文章编号：1001-3806(2025)04-0532-07

# 反射式全息光刻系统的对比度分析

赵家琦[1,2,3]*，胡　飞[2]，郭登极[3]，张贤鹏[2]，王序进[1,3]
（1. 深圳大学 物理与光电工程学院，深圳 518060，中国；2. 深圳光峰科技股份有限公司，深圳 518054，中国；3. 深圳大学半导体制造研究院，深圳 518060，中国）

**摘要：** 全息光刻作为一种高效率的微纳加工方法，在 3 维微纳结构制造领域引起了广泛的研究兴趣。为了分析 3 维微纳结构的形貌演变并研究曝光系统设计对所制备结构的影响，基于全息光刻原理，建立了光刻胶内的 3 维曝光剂量模型，并进一步建立了 3 维微纳结构的形貌演化模型；基于上述数值模型进行了理论分析，探索了光源偏振、曝光基底反射、入射光相位漂移等关键因素对曝光场对比度的影响。结果表明，在经典反射式全息光刻系统中，横向电波-横向电波（TE-TE）偏振入射光在不同入射角下表现出高对比度 (0.95 以上)，明显优于其它偏振组合；曝光基底反射率对基底法线方向对比度具有重要影响并且二者正相关；大幅值低频相位漂移的入射光将导致曝光场对比度明显下降，因此曝光系统应主动控制环境和系统自身扰动，以获得高对比度的曝光场。该研究为反射式全息光刻系统的参数优化设计提供了参考。

**关键词：** 光学制造；全息光刻；光束干涉；微纳结构；对比度
**中图分类号：** TN305.7　　**文献标志码：** A　　**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2025.04.009

# Contrast analysis of the reflective holographic lithography system

*ZHAO Jiaqi*[1,2,3]*, *HU Fei*[2], *GUO Dengji*[3], *ZHANG Xianpeng*[2], *WANG Xujin*[1,3]
（1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Appotronics Corporation Ltd., Shenzhen 518054, China; 3. Institute of Semiconductor Manufacturing Research, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China）

**Abstract:** Holographic lithography has garnered significant research attention in the production of 3-D micro/nano structures due to its high efficiency. To delve deeper into the morphological changes within these 3-D structures and evaluate the impact of exposure system design on production, a comprehensive exposure dose model within the photoresist was developed, rooted in holographic lithography principles. Additionally, a morphology evolution model for 3-D micro-nano structures was formulated. By utilizing these established models, theoretical analysis was conducted to investigated key variables influencing the contrast of the exposure field, including light source polarization, exposure substrate reflection, and incident light phase drift. Simulation results indicate that, within the classical reflective holographic lithography system, the transverse electric and transverse electric(TE-TE) polarized incident light exhibits superior contrast (above 0.95) across various incident angles, surpassing other polarization combinations significantly. Moreover, the reflectivity of the exposure substrate significantly influences contrast in the substrate's normal direction, showing a positive correlation. Importantly, significant and low-frequency drifts in the incident light's relative phase result in a notable decrease in exposure field contrast. Thus, actively mitigating environmental and internal disturbances is crucial for maintaining a high-contrast exposure field. This study provides a reference for the parameter optimization design of reflective holographic lithography systems.

**Key words:** optical fabrication; holographic lithography; beam interference; micro/nano structures; contrast ratio

## 0　引　言

相较于 1 维和 2 维微纳结构，3 维 (three-dimensional, 3-D) 微纳结构具有更大空间自由度及其所引起的独特的机械、电、热和光学性质[1]。一系列 3 维微纳结构已被广泛研究并应用于不同领域，展示出巨大的性能优势和应用前景[2-4]。然而，3 维微纳结构的制备复杂度与难度同样高于 1 维/2 维微纳结构。常见的平面微纳制造工艺难以直接应用于 3 维微纳结构制备。

近年来，3 维微纳结构制备技术引起了极大地研究兴趣。相关研究中的制备技术可以分为自上而下和自下而上两类方法。投影式光刻、电子束光刻、全息光刻、激光直写、纳米压印和 3 维打印（聚焦离子束/电子束诱导沉积）等自上而下技术已被用于创建各种 3 维微纳结构[1,5-6]；以自组装为代表的自上而下方法已被广泛应用于制造 3 维微纳结构[7]。

在上述方法中，全息光刻技术在实现相对简单、亚波长和低成本的周期性图案上具有很大的前景[8]。基

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2021YFB3600300）
* 通信作者：zhaojiaqi@appotronics.com
收稿日期：2024-07-08；修回日期：2024-09-06

于光场干涉特性，通过调节全息光刻系统的波矢、相位与偏振可以形成几乎所有的晶格类型[9]。该技术在光子晶体、超材料、亚波长结构、生物医疗结构领域得到了广泛的关注[10]。除了典型的全息光刻技术外，自组装、刻蚀等微纳工艺也被引入与全息光刻结构相结合[11-13]，以产生更多形貌/材料体系的微纳结构。其中，3 维结构一般需要多光束干涉光场或双光束光场多次曝光形成。全息光刻系统的入射光参数、曝光基底参数对最终得到的微纳结构形貌具有重要影响[14-16]。此外，曝光过程中的环境或光学系统自身扰动将进一步导致曝光场强度分布漂移，从而导致曝光场剂量对比度降低[17]。现有全息光刻法制备 3 维微纳结构研究中，相关研究偏重于全息光刻系统的使用上，而较少见 3 维全息光刻系统的性能评估研究[10,18]。

为了获得高对比度的曝光场并为制作不同构型的微纳结构提供理论依据，本文作者以反射式全息光刻系统为例，系统性地建立了曝光场模型与光刻胶剂量分布模型，分析了光束偏振、基底反射率、光束相位漂移等关键曝光系统参数对曝光场强度或剂量分布的影响，并给出了相应曝光系统的参数设计与相位漂移抑制建议。

## 1　全息曝光场建模

### 1.1　建模对象描述

图 1 展示了最典型的反射式全息干涉曝光系统。两平面单色光束 $A$、$B$ 以不同的角度入射至光刻胶层与镀膜基底。光束 $A$、$B$ 经镀膜基底反射后分别得到反射光束 $A_r$、$B_r$。两入射光与两反射光在光刻胶层中干涉得到 $xOz$ 面内的 2 维干涉场分布。图 1a 所示坐标系为曝光系统全局坐标系。通过旋转基底后 2 次曝光，即可得到 3 维干涉场分布，光刻胶显影后即可得到

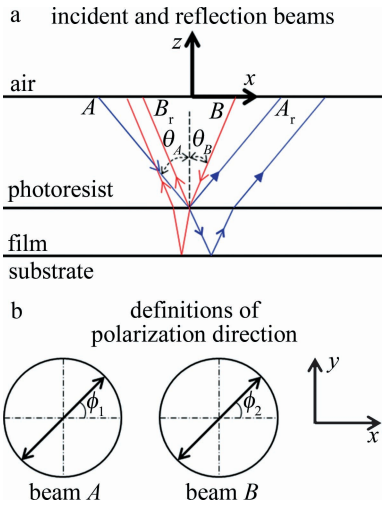


图 1　曝光系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of exposure system

3 维微纳结构。考虑到全息干涉法中更为普遍地采用线偏光，本文中光束 $A$、$B$ 均定义为线偏光。两光束的偏振方向如图 1b 所示。

### 1.2　光刻胶层全息曝光场建模

以光束 $A$ 为例，考虑光刻胶层的吸收效应，其在光刻胶层的电场分布为：

$$\boldsymbol{E}_A = |\boldsymbol{E}_A|\cdot\boldsymbol{e}_A\cdot\exp[\mathrm{i}(\boldsymbol{k}_A\cdot\boldsymbol{w}_A+\varphi_A)]\cdot\exp(-\alpha L_A) \quad (1)$$

式中：$|\boldsymbol{E}_A|$是光束 $A$ 的电场振幅；$\boldsymbol{e}_A$是光束 $A$ 的偏振单位向量；$\boldsymbol{k}_A$ 是波矢量，其幅值等于$(2\pi n)/\lambda$；$n$ 为光刻胶层折射率；$\lambda$为光束的波长；$\boldsymbol{w}_A=[x,y,z]$是光束 $A$ 在曝光系统全局坐标系下的位置向量；$\varphi_A$是光束 $A$ 的初始相位；$\exp(-\alpha L_A)$是光刻胶层的吸收项；$\alpha=(2\pi\kappa)/\lambda$是光刻胶的吸收系数；$L_A$代表光束 $A$ 进入光刻胶的深度；$\kappa$是光刻胶复折射率的虚部。

入射光 $A$ 在经过底部薄膜层以及基底层反射后，得到反射光 $A_r$ 的电场强度为：

$$\boldsymbol{E}_{A_r} = \left|\boldsymbol{E}_{A_r}\right|\cdot\boldsymbol{e}_{A_r}\cdot\exp[\mathrm{i}(\boldsymbol{k}_{A_r}\cdot\boldsymbol{w}_{A_r}+\varphi_{A_r})]\cdot\exp(-\alpha L_{A_r}) \quad (2)$$

$$\left|\boldsymbol{E}_{A_r}\right| = r_A\cdot|\boldsymbol{E}_A| \quad (3)$$

$$\boldsymbol{e}_{A_r} = \boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{e}_A \quad (4)$$

式中：$r_A$是镀膜基底对入射光 $A$ 的反射率；$\boldsymbol{J}$是镀膜基底的 Jones 矩阵，代表了镀膜基底对入射光的偏振响应，$\boldsymbol{J}$中对 $p$ 光与 $s$ 光的振幅反射系数可以根据菲涅耳方程计算得到。反射光 $A_r$ 的光刻胶层传播深度$L_{A_r}$可基于光束 $A$ 对应参数的简单坐标系换算得到，本文中不再展开赘述。根据反射光束 $A_r$ 与入射光 $A$ 的几何关系，光束 $A_r$ 电场公式中的相位项可由光束 $A$ 的电场相位项换算而来：

$$\boldsymbol{k}_{A_r}\cdot\boldsymbol{w}_{A_r}+\varphi_{A_r} = \boldsymbol{k}_A\cdot(\boldsymbol{w}_A+[0\quad 0\quad 2d_p])+\varphi_A+\Delta\varphi_A \quad (5)$$

式中：$d_p$是光刻胶层厚度；$\Delta\varphi_A$是光束 $A$ 经过镀膜基底反射后的相位变化量。$r_A$与$\Delta\varphi_A$均可通过薄膜函数求解[19]。

将式(1)~式(5)中的下标 $A$ 更换为 $B$，即可得到光束 $B$、$B_r$ 的电场公式。对于光刻胶层中的位置 $\boldsymbol{w}$，入射光 $A$、$B$ 与反射光 $A_r$、$B_r$ 的干涉光场总强度为：

$$\boldsymbol{I}(\boldsymbol{w}) = \left(\sum_i \boldsymbol{E}_i\right)\left(\sum_i \boldsymbol{E}_i\right)^* = \sum_{i\neq j}|\boldsymbol{E}_i||\boldsymbol{E}_j|\boldsymbol{e}_i\boldsymbol{e}_j^{\mathrm{T}}\cos[(\boldsymbol{k}_i-\boldsymbol{k}_j)\cdot\boldsymbol{w}+(\varphi_i-\varphi_j)]\times \exp[-\alpha(L_i+L_j)]+\sum_i|\boldsymbol{E}_i|^2\exp(-2\alpha d_i),\quad (i,j\in A,B,A_r,B_r) \quad (6)$$

曝光场的强度对比度定义为：

$$K_I = \frac{\boldsymbol{I}_{\max}-\boldsymbol{I}_{\min}}{\boldsymbol{I}_{\max}+\boldsymbol{I}_{\min}} \quad (7)$$

此外，为了评估曝光场光强的 3 维分布，引入参数

$K_{I,x}$、$K_{I,y}$、$K_{I,z}$分别代表曝光场的 $x$、$y$ 和 $z$ 3 个方向的强度对比度，其计算方法为取某局部光强极大点作 $x$、$y$ 和 $z$ 3 个方向截线，利用截线上光强求解强度对比度。

综合式(6)和式(7)，曝光场强度对比度$K_I$受到各入射光束相对强度、镀膜基底反射系数、光束偏振态以及光刻胶层吸收系数的影响。一般的全息干涉应用中，光刻胶的吸收率较低且膜厚较小，入射光强度容易调控且各个入射光强度相对值一般设定为固定值。因此，下面将主要探讨光源偏振与基底反射系数对曝光场对比度和显影形貌的影响。

全息曝光场的光束振幅、偏振态在曝光过程中一般保持不变。由于环境扰动或光学系统振动等因素影响，光束 $A$、$B$ 的相位差波动导致曝光期间干涉场强度分布变化。因此，光刻胶层的曝光场剂量分布主要受入射光相位变化的影响：

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{w})=\int_0^T \boldsymbol{I}(\boldsymbol{w},\varphi_A,\varphi_B)\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中：$T$是曝光时长。类似地，光刻胶层曝光剂量对比度定义为：

$$K_D=\frac{\boldsymbol{D}_{\max}-\boldsymbol{D}_{\min}}{\boldsymbol{D}_{\max}+\boldsymbol{D}_{\min}} \tag{9}$$

结合式(7)~式(9)可以看出，剂量对比度优劣取决于曝光场强度对比度$K_I$优劣以及曝光期间入射光束的相对相位波动大小。因此，下面在评估入射光偏振、镀膜基底反射特性等非时变系统参数时，采用强度对比度$K_I$作为研究对象；在评估入射光相位漂移现象时，采用剂量对比度$K_D$作为研究对象。

上面推导了单次曝光下的光刻胶层干涉场光强与剂量分布。通过旋转光刻胶基底并 2 次曝光，显影后即可得到 3 维近似周期分布的微纳结构。相对于第 1 次曝光，2 次曝光时光刻胶基底绕 $y$ 轴顺时针旋转$\beta$角度，2 次曝光得到的干涉曝光场光强与剂量分布分别为：

$$\boldsymbol{I}_2(\boldsymbol{w})=\boldsymbol{I}(\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{D}_2(\boldsymbol{w})=\int_0^{T_2}\boldsymbol{I}_2(\boldsymbol{w},\varphi_A,\varphi_B)\mathrm{d}t \tag{11}$$

式中：$T_2$是 2 次曝光的时长；$\boldsymbol{p}$ 为光刻胶基底旋转$\beta$角度后基底坐标系旋转为曝光光束定义的全局坐标系的转换矩阵。

$$\boldsymbol{p}=\begin{bmatrix}\cos\beta & 0 & \sin\beta\\ 0 & 0 & 0\\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta\end{bmatrix} \tag{12}$$

将两次曝光后的光刻胶 3 维剂量叠加，根据光刻胶显影的二元模型即可得到微纳结构形貌。

## 2 系统参数评估

经典的全息光刻应用中，两光束 $A$、$B$ 波矢共面且具有相同的振幅与入射角。本文中基于上述假定来探究光刻胶层全息曝光场及显影后微纳结构，曝光系统的详细参数设定如表 1 所示。

表 1 曝光系统参数

Table 1 Parameters of exposure system

| parameter | value | parameter | value |
|---|---|---|---|
| $\lambda$ | 405 nm | $n$ | 1.6708 |
| $d_p$ | 400 nm | $\kappa$ | 0.00847 |
| $\theta_A$ | 30° | $r_A$ | 0.3 |
| $\theta_B$ | 30° | $r_B$ | 0.3 |
| $\phi_1$ | 90° | $\Delta\varphi_A$ | π |
| $\phi_2$ | 90° | $\Delta\varphi_B$ | π |

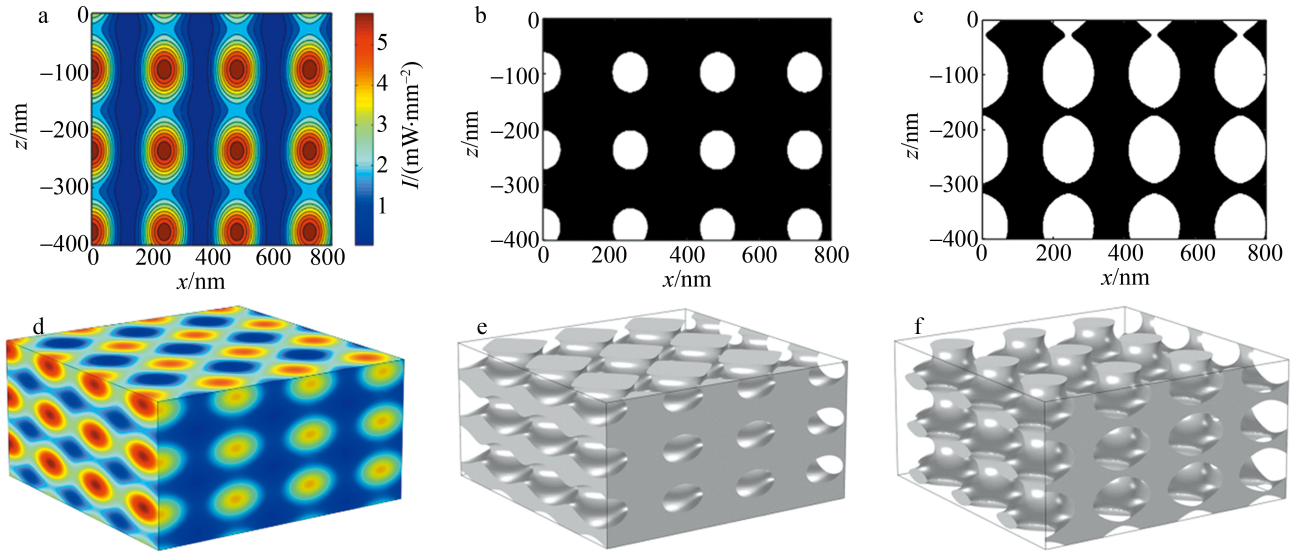


图 2 单次曝光和 2 次曝光后的光强分布与显影后结构形貌

Fig. 2 Light intensity distributions and the corresponding developed structures after single exposure and double exposure

由式(6)推导可知，在忽略光刻胶吸收效应情况下，光束 $A$ 与 $B$ 干涉、$A_r$ 与 $B_r$ 干涉时均会产生 $x$ 向 1 维周期性结构（周期为 $\lambda/(2n\sin\theta_A)$）；光束 $A$ 与 $A_r$ 干涉、$B$ 与 $B_r$ 干涉时均会产生 $z$ 向 1 维周期性结构（周期为 $\lambda/(2n\cos\theta_A)$）；光束 $A$ 与 $B_r$ 干涉、$B$ 与 $A_r$ 干涉时均会产生 $xOz$ 平面内倾斜的 1 维周期性结构（$x$ 向周期为 $\lambda/(2n\sin\theta_A)$，$y$ 向周期为 $\lambda/(2n\cos\theta_A)$）。叠加光刻胶吸收效应后，光刻胶层的光强分布如图 2a 所示。2 维光强分布对比度 $K_I = 1$，其中，由于入射光 $A$、$B$ 显著强于反射光 $A_r$、$B_r$，而 $z$ 向周期性结构主要由反射光干涉产生，2 维干涉场中 $x$ 向对比度优于 $z$ 向对比度。在上述光场中取一局部最大光强极大值作 $x$ 向与 $z$ 向截线，利用截线上光强数据求得 $x$ 向与 $z$ 向光强对比度分别为 $K_{I,x} = 1$、$K_{I,z} = 0.53$。

假定曝光过程中 $A$、$B$ 光束初始相位波动可忽略不计，则光刻胶层剂量对比度也为 1。图 2b 和图 2c 展示了不同曝光总剂量下的显影得到的 $xOz$ 面内微纳结构形貌。可以看出，由于 $x$ 向对比度更好，$x$ 向结构显影分离速度明显高于 $z$ 向。

将单次曝光后的光刻胶基底旋转 $\beta = \pi/2$ 后 2 次曝光，可得到 3 维分布的曝光场。图 2d 展示了光刻胶层的 3 维光强分布；同样地，假定忽略不计曝光过程光束的初始相位波动，图 2e 和图 2f 展示了不同曝光总剂量下的显影得到的 3 维微纳结构形貌。

### 2.1　入射光偏振

各干涉光束的偏振方向直接影响相干项的振幅大小，从而影响曝光场对比度。各光束的偏振方向由入射角与偏振角共同决定。因此，本小节中将探究不同光源偏振角与入射角对曝光场强度对比度的影响。除光源偏振角 $\phi$ 与入射角 $\theta$ 外，其它曝光系统参数均与表 1 中的参数保持一致。

通常两入射光由同一光源分光得到。因此，假定光束 $A$、$B$ 具有相同的偏振角。图 3a 展示了横向电波（transverse electric,TE）（偏振角为 90°）与横向磁波(transverse magnetic,TM)（偏振角为 0°）在不同入射角下的曝光场强度对比度。当各光束均为 TE 波时，偏振干涉项 $\boldsymbol{e}_i\boldsymbol{e}_j^{\mathrm{T}}$ 项恒等于 1 而与入射角无关。对于 TM 波，其偏振干涉项与入射角相关，并且入射角越接近 45°时曝光场对比度越差。

进一步地，图 3b 展示了不同入射角与偏振角下的曝光场强度对比度分布。可以看出，不同入射角下对比度随偏振角的变化趋势不同。在入射角小于 45°时，随着偏振角增大，曝光场对比度逐渐增大；而在入射角大于 45°时，随着偏振角增大，曝光场对比度先减小后增大。上述变化趋势是由于特定入射角下 TE 分量与 TM 分量的曝光场相位变化导致的。具体地，当入射角小于 45°时，TE 分量与 TM 分量的曝光场相位分布相同，因此，随着偏振角增大，TE 偏振分量增加，曝光场对比度也逐渐增大；而当入射角大于 45°时，由于 TE 分量与 TM 分量的偏振干涉项 $\boldsymbol{e}_i\boldsymbol{e}_j^{\mathrm{T}}$ 符号相反，TE 分量与 TM 分量的曝光场相位分布相反。因此，TE 分量曝光场与 TM 分量曝光场叠加带来的均化效应使得曝光场对比度随着偏振角增大而先减小后增大。

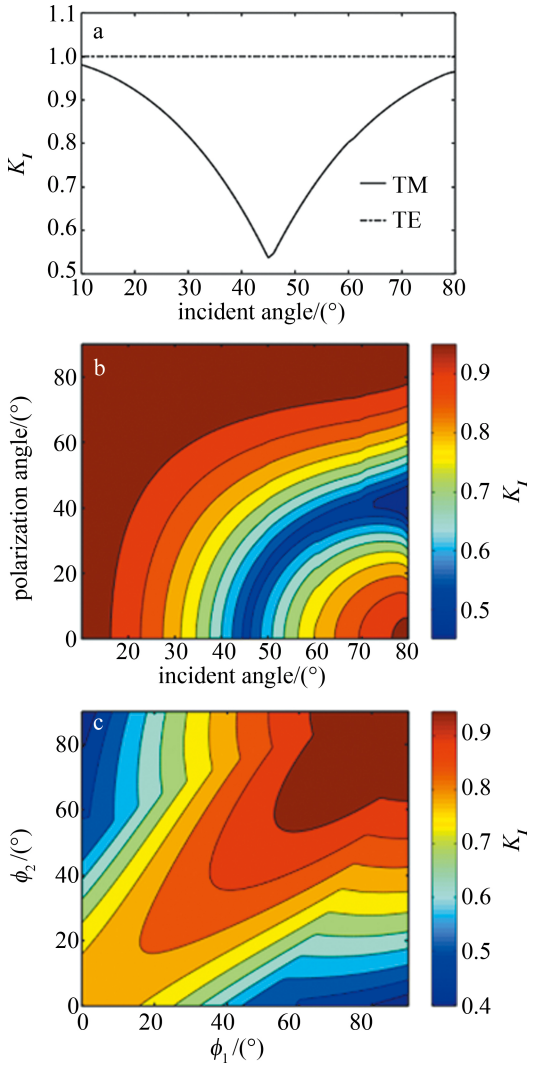


图 3　入射光偏振对曝光场强度对比度 $K_I$ 的影响

Fig. 3　Effect of incident light polarization on intensity contrast $K_I$ of exposure field

为了更普适性地探索偏振对曝光场强度对比度的影响，图 3c 展示了同一入射角(30°)下不同入射光偏振角对曝光场对比度的影响。可以看出，入射光均为 TE 波时曝光场对比度最好。此外，当一个入射光束已确定偏振角时，另一入射光束具有相同偏振角时曝光场对比度最好。

### 2.2　镀膜基底反射特性

光刻胶下方的镀膜基底直接决定反射光束的振幅

与初始相位，从而影响曝光场对比度与相位分布。本小节中将探究镀膜基底反射率$r$与相位改变量$\Delta\varphi$对曝光场强度对比度的影响。除$r$与$\Delta\varphi$外，其它曝光系统参数均与表 1 中的参数保持一致。

图 4a、图 4b 分别展示了镀膜基底$r$与$\Delta\varphi$对曝光场 $x$ 向和 $z$ 向对比度的影响。可以看出，由于 $z$ 向对比度主要与反射光束振幅相关，镀膜基底反射率参数$r$对曝光场 $z$ 向对比度具有显著影响，$K_{I,z}$随$r$增大的而增大，$r = 1.0$时，$K_{I,z}$=1.0；而相位改变量$\Delta\varphi$对曝光场的影响主要体现在曝光场光强相位分布上，$\Delta\varphi$对$K_{I,z}$的影响较小。另外，由于所有光束均为 TE 波，$x$ 向对比度$K_{I,x}$主要与入射光束相关，基底反射对$K_{I,x}$影响较小。

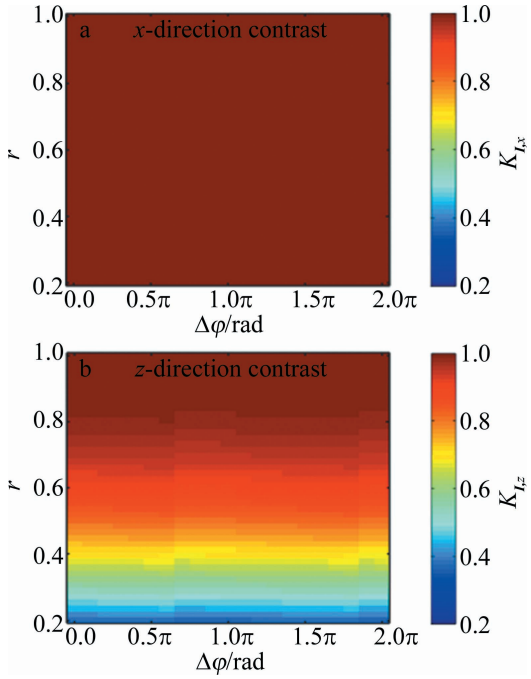


图 4 镀膜基底反射率 $r$ 与相位$\Delta\varphi$对曝光场强度对比度的影响

Fig. 4 Effect of substrate reflectance $r$ and phase $\Delta\varphi$ on intensity contrast of exposure field

实际应用中，基底反射率与基底镀膜参数、光束入射角密切相关。因此，下面采用较常见的镀铬硅片基底来评估镀膜参数与入射角度对曝光场强度 $z$ 向对比度的影响。图 5a 和图 5b 展示了 30°入射角下铬膜厚度对$r$和$K_{I,z}$的影响。可以看出，在固定的入射角下，随着铬膜厚度增加，基底反射率与 $z$ 向对比度同步先增加后减小再稳定。图 5c 和图 5d 展示了 100 nm 铬膜厚度下入射角对$r$和$K_{I,z}$的影响。可以看出，在固定的铬膜厚度下，随着入射角增大，基底反射率与 $z$ 向对比度同步增大。

在实际应用中，入射角取决于待制备的微纳结构参数。因此，可通过改变基底膜层设计来调控基底反射率，从而实现所期望 $z$ 向对比度的曝光场。

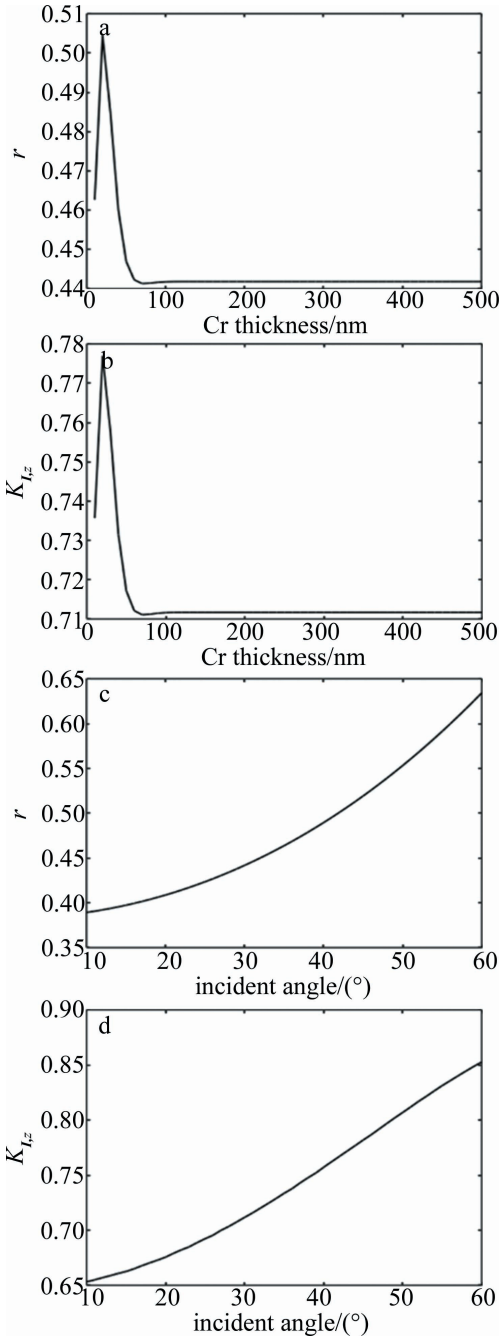


图 5 镀膜基底厚度与入射角对基底反射率 $r$ 和曝光场强度 $z$ 向对比度$K_{I,z}$的影响

Fig. 5 Effect of substrate thickness and incident angle on substrate reflectance $r$ and $z$-direction intensity contrast $K_{I,z}$

## 2.3 入射光相位漂移

除曝光场强度对比度外，曝光过程中的入射光束相位波动同样直接影响曝光场剂量对比度。参照前人的研究[17]，入射光束相位的低频漂移对曝光剂量对比度与微纳结构形状影响远大于小幅值高频相位漂移。因此，本小节中将探究入射光 $A$、$B$ 的初始相位$\varphi_A$、$\varphi_B$的低频漂移对曝光场强度对比度的影响。除$\varphi_A$与$\varphi_B$外，其它曝光系统参数均与表 1 中的参数保持一致。

根据式(6)，$\varphi_A$、$\varphi_B$对曝光场强度分布的影响体现

在两初始相位的差值$\Delta\varphi_{A-B}=\varphi_A-\varphi_B$。以表 1 中的参数所对应曝光场光强分布为例，图 6 展示了不同$\Delta\varphi_{A-B}$时，曝光场某一局部光强最大点的坐标位置变化。可以看出，$\Delta\varphi_{A-B}$的变化主要导致曝光场光强分布横向移动，而对曝光场 $z$ 向光强分布相位没有直接影响。曝光过程中的光场强度分布漂移直接导致曝光场剂量对比度下降。

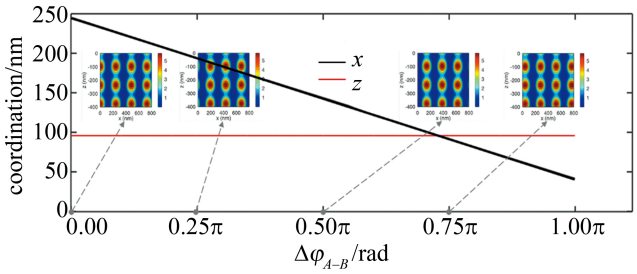


图 6　入射光初始相位差$\Delta\varphi_{A-B}$漂移对曝光场强度分布的影响

Fig. 6　Effect of initial phase difference $\Delta\varphi_{A-B}$ of incident light on intensity distribution of exposure field

入射光的初始相位漂移主要由外界环境的缓慢变化引起[17]。因此，本小节中以线性漂移与正弦漂移两种形式，来分析相位漂移对剂量对比度的影响。

当$\Delta\varphi_{A-B}$线性漂移时，其时变公式定义为$\Delta\varphi_{A-B}(t)=\varphi_{\max}t/T$。其中$\varphi_{\max}$是曝光时间$T$内的最大相位漂移量。结合表 1 中的系统参数，剂量对比度随$\varphi_{\max}$的变化关系如图 7a 所示。由图可以发现，线性漂移导致剂量对比度明显下降，剂量对比度变化曲线为偶函数且存在多个旁瓣，当 $\varphi_{\max}>\pi$ 或 $\varphi_{\max}<-\pi$ 时，剂量对比度均小于 0.7。

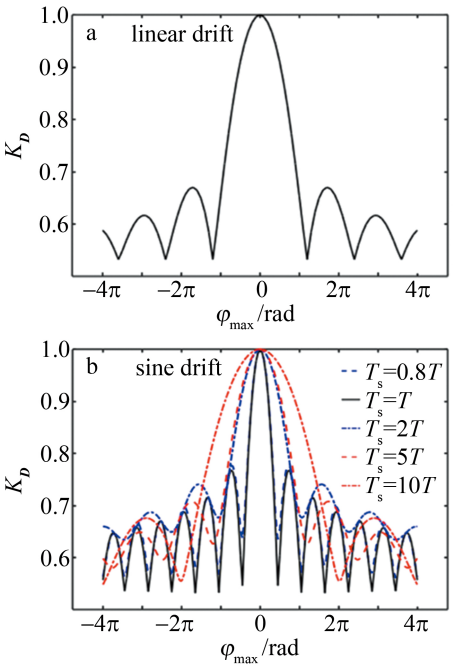


图 7　相位漂移$\varphi_{\max}$对曝光场剂量对比度 $K_D$ 的影响

Fig. 7　Effect of phase drift $\varphi_{\max}$ on dose contrast $K_D$ of exposure field

当$\Delta\varphi_{A-B}$发生正弦漂移时，其时变公式定义为$\Delta\varphi_{A-B}(t)=\varphi_{\max}\sin(2\pi t/T_s)$，其中$T_s$是低频正弦波动变化的周期。图 7b 为不同$T_s$下剂量对比度随$\varphi_{\max}$的变化曲线。可以看出，相位正弦漂移导致剂量对比度下降，对比度变化曲线为偶函数且存在多个旁瓣。此外，当相位波动周期较小（频率较大）时，$\varphi_{\max}$对 $K_D$ 影响更大，$K_D$ 随$\varphi_{\max}$绝对值增大而迅速下降。

为了避免入射光初始相位波动导致的剂量对比度下降，全息干涉曝光系统应放置于低温度漂移、低湿度漂移与低振动的环境内。此外，通过设计曝光光学系统以减少各束入射光的光路差异（例如劳埃镜方案或光栅掩模自干涉方案），同样可以降低环境低频扰动对入射光相对相位的影响。除了上述被动式方案外，当所需曝光时长较长时，可引入相位锁定系统[20]，通过主动式器件补偿入射光相位漂移，从而实现高剂量对比度。

## 3　结　论

针对反射式全息光刻系统，本文中系统性地建立了 3 维曝光场的光强与剂量分布模型，并探索了制备的 3 维微纳结构的形貌演变。基于上述模型分析可知，曝光场对比度的主要影响因素包括：入射光偏振态、镀膜基底反射特性与入射光相位漂移。进一步地，详细探究了上述曝光系统参数对曝光场对比度的影响。分析结果表明：在入射光偏振参数方面，TE 偏振或具有相同偏振角的入射光更利于曝光场对比度；在镀膜基底特性方面，基底反射率参数对曝光场对比度影响远大于基底反射相位变化参数；在 TE 入射光下，基底反射率主要影响垂直基底方向对比度，且二者正相关。另外，在曝光场相位漂移现象方面，给定曝光时间内的大幅值高频漂移对曝光场对比度产生最大的不利影响。因此，可以通过环境控制、隔振、相位锁定等措施来规避曝光场相位漂移。

### 参　考　文　献

[1]　WANG K, MA Q, QU C X, *et al*. Review on 3D fabrication at nanoscale[J]. Autex Research Journal, 2023, 23(3): 350-369.

[2]　ZHAO H, LEI Y. 3D nanostructures for the next generation of high-performance nanodevices for electrochemical energy conversion and storage[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(28): 2001460.

[3]　KASANI S, CURTIN K, WU N. A review of 2D and 3D plasmonic nanostructure array patterns: Fabrication, light management and sensing applications[J]. Nanophotonics, 2019, 8(12): 2065-2089.

[4]　KARIMI A R, KHODADADI A. Mechanically robust 3D nano-structure chitosan-based hydrogels with autonomic self-healing properties[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2016, 8(40): 27254-27263.

[5]　SONG Zh, WEI Sh H, DUAN H G, *et al*. Current status and development of 3-D microstructures fabrication[J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(7): 558-562 (in Chinese).

宋志，魏淑华，段辉高，等. 三维微结构制作现状与进展 [J]. 半导体技术，2008，33(7)：558-562.

[6] ZENG H F, GUO L, LI Sh G, *et al*. Global technical cooperation from the perspective of extreme ultraviolet lithography development[J]. Laser Technology, 2023, 47(1): 1-12(in Chinese).
曾海峰，郭磊，李世光，等. 从极紫外光刻发展看全球范围内的技术合作 [J]. 激光技术，2023，47(1)：1-12.

[7] GHOLAMI A, HASHEMI S A, YOUSEFI K, *et al*. 3D nanostructures for tissue engineering, cancer therapy, and gene delivery[J]. Journal of Nanomaterials, 2020, 2020: 1852946.

[8] LU C, LIPSON R H. Interference lithography: A powerful tool for fabricating periodic structures[J]. Laser and Photonics Reviews, 2010, 4(4): 568-580.

[9] ULLAL C K, MALDOVAN M, THOMAS E L, *et al*. Photonic crystals through holographic lithography: simple cubic, diamond-like, and gyroid-like structures[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(26): 5434-5436.

[10] PENG F P, DU J, DU J L, *et al*. Contrast analysis of polarization in three-beam interference lithography[J]. Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(11): 4789.

[11] KANG D Y, LEE W, KIM D, *et al*. Three-dimensional polymeric mechanical metamaterials fabricated by multibeam interference lithography with the assistance of plasma etching[J]. Langmuir, 2016, 32(33): 8436-8441.

[12] LI J, YAN J, JIANG L, *et al*. Nanoscale multi-beam lithography of photonic crystals with ultrafast laser[J]. Light: Science and Applications, 2023, 12(1): 164.

[13] AHN J, HONG S, SHIM Y S, *et al*. Electroplated functional materials with 3D nanostructures defined by advanced optical lithography and their emerging applications[J]. Applied Sciences (Switzerland), 2020, 10(24): 8780.

[14] JEE H, PARK M J, JEON K, *et al*. Combining interference lithography and two-photon lithography for fabricating large-area photonic crystal structures with controlled defects[J]. Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(14): 6559.

[15] NAM S H, PARK J, JEON S. Rapid and large-Scale fabrication of full color woodpile photonic crystals via interference from a conformal multilevel phase mask[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(44): 1904971.

[16] QI Y L, LIU K P, WANG Sh, *et al*. Focusing characteristics of graded photonic crystal waveguide lens based on interference lithography[J]. Optical Engineering, 2021, 60(7): 077102.

[17] SONG Y. Effect of phase changes of interference fringes on exposure of plane holographic gratings[J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 339-343(in Chinese).
宋莹. 干涉条纹相位变化对平面全息光栅曝光的影响 [J]. 激光技术，2016，40(3)：339-343.

[18] SONG J, LIU B, SHAN X, *et al*. Multi-functional dual-path self-aligned polarization interference lithography[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 17629-17644.

[19] MAcLEOD A . Optical thin films[M]. London, UK: Institute of Physics Publishing, 2012.

[20] HEILMANN R K, KONKOLA P T, CHEN C G, *et al*. Digital heterodyne interference fringe control system[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2001, 19(6): 2342-2346.