

文章编号: 0258-7025(2010)12-3007-06

双液体层消色差氩氟浸没干涉光刻性能分析

周 远¹ 李艳秋²

(¹ 长沙学院电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003
² 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室(筹), 北京 100081)

摘要 氩氟(ArF)浸没干涉光刻系统可产生高分辨周期图形,是研究高数值孔径 ArF 浸没光刻的有力工具。消色差 ArF 浸没干涉光刻系统能降低系统对曝光光源的相干性要求,实现高分辨率成像。提出了一种双液体层消色差浸没干涉光刻系统,由衍射理论和几何光学理论分析了系统的消色差原理和成像机制。对比传统的单液体层系统分析了其成像性能并分析其优点。结果表明,该系统的成像焦深和可分辨像场宽度较大且不依赖于激光光源的带宽;系统性能对外界环境不敏感,成像稳定性得到改善;该系统以简单的对称结构解决了干涉光刻成像中 ArF 准分子激光光源相干性差的问题,并保证了系统成像性能的稳定。

关键词 成像系统;浸没干涉光刻;消色差;相干性;焦深

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3007

Performance Analysis of Double-Fluid-Layer Achromatic ArF Immersion Interference Lithography

Zhou Yuan¹ Li Yanqiu²

¹Department of Electronic and Communication Engineering, Changsha University,
Changsha, Hunan 410003, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract ArF immersion interference lithography system can produce high resolution periodic pattern as a powerful tool for the study of hyper numerical aperture ArF immersion lithography. The coherence requirements on exposure source can be alleviated and high resolution imaging can be realized by the use of achromatic ArF immersion interference lithography system. A novel double-fluid-layer achromatic immersion interference lithography system is developed. The system's achromatic principles and imaging mechanism are studied by using diffraction theory and principle of geometrical optics. The imaging performance is analyzed and the advantages are summarized compared with traditional single-fluid-layer system. The results indicate that this system enables a large depth of focus (DOF) and width of resolved imaging field which are independent of the bandwidth of laser. The system's performance is insensitive to environment, so that the imaging stability is improved. The system employs simple symmetry structure to overcome the problem of poor coherence properties for ArF excimer lasers, and ensures stability of imaging performance in interference lithography.

Key words imaging systems; immersion interference lithography; achromatic; coherence; depth of focus

1 引 言

高数值孔径氩氟(ArF)浸没光刻(波长为

193 nm)已经在 45 nm 工艺节点得到了广泛应用^[1~6]。ArF 浸没干涉光刻系统是研究 ArF 浸没光

收稿日期: 2010-04-06; 收到修改稿日期: 2010-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)、长沙学院引进人才科研启动基金(SF080102)和长沙学院光电信息技术创新团队科研基金(10700-99008)资助课题。

作者简介: 周 远(1976—),男,博士,讲师,主要从事先进光刻方面的研究。E-mail: zhoyuan304@163.com(中国光学学会光学教育专业委员会会员号:2009019)

导师简介: 李艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事光学和微纳技术等方面的研究。
E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

刻的有力工具。利用 ArF 浸没干涉光刻可研究高数值孔径下的投影成像、偏振对成像的影响、浸没液体和光刻胶性能等^[7]。另外,ArF 浸没干涉光刻可产生高分辨密集周期图形,并广泛应用于微电子、光电子等领域^[8]。ArF 浸没干涉光刻使用干涉浸没曝光工具,使两束或多束 ArF 准分子相干激光发生干涉,在光刻胶中产生周期图形。由两相干光束通过浸没液体进入光刻胶后相互叠加干涉,将产生高分辨率周期结构。

干涉光刻成像的首要条件是要保证两叠加光束的相干性。ArF 准分子激光光源相干性相对较差^[9],目前实现 ArF 浸没干涉光刻成像方案有三类:1)从光源本身角度,采用标准具、非稳腔及压窄线宽装置来改善光束的时间相干性和空间相干性^[10,11];2)从分束装置和复合装置入手,采用紧凑结构,尽量减小两束光的光程差,缓解系统对光源相干性的要求^[12,13];3)采用消色差装置,使成像不依赖于曝光波长及光束发散角,实现消色差的目的^[14]。

对于 ArF 消色差浸没干涉光刻系统, A. L. Charley 等^[15]研究了单液体层消色差浸没干涉光刻方案。本文提出双液体层方案,分析了系统的成像以及消色差机制,仿真研究了其成像性能并总结其优点。

2 消色差浸没干涉光刻系统成像及消色差分析

消色差浸没干涉光刻系统由两块相位光栅组成,如图 1 所示。一块光栅作为分束光栅,另一块光栅作为复合光栅^[15]。分束光栅的 0 级衍射光被一

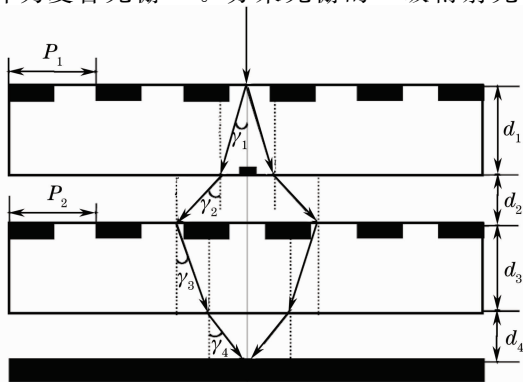


图 1 消色差干涉成像系统结构参数

Fig. 1 Structure parameters of achromatic interference lithography system

金属薄片挡住,利用其±1级衍射光分束。分束光栅的±1级衍射光射到复合光栅上再次发生衍射,利用其±1级或±2级衍射光在涂有光刻胶的基片上叠加成像。对于单液体层结构,只在复合光栅和硅片间填充液体,此时 $n_2 = 1, n_4 > 1$,是非对称结构^[14]。对于双液体层结构,在复合光栅和硅片间以及两光栅间都填充相同液体,此时 $n_2 = n_4 = n_f$,构成对称结构。

2.1 系统成像分析

平行光正入射系统后(如图 1 所示),经过分束光栅衍射,分束光栅基板下表面折射,复合光栅衍射,复合光栅基板下表面折射,最后在光刻胶中叠加成像。对于正入射光,分束光栅±1级衍射光的衍射角可描述为

$$\sin \gamma_1 = \lambda / (n_1 P_1), \quad (1)$$

式中 λ 为曝光波长, γ_1 和 P_1 为分束光栅的衍射角和空间周期。由(1)式结合斯涅耳定律,分束光栅下表面折射角可描述为

$$\sin \gamma_2 = \lambda / (n_2 P_1). \quad (2)$$

光经过复合光栅时,结合(2)式,2级衍射光的衍射角 α_3 可通过

$$n_g \sin \gamma_3 = 2\lambda / P_2 - \lambda / P_1 \quad (3)$$

计算(假设两光栅为同种材料,折射率为 $n_3 = n_1 = n_g$),由(3)式结合斯涅耳定律,复合光栅下表面折射表示为

$$d_{NA} = n_4 \sin \gamma_4 = 2\lambda / P_2 - \lambda / P_1 = \lambda / Q, \quad (4)$$

式中 d_{NA} 定义为系统数值孔径。系统的有效光栅周期 Q 定义为^[15]

$$1/Q = 2/P_2 - 1/P_1. \quad (5)$$

系统可实现的半线宽(即成像分辨率)为

$$H_p = \lambda / (4 \cdot d_{NA}) = Q/4. \quad (6)$$

由(5),(6)式可知,系统成像分辨率仅仅决定于系统的有效光栅周期 Q ,最终决定于两光栅的空间周期 P_1 和 P_2 。(1),(2)式成立的条件为

$$P_1 > \lambda / \min(n_g, n_2), \quad (7)$$

(3),(4)式成立的条件为

$$Q > \lambda / \min(n_g, n_4), \quad (8)$$

式中 $\min(n_g, n_2)$ 为 n_g 和 n_2 中的最小值, $\min(n_g, n_4)$ 为 n_g 和 n_4 中的最小值。分析(6),(8)式可知,在两块光栅的光栅常数一定的情况下,系统成像分辨率的理论极限决定于曝光波长 λ ,光栅基板折射率以及复合光栅下面间隙间介质折射率。在光栅基板一定的条件下,系统成像分辨率理论极限可通过两种途径得到提高:一是缩小曝光波长,二是在复合

光栅和光刻胶间隙间充满浸没液体, 增大 n_4 , 实现浸没干涉光刻。

对于双液体层结构, 可设计采用相同光栅, $P_1 = P_2 = P, n_2 = n_4 = n_f$, 由(5)式可得 $Q = P$, 系统成像分辨率 $H_p = P/4$ 。采用折射率高的液体能有效提高系统成像分辨率极限。

2.2 系统消色差分析

设光以较小倾斜角 θ 入射系统, 其光路如图 2 所示。左边光路在 4 种介质中的传播角依次为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 , 而右边光路在 4 种介质中的传播角依次为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 和 β_4 。

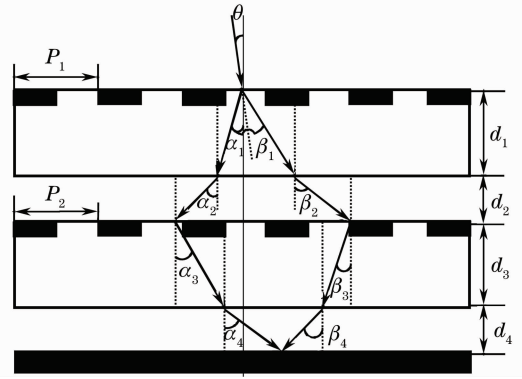


图 2 消色差光刻成像系统光路图

Fig. 2 Ray path in achromatic interference lithography system

当 θ 较小时 ($\sin \theta \approx \theta$), 由光线迹可得左右两束成像光的相位差为^[15]

$$\Delta\phi = \frac{4\pi x}{Q} - \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left[\sqrt{n_g^2 - \left(\frac{\lambda}{P_1} - \theta\right)^2} - \sqrt{n_g^2 - \left(\frac{\lambda}{P_1} + \theta\right)^2} \right] - \frac{2\pi d_3}{\lambda} \left[\sqrt{n_g^2 - \left(\frac{\lambda}{Q} + \theta\right)^2} - \sqrt{n_g^2 - \left(\frac{\lambda}{Q} - \theta\right)^2} \right] - \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left[\sqrt{n_2^2 - \left(\frac{\lambda}{P_1} - \theta\right)^2} - \sqrt{n_2^2 - \left(\frac{\lambda}{P_1} + \theta\right)^2} \right] - \frac{2\pi d_4}{\lambda} \left[\sqrt{n_4^2 - \left(\frac{\lambda}{Q} + \theta\right)^2} - \sqrt{n_4^2 - \left(\frac{\lambda}{Q} - \theta\right)^2} \right], \quad (9)$$

式中 x 为像面上叠加点的位置坐标。两束光叠加干涉成像时为实现消色差目的, 必须设计系统使曝光波长 λ 在光源带宽限定的范围内变化时, $\Delta\phi$ 保持不变。将 $\Delta\phi$ 相对 λ 微分并泰勒展开取一级近似得

$$d(\Delta\phi) = 4\pi\lambda\theta \left[\frac{d_3}{(n_g^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} - \frac{d_1}{(n_g^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} + \frac{d_4}{(n_4^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} - \frac{d_2}{(n_2^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} \right] d\lambda, \quad (10)$$

令 $d(\Delta\phi) = 0$, 得系统消色差的限制条件为

$$\frac{d_3}{(n_g^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} - \frac{d_1}{(n_g^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} + \frac{d_4}{(n_4^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} - \frac{d_2}{(n_2^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} = 0. \quad (11)$$

为消除激光光束发散角对成像的影响, 需减小 $\Delta\phi$ 对入射角 θ 的敏感性, 使其不随 θ 的微小改变而改变。为此将 $\Delta\phi$ 相对 θ 微分并泰勒展开取一级近似得

$$d(\Delta\phi) = 4\pi \left[\frac{d_3}{\sqrt{n_g^2 Q^2 - \lambda^2}} - \frac{d_1}{\sqrt{n_g^2 P_1^2 - \lambda^2}} + \frac{d_4}{\sqrt{n_4^2 Q^2 - \lambda^2}} - \frac{d_2}{\sqrt{n_2^2 P_1^2 - \lambda^2}} \right] d\theta, \quad (12)$$

令 $d(\Delta\phi) = 0$, 得 $\Delta\phi$ 不随 θ 改变的限制条件为

$$\frac{d_3}{\sqrt{n_g^2 Q^2 - \lambda^2}} - \frac{d_1}{\sqrt{n_g^2 P_1^2 - \lambda^2}} + \frac{d_4}{\sqrt{n_4^2 Q^2 - \lambda^2}} - \frac{d_2}{\sqrt{n_2^2 P_1^2 - \lambda^2}} = 0. \quad (13)$$

合理设置两光栅厚度 d_1 和 d_3 以及两间隙宽度 d_2 和 d_4 使(11), (13)式得到满足, 则可使成像不依赖于光源波长 λ 以及光束入射角 θ 。当光源波长或光束入射角改变时, 两光栅衍射角也相应改变, 维持两光臂长度相等, 起到自纠正的作用, 实现系统消色差的同时消除光束发散角对成像的影响。

双液体层结构为对称结构, $P_1 = Q, n_2 = n_4, d_1 = d_3, d_2 = d_4$, 满足(11)式的消色差条件和(13)式的限制条件。而对于单液体层结构, 由于两间隙中介质的光学性质不同 ($n_2 = 1, n_4 > 1$), 为满足消色差条件, 则采用的两光栅栅距、厚度以及两间隙宽度

都难以保证相等。单液体层方案由于系统结构不对称, 元器件的对准只能在有液体参与情况下进行, 为实际系统调准操作带来不便。另外, 在两光栅线条周期、厚度和结构都确定的情况下, 两空隙宽度不能随意改变, 实验操作相对困难。双液体层浸没干涉光刻系统则以其对称结构特点可规避这些技术难题。

3 双液体层消色差浸没干涉光刻系统的性能

3.1 双液体层系统的成像焦深

焦深是评价光刻系统成像性能最基本的参数之

—^[16]。在焦深范围内要得到可分辨的成像条纹,两束成像光相位差变化量 $d(\Delta\phi)$ 应小于 $\pi/2$ 。若系统结构满足(11),(13)式所列条件,则由(10),(12)式

$$d(\Delta\phi) = -4\pi\delta d_1 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_g^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_g^2 P_1^2 - \lambda^2}} d\theta \right] + 4\pi\delta d_3 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_g^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_g^2 Q^2 - \lambda^2}} d\theta \right] - 4\pi\delta d_2 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_2^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_2^2 P_1^2 - \lambda^2}} d\theta \right] + 4\pi\delta d_4 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_4^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_4^2 Q^2 - \lambda^2}} d\theta \right]. \quad (14)$$

若(14)式中 $d(\Delta\phi) = \pi/2$ 时对应 d_4 的偏差为 $\delta d_{4,\max}$, 则涂有光刻胶的基片在 $2\delta d_{4,\max}$ 范围内移动都能得到可分辨的条纹,故系统的成像焦深可定义为 $D = 2\delta d_{4,\max}$, 由(14)式计算可得

$$D = 2 \left\{ \frac{1}{8} + \delta d_1 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_g^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_g^2 P_1^2 - \lambda^2}} d\theta \right] + \delta d_2 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_2^2 P_1^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_2^2 P_1^2 - \lambda^2}} d\theta \right] - \delta d_3 \left[\frac{\lambda\theta}{(n_g^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_g^2 Q^2 - \lambda^2}} d\theta \right] \right\} / \left[\frac{\lambda\theta}{(n_4^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{1}{\sqrt{n_4^2 Q^2 - \lambda^2}} d\theta \right]. \quad (15)$$

由(15)式可知,系统的焦深与两光栅厚度偏差 $\delta d_1, \delta d_3$ 以及光栅间距偏差 δd_2 有关,即光栅的加工精度以及系统装调精度都将影响系统成像焦深。若光栅厚度和间距都无偏差,则系统焦深为

$$D = \frac{1}{\frac{4\lambda\theta}{(n_4^2 Q^2 - \lambda^2)^{3/2}} d\lambda + \frac{4}{\sqrt{n_4^2 Q^2 - \lambda^2}} d\theta}. \quad (16)$$

图3为用双液体层消色差浸没干涉光刻系统实现32 nm线宽成像的焦深。曝光采用ArF准分子激光,光栅材料采用镱铝石榴石(LuAG, $n_g = 2.14$),浸没液体采用第2代浸没液体($n_{\text{fluid}} = 1.64$),入射角 $\theta = 0.1^\circ$ 。由图可知,该系统成像焦深对激光光源的带宽 $d\lambda$ 敏感性低,系统达到了消色差的目的。该系统的焦深主要决定于入射激光光束的角宽度 $d\theta$ 。

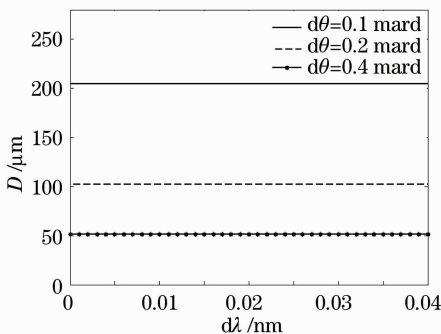


图3 双液体层消色差浸没干涉光刻系统的焦深

Fig. 3 Depth of focus of double fluid layer immersion achromatic interference lithography system

3.2 双液体层系统成像的像场宽度

入射光束倾斜角 θ 将影响成像面上两光束的入射角,可能导致成像条纹空间周期改变。为此可能

可知, $d(\Delta\phi)$ 为0。但实际器件加工和装调中,两光栅厚度 d_1 和 d_3 , 两间距 d_2 和 d_4 都不可避免存在偏差(表示为 $\delta d_1, \delta d_3, \delta d_2, \delta d_4$)。 $d(\Delta\phi)$ 表示为

带来的影响是远离像场中央的成像条纹对比度降低,像场宽度受到限制。对于双液体层干涉光刻系统,激光束正入射时($\theta = 0^\circ$)条纹空间周期可表示为

$$P_0 = \frac{\lambda}{2n_f \sin \gamma_4}, \quad (17)$$

激光束以倾斜角 θ 入射时条纹空间周期可表示为

$$P_{\text{Tilt}} = \frac{\lambda}{n_f (\sin \alpha_4 + \sin \beta_4)}. \quad (18)$$

像场边缘某处两种条纹级数相差1级时,可认为该处为像场的边界点,超出该点的条纹不可识别。由此定义像场宽度 L 为

$$\frac{L}{2} = n P_{\text{Tilt}} = (n+1) P_0, \quad (19)$$

式中 n 为可识别的条纹数。由(19)式可得

$$L = \frac{P P_{\text{Tilt}}}{(P_{\text{Tilt}} - P)}. \quad (20)$$

由(17),(18)式容易得到 $P_{\text{Tilt}} = P$, 因此,在不考虑入射激光光束尺寸限制的情况下,双液体层浸没干涉系统的像场宽度 L 为无限大。

3.3 双液体层系统的成像稳定性

实际系统成像中需要考虑外界环境对成像性能的影响,外界环境的变化(例如环境温度的变化)将使浸没液体和光栅材料的折射率发生变化,导致 $d(\Delta\phi)$ 波动,影响成像稳定性。而双液体层系统与单液体层系统的主要区别在于前者具有对称结构而后者是非对称结构,这使两者的成像稳定性呈现很大差别。对于双液体层系统,两光栅的折射率、厚度、空间周期相同,光栅间隙与复合光栅和光刻胶间隙充同种液体且两间隙宽度也相等。由(10),(12)式可知,无论光栅材料和浸没液体折射率怎么

波动, $d(\Delta\phi)$ 始终为 0, 说明双液体层系统成像性能不受外界环境的影响, 成像稳定性好。对于单液体层系统, 两光栅间无浸没液体而复合光栅与光刻胶间有浸没液体, 为满足消色差条件, 两光栅的厚度和空间周期不相等, 两间隙宽度也不相等。若光栅材料或浸没液体折射率随环境变化, $d(\Delta\phi)$ 便不再为 0。

图 4 比较了双液体层系统与单液体层系统两种方案下两束光相位差变化量随浸没液体及光栅材料折射率变化的关系。研究针对 32 nm 线宽成像, 光栅材料采用 LuAG ($n_g = 2.14$), 浸没液体采用第 2 代浸没液体 ($n_{\text{fluid}} = 1.64$)。照明光带宽为 $\Delta\lambda = 10$ pm, 入射角 $\theta = 0.1^\circ$, 角宽度 $\Delta\theta = 1$ mrad; 单液体

层系统两光栅线条周期为 $P_1 = 240$ nm, $P_2 = 167$ nm, 厚度为 $d_1 = 2.23$ mm, $d_3 = 12.18$ mm; 两空隙宽度为 $d_2 = 10$ mm, $d_4 = 1$ mm。双液体层系统两光栅线条周期为 $P_1 = P_2 = 128$ nm, 厚度为 $d_1 = d_3 = 5$ mm, 间隙宽度 $d_2 = d_4 = 10$ mm。两种方案的结构设置都满足消色差条件。由图可知, 对于单液体层系统, 两束光相位差变化量对浸没液体及光栅材料折射率变化很敏感, 影响到成像性能的稳定性。对于双液体层对称结构系统, 两束光相位差变化量不随浸没液体及光栅材料折射率变化而变化, 保证了成像性能的稳定性。

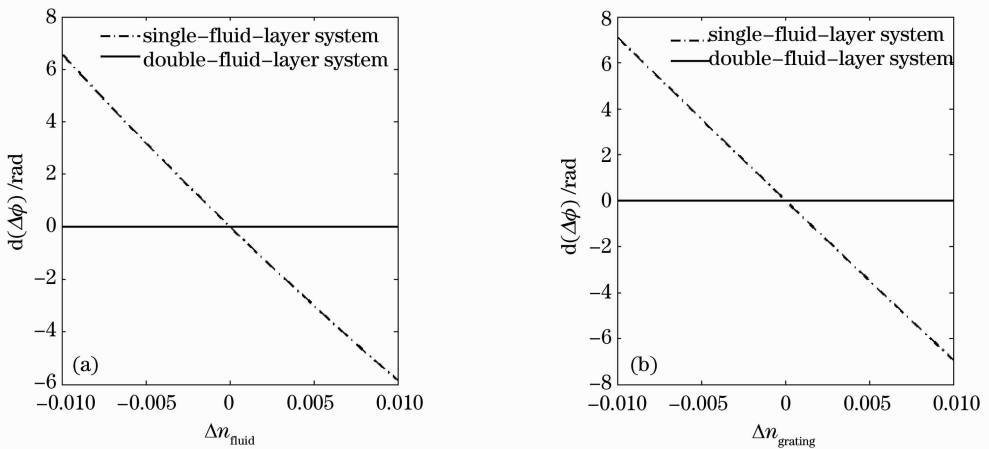


图 4 两种方案下两束光相位差变化量随浸没液体折射率及光栅材料折射率变化的关系。(a) 浸没液体折射率变化, (b) 光栅材料折射率变化

Fig. 4 Variation of $d(\Delta\phi)$ with refractive indices of fluid and grating material for two systems. (a) refractive index change of immersion liquid, (b) refractive index change of grating material

4 结 论

提出一种双液体层消色差浸没干涉成像系统。深入研究了系统成像机制及消色差原理, 理论分析了新系统的成像性能。结果表明, 双液体层系统以简单的对称系统结构不但实现了消色差的目的, 也消除了光束发散角对成像性能的影响。相对于传统单液体层消色差浸没干涉成像系统, 双液体层系统成像性能对环境变化不敏感, 成像稳定性好, 成像焦深对激光光源的带宽敏感性低, 像场宽度无限大。双液体层系统解决了 ArF 浸没干涉光刻成像中激光光源相干性差的问题, 可用来研究高数值孔径 ArF 浸没光刻成像, 制造高分辨率周期微细图形, 在微电子和光电子领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

1 A. J. Hazelton, K. Shiraiishi, S. Wakamoto *et al.*. Recent

performance results of Nikon immersion lithography tools[C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69241N

2 Li Yanqiu. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 865~868

李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 865~868

3 Ma Bin, Li Lin, Chang Jun *et al.*. Refractive projection lens for 90 nm resolution lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 211~215

马 斌, 李 林, 常 军等. 高分辨率折射式投影光刻物镜的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 211~215

4 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Optimization of topside antireflective coatings for hyper numerical aperture lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 337~343

周 远, 李艳秋. 高数值孔径光刻成像中顶层抗反膜的优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 337~343

5 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Optimization of double bottom antireflective coating for hyper numerical aperture lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 472~477

周 远, 李艳秋. 高数值孔径光刻成像中双层底层抗反膜的优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 472~477

6 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Bulk effects in hyper-numerical aperture

- optical lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1091~1095
- 周 远, 李艳秋. 高数值孔径光学光刻成像中的体效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1091~1095
- 7 B. W. Smith, A. Bourov, Y. Fan *et al.*. Approaching the numerical aperture of water-immersion lithography at 193 nm [C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 273~284
- 8 J. Zhou, Y. Fan, B. W. Smith. Three-dimensional imaging of 30-nm nanospheres using immersion interferometric lithography [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: U2561~U2567
- 9 B. W. Smith, H. Kang, A. Bourov *et al.*. Water immersion optical lithography for 45-nm node [C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 679~689
- 10 A. K. Raub, S. R. J. Brueck. Deep UV immersion interferometric lithography[C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 667~678
- 11 J. A. Hoffnagle, W. D. Hinsberg, M. Sanchez *et al.*. Liquid immersion deep-ultraviolet interferometric lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1999, **17**(6): 3306~3309
- 12 B. W. Smith, A. Bourov, Y. Fan *et al.*. Amphibian XIS: an immersion lithography microstepper platform [C]. *SPIE*, 2004, **5754**: 751~759
- 13 E. Hendrickx, M. O. Beeck, R. Gronheid *et al.*. Early learning on hyper-NA lithography using two-beam immersion interference [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: U1161~U1169
- 14 A. L. Charley, A. Lagrange, O. Lartigue *et al.*. Liquid immersion lithography at 193 nm using a high-NA achromatic interferometer [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61541~61549
- 15 A. L. Charley, A. Lagrange, O. Lartigue *et al.*. Hyper high numerical aperture achromatic interferometer for immersion lithography at 193 nm [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, **23**(6): 2668~2674
- 16 Liao Feihong, Li Xiaoping, Chen Xuedong *et al.*. Probe spot position error on the accuracy of focusing and leveling measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1041~1045
- 廖飞红, 李小平, 陈学东等. 调焦调平探测光斑位置误差对测量准确度影响的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1041~1045