

影响全息光刻图形质量的因素*

陈 芬^{1, 2} 周亚训^{1, 2} 冯伯儒³ 张 锦³

(1 宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

(2 宁波大学光纤通信与网络技术研究所, 宁波 315211)

(3 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: 使用矩阵转换方法, 对全息光刻中全息掩模衍射效率进行了数值模拟计算, 讨论了记录介质显影前后特性的改变和再现时全息掩模复位精度对光刻图形质量的影响, 并找出了影响图形质量的主要因素。在此基础上设计了实验系统, 最后得到了分辨率基本上只受初始光掩模分辨率限制的光刻图形。

关键词: 全息光刻; 衍射效率; 光刻

EEACC: 2570; 2550G

中图分类号: TN 305. 7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)12-1335-05

1 引言

半导体器件的线宽每 3 年以 70% 的速度下降, 目前以 DRAM 为代表的 IC 技术, 线宽已达到 0.15, 0.13, 甚至 0.1 μm 等线宽的工艺水平, 一些尖端项目研究已进入 50nm 线宽及以下的阶段。因而, 作为集成电路更新换代重要工艺的光刻技术在向高分辨、深度光刻方向发展的同时, 各种新型的光刻技术也不断涌现。

全息光刻是一种新型的光刻技术。它最突出的优点是在分辨率和曝光视场之间不必折中, Clube 等人采用离轴全内反射(TIR)全息光刻已成功地在 150mm × 150mm 的基片上印制出了 0.12 μm 的高分辨图形(曝光波长为 364nm), 若使用分步重复方法还将进一步提高曝光视场^[1]。另外, 该技术还具有系统结构简单, 与传统微电子光刻工艺相兼容等优点。预计将在声表面滤波器、光互连, 尤其是大尺寸平板显示器(FPD)和有源矩阵液晶显示器(LCDs)等方面得到广泛应用。本文着重对影响该技术光刻图形质量的因素开展了理论和数值模拟分析, 并在此基础上进行了实验研究。

2 全息光刻的耦合波理论分析

2.1 全息光刻的实现方法

常见的全息光刻主要有三种类型: 镜面全息光刻^[2]、聚焦像全息光刻^[3]和全内反射(TIR)全息光刻^[4]。目前发展态势最旺, 且最有发展前景的是 TIR 全息光刻。全息光刻一般采用波前共轭的全息方法, 该技术分两步完成: 记录和再现, 分别如图 1(a)、(b) 所示。记录时, 通过全内反射全息方法, 把物体(传统光掩模)所携带的信息用干涉方法记录在介质上, 经显影、定影等处理, 即成为全息掩模, 将其放回原处, 并用于记录参考光共轭的再现照明光束照明全息掩模, 如图 1(b) 所示, 经全息掩模衍射后所成实像(初始传统光掩模的再现像)用光致抗蚀剂等介质记录(抗蚀剂基片放在记录时物体所处的位置上, 保持与全息掩模的间距不变)。这样, 传统光掩模上微细图形的信息特征就精确地转移到了抗蚀剂基片上。可见, 全息掩模的衍射效率和再现时是否精密复位将直接影响光刻图形的质量。

* 国家自然科学基金(批准号: 69776028), 微细加工光学技术国家重点实验室基金(No. KFS9901)资助项目

陈 芬 女, 1973 年出生, 硕士, 现主要从事光学全息、激光光刻和光通信技术研究。

2002-11-29 收到, 2003-06-23 定稿

©2003 中国电子学会

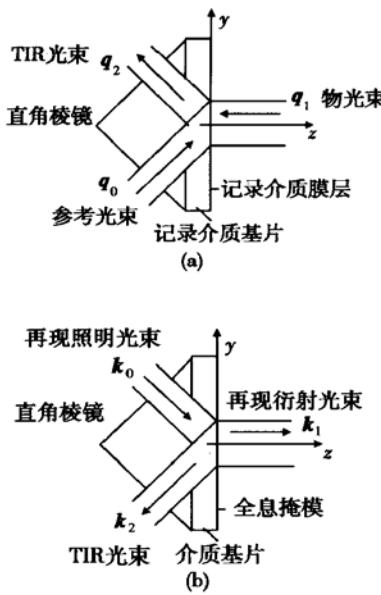


图 1 TIR 全息光刻 (a) 记录 (b) 再现

Fig. 1 Recording (a) and Reconstruction (b) geometry for TIR holographic lithography

2.2 耦合波分析

记录时, 设三束光波光场矢量:

$$E_i(y, z) = A_i \mu_i \exp[-i(\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{x} - \varphi_i)] \quad i = 0, 1, 2 \quad (1)$$

其中 $\mathbf{q}_0 = \beta(0, \sin\theta, \cos\theta); \mathbf{q}_1 = \beta(0, 0, -1); \mathbf{q}_2 = \beta(0, \sin\theta, -\cos\theta), \beta = 2\pi\sqrt{\epsilon_a/\lambda}, \epsilon_a$ 为显影前介质平均介电常数, θ 为参考光入射角.

TIR 光的位相在 $y = z = 0$ 时为:

$$\varphi_t = \varphi_0 + \Omega_{\text{TIR}}(\theta) - 2\beta d \cos\theta \quad (2)$$

其中 d 为介质厚度; $\Omega_{\text{TIR}}(\theta)$ 为 $z = d$ 处因全内反射引起的相移.

介电常数:

$$\epsilon(y, z) = \epsilon_a + \delta \sum_{i=0}^2 A_i^2 + \sum_{i < j=1}^2 \Delta \epsilon_{ij} \cos(\mathbf{K}_{ij} \cdot \mathbf{x} - \phi_{ij}) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{K}_{ij} = \mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j, \phi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j (i < j = 1, 2), \Delta \epsilon_{ij} = 2\delta A_i A_j \mu_i \cdot \mu_j, \delta$ 为比例因子.

假定记录介质显影前后仅在 z 方向有变化, 即:

$$\mathbf{K}_{ij}^y|_{\text{后}} = \mathbf{K}_{ij}^y|_{\text{前}};$$

$$\mathbf{K}_{ij}^z|_{\text{后}} = \frac{1}{1 + \sigma} \times \mathbf{K}_{ij}^z|_{\text{前}} (\sigma > 0: \text{膨胀}, \sigma < 0: \text{收缩})$$

再现时, 用平面波 \mathbf{k}_0 照明全息掩模, 且

$$\mathbf{k}_0 = \beta'(0, \sin\theta', \cos\theta') \quad (4)$$

其中 θ' 为再现照明光入射角; $\beta' = 2\pi\sqrt{\epsilon'_a/\lambda}, \epsilon'_a$ 为显影后介质平均介电常数.

全息掩模中的电场:

$$E(y, z) = \sum_{i=0}^2 B_i(z) \mu_i \exp(-ik_i \cdot \mathbf{x}) \quad (5)$$

其中 $k_0^y = k_0^y - \mathbf{K}_{12}^y = \beta' \sin\theta' + \beta \sin\theta,$

$$k_1^y = \sqrt{\beta'^2 - (k_1^y)^2},$$

$$k_2^y = k_0^y - \mathbf{K}_{02}^y = \beta' \sin\theta',$$

$$k_1^z = \sqrt{\beta'^2 - (k_1^z)^2}$$

求解下列方程可得出耦合波方程和边界条件.

$$\Delta E(y, z) + (2\pi/\lambda)^2 \epsilon(y, z) E(y, z) = 0 \quad (6)$$

耦合波方程:

$$(d/dz) C_0 = -i(\kappa_1/\cos\theta') \exp(i\Delta k_{12}z) C_1 \\ - i(\kappa_2/\cos\theta') \exp(i\Delta k_{02}z) C_2,$$

$$(d/dz) C_1 = -i\kappa_1 \exp(-i\Delta k_{12}z) C_0 \\ - i\kappa_1 \exp(i\Delta k_{01}z) C_2, \quad (7)$$

$$(d/dz) C_2 = i(\kappa_2/\cos\theta') \exp(-i\Delta k_{02}z) C_0 \\ + i(\kappa_1/\cos\theta') \exp(-i\Delta k_{01}z) C_1$$

边界条件:

$$C_0(0) = \exp[i(\varphi'_0 + \varphi_t)], \\ C_1(0) = 0, \quad (8)$$

$$C_2(d') = C_0(d') \exp(i\Delta\Psi)$$

其中 $\Delta\Psi = [\Omega_{\text{TIR}}(\theta') - \Omega_{\text{TIR}}(\theta) - 2[\beta'd'\cos\theta' - \beta d \cos\theta]], \Delta k_{12} = k_1^y - k_1^z - \mathbf{K}_{12}^y, \Delta k_{02} = k_0^y - k_2^z - \mathbf{K}_{02}^y, \Delta k_{01} = k_1^z - k_2^z - \mathbf{K}_{01}^y.$

对于 s 偏振: $\kappa_1 = \beta' \Delta \epsilon_{01}/4\epsilon'_a, \kappa_2 = \beta' \Delta \epsilon_{00}/4\epsilon'_a,$

对于 p 偏振: $\kappa_1 = (\beta' \Delta \epsilon_{01}/4\epsilon'_a) \mu_0 \cdot \mu_1, \kappa_2 = 0.$

2.3 全息掩模衍射效率的推导

为方便数值计算, 我们用一转换矩阵 \mathbf{M}_{pq} 来描述耦合波方程式(7), 该矩阵把 $z = 0$ 时的输入矢量 $\mathbf{C}(0) = (C_0(0), C_1(0), C_2(0))$ 转换成 $z = d'$ 时的输出矢量 $\mathbf{C}(d')$, 即:

$$\mathbf{C}(d') = [\mathbf{M}_{pq}] \cdot \mathbf{C}(0) \quad p, q = 0, 1, 2 \quad (9)$$

\mathbf{M}_{pq} 可通过在三组相互独立的初始条件 $\mathbf{C}(0) = (1, 0, 0), (0, 1, 0)$ 和 $(0, 0, 1)$ 下对耦合波方程(7) 数值积分求得.

衍射效率 η 定义为:

$$\eta = \frac{k_1^z}{k_0^y} \times \frac{|C_1(d')|^2}{|C_0(0)|^2} \quad (10)$$

把(8)、(9)式代入(10)式可得:

$$\eta = \frac{k_0^2}{k_0^2} \left| M_{10} + M_{12} \times \frac{M_{00} - M_{20} \exp(-i\Delta\Psi)}{M_{02} - M_{22} \exp(-i\Delta\Psi)} \right|^2 \quad (11)$$

3 全息掩模复位精度对光刻图形质量的影响

如图1所示,若全息掩模复位时在 xy 平面内平移,只要仍在再现照明光照射的范围内,该平移就不会对结果有影响;若在 xy 平面旋转角度 $\Delta\theta$,根据衍射特性,再现像也相应的在抗蚀剂基片平面旋转角度 $\Delta\theta$.若在 yz 面旋转角度 $\Delta\theta'$,这等效于再现照明光入射时偏离了布拉格角 $\Delta\theta'$,而全息掩模精密复位.这种非完全共轭再现的情况将在本文后面加以讨论.

下面考虑全息掩模复位时对空间间距的灵敏性,即全息掩模相对于抗蚀剂基片在 z 方向的复位误差对结果的影响.由球差引起的相移:

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{\lambda_0} \times \frac{(x^2 + y^2)^2}{8} \left[\frac{1}{R_0^3} - \frac{1}{R_i^3} + \frac{\lambda_0}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0^3} - \frac{1}{R_i^3} \right) \right] \quad (12)$$

此时 $\lambda_0 = \lambda = \lambda, R_i = R_0 \rightarrow \infty, R = Z, R_i = Z + \Delta Z,$

$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ ($\rho = z \tan\alpha, \sin\alpha = \lambda\nu, \nu$ 为空间频率).

当 $|\Delta\phi|^2 \leq 20\%$ 时, 可认为该系统无像差, 则:

$$\Delta Z \leq Z \left(1 - \frac{4\sqrt{0.2(1 - \lambda^2\nu^2)^2}}{\pi\lambda^3\nu^4 Z} \right)^{-\frac{1}{3}} - Z$$

取近似后得到:

$$\Delta Z \leq 0.19 \frac{(1 - \lambda^2\nu^2)^2}{\lambda^3\nu^4} \quad (13)$$

ΔZ 与 ν 间的关系如图2所示.

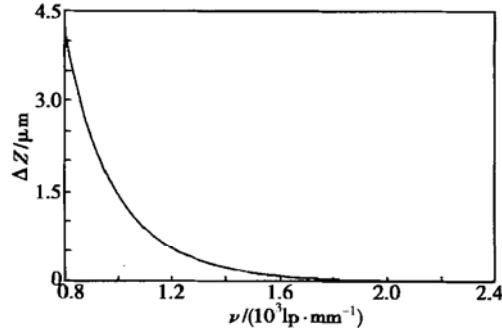


图2 显影前后对空间间距的灵敏性

Fig. 2 Accuracy of equal separations for the recording and the reconstruction process

从图2可知, 对高分辨率光刻($\nu > 1.5 \mu\text{m}^{-1}$)

时), ΔZ 就趋近于零了, 即微细图形的光刻分辨率对此误差非常敏感.

4 全息掩模衍射效率的计算结果与讨论

对耦合波方程(7)和衍射效率表达式(11)进行数值模拟计算, 得出了s偏振和p偏振时衍射效率 η 与再现照明光入射角 θ' 之间的依赖关系, 如图3~7所示, 考虑了平均介电常数 ϵ'_a 和记录介质显影前后厚度 d' (介质无伸缩、介质收缩和介质膨胀)变化的各种情况. 计算时使用了以下参数: $d = 15 \mu\text{m}, \lambda = 0.488 \mu\text{m}, n_a = \sqrt{\epsilon_a} = 1.5, \theta = 45^\circ$, s偏振和p偏振时的耦合因子 κ_1 相等, 则s偏振时 $\Delta\epsilon_{01}$ 取0.026, p偏振时 $\Delta\epsilon_{01}$ 取0.037, s偏振时 n'_a 取1.51, p偏振时 n'_a 取1.53.

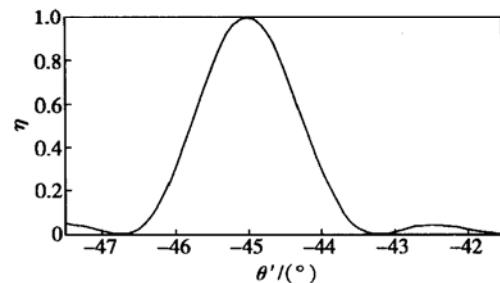


图3 d' 和 ϵ'_a 不变时 η 与 θ' 的关系

Fig. 3 Relationship between η and θ' (no change in the thickness and the average permittivity)

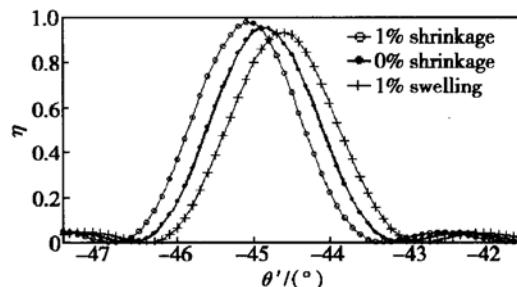


图4 s偏振时 η 与 θ' 的关系

Fig. 4 Relationship between η and θ' (s polarization)

理想情况下, 即记录与再现时各参数完全不变, 则完全共轭再现($\theta' = -\theta$)时衍射效率最高, 如图3所示. 而当平均介电常数 ϵ'_a 变化和介质膨胀或收缩时Bragg角都会有偏移(图4~6中所有曲线). 可喜的是, 介质的收缩与 ϵ'_a 的增大对Bragg角的偏移可相互补偿, 使 η 接近100%, 如图4, 5所示. 对相同

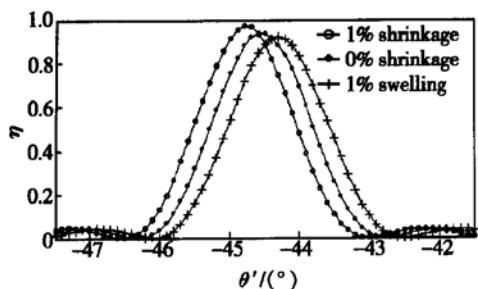
图 5 p 偏振时 η 与 θ' 的关系

Fig. 5 Relationship between η and θ' (p polarization)

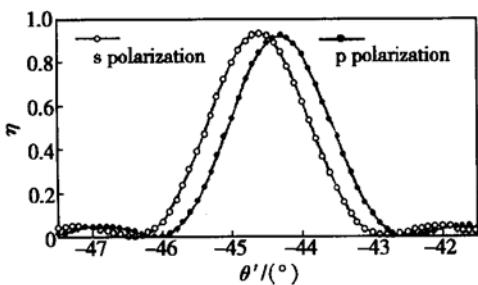
图 6 s 偏振与 p 偏振的比较(均 1% 膨胀)

Fig. 6 Comparison between s polarization and p polarization (1% swelling)

的 κ_1 因子, p 偏振时 Bragg 角的偏移比 s 偏振时明显, 如图 6 所示. 可见, 平均介电常数 ϵ'_a 与记录介质厚度 d' 的改变都将大大影响衍射效率 η , 若 ϵ'_a 与 d' 同时增大, 即使 d' 仅改变 1%, 完全共轭再现($\theta' = -45^\circ$)时 η 将降至 55% (p 偏振, 图 5). 另外, 即使 ϵ'_a 与 d' 均不改变, 但非共轭再现(如偏离 1°)时或全息掩模复位时在 yz 面旋转 $\Delta\theta'$ 角(如 $\Delta\theta' = \pm 1^\circ$), η 也会迅速下降(降至 30%, 如图 3 所示).

可见, 全息光刻图形质量主要与记录和再现时记录介质折射率的改变(即平均介电常数的改变), 通过全息掩模光程的改变(由介质的膨胀或收缩引起), 全息掩模复位时空间间距的改变以及再现照明光的入射角(是否完全共轭再现)有关. 以上任一参数的改变均将直接影响结果. 但我们可以寻找一些合适的条件, 使这些参数所带来的影响相互补偿, 从而最终提高图形光刻分辨率和图像质量.

5 实验结果分析

为了实验研究, 我们设计了一套 TIR 全息光刻实验系统, 设计时主要考虑了以下因素:

(1) 为保证完全共轭再现, 实验中设置了一个可转动全反射镜 M2, 既容易实现光束的完全共轭, 又不需使全息掩模机械转动 180° , 便于精密复位.

(2) 采用优质的记录介质, 可减小介质的伸缩和平均介电常数的改变对光刻分辨率的影响, 但因条件所限, 实验仅用全息干版乳胶作为记录介质.

(3) 为保证全息掩模的精密复位, 实验中采用了真空吸附装置以及不锈钢垫片以尽可能减小空间间距的改变.

通过摸索各种实验工艺参数, 我们最终做出了分辨率基本上只受初始光掩模分辨率限制的光刻图形, 图 7 示出了部分实验结果照片, 其中(a), (c) 分别是线宽为 $1.0\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$ 的周期渐变线/间隔的线条图形; (b), (d) 分别是边长为 $1.75\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$ 的方孔图形. 因全息干版乳胶自身特性的限制以及拍照过程带来的失真, 导致图 7 所示的光刻图形像质不太令人满意.

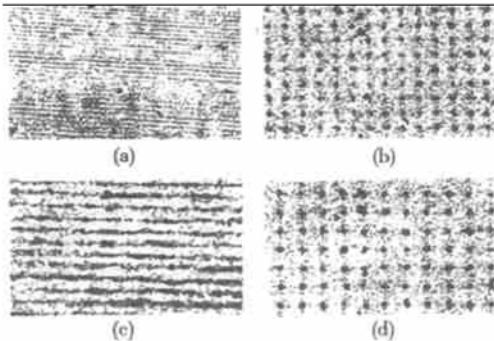


图 7 部分实验结果照片

Fig. 7 Part photograph of experimental results

6 结论

本文通过理论分析, 采用矩阵转换方法, 对全息掩模衍射效率进行了数值模拟计算, 得出了影响全息光刻微细图形质量的因素主要是显影前后记录材料平均介电常数的改变、介质的膨胀与收缩、非共轭再现以及全息掩模复位时空间间距的改变等, 并在此理论指导下设计了相应的实验系统, 最终做出了分辨率基本上只受初始光掩模分辨率限制的光刻图形.

参考文献

- [1] Barge M, Bruynooghe S, Clube F, et al. 120-nm lithography using off-axis TIR holography and 364nm exposure wave-

- length. *Microelectron Eng*, 2001, 57/58: 59
- [2] Ross I N, Davis G M, Klemitz D. High-resolution holographic image projection at visible and ultraviolet wavelengths. *Appl Opt*, 1988, 27(5): 967
- [3] Addiego G, Oldham W G. Diffraction limited imaging using incoherently illuminated holographic masks. *SPIE Optical/Laser Microlithography II*, 1989, 1088: 296
- [4] Clube F, Gray S. Holographic Microlithography. *Opt Eng*, 1995, 34(9): 2724

Factors of Affecting Patterning Quality in Holographic Lithography^{*}

Chen Fen^{1,2}, Zhou Yaxun^{1,2}, Feng Boru³ and Zhang Jin³

(1 College of Information Science & Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(2 Optical Communications & Network Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(3 State Key Laboratory of Optical Technology for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Based on the theoretical analysis and transfer matrix formalism, the numerical simulation of hologram mask diffraction behavior in holographic lithography is presented. The primary influence factors are concluded on the research basis of effects of medium property between recording and reconstruction and the hologram mask repositioning accuracy on lithography patterning quality. With the theoretical guiding, the relevant experimental system is devised. High-resolution lithography patterning is obtained finally, which resolution is limited only by the object's resolution.

Key words: holographic lithography; diffraction efficiency; lithography

EEACC: 2570; 2550G

Article ID: 0253-4177(2003)12-1335-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69776028) and State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, China (No. KFS9901)

Chen Fen female, was born in 1973, master. Her current research interests focus on optical holography, laser lithography and optical communication technique.