的同时必须设法增大焦深。从(14)式可以看出, 如果改变照明条件 $P(m, n)$, 使频率传递发生改变, 损失的高频信号会重新出现。光源函数 $P(m, n)$ 相当于调频量, 改变光源函数可以改变系统的频率传递函数, 使像质得到改进。这就是改进照明条件提高分辨力的物理本质。

5 像质的改进

光源可为四极/多极、环形、或其他形状。目前用四极、环形光源改进像质、提高分辨力和增大焦深得到了实际应用^[4, 5]。

5.1 四极光源照明

光源函数为

$$P(m, n) = \begin{cases} I_0 \text{rect} \left[\frac{m_0 - m/2; m_0 + m/2}{a}; \frac{n_0 - n/2; n_0 + n/2}{b} \right] & \begin{cases} m_0 - a/2 < m < m_0 + a/2 \\ n_0 - b/2 < n < n_0 + b/2 \end{cases} \\ I_0 \text{rect} \left[\frac{-m_0 + m/2; -m_0 - m/2}{a}; \frac{n_0 - n/2; n_0 + n/2}{b} \right] & \begin{cases} -m_0 + a/2 < m < -m_0 - a/2 \\ n_0 - b/2 < n < n_0 + b/2 \end{cases} \\ I_0 \text{rect} \left[\frac{-m_0 + m/2; -m_0 - m/2}{a}; \frac{-n_0 + n/2; -n_0 - n/2}{b} \right] & \begin{cases} -m_0 + a/2 < m < -m_0 - a/2 \\ -n_0 + b/2 < n < -n_0 - b/2 \end{cases} \\ I_0 \text{rect} \left[\frac{m_0 - m/2; m_0 + m/2}{a}; \frac{-n_0 + n/2; -n_0 - n/2}{b} \right] & \begin{cases} m_0 - a/2 < m < m_0 + a/2 \\ -n_0 + b/2 < n < -n_0 - b/2 \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

将(18)式代入(5)式, 结合对比度的定义, 并调节四极照明光源的四个孔的大小和位置, 可求出对比度曲线和焦深曲线分别如图5、图6。显然, 像质得到了很好的改善。

5.2 环形光源照明

光源函数如下:

$$P(m, n) = I_0 [\text{circ}(R) - \text{circ}(r)] \quad (19)$$

同样, 可求出对比度曲线和焦深曲线分布如图7所示。比较图5、图6、图7可知, 对垂直线

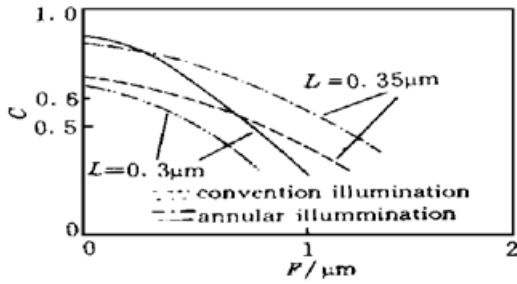


Fig. 5 Image contrast vs. focal depth and linewidth of gratings with equal 1/s for quadrupole illumination ($\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.55$)
 - - - - conventional illumination,
 - - - - annular illumination

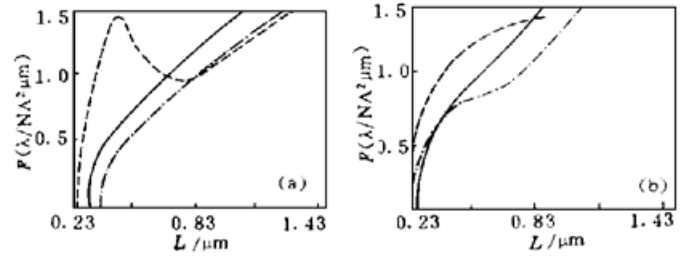


Fig. 6 Focal depth vs. linewidth when image contrast equals 60% for standard illumination (solid line), quadrupole illumination for vertical/horizontal (dashed) and 45 degree tilted (dotted) features for (a) gratings with equal 1/s (line/space) (b) isolated lines. ($\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.55$)
 - - - - conventional illumination, - - - - annular illumination

/空图形, 四极光源照明对像质改进有明显效果, 对斜线条或孤立孔图形的传递, 四极光源照明效果较差。环形光源照明对各个方向的密集线/空图形的传递效果均较好。

5.3 二元光栅光源函数

根据成像特点, 高频部分损失较多, 因而需增加高频分量, 通过调整 $P(m, n)$ 来减少低频分量调制高频, 达到改进像质的目的, 除四极和环形照明外, 还可以利用二元光栅达到此目的。设二元光栅函数为

$$P(m, n) = \text{rect} \left(\frac{2m}{a}; \frac{2n}{b} \right) * * \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \delta(m \pm 2ka; n \pm 2lb) - \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \delta[m \pm (2k + 1)a; n \pm (2l + 1)b] \right\} \quad (20)$$

其中 a, b 为二元光栅的节距, “* *”在这里表示二维卷积符号。该式表明二元光栅是相位为 $0 \sim \pi$ 分布的相位板。

同时设成像物(掩模)函数为

$$t_o(u, v) = \text{rect} \left(\frac{2u}{b} \right) * \sum_{k=0}^{\infty} \delta(u \pm nb) \quad (21)$$

上式表明掩模为 u 方向的线/空图形。调节二元光栅节距 a, b , 同样可求出此时分辨力曲线和焦深曲线, 分别如图 8、图 9 所示。从图 8、图 9 可看出, 用二元光栅照明对像质有较大程度的提高。

比较光瞳面频谱分布图 10 中(a)、(b)、(c)三图可知, 四极和环形照明时低频对成像几乎无贡献, 主要是由于四极/环形相干片简单地将低频挡掉的结果。二元光栅照明时, 低频成份对成像有少量贡献, 高频部分对成像贡献有所提高, 正好弥补了投影系统成像时低频较多, 高频损失的不足之处。因而二元光栅照明对像质的改进效果优于四极/环形照明。

实际上, 对不同的掩模图形, 作者都可以按以上思路设计照明光源函数, 使部分相干系统的像质得到改善, 达到提高分辨力和增大焦深的目的。在工程应用中, 由于采用特殊照明,

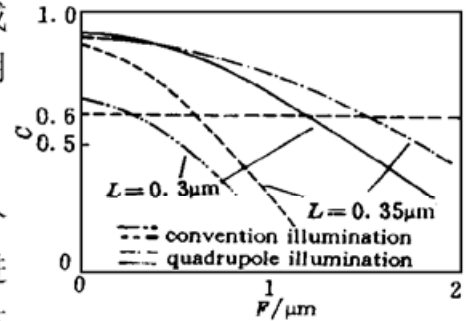


Fig. 7 Image contrast vs. focal depth and linewidth of gratings with equal 1/s for annular illumination ($\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.55$)
 - - - - conventional illumination,
 - - - - annular illumination

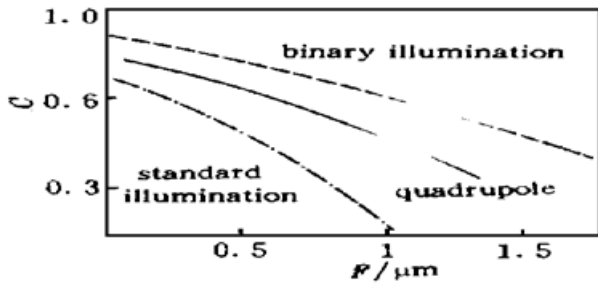


Fig. 8 Image contrast vs. focal depth of gratings with equal l/s for binary grating illumination ($\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.55$)

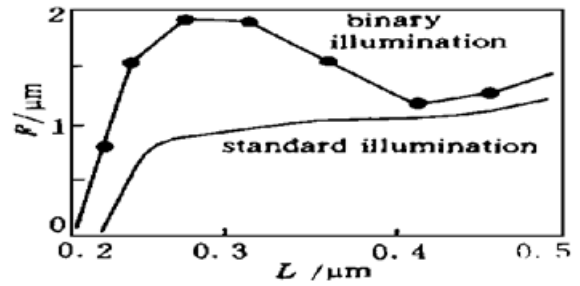


Fig. 9 Focal depth vs. linewidth of gratings with equal l/s for binary illumination ($\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.55$)

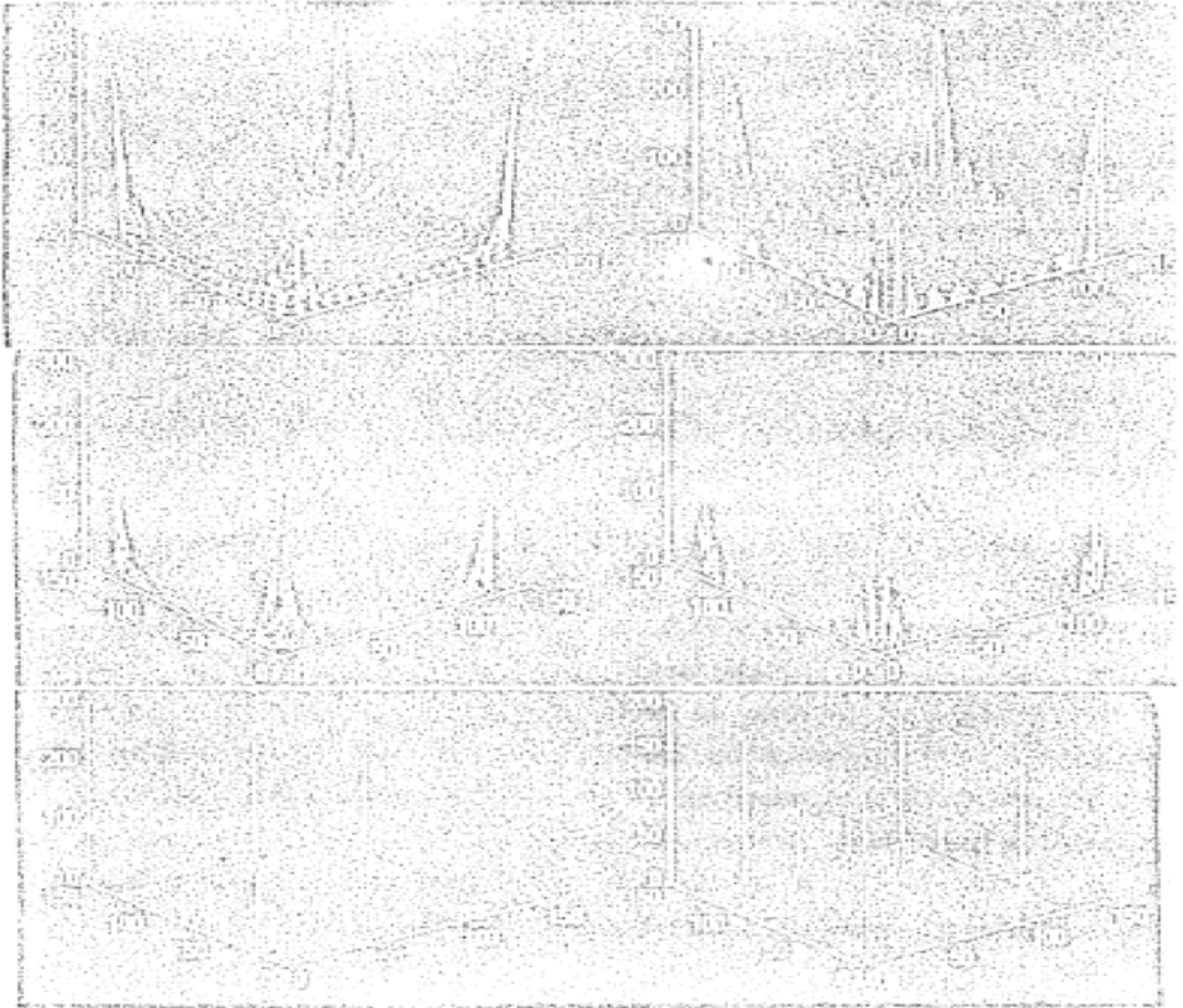


Fig. 10 Frequency spectrum of pupil. (a) Quadrupole, (b) Annular, (c) Binary grating

必然使能量利用率降低, 使生产率受到一定程度影响。尽管如此, 人们通过增大曝光光源能量等方法可以在一定程度上弥补光能损失。日本的 Nikon、Canon 等公司已经在其光刻机上实现了四极/环形照明, 韩国的三星公司也使光栅照明得到了应用, Sony 公司采用变形照明装置的原理也是基于频率调制^[6]。这些实际应用说明了采用改变照明函数提高分辨力和焦深方法的确可行。

结 语 将部分相干成像系统视为调频系统, 改进调频函数(照明光源)可达到改善像质的目

的。用四极/环形以及二元光栅光源照明均是可行的方法, 可达到提高分辨力增大焦深的目的。针对不同图形, 可以设计不同的照明形式达到提高分辨力和增大焦深的目的。

参 考 文 献

- [1] J. Bokor, A. R. Neureuther, W. G. Oldham, Advanced lithography for ULSI. *IEEE. Circuits & Devices*, 1996, **43**(1) : 11~ 15
- [2] H. H. Hopkins, On the diffraction theory of optical images. *Proc. R. Soc.*, (London), 1953, **A217** (3) : 408~ 432
- [3] B. J. Thompson, Image formation with partially coherent light. In: E. Wolf, ed, *Progress in Optics*, 1969, **7** : 169~ 230
- [4] P. F. Luehrmann, P. Van Oorschot *et al.*, 0.35 μm lithography using off-axis illumination. *Optical/Laser Microlithography VI, Proc. SPIE*, 1993, **1927** : 103~ 123
- [5] N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi *et al.*, New imaging technique for 64 M-DRAM. *Optical/Laser Microlithography V, Proc. SPIE*, 1992, **1674** : 741~ 746
- [6] Tohru Ogawa, Masaya Uematsu, Toshiyuki Ishimaru *et al.*, The effective light source optimization with the modified beam for the depth-of-focus enhancements. *Optical/Laser Microlithography VI, Proc. SPIE*, 1994, **2197** : 19~ 30

Study of Partical Coherent Imagery System in Microlithography

Luo Xiangang Chen Xu 'nan Yao Hanmin

(The State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics & Electronics,
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 20 September 1997; revised 22 December 1997)

Abstract The physical process of partially coherent image formation in the projection lithography has been analyzed. It has been proved that the image-intensity distribution in a partially coherent imagery system is the weighted sum of the intensities of the result from coherent imagery with respect to each point in the source. The physical mechanism of resolution enhancement by improving illumination condition has also been investigated. The results show that a partially coherent imaging system is practically a variable spatial frequency system. Frequency modulation can be realized by adjusting illumination function. New approach to resolution enhancement is given.

Key words partial coherent imagery, quadrupole illumination, annular illumination, binary grating illumination.