

# 扫描干涉场曝光中光栅掩模槽形轮廓的预测

鲁森<sup>1,2</sup>, 杨开明<sup>1,2\*</sup>, 朱煜<sup>1,2</sup>, 王磊杰<sup>1,2</sup>, 张鸣<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;

<sup>2</sup>清华大学精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084

**摘要** 根据扫描干涉场曝光的特点, 针对光刻胶层内曝光量的驻波效应, 建立了动态曝光模型。基于快速推进法建立了显影模型, 得到了光栅掩模槽形的演变规律。为减弱驻波效应的影响, 提出了一种抗反射层最优厚度的设计方法。仿真结果表明, 建立的曝光和显影模型能有效预测光栅掩模的槽形轮廓, 同时可优化抗反射膜的厚度。

**关键词** 光栅; 扫描干涉场曝光; 曝光模型; 显影模型; 快速推进法; 驻波效应

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0505001

## Groove Profile Prediction of Grating Masks in Scanning Beam Interference Lithography

Lu Sen<sup>1,2</sup>, Yang Kaiming<sup>1,2</sup>, Zhu Yu<sup>1,2</sup>, Wang Leijie<sup>1,2</sup>, Zhang Ming<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-Precision Manufacturing Equipment and Control,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Based on the characteristics of scanning beam interference lithography (SBIL), the dynamic exposure model is established for the standing wave effect of the exposure in the photoresist layer. Based on the fast marching method, the development model is established and the evolution rule of grating mask grooves is obtained. In order to reduce the influence of the standing wave effect, a design method for the optimal thickness of anti-reflective coatings (ARCs) is proposed. The simulation results show that the established exposure and development models can effectively predict the groove profile of the grating masks, and optimize the thickness of ARCs simultaneously.

**Key words** gratings; scanning beam interference lithography; exposure model; development model; fast marching method; standing wave effect

**OCIS codes** 050.2770; 220.3740; 260.3160

## 1 引 言

扫描干涉场曝光<sup>[1-3]</sup> (SBIL) 是一种全新的大面积平面光栅的制作技术, 其利用低相位非线性的小干涉场和高精度的两自由度工件台完成对整块基底的动态曝光, 有效克服了传统制作方法的缺点, 极大提高了光栅的制造精度和效率。

衍射效率是平面光栅最重要的指标之一, 其由光栅的槽形轮廓直接决定。合理的光栅制造条件是

得到理想槽形轮廓的关键<sup>[4]</sup>。传统机械刻划方法得到的光栅槽形由刻刀形状决定, 而 SBIL 首先通过曝光显影等工序得到光栅掩模, 再通过离子束刻蚀的方法得到最终的光栅产品。选择不同的曝光条件和显影条件, 可以得到不同的光栅掩模槽形。曝光实时监测技术很难应用在 SBIL 的光栅掩模槽形轮廓的预测中<sup>[5]</sup>, 故建立准确的扫描曝光模型是预测光栅掩模槽形轮廓的有效途径之一。

显影过程有多种模拟方式, 常见的有弹性弦模

收稿日期: 2017-09-27; 收到修改稿日期: 2017-11-19

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702-006)

作者简介: 鲁森(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事扫描干涉光刻系统方面的研究。E-mail: lus13@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 朱煜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事面向 IC 制造装备的超精密机械系统设计、超精密测量、超精密运动控制等方面的研究。E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: yangkm@tsinghua.edu.cn

型和细胞去除法。弹性弦模型<sup>[6]</sup>是用于模拟光刻胶表面轮廓变化的常用模型之一。赵劲松等<sup>[7]</sup>基于弹性弦模型,对全息光栅制作中的显影过程进行了模拟,并由此得到了显影监测曲线。弹性弦模型最大的缺点是演化过程中演变曲线可能发生交叉,导致数值不稳定。细胞去除法<sup>[8]</sup>将光刻胶划分成由长方体元素组成的规则阵列,其表面由相互接触的溶解元素和未溶解元素组成,比弹性弦模型更加稳定,且使用更为方便。但该方法获取光刻胶的表面轮廓曲线时需要消耗大量的内存与计算时间<sup>[9]</sup>。快速推进法(FMM)是 Sethian<sup>[10]</sup>提出的一种基于水平集法的演变方法,其在医学图像分割领域得到了广泛应用,同时也可应用于光刻胶表面轮廓演变的仿真。应用 FMM 可对 Eikonal 方程进行快速求解,获取各时间节点的轮廓表面曲线,有效克服了前两种方法的缺陷。

基于以上分析,本文提出了一种 SBIL 中光栅掩模槽形轮廓的预测方法。建立了 SBIL 的曝光模型,并基于 FMM 建立了 SBIL 显影模型,获得了槽形轮廓的演变规律。提出了一种抗反射膜(ARC)厚度的优化方法,减弱了驻波效应对光栅掩模槽形的影响。

## 2 SBIL 的曝光模型

### 2.1 干涉场的光强分布

图 1 所示为研究的 SBIL 系统,曝光场采用两束相干高斯光在基底表面形成干涉条纹,利用工件台的扫描步进运动完成曝光,其中 AOM 表示声光调制器。在扫描曝光过程中,通过条纹锁定系统来克服由环境扰动和工件台的定位误差引起的光栅相位误差<sup>[11]</sup>,使干涉条纹的相位实时锁定在基底上的固定位置上。

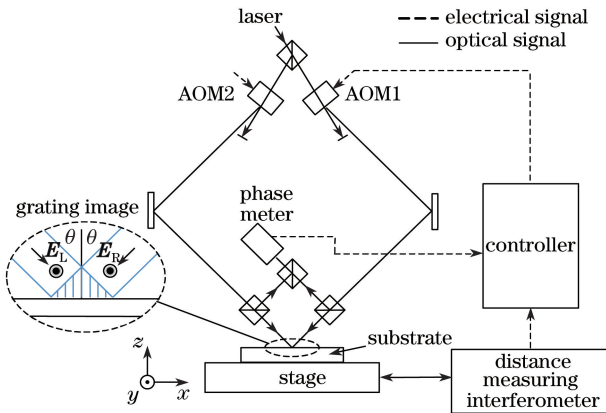


图 1 SBIL 示意图

Fig. 1 Schematic of SBIL

如图 1 所示,波长为  $\lambda$  的两束高斯光均以  $\theta$  角度

入射到基底上,以横电(TE)偏振的方式相互干涉。左电场  $E_L$  和右电场  $E_R$  的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_L = |\mathbf{E}_L| \exp[i(\mathbf{k}_L \cdot \mathbf{r})] \hat{\mathbf{y}} \\ \mathbf{E}_R = |\mathbf{E}_R| \exp[i(\mathbf{k}_R \cdot \mathbf{r})] \hat{\mathbf{y}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中左波矢  $\mathbf{k}_L = 2\pi n_0 / \lambda \cdot (\sin \theta \hat{\mathbf{x}} - \cos \theta \hat{\mathbf{z}})$ , 其中  $n_0$  为空气折射率;右波矢  $\mathbf{k}_R = 2\pi n_0 / \lambda \cdot (-\sin \theta \hat{\mathbf{x}} - \cos \theta \hat{\mathbf{z}})$ ;  $\mathbf{r} = x \hat{\mathbf{x}} + z \hat{\mathbf{z}}$ , 其中  $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{z}}$  分别为  $x, y, z$  方向的单位向量;  $|\mathbf{E}_L| = A_L \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right)$ ,  $|\mathbf{E}_R| = A_R \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right)$ , 其中  $A_L$  和  $A_R$  分别为与左右场强成比例的常数,  $\omega$  为激光束腰半径,  $x, y, z$  为坐标。

左右电场相互干涉,在  $xy$  平面上形成干涉场,场内光强分布可表示为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |\mathbf{E}|^2 = |\mathbf{E}_L + \mathbf{E}_R|^2 = \\ &= |\mathbf{E}_L|^2 + |\mathbf{E}_R|^2 + 2|\mathbf{E}_L| |\mathbf{E}_R| \cos(\mathbf{k}_L \mathbf{r} - \mathbf{k}_R \mathbf{r}) = \\ &= |\mathbf{E}_L|^2 + |\mathbf{E}_R|^2 + 2|\mathbf{E}_L| |\mathbf{E}_R| \cos\left(\frac{2\pi}{p} x\right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\mathbf{E}$  为总电场,  $p = \frac{\lambda}{2n_0 \sin \theta}$  为干涉条纹周期。将  $\mathbf{E}_L$  和  $\mathbf{E}_R$  代入(2)式,化简后可得

$$I(x, y) = \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \times \left[ A_L^2 + A_R^2 + 2A_L A_R \cos\left(\frac{2\pi}{p} x\right) \right]. \quad (3)$$

### 2.2 光刻胶内的曝光量分布

在基底反射率为零的情况下,干涉场光强分布可由(3)式描述。但基底通常具有一定的反射率,而光刻胶与基底界面处的反射或折射将导致光刻胶层内的光强重新分布,光强会沿  $z$  轴产生周期变化,即驻波效应<sup>[12]</sup>。在光刻胶与基底之间添加一层 ARC,可以有效减弱驻波效应的影,如图 2 所示,其中  $n_{\text{sub}}, n_1, n_2$  分别为基底、光刻胶和 ARC 的折射率,  $d, h$  分别为光刻胶和 ARC 的厚度,  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  分别为界面 a、b、c 的入射角,  $\theta_3$  为界面 c 的出射角,  $E_{i1}, E_{r1}, E_{t1}$  分别为界面 a 处的反向入射电场、反射电场、透射电场,  $E_{t2}$  为界面 b 处的透射电场,  $E_{\text{sub}}$  为界面 c 处的透射电场。

如图 2 所示,入射光  $E_0$  以  $\theta_0$  角入射到光刻胶表面,光刻胶层内任一点的场强由向下场  $E_{\text{down}}$  与向上场  $E_{\text{up}}$  叠加产生。  $E_{\text{down}}$  和  $E_{\text{up}}$  可以表示为

$$\begin{cases} E_{\text{down}} = E_{i2} \exp[i(2\pi n_1 / \lambda)(d - z) \cos \theta_1] \\ E_{\text{up}} = E_{r2} \exp[-i(2\pi n_1 / \lambda)(d - z) \cos \theta_1] \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $n_1$  为光刻胶的复折射率,  $E_{i2}$  和  $E_{r2}$  分别为为界

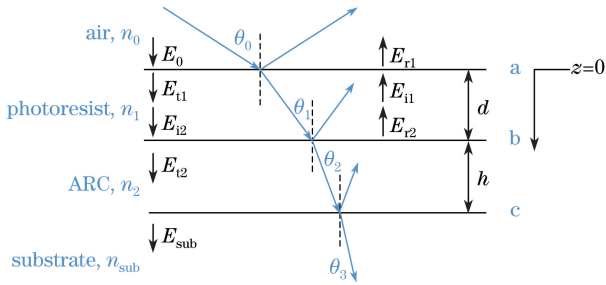


图 2 光刻胶层内光波传播示意图

Fig. 2 Schematic of light wave propagating in photoresist layer

面 b 处的向下场和向上场。

光刻胶层内的任何点处的总电场可表示为

$$E(z) = E_{\text{down}} + E_{\text{up}} = E_{i2} \exp[i(2\pi n_1/\lambda)(d-z)\cos\theta_1] + E_{r2} \exp[-i(2\pi n_1/\lambda)(d-z)\cos\theta_1]. \quad (5)$$

$E_{i2}$  和  $E_{r2}$  与界面 a 处的入射场  $E_0$  相关, 界面 a 的透射系数和反射系数可定义为

$$\tau_1 \equiv \frac{E_{\text{sub}}}{E_0}, \quad r_1 \equiv \frac{E_{r1}}{E_0}. \quad (6)$$

界面 b 处的透射系数和反射系数可定义为

$$\tau_2 \equiv \frac{E_{\text{sub}}}{E_{i2}}, \quad r_2 \equiv \frac{E_{r2}}{E_{i2}}. \quad (7)$$

将  $\tau_1, \tau_2, r_2$  代入(5)式, 得

$$E(z) = \frac{\tau_1}{\tau_2} E_0 \{ \exp[i(2\pi n_1/\lambda)(d-z)\cos\theta_1] + r_2 \exp[-i(2\pi n_1/\lambda)(d-z)\cos\theta_1] \} = F(z) E_0, \quad (8)$$

式中  $F(z)$  描述了光刻胶与基底界面的反射引起的驻波效应<sup>[13]</sup>, 表示为

$$F(z) = \frac{\tau_1}{\tau_2} \{ \exp[i(2\pi n_1/\lambda)(d-z)\cos\theta_1] + r_2 \exp[-i(2\pi n_1/\lambda)(d-z)\cos\theta_1] \}. \quad (9)$$

结合(2)~(3)式, 光刻胶层内的光强分布可写为

$$I(x, y, z) = |F(z)|^2 \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right) \times \left[ A_L^2 + A_R^2 + 2A_L A_R \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) \right]. \quad (10)$$

SBIL 系统利用工件台的扫描步进运动, 对覆盖有光刻胶的光栅基底进行曝光。假定工件台沿  $x$  轴的步进量为  $S$ , 沿  $y$  轴的扫描速度为  $v$ , 则第  $k$  次扫描的曝光量<sup>[14]</sup>可写为

$$D_k(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z, t) dt = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z, t) dy = \frac{\omega}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} |F(z)|^2 \exp\left\{-2 \frac{[x - (k-1)S]^2}{\omega^2}\right\} \times$$

$$\left\{ A_L^2 + A_R^2 + 2A_L A_R \cos\left\{\frac{2\pi}{p}[x - (k-1)S]\right\} \right\}. \quad (11)$$

为保证曝光的对比度最大, 步进量  $S$  为周期  $p$  的整数倍。经过  $l$  次步进后, 总曝光量可表示为

$$D(x, z) = \sum_{k=1}^l D_k(x, z). \quad (12)$$

图 3 所示为通过数值计算得到的光刻胶内的曝光量分布, 可以看出, 在  $x$  方向上曝光量呈周期为  $p$  的余弦分布, 在  $z$  方向上曝光量呈周期  $p' = \frac{\lambda}{2n_1 \cos\theta_1}$  的余弦分布。归一化的曝光量幅值由左右入射光的场强决定, 当  $A_L = A_R$  时, 幅值最大为 1。由于光刻胶内的曝光量在  $z$  方向上呈余弦分布, 显影后光栅掩模的侧壁会出现驻波节。

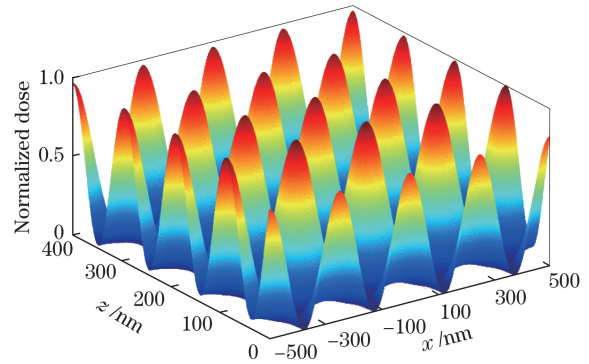


图 3 光刻胶内的归一化曝光量

Fig. 3 Normalized exposure within photoresist

### 3 SBIL 显影模型

#### 3.1 显影刻蚀速率与曝光量的关系

正性光刻胶主要由光敏化合物(PAC)、感光树脂和有机挥发性溶剂组成。PAC 用于阻止未曝光的光刻胶溶解在显影剂中, 因此又被称为抑制剂。光刻胶在曝光过程中将发生光化学反应, 该反应将 PAC 转化成可溶于显影剂的暴露产物, 以上过程即为光敏作用过程。

Dill 等<sup>[15]</sup>给出了光敏作用过程的数学表达形式, 其中相对 PAC 浓度(原子数分数, 下同)  $m(x, z)$  与曝光量  $D(x, z)$  的关系可写为

$$m(x, z) = \exp[-C \cdot D(x, z)], \quad (13)$$

式中  $C$  为动态曝光率常数。

基于由(13)式得到的 PAC 浓度, Mack<sup>[16]</sup>给出了光刻胶刻蚀速率的表达式, 即

$$v(x, z) = v_{\text{max}} \frac{(a+1)[1-m(x, z)]^n}{a+[1-m(x, z)]^n} + v_{\text{min}}, \quad (14)$$

式中  $v_{\max}$  为被完全曝光的光刻胶的刻蚀速率;  $v_{\min}$  为未曝光的光刻胶的刻蚀速率;  $n$  为显影选择常数;  $a$  为简化常量, 可表示为

$$a = \frac{(n+1)}{(n-1)}(1-m_{\text{th}})^n, \quad (15)$$

式中  $m_{\text{th}}$  为抑制剂发生溶解的相对 PAC 浓度阈值。

本文以上参数分别为  $C=0.1, v_{\max}=18 \text{ nm/s}, v_{\min}=0.5 \text{ nm/s}, m_{\text{th}}=0.75, n=7$ 。结合 (13) ~ (14) 式即可得到显影刻蚀速率与曝光量间的数学关系。

### 3.2 显影过程

光刻胶表面轮廓的演变过程可以应用 FMM 进行描述。假设  $r(x, z)$  为定义在  $x$ - $z$  平面的曲线, 且其法线方向速度  $v(x, z) \geq 0$ , 即  $r(x, z)$  一直向外作扩张运动。曲线到达点  $(x, z)$  的耗时为  $T(x, z)$ , 则有

$$|\nabla T(x, z)|v(x, z) = 1, \quad (16)$$

式中  $\nabla T$  为函数  $T(x, z)$  的梯度。(16) 式即为 Eikonal 方程, 该方程可以应用 FMM 进行数值求解。

假定曲线以速率  $v(x, z)$  在  $N_x \times N_z$  的网格上传播, 即

$$\begin{cases} x_g = (g-1) \cdot \Delta x, g=1, \dots, N_x \\ z_h = (h-1) \cdot \Delta z, h=1, \dots, N_z \end{cases}, \quad (17)$$

式中  $(x_g, z_h)$  为网格点坐标,  $\Delta x, \Delta z$  分别为  $x, z$  方向上相邻网格点之间的距离,  $g, h$  分别取整数,  $N_x, N_z$  分别为  $x, z$  方向的网格点总数。到达网格点  $(x_g, z_h)$  的耗时为  $T_{gh} = T(x_g, z_h)$ 。利用迎风差分法, 对 (16) 式中的  $|\nabla T|$  进行近似离散化处理<sup>[17]</sup>, 即

$$[\max(D_{gh}^- T, 0)^2 + \min(D_{gh}^+ T, 0)^2 + \max(D_{gh}^- y T, 0)^2 + \min(D_{gh}^+ x T, 0)^2] = \frac{1}{v(x, y)^2}, \quad (18)$$

式中  $D_{gh} = D(x_g, z_h)$ 。在计算到达某特定网格点  $(x_g, z_h)$  的耗时  $T_{gh}$  时, 假设其他的点是固定的, (18) 式实质上是每个网格点的值的二次方程。根据 (18) 式可以求得 (16) 式的稳定解, 选择最大的可能值作为解。

FMM 的原理如图 4 所示, 该算法每次只考虑一组紧邻当前曲线的网格点 (narrow band 点), 而所有之前达到的网格点 (alive 点) 均有固定的到达时间。计算到达 narrow band 点集中网格点的耗时, 并将其纳为 alive 点, 曲线的表面不断推进。以下为具体计算过程。

#### 1) 初始化

(a) alive 点: 以未发生蚀刻的光刻胶表面为初始

表面, 将初始表面  $r(x_g, z_h)$  内的所有网格点  $(x_g, z_1)$  的到达时间  $T_{g1}$  设置为零;

(b) narrow band 点: 估计与初始表面相邻的网

格点  $(x_g, z_2)$  的到达时间  $T_{g2}$ , 即  $T_{g,2} = \frac{\Delta z}{v(x_g, z_2)}$ ;

(c) 其余点设为 far away 点:  $T_{gh} = +\infty, h=3, \dots, N_z$ 。

#### 2) 曲线演变

(a) 假设点  $A(x_A, z_2)$  为 narrow band 点中具有最小时间的点, 则标记点  $A$  为 alive 点, 并将其从 narrow band 点集中删除;

(b) 考察点  $A$  的四个邻点  $(x_{A-1}, z_2), (x_{A+1}, z_2), (x_A, z_1), (x_A, z_3)$ , 将这四个点中的非 alive 点加入到 narrow band 点集中;

(c) 对 (18) 式进行求解, 计算新加入的 narrow band 点对应的的时间  $T$ , 并取求得的最大解;

(d) 对新生成的 narrow band 点集重复此循环, 直到 narrow band 点集中没有点。

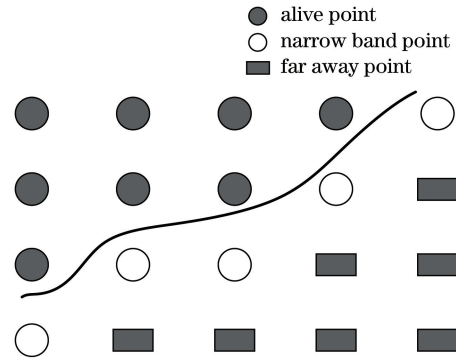


图 4 FMM 示意图

Fig. 4 Schematic of FMM

对应的仿真参数见表 1, 通过 FMM 仿真计算获得 20~200 s 槽形轮廓曲线, 如图 5 所示。可以看出, 随着显影时间的增加, 光栅掩模的槽深逐渐增大, 然而在槽深 50, 150, 250, 350 nm 附近处出现了驻波节, 这严重影响了光栅性能。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Content
Wavelength	355 nm
Incident angle	45°
Refractive index of air	1.0
Refractive index of photoresist	1.71-0.018i
Thickness of photoresist	400 nm
Refractive index of ARC	1.82-0.34i
Refractive index of substrate	0.883-2.778i



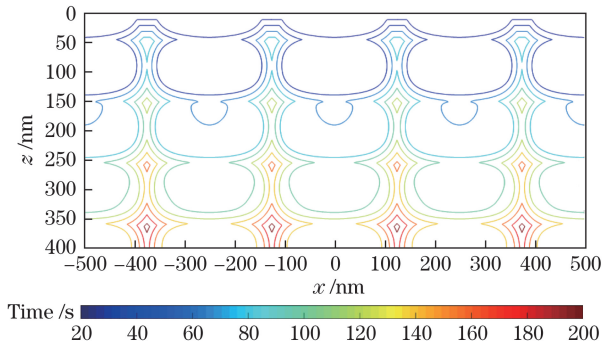


图 5 受驻波效应影响的轮廓演变曲线

Fig. 5 Profile evolution curves under influence of standing wave effect

## 4 ARC 厚度设计

利用扫描干涉光刻方法制作平面光栅时,基底的高反射率会带来严重的驻波效应,导致显影后的光栅掩模槽壁呈锯齿状结构<sup>[18-19]</sup>。这使得制作高精度的光栅掩模非常困难,因此需要寻找减少驻波效应的方法。通过设计合理的 ARC 厚度,可降低基底反射光强度,从而减弱驻波效应的影响。

首先应用传输矩阵的方法计算界面 b 的反射率。假设空气复折射率为  $n_0$ ,基底复折射率为  $n_{\text{sub}}$ ,复折射率为  $n_1$  的光刻胶是各向同性的,均匀分布在复折射率为  $n_2$  的 ARC 上。根据边界条件,所得到的电场和磁场的切向分量在界面上是连续的,则有

$$\begin{cases} E_a = E_0 + E_{r1} = E_{t1} + E_{i1} \\ E_b = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \end{cases}, \quad (19)$$

以及

$$\begin{cases} B_a = B_0 \cos \theta_0 - B_{r1} \cos \theta_0 = B_{t1} \cos \theta_1 - B_{i1} \cos \theta_1 \\ B_b = B_{i2} \cos \theta_1 - B_{r2} \cos \theta_1 = B_{t2} \cos \theta_2 \end{cases}, \quad (20)$$

式中  $E_a$ 、 $E_b$  分别为界面 a 和界面 b 处的总电场,  $B_a$ 、 $B_b$  分别为界面 a 和界面 b 处的总磁场,  $B_0$ 、 $B_{i1}$ 、 $B_{r1}$ 、 $B_{t1}$  分别为界面 a 处的入射磁场、反向入射磁场、反射磁场、透射磁场,  $B_{i2}$ 、 $B_{r2}$ 、 $B_{t2}$  分别为界面 b 处的入射磁场、反射磁场、透射磁场。

通过文献[20]中的方法,计算得到矩阵传递形式:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\gamma_1} \\ i\gamma_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中  $\delta_1$  为相位因子,  $\gamma_1$  为光学导纳,  $\mathbf{M}_1$  为转移矩阵。对于 TE 偏振,  $\gamma_1 = n_1 \cos \theta_1$ ,  $\delta_1 = (2\pi n_1 / \lambda) d \cos \theta_1$ 。

在图 2 所示的多涂层结构中,每一层都有对应

的转移矩阵,系统的整体转移矩阵是单个转移矩阵  $\mathbf{M}_N$  的乘积,以光的传播顺序进行多层叠加后可写为

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \left( \prod_{u=1}^N \mathbf{M}_N \right) \begin{bmatrix} E_{\text{sub}} \\ B_{\text{sub}} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

式中  $u$  为薄膜层编号。

在图 2 所示的结构中,利用边界条件,转移矩阵可写为

$$\begin{bmatrix} E_0 + E_{r1} \\ \gamma_0(E_0 - E_{r1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i \sin \delta_1}{\gamma_1} \\ i\gamma_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & \frac{i \sin \delta_2}{\gamma_1} \\ i\gamma_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{sub}} \\ \gamma_s E_{\text{sub}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{sub}} \\ \gamma_s E_{\text{sub}} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

式中  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{21}$ 、 $m_{22}$  为矩阵元素,  $\gamma_2 = n_2 \cos \theta_1$ ,  $\gamma_s = n_{\text{sub}} \cos \theta_3$ ,  $\delta_2 = (2\pi n_2 / \lambda) h \cos \theta_2$ 。

结合(6)式,(23)式可写成

$$\begin{cases} 1 + r_1 = m_{11} \tau_1 + m_{12} \gamma_s \tau_1 \\ \gamma_0(1 - r_1) = m_{21} \tau_1 + m_{22} \gamma_s \tau_1 \end{cases}. \quad (24)$$

对(24)式求解,得

$$\begin{cases} r_1 = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} - m_{21} - \gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \\ \tau_1 = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \end{cases}. \quad (25)$$

同理可求得  $r_2$  和  $\tau_1$ ,从而可求得 ARC 表面的反射率为

$$R = |r_2|^2. \quad (26)$$

根据以上分析计算,得到光刻胶与 ARC 分界面 b 处的反射率  $R$  随 ARC 厚度的变化规律,如图 6 所示。可以看出,当 ARC 厚度为 160 nm 时,反射率  $R$  取得最小值 0.104%,此时轮廓的演变曲线如图 7 所示。图 7 所示的光刻胶轮廓曲线没有出现图 5 中的驻波节,从而验证了 ARC 可有效减弱驻波效应。

## 5 结 论

针对 SBIL 技术建立了曝光显影模型,根据该模型可近似模拟出光栅掩模的槽形轮廓。结合光的干涉理论,建立了包含驻波效应的扫描曝光模型。在获得曝光模型的基础上,基于 Dill 模型和 Mack 模型,应用 FMM 分析了显影过程中光刻胶轮廓曲

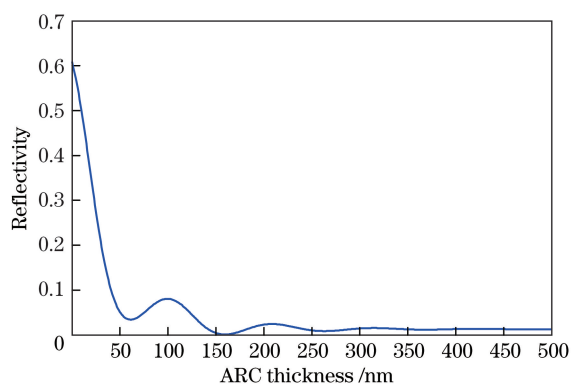


图 6 反射率随 ARC 厚度的变化曲线

Fig. 6 Reflectivity versus thickness of ARC

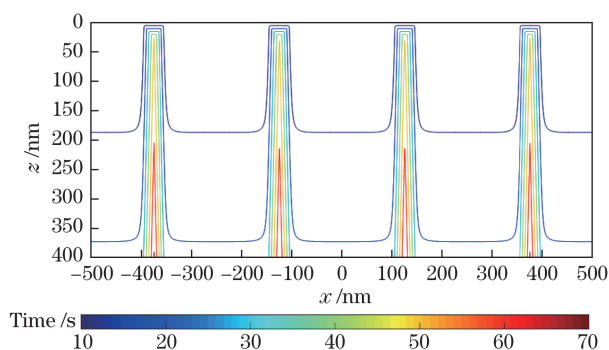


图 7 消除驻波效应后的轮廓演变曲线

Fig. 7 Profile evolution curves after elimination of standing wave effect

线的演变规律。为了得到光滑的光栅槽形,设计了最优的 ARC 厚度。从仿真结果可以看出,驻波效应的影响被消除。使用该曝光显影模型可有效提高光栅制作效率,同时降低制作成本。

## 参 考 文 献

- [1] Schattenburg M L, Chen C, Everett P N, *et al.* Sub-100 nm metrology using interferometrically produced fiducials[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1999, 17(6): 2692-2697.
- [2] Chen C G, Konkola P T, Heilmann R K, *et al.* Nanometer-accurate grating fabrication with scanning beam interference lithography[C]. *SPIE*, 2002, 4936: 126-134.
- [3] Pati G S, Heilmann R K, Konkola P T, *et al.* Generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2002, 20(6): 2617-2621.
- [4] Lindau S. The groove profile formation of holographic gratings[J]. *Journal of Modern Optics*, 1982, 29(10): 1371-1381.
- [5] Han J, Bayanheshig, Li W H, *et al.* Profile evolution of grating masks according to exposure dose and interference fringe contrast in the fabrication of holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0305001.  
韩建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅制作中光栅掩模形状随曝光量及干涉场条纹对比度的变化规律[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0305001.
- [6] Jewett R. A string model etching algorithm[D]. Berkeley: University of California, 1979.
- [7] Zhao J S, Li L F, Wu Z H. Modeling of *in-situ* monitoring curves during development of holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1146-1150.  
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1146-1150.
- [8] Scheckler E W, Tam N N, Pfau A K, *et al.* An efficient volume-removal algorithm for practical three-dimensional lithography simulation with experimental verification[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1993, 12(9): 1345-1356.
- [9] Geypen N N. Optimization of resist profiles using resist modeling techniques[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
- [10] Sethian J A. Level set methods and fast marching methods: evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [11] Lu S, Yang K M, Zhu Y, *et al.* Interference fringe phase locking system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 1-7.  
鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 干涉条纹相位锁定系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 1-7.
- [12] Mello B D, da Costa I F, Lima C R, *et al.* Developed profile of holographically exposed photoresist gratings[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(4): 597-603.
- [13] Fan Y, Bourov A, Zavyalova L, *et al.* ILSim: a compact simulation tool for interferometric lithography[C]. *SPIE*, 2005, 5754: 1805-1816.
- [14] Jiang S, Bayanheshig, Song Y, *et al.* Effect of measured interference fringe period error on groove profile of grating masks in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0405003.  
姜珊, 巴音贺希格, 宋莹, 等. 扫描干涉场曝光系统

- 中干涉条纹周期测量误差对光栅掩模槽形的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0405003.
- [15] Dill F H, Neureuther A R, Tuttle J A, *et al.* Modeling projection printing of positive photoresists[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1975, 22(7): 456-464.
- [16] Mack C A. Development of positive photoresists[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1987, 134(1): 148-152.
- [17] Godunov S K. A difference method for numerical calculation of discontinuous solutions of the equations of hydrodynamics[J]. Matematicheskii Sbornik, 1959, 89(3): 271-306.
- [18] Pati G S, Heilmann R K, Konkola P T, *et al.* Generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2002, 20(6): 2617-2621.
- [19] Qiu K Q, Liu Z K, Xu X D, *et al.* Standing wave in holographic lithography[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 014204.
- 邱克强, 刘正坤, 徐向东, 等. 全息光刻中的驻波效应研究[J]. 物理学报, 2012, 61(1): 014204.
- [20] Pedrotti F L, Pedrotti L S. Introduction to optics[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.