

成像干涉光刻技术与离轴照明光刻技术的对比分析*

刘 娟^{1,2} 张 锦¹ 冯伯儒¹

(1 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)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 作为分辨率增强技术(RET)之一,离轴照明技术(OAI)通过调整照明方式,不但能提高分辨率还能很好地改善焦深.成像干涉光刻技术(IIL)利用多次曝光分别记录物体空间频率的不同部分,极大地提高了成像质量,其中大角度倾斜照明是对 OAI 的扩展.从成像原理和频域范围的角度对 IIL 和 OAI 进行了理论研究、计算模拟和对比分析.结果表明,在同样条件下,IIL 相对于 OAI 可更好地分辨细微特征.

关键词: 倾斜照明; 成像干涉光刻技术; 离轴照明技术; 光刻技术

PACC: 4210J; 4225; 4230

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)07-1480-05

1 引言

传统投影光学光刻(OL)的分辨率由瑞利(Rayleigh)判据给出:

$$R = k_1 \lambda / NA \quad (1)$$

式中 k_1 为工艺因子; NA 为数值孔径; λ 为曝光波长.提高分辨率最直接的方法是增大 NA ,减小 λ ,但目前这些都存在很多限制.多年来,一些新技术不断涌现.分辨率增强技术(RET),包括离轴照明技术(OAI)^[1,2,4]、相移掩模技术(PSM)^[2,3]、光学邻近效应校正技术(OPC)^[2,3],都是在给定的 λ 和 NA 下减小 k_1 提高分辨率的方法,而 OAI 以其未增加掩模制作难度且有效地改善焦深而独具优势.

成像干涉光刻技术(IIL)^[2,4,5]结合了 OL 可对任意图形成像和无掩模干涉光刻(IL)^[6],高分辨率的优点,将投影光刻、大角度偏置照明、光瞳滤波和多曝光干涉集成,能以较高分辨率对任意图形成像,是一种理想的提高光刻分辨率的方法.Bruck 等人^[2]曾对各种 RETs 提出了一个普适模型,并分别进行了简单的分析和讨论.和 OAI 类似,IIL 也是通

过调整照明系统,把频率空间的不同部分在不同曝光中分别引入系统而实现高分辨率成像,是对 OAI 的扩展.本文从 IIL 和 OAI 的成像原理和频域范围的角度进行比较,并通过具体的计算模拟对比分析,说明了 IIL 较之于 OAI 的优越性,其结果令人满意.

2 IIL 和 OAI 的原理

光学成像系统是信息传递的系统,输入物体(掩模)的信息可以分解为不同的空间频率,像质的好坏取决于物体各种频率成分是否能经过系统到达像面.物体结构越精细,其空间频率越高,衍射角越大,相应的频谱在频谱面上离中心也越远.传统衍射受限光刻系统中,透镜可视为低通滤波器^[7],存在光学截止频率 $f_{\text{opt}} = NA/\lambda$,它是 OL 系统可传递的最大空间频率,高于它的空间频率不能进入系统参与成像.

如图 1(a)所示,垂直曝光时只有靠近光轴的低频分量进入系统到达像面,高频分量都被阻在外面,所以 OL 的分辨率较低.离轴照明技术采用倾斜照明方式,用从掩模透过的零级光和其中一个一级衍

*国家自然科学基金资助项目(批准号:60276043)

刘 娟 女,1981 年出生,硕士研究生,主要从事微光刻和微细加工技术研究. Email:biange@vip.371.net

2004-09-24 收到,2005-01-18 定稿

射光成像,让包含主要结构信息的低频分量和部分包含精细特征的高频分量都进入系统,因而可以提高分辨率,改善像质;由于是双光束对称成像,还可改善焦深.

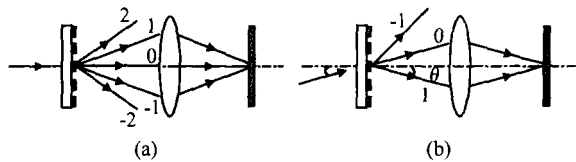


图 1 传统光学光刻(a)与离轴照明(b)示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of conventional OL (a) and OAI (b)

成像干涉光刻技术借用“波分复用”的概念,在系统有限的通带内,用垂直光照射掩模传递低频信息,再用大角度倾斜曝光传递高频信息,最后把多次曝光进行叠加,就可以得到一个好的像.由于 IC 结构很复杂,每一次曝光只是包含一部分频率分量,因而需要多次曝光才能覆盖足够的频率范围,记录足够的图形信息.考虑到电路图形多为沿 x,y 方向分布的直线结构,相应的空间频率沿 f_x,f_y 轴分布,故只需进行 3 次曝光,即用传统 OL 记录含主要特征的低频信息,两次分别在 x (水平)、 y (垂直)方向的倾斜照明记录对应精细结构的高频信息,就可以得到

更好的空间像.图 2 是曝光 x 方向高频分量倾斜照明的示意图,抗蚀剂基片平面上引入的参考光束 R 和到达的高频分量干涉,以恢复在传统光刻中可能失去的高频信息.

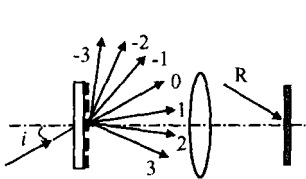


图 2 x 方向倾斜曝光示意图

Fig. 2 Illustration of x -offset exposure

图 3(a)是 IIL 的完整的频域图^[4].图中大圆是 IL 能达到的频域范围,圆心 O 处半径为 f_{opt} 的小圆是 OL 的频域范围.图中有 4 个偏离原点 $\pm f_{off}$ 、半径为 f_{opt} 的共轭圆对,它们分别代表在 x,y 方向偏离曝光引起的频率偏移.圆半径仍是 f_{opt} ,说明系统是用同一个通带把不同的频谱分别传递;沿轴 f_x,f_y 的圆分别对应于 x,y 方向的偏离曝光.从频域图上看,IIL 三次曝光覆盖的频域范围是

$$f_{opt} + f_{off} = \frac{NA}{\lambda} + \frac{\sin i}{\lambda} = \frac{NA + \sin i}{\lambda}$$

当 $\sin i \rightarrow 1, NA \rightarrow 1$ 时,整个频域范围就接近于光刻极限 $2/\lambda$,如图 3(b)所示.

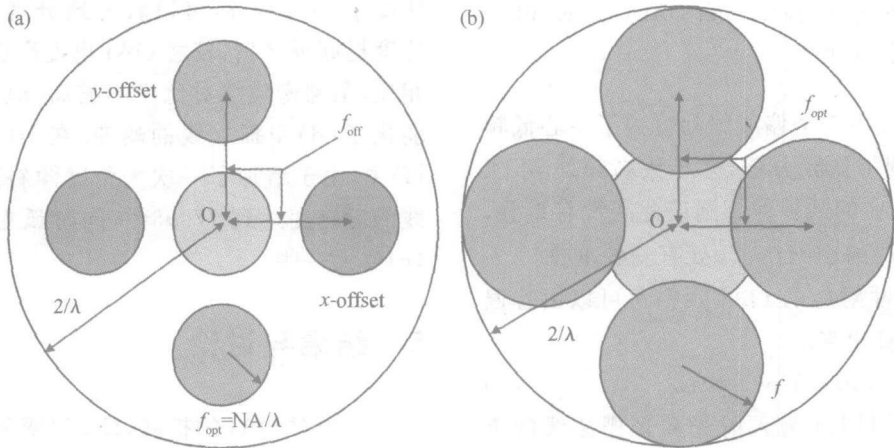


图 3 成像干涉光刻的频域图 (a) 一般情况;(b) 极限情况

Fig. 3 Frequency space picture of IIL (a) Ordinary;(b) Extreme

3 IIL 和 OAI 的频域比较

在 OAI 中,因为只有一次曝光,其中必须包含

0 级分量,所以 OAI 的倾斜角 i 必小于最大孔径角 $U_m = \sin^{-1}(NA)$,偏移频率 $f_{off} = \sin i/\lambda$ 也必小于截止频率 f_{opt} .如果 $i > U_m$,0 级分量就偏出系统无法参与成像,得到的像就只有精细特征,丢失了图形主

要的大特征信息. IIL 的倾斜曝光中倾斜角 i 可以超出 NA 的限制, 让更多的高频分量进入系统, 而另外引入的参考光束保证了高频信息的记录; 低频分量再通过一次垂直曝光进入系统, 几次曝光的叠加就可以得到比 OAI 好得多的频率范围.

以沿 x 方向分布 (y 方向延伸) 的一维图形为例, 由于图形只是在 x 方向有变化, 所以只需进行 x 方向的离轴照明就可以了. 图 4 给出 x 方向倾斜照明时 OAI 和 IIL 分别对应的频域图. 在频域中, OL 只能覆盖图 4(b) 中圆心在 O 点的小圆. 对 OAI 而言, 偏离频率 $f_{\text{off}} < f_{\text{opt}}$, OAI 的最大频率被限制在 $2f_{\text{opt}}$, 频域范围是图 4(a) 中 2 个偏离中心的圆; 而在 IIL 中, 大角度的倾斜照明允许偏移频率 $f_{\text{off}} > f_{\text{opt}}$, 2 次曝光的 IIL 覆盖的频率范围是图 4(b) 中的 3 个圆, 能更有效地传递图形信息.

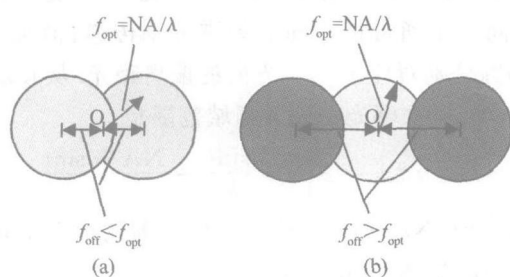


图 4 x 方向倾斜照明时 OAI(a) 和 IIL (b) 的频域图

Fig. 4 Frequency space pictures of OAI (a) and IIL (b) at x -offset illumination

另外, 在 OAI 中 2 个偏离圆都覆盖了中心低频区, 这种重叠强调了低频分量, 并导致高频处 MTF 的减小; 而 IIL 对应的共轭偏离圆彼此间没有重叠, 只是和垂直曝光时的小圆在 f_{opt} 处有一些重叠.

不同特征尺寸对应的 OAI 倾斜角可以由普遍的光栅方程^[8]估算出来.

$$d(\sin i - \sin \theta) = m\lambda \quad (2)$$

其中 d 为光栅周期; i 为入射光和光栅法线的夹角; θ 为衍射光和光栅法线的夹角; m 为衍射级次; λ 为曝光波长. 当入射光和衍射光在法线同侧时取 “+”, 异侧取 “-”. OAI 是 0 级光和一束 1 级光成像, 为了改善焦深, 令 $\theta = i$, 所以有 $2d\sin i = \lambda$, 对等线/间图形有 $d = 2CD$, 即得

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{4CD} \right) \quad (3)$$

对 1:1 投影曝光光刻系统, 当曝光波长 $\lambda = 248\text{nm}$

时, $CD = 180\text{nm}$ 对应倾斜角 $i_{\text{OAI}} = 20.15^\circ$; $CD = 150\text{nm}$ 对应 $i = 24.4^\circ$; $CD = 130\text{nm}$ 对应 $i = 28.48^\circ$.

4 模拟与分析

图 5 是对同一掩模图形用不同曝光方式模拟的结果. 模拟条件: $\lambda = 248\text{nm}$, $NA = 0.65$, 部分相干因子 $\sigma = 0.5$, 图形采样点数为 512×512 , 采样点间距为 10nm . 在图中, (a) 是模拟用的图形包括特征尺寸 $CD = 150\text{nm}$ 的等线/间密集线结构和 $5CD$ 宽的孤立线; (b) ~ (f) 是不同的曝光结果. 其中, 图 (b) 是只用 OL 垂直照明掩模对应的强度分布, 此时密集线的对比度 $\gamma = 40.89\%$, 几乎不能分辨. (c) 是用常规 OAI ($i = 24^\circ$) 曝光的结果, 其密集线部分 $\gamma = 51.13\%$, 基本可以分辨, 孤立线的畸变较小. 图 (d) 是用大角度 (39°) 倾斜照明的结果, 可以看出倾斜照明对密集线部分的改善比较明显, 此时密集线对比度已达 91.60% , 但是孤立线存在严重畸变. 由于图形只是沿 x 方向的一维分布, 所以用一次 x 方向的偏离曝光和一次垂直曝光就可以包含大部分空间频率. 为了说明大角度倾斜照明在 IIL 中的作用, 图 (e) 和 (f) 分别给出用 IIL 二次曝光 (垂直曝光 x 方向倾斜照明曝光) 和三次曝光 (垂直曝光加 $+x$ 和 $-x$ 方向倾斜照明曝光) 的结果. 图 (e) 中, 密集线的对比度 $\gamma = 70.07\%$, 可以较好地分辨, 相对于 OL 对比度提高近 2 倍, 较之 OAI 也提高近 1.5 倍; 和 (d) 相比, 虽然密集线对比度不够高, 但已足够, 而且也弱化了 (d) 中孤立线的畸变. 在 IIL 三次曝光的图 (f) 中, 由于增加了一次大角度倾斜照明, 使得密集线的对比度达到 77.95% , 同时孤立图形的畸变比 (e) 要大一些.

5 结果与讨论

作为对 OAI 的扩展, IIL 改变照明方式把图形的不同频率分量分别传递、分别曝光、再非相干迭加, 对细小图形成像可以得到更高的图像对比度, 而这就意味着提高分辨率. 对同一掩模图形的模拟表明, 对细微特征的分辨, IIL 相对于 OL 可以把对比度提高近 2 倍, 较之 OAI 也可提高近 1.5 倍. 实验结果^[5]也表明, IIL 比 OAI 具有更高的分辨率和产生任意图形的能力, 是一种有应用前景的新型光刻技术.

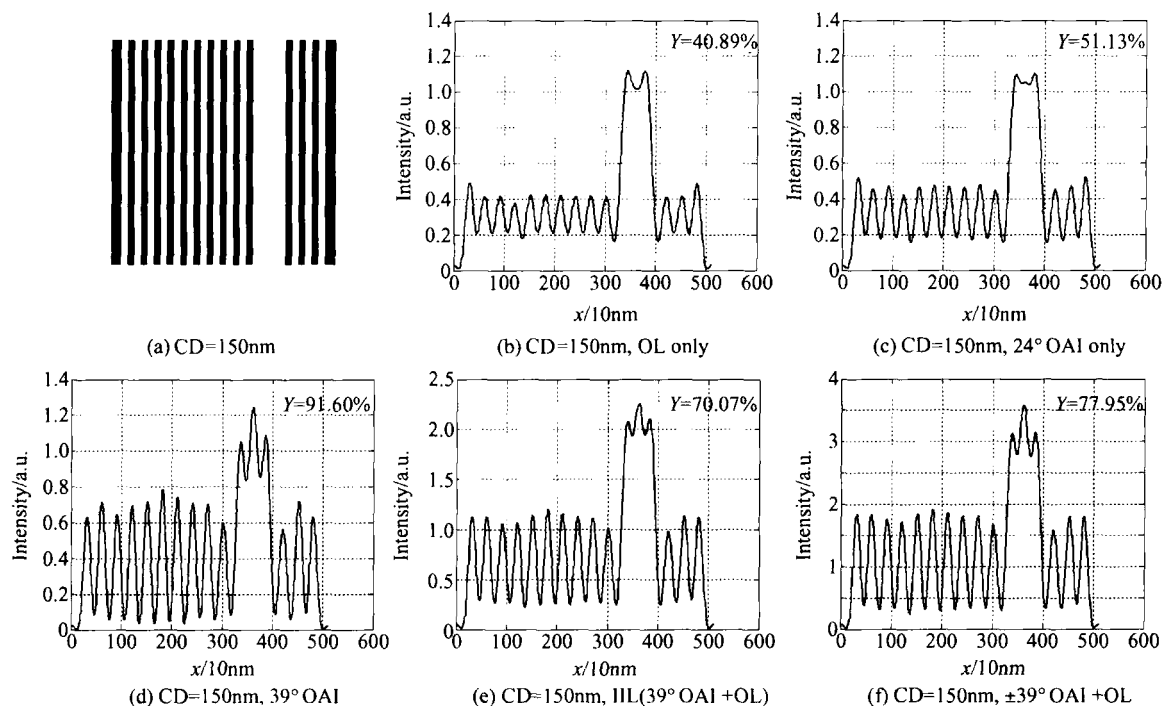


图5 掩模图形(a)和用不同曝光得到的模拟结果(b)~(f) ($\lambda = 248\text{nm}$, $\text{NA} = 0.5$, $\sigma = 0.5$)

Fig. 5 Mask pattern (a) and simulation results (b) ~ (f) at $\lambda = 248\text{nm}$, $\text{NA} = 0.65$, $\sigma = 0.5$

参考文献

- [1] Zhang Jin, Feng Boru, Liu Juan, et al. Off-axis illumination. 12th National Conference on Electron, Ion, and Photon Beam, Beijing, 2003:300 (in Chinese) [张锦, 冯伯儒, 刘娟, 等. 离轴照明技术(OAI). 第十二届全国电子束、离子束、光子束学术年会论文集, 北京, 2003:300]
- [2] Brueck S R J, Chen Xiaolan. Spatial frequency analysis of optical lithography resolution enhancement techniques. SPIE, 1999, 3679:715
- [3] Feng Boru, Zhang Jin, Hou Desheng, et al. Optical microlithography of phase-shifting mask and optical proximity effect correction. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(1):1 (in Chinese) [冯伯儒, 张锦, 侯德胜, 等. 相移掩模和光学邻近效应校正光刻技术. 光电工程, 2001, 28(1):1]
- [4] Liu Juan, Feng Boru, Zhang Jin. Imaging interferometric lithography and its spatial frequency analysis. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(10):24 (in Chinese) [刘娟, 冯伯儒, 张锦. 成像干涉光刻技术及其频域分析. 光电工程, 2004, 31(10):24]
- [5] Chen Xiaolan, Bruck S R J. Imaging interferometric lithography: approaching the resolution limits of optics. Opt Lett, 1999, 24(3):124
- [6] Zhang Jin. Study on laser interferometric lithography. PhD Dissertation of Sichuan University, 2003 (in Chinese) [张锦. 激光干涉光刻技术研究. 四川大学博士学位论文, 2003]
- [7] Wang Shifan, Zhu Ziqiang. Principles of contemporary optics. Chengdu: the UESTC Press, 1998:126 (in Chinese) [王仕, 朱自强. 现代光学原理. 成都: 电子科技大学出版社, 1998:126]
- [8] Liang Quanting. Physical optics. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981:138 (in Chinese) [梁铨廷. 物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1981:138]

Comparison Between Imaging Interferometric Lithography and Off-Axis Illumination Lithography^{*}

Liu Juan^{1,2}, Zhang Jin¹, and Feng Boru¹

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

(2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract : As a resolution enhancement technique (RET), off-axis illumination (OAI) can enhance resolution and improve depth of focus (DOF) through adjusting illumination. Imaging interferometric lithography (IIL) uses multiple exposure to record different portions of the spatial frequency space of mask and greatly increases resolution. The large angle oblique illumination in IIL is an extension of OAI. A comparison of IIL with OAI in theory and frequency domain is given. The theoretical analysis and simulation results show that IIL has better resolution than OAI when under the same condition.

Key words : oblique illumination; imaging interferometric lithography; off-axis illumination; optical lithography

PACC : 4210J; 4225; 4230

Article ID : 0253-4177(2005)07-1485-05

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60276043)

Liu Juan female, was born in 1981, master candidate. Her research interest is technologies for microlithography and microfabrication. Email : biange@vip.371.net

Received 24 September 2004, revised manuscript received 18 January 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics