

doi: 10.3788/gzxb20154410.1011003

入射光束角度及强度偏差对多光束干涉光刻结果的影响

马丽娜, 张锦, 蒋世磊, 孙国斌, 杨国锋, 杭凌侠, 弥谦, 计玮

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要:建立了多光束干涉光刻干涉场内光强分布的数学模型, 仿真计算了双光束、三光束、四光束干涉曝光情况下, 入射光束存在角度偏差以及各入射光强不同时的干涉图样, 并与理想状态的模拟结果进行对比. 结果表明: 光束入射角度偏差主要影响干涉图样的形状和周期; 入射光的光强不同是降低图样对比度的主要因素. 利用 402 nm 波长激光光源进行多光束干涉光刻实验. 设定激光器输出功率 32 mW, 每两束光夹角为 16° , 通过控制曝光、显影工艺, 双光束干涉光刻产生周期为 $1.4 \mu\text{m}$ 的光栅、点阵和孔阵结构, 三光束干涉光刻产生周期为 $1.7 \mu\text{m}$ 的六边形图形阵列. 该模型可为利用干涉光刻技术制备微细周期结构, 提高光刻图形质量, 提供一定的理论参考.

关键词:多光束干涉; 干涉光刻; 周期结构; 角度偏差; 光强偏差; 干涉光强分布

中图分类号: TN305.7; TN241

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)10-1011003-7

Influence on Patterns Quality of Multi-beam Interference Lithography Caused by the Deviations of Incidence Azimuth Angle and Intensity of Light

MA Li-na, ZHANG Jin, JIANG Shi-lei, SUN Guo-bin, YANG Guo-feng,
HANG Ling-xia, MI Qian, JI Wei

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Based on the mathematical model of light intensity distribution in multi-beam interference field, the patterns have been calculated and stimulated respectively for two beams, three beams and four beams interference exposure, in the case of having incidence angle errors and unequal intensity of each beam. The stimulated results have been analyzed and compared with that in ideal situation. The study results show that angel deviation of incident beam mainly affects the shape and period of interference pattern, and inequality of light intensity of each incident beam is the main factor that leads to decrease of pattern contrast. The multi-beam interference lithography experiments have been done by using a laser source with the wavelength of 402 nm. Under the conditions of 32 mW laser output power and 16° angle between two incident beams, by controlling exposure dose and development process, the gratings, dots and holes array with the period of about $1.4 \mu\text{m}$ have been generated by two-beam interference lithography, and the hexagon array with the period of about $1.7 \mu\text{m}$ have been got by three-beam interference lithography. The results provide some theoretical reference for fabricating micro-nano periodic structures and improving the quality of pattern by multi-beam interference lithography technology.

Key words: Multi-beam interference; Interference lithography; Periodic structures; Angle deviation; Light intensity deviation; Interference intensity distribution

OCIS Codes: 110.5220; 110.3960; 260.3160

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划(No. 13JS038)、陕西省科技厅重点实验室项目(No. 2013SZS14-P01)、广东省科技厅高新区发展引导专项(No. 2011B010700101)和西安工业大学校长科研基金(No. XAGDXJJ1303)资助

第一作者:马丽娜(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为微纳光学. Email: mln_dwcy@163.com

导师(通讯作者):张锦(1966-),女,研究员,博士,主要研究方向为微纳光学技术、先进光学制造、光学精密测量. Email: zhangjin@xatu.edu.cn

收稿日期:2015-04-27; **录用日期:**2015-08-17

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

微纳结构在微电子和半导体光电子器件等诸多领域有着广泛的应用^[1-6],其中具有微米纳米尺度的光栅、孔阵、点阵等结构,是一类具有广阔应用前景的周期性微纳结构.在周期性微纳结构的制备方法研究中,国内外已经有许多研究成果,目前用于制备微纳结构的方法有电子束光刻、等离子体刻蚀、纳米压印、干涉光刻等^[7-10],其中大多数方法设备价格昂贵、工序复杂、生产效率低,无法满足大规模的生产、应用需求,部分技术目前尚处于实验室研究阶段.激光干涉光刻技术是利用多束激光干涉产生周期性的光场分布,与感光材料相互作用而在基片表面制备出周期微纳结构^[11-13],因其成本低、分辨率高,工序简单易行等优点,在大面积周期性微纳结构的制备中受到越来越多人的青睐.

国外对激光干涉光刻技术的研究起步于激光器出现后,近年来发展迅速,目前在获得较小的光刻图形的特征尺寸和较大的曝光场尺寸两方面都有很大进展.德国马克斯·普朗克微结构物理学研究所的 Johannes de Boor 等人利用这一技术加工出线宽小于 50 nm 的纳米结构^[14],美国加州大学的 J. P. Spallas 等人利用 351 nm 激光光源,在 50 cm×50 cm 范围内加工出周期小于 500 nm 的微纳结构,且具有很好的均匀性^[15].国内也有很多高校和科研院所开展此项技术的研究^[16-20].中科院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室利用波长为 442 nm 的 He-Cd 激光器作光源,制作了尺寸为 220 nm 的孔阵结构^[21].长春理工大学纳米测量与制造技术中心实验室利用波长为 405 nm 的光纤半导体激光器,制备出周期达到 215 nm 的光栅图案^[22].

多光束干涉光刻的实质是利用多束相干光的叠加,对干涉场内的光强重新分布,作用于光敏材料获得周期性微结构,因此干涉光刻最终的图形形貌会受曝光系统光路的影响,各个入射光束发生偏差会影响到光束的叠加结果,导致最终干涉图样的周期、形貌和均匀性发生变化.

本文就各入射光束光强及角度的偏差对干涉光刻结果的影响展开研究,建立干涉场内光强分布的数学模型,仿真计算分析了角度及强度偏差对干涉图样的影响,并进行了实验验证,为可控制备微纳结构提供理论参考.

1 干涉光刻的基本原理

多光束干涉光刻是利用两束或者多束相干激光光束通过特定的光束组合方式,来调控干涉场内的光强分布,并用感光材料记录下来,最终形成光刻图形.根

据参与的光束数不同及光路布局,可产生光栅、点阵、孔阵、柱阵等周期结构^[21,23-24],并且能够通过可控操作来调整改变图形形貌.

以麦克斯韦方程组为基础,根据光波的叠加原理,干涉场内总的光波场实质上为参与干涉的各个光波场的线性叠加,对于沿空间某一方向 k 传播的平面波,用 r 表示波面上任意一点的位置矢量,在不考虑时间因子的情况下,该平面波的复振幅表示为

$$\tilde{E} = A e^{ik \cdot r} \quad (1)$$

式中 A 为平面波的振幅.当 n 束光发生干涉时,干涉场内的光强分布为^[16]

$$I = \left| \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i \right|^2 = \left| \sum_{i=1}^n A_i e^{ik_i \cdot r} \right|^2 \quad (2)$$

几种干涉场在理想情况下(各光束入射光强及入射角均相等)的光强分布表达式推导结果如下,其中 θ 为光束的入射角:

双光束曝光

$$I = 2A^2 + 2A^2 \cos(2kx \sin \theta) \quad (3)$$

三光束曝光

$$I = 3A^2 + 2A^2 \cos k \left[\left(\frac{3}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y \right) \sin \theta \right] + 2A^2 \cos \cdot (\sqrt{3}ky \sin \theta) + 2A^2 \cos \left[k \left(\frac{3}{2}x - \frac{\sqrt{3}}{2}y \right) \sin \theta \right] \quad (4)$$

四光束曝光

$$I = 4A^2 + 4A^2 \cos [k(x-y) \sin \theta] + 2A^2 \cos \cdot (2kx \sin \theta) + 4A^2 \cos [k(x+y) \sin \theta] + 2A^2 \cos(2ky \sin \theta) \quad (5)$$

图 1 为入射光束空间位置示意图,基片位于 $x-y$ 平面内,定义光束与 z 轴(基片法线方向)夹角 θ 为入射角,在 $x-y$ 平面内的投影相对于 x 轴的夹角 φ 为方位角.

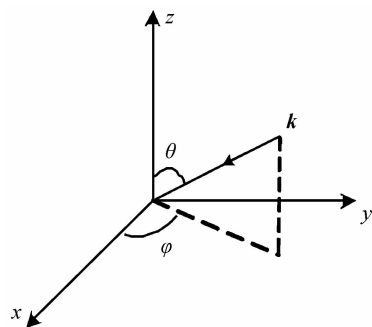


图 1 入射光束空间位置

Fig. 1 The sketch of spatial position of incident beam

2 多光束干涉光刻误差分析

式(3)~式(5)均是在入射光束处于理想情况下干涉场的光强分布表达式,理想情况下能够获得对比度较好的干涉图形,在实际情况中要考虑入射光强的差异、空间入射角度的偏差、相位差和偏振态等因素.下面就入射光强及空间入射角度的差异对干涉结果的影

响进行分析。

根据对比度公式

$$K = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (6)$$

光强的变化影响干涉图样对比度,为了获得清晰、明暗对比明显的干涉条纹,应使多光束以相等的光强入射到涂有光刻胶的基片表面。

入射角度的偏差,分为入射角和方位角两个方面。入射角 θ (入射光线与基片表面法线之间的夹角) 发生变化,将直接影响光刻图形的周期,而入射方位角 φ 若存在偏差,除了因为入射面的轻微改变导致入射角发生变化从而影响图形的周期外,还将对光刻图形产生更为复杂的影响。

2.1 双光束干涉

理想情况下的双光束干涉光刻,是两束强度相等的平面波在垂直于基片的平面内相对于基片法线对称入射,对基片表面的光致抗蚀剂进行曝光。设两束入射光振幅分别为 A_1 、 A_2 ,入射角分别为 θ_1 、 θ_2 。图 2 为其光强分布模拟图,设定激光波长为 $\lambda = 402 \text{ nm}$; $A_1 = A_2 = 1$; $\theta_1 = \theta_2 = 12^\circ$; $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 180^\circ$ 。双光束单曝光形成周期性干涉条纹。

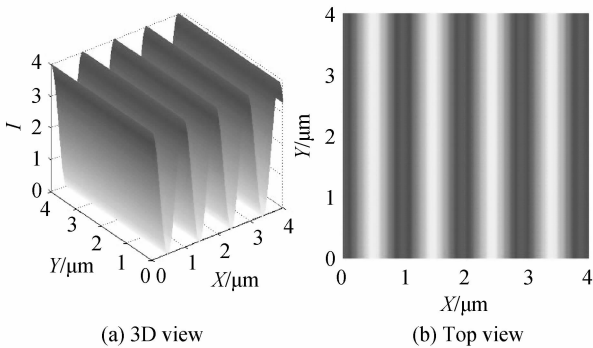


图 2 理想情况双光束单曝光光强分布模拟
Fig. 2 Distribution of light intensity of two-beam interference for single exposure

当两束光的光强不同时,入射光强差异会影响干涉场内的光强分布,进而影响到干涉图形对比度。图 3

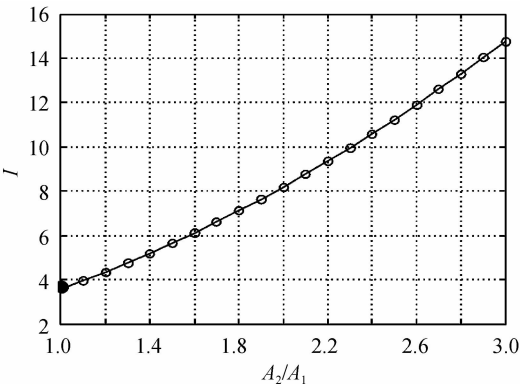
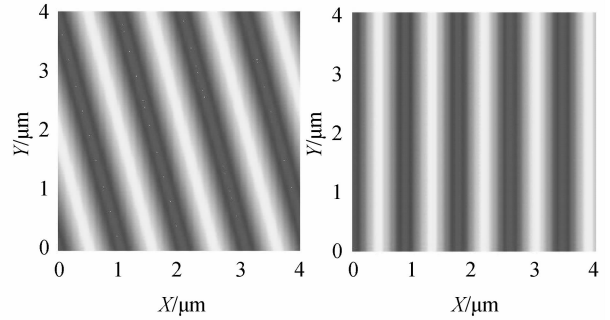


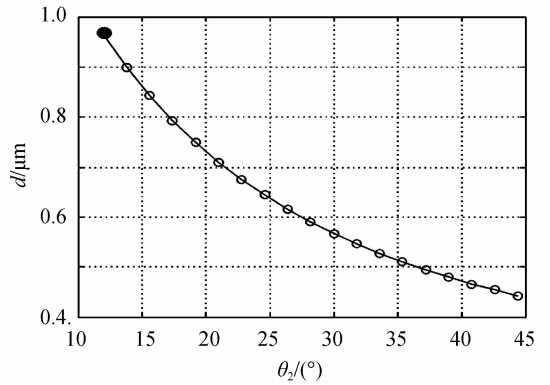
图 3 双光束干涉场内某点光强随两光束振幅比的变化
Fig. 3 The relationship between light intensity at $(0.1, y)$ point and the amplitude ratio of two beams

给出了当 $\theta_1 = \theta_2 = 12^\circ$ 时,干涉场内某点 ($x = 0.1 \mu\text{m}$) 处光强随两光束振幅比 $A_2/A_1 = [1, 3]$ 的变化曲线。

在其它条件不变的情况下,改变其中一束光的入射方位角 ($\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 210^\circ$),两光束干涉条纹方向会随着方位角的变化而变化,周期不变,模拟结果如图 4(a)。改变其中一束光的入射角 ($\theta_1 = 12^\circ$, $\theta_2 = 15^\circ$),模拟结果如图 4(b),与图 2(b)相比,干涉条纹的周期发生改变。双光束干涉形成的条纹周期 d



(a) By azimuth angle deviation (b) By incident angle deviation



(c) Relationship between period and variation incident angle of one beam

图 4 双光束干涉方位角和入射角偏差对干涉结果的影响
Fig. 4 Influence by azimuth angle deviation and incident angle deviation of two-beam interference

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2} \quad (7)$$

式中 λ 为入射光波长, θ_1 、 θ_2 分别为两束光的入射角,形成的干涉条纹周期与入射角的正弦之和成反比,图 4(c) 为当一束光的入射角 $\theta_1 = 12^\circ$ 一定时,干涉条纹周期随另一束光的入射角 θ_2 的变化,干涉条纹周期随着入射光束夹角的增大而减小。

双光束双曝光是在单曝光的基础上,将基片旋转 90° ,对基片进行二次曝光,两次曝光形成的干涉条纹相互垂直。单曝光存在的误差因素会携带到双曝光的过程中去,进而影响双曝光图形结果。

2.2 三光束干涉

三光束单曝光的理想情况是,三束光每两束光之间的夹角相等,并且以相同的入射角和光强同时入射到基片表面,理想情况下的光强模拟分布如图 5 ($A_1 = A_2 = A_3 = 1$; $\varphi_1 = 60^\circ$, $\varphi_2 = 180^\circ$, $\varphi_3 = 300^\circ$; $\theta = 15^\circ$)。三光

束单曝光产生均匀分布的周期性点阵,在精密排列的六边形中心形成强度峰值。

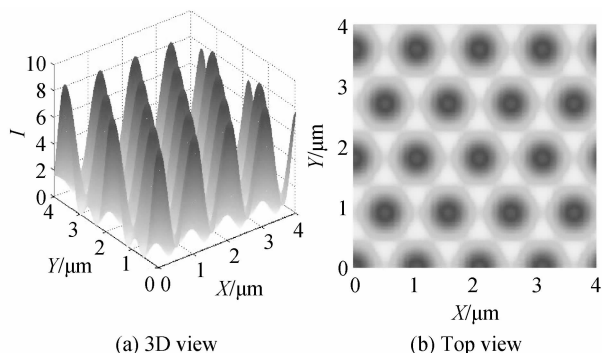


图 5 理想情况三光束单曝光光强分布模拟
Fig. 5 Distribution of light intensity of three-beam interference for single exposure

只改变三光束入射光强时,干涉场内光强分布发生改变,如图 6,图 6(a)为光强差异较小时($A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 1.5 : 2$)的模拟结果,图 6(b)为光强差异较大时($A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 4 : 5$)的模拟结果. 当各束光强不等时,因为每两束光之间均是相干的,最终的结果将导致干涉场内的光强度分布发生变化,使干涉图形发生变形. 若三光束入射方位角发生改变(同时每两束光之间的夹角发生改变),由双光束方位角改变产生的影响(如图 4(a))可知,三光束干涉产生的三组干涉条纹方向发生改变,不再互成 60° 夹角,并且每两束光之间夹角的改变使得形成的三组干涉条纹的周期也发生变化,不再相同,最终导致本该是正六边形的图形发生变形,同样产生均匀分布的周期性点阵结构,但是点阵周期和点的形状均发生了变化,对应光强分布模拟如图 7. 图 7(a)为本应旋转对称分布的三束光,其中一束光的方位角沿逆时针偏转了 60° ($\varphi_1 = 120^\circ$) 的模拟结果,图 7(b)是当两束光的方位角同时偏转 30° ($\varphi_1 = 90^\circ, \varphi_3 = 270^\circ$),即光线在基片表面($x-y$ 面)的投影分别重合于 y 轴的正、负方向时,光强分布的模拟结果。

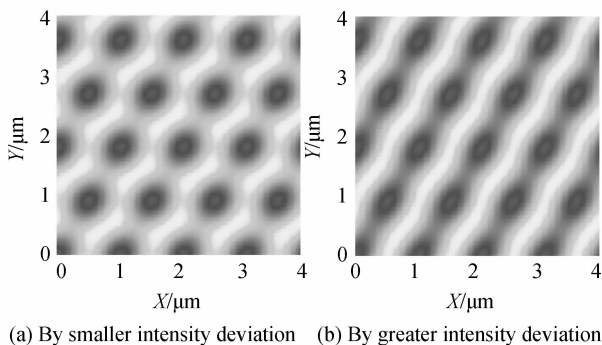


图 6 三光束单曝光入射光强不同对干涉结果的影响
Fig. 6 Influence on pattern of three-beam interference by incident light intensity deviation

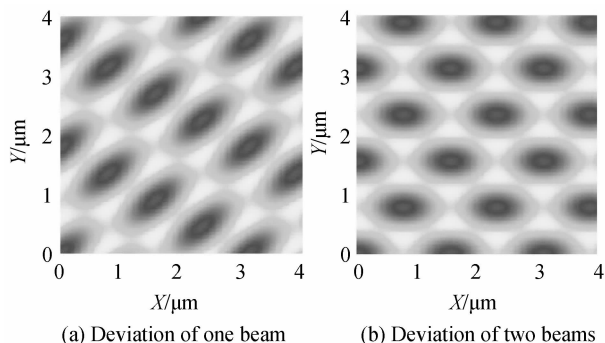


图 7 三光束单曝光入射方位角不同对干涉结果的影响
Fig. 7 Influence on pattern of three-beam interference by azimuth angle deviation

图 8 为三光束干涉光刻在非理想状态下的实验结果,其中激光器输出功率 32 mW ,每两束光之间的夹角约为 16° ,记录介质是北京科华微电子材料有限公司生产的 BP-212 型号的光刻正胶. 图 8(a)为三光束入射光强不同(光强比约为 $A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 4 : 5$)时的实验结果,形成的光刻图形已完全变形,图 8(b)为其中一束光的方位角发生改变 ($\varphi_1 = 120^\circ, \varphi_2 = 180^\circ, \varphi_3 = 300^\circ$) 时的实验结果,图形中的正六边形发生倾斜变形. 实验结果均与理论模拟结果相符。

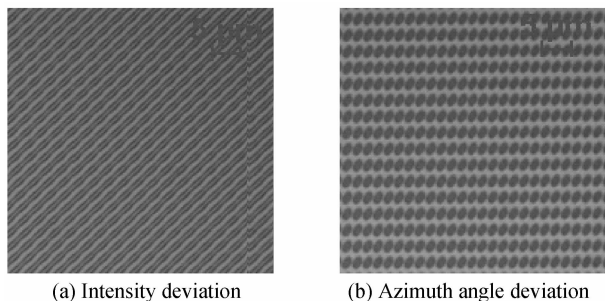


图 8 三光束单曝光非理想状态实验结果
Fig. 8 Experiment pattern of three-beam interference in imperfect situation

2.3 四光束干涉

四光束单曝光的理想状态是,让四束强度相等的光在两个相互正交的平面内以相同的入射角同时照射到基片表面,产生的阵列结构按正四边形分布. 图 9 为 $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 1, \theta = 15^\circ$,四束光方位角为 ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) 时干涉场内的光强分布模拟结果. 图 10 为入射光束方位角和光强偏离理想状态时的光强分布. 其中图 10(a)为其中一束光的方位角偏转 30° 的模拟结果 ($\varphi_1 = 30^\circ$),光强分布出现明显不同,干涉图形发生严重变化. 四光束干涉对四束入射光布局的空间对称性有着很高的要求,某一光束的偏差会导致干涉图样出现严重的调制现象. 图 10(b)为入射光强不同时 ($A_1 : A_2 : A_3 : A_4 = 1 : 1 : 1 : 2$) 干涉场内的光强

分布模拟结果,与图 9(b)相比点阵周期没有变化,光强能量分布发生变化,导致图形对比度下降.图 9(c)、图 10(c)分别为图 9(b)和图 10(b)中直线位置所对应

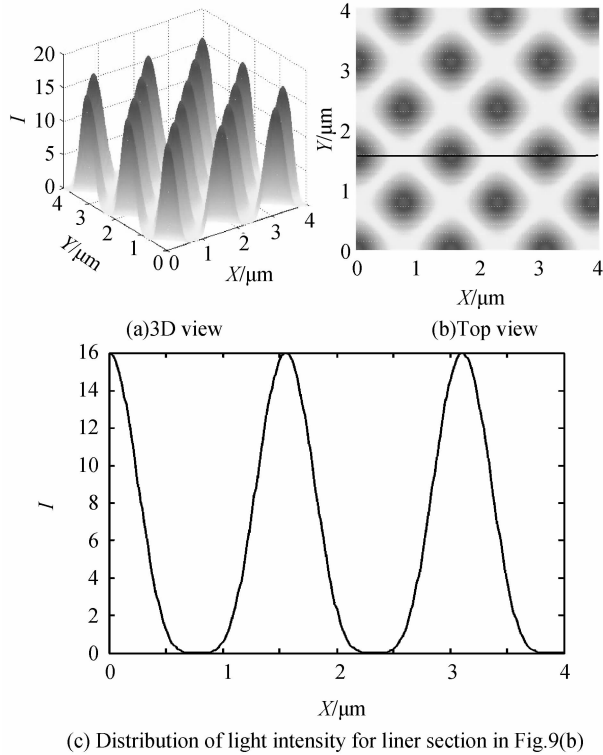


图 9 理想情况四光束单曝光光强分布模拟

Fig. 9 Distribution of light intensity of four-beam interference

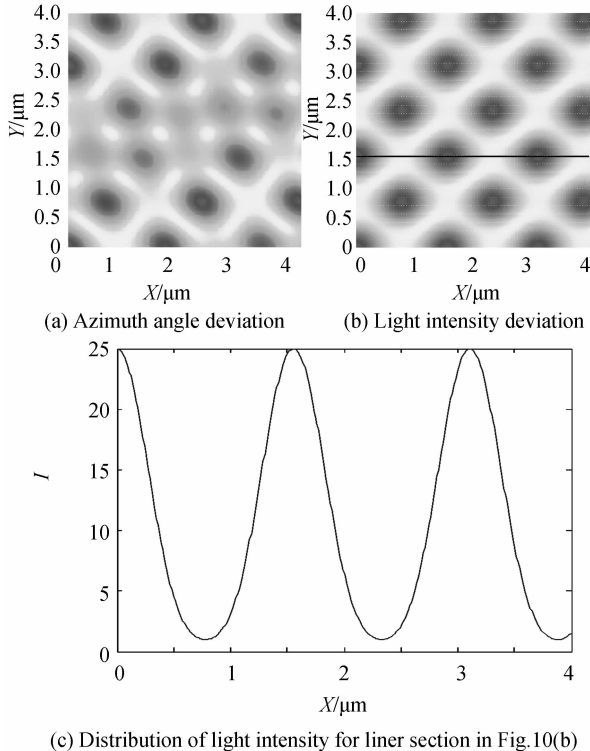


图 10 四光束单曝光入射方位角、光强不同对干涉结果的影响

Fig. 10 Influence on pattern of four-beam interference by azimuth angle and light intensity deviations

截面的光强分布曲线,根据对比度公式,当四束光的振幅比值为 1:1:1:2 时,对比度从理想状态的 1 下降为 0.92.

3 干涉光刻实验

根据参与干涉的光束数和入射角度的需要,结合上述分析结果,在设计安排光路布局的过程中应该考虑光束的空间对称性及各束光的光强,光路中需要加入具有微调功能的光机元件和多维调整机构便于较为精确的控制光学元件,使误差最小化.

3.1 干涉光刻实验系统

以三光束为例,如图 11,激光器(波长 402 nm)发出的光经物镜聚焦、针孔滤波后,再由光学镜头扩束、准直,通过选取合适的分束器透反比,将光束分为能量相近的三束,再通过精密机械调节机构调整光路使得三束光以相同的入射角对称入射,且三束光在曝光平面上的投影夹角均为 120° .在光强足够大的情况下,可在光路中适当加入衰减片、半波片和偏振片进一步调整三束光的光强及偏振态.光路中的机械支撑均选用多维调整机构,在调整过程中能够灵活控制光学元件的位置与角度使其误差最小.在此系统基础上遮住其中一束光,对其余两束光及基片进行调整可实现双光束干涉光刻,将基片旋转 90° 实现双光束双曝光.

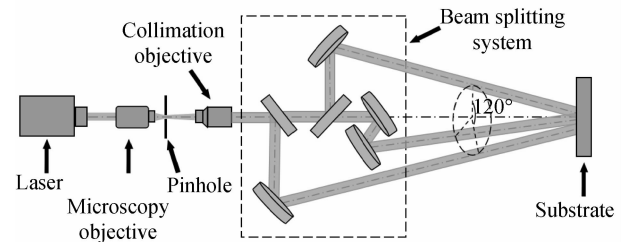


图 11 三光束干涉光刻系统结构示意图

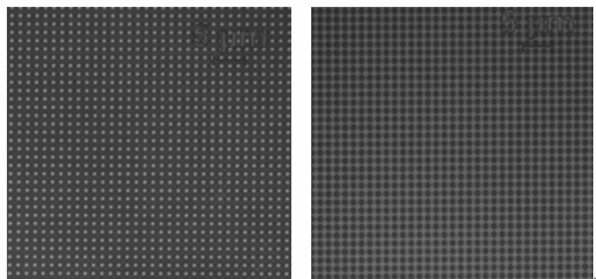
Fig. 11 The sketch of three-beam interference experimental system

3.2 实验结果

设定激光器输出功率 32 mW,每两束光之间的夹角约为 16° ,采用北京科华微电子材料有限公司 BP-212 型号的光刻正胶,显影液是浓度为 5% 的 NaOH 溶液.图 12(a)、12(b)分别为双光束单曝光和双光束双曝光样品在显微镜下的测试结果,实验样品基片为石英玻璃,得到周期约为 $1.4 \mu\text{m}$ 的光刻图形,图 12(a)为单曝光形成的光栅结构,图 12(b)为双曝光过程中通过控制曝光、显影工艺,形成的点阵和孔阵周期结构.图 13 为三光束单曝光干涉光刻结果,实验基片为单抛硅片,得到周期约为 $1.7 \mu\text{m}$ 均匀分布的六边形阵列,图形对比度较好.与其它多光束干涉结果相比,旋转对称的三光束组合形式更易获得较好的均匀性.



(a) Single exposure by two-beam interference



(b) Double exposure by two-beam interference

图 12 双光束干涉光刻图形

Fig. 12 Patterns of two-beam interference lithography

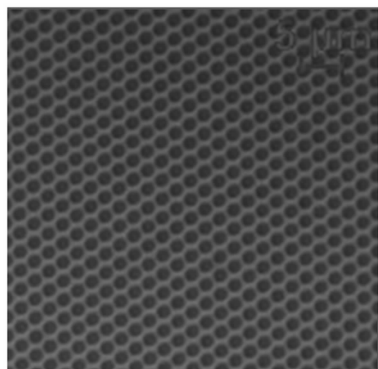


图 13 三光束干涉光刻图形

Fig. 13 Patterns of three-beam interference lithography

4 结论

根据光波叠加基本原理,结合计算机模拟计算和相关实验,研究了光束的入射光强和入射角度差异对多光束干涉光刻结果的影响。模拟和实验结果充分说明了干涉光刻技术制备周期性微纳结构的潜力。光束入射强度的差异,会影响到最终干涉场的能量分布不同,造成光刻图形对比度下降;当光束的入射角度偏离预期时,各组干涉条纹的周期和方向发生变化,相干叠加后光场重新分布,图样的周期和形状也随之发生改变。对利用干涉光刻技术制备微纳周期结构有一定的参考意义。

参考文献

- [1] CHO K S, MANDAL P, KIM K, *et al.* Improved efficiency in GaAs solar cells by 1D and 2D nanopatterns fabricated by laser interference lithography[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(10/11): 2608-2612.
- [2] BERENDSEN C W J, SKEREN M, NAJDEK D, *et al.*

Superhydrophobic surface structures in thermoplastic polymers by interference lithography and thermal imprinting [J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(23): 9305-9310.

- [3] XU D, CHEN K P, OHLINGER K, *et al.* Nanoimprinting lithography of a two-layer phase mask for three-dimensional photonic structure holographic fabrications via single exposure [J]. *Nanotechnology*, 2011, **22**(3): 5303-5308.
- [4] TRUSKETT V N, MICHAEL P C W. Trends in imprint lithography for biological applications [J]. *Trends in Biotechnology*, 2008, **24**(7): 312-317.
- [5] ZHANG Xin-yu, TANG Qing-le, ZHANG Zhi, *et al.* DNA microarray plate in quartz glass substrate fabricated by ion beam etching[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1): 129-133.
- 张新宇, 汤庆乐, 张智, 等. 用光刻及离子束刻蚀技术制作 DNA 芯片模板[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1): 129-133.
- [6] ZHOU Chang-he. Micro- & nano-optical structures and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(10): 22-27.
- 周常河. 微纳光学结构及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(10): 22-27.
- [7] LIU Xu, WU Yun-feng, YE Yu-tang, *et al.* Diffractive characteristics of laser assisted chemical etching GaAs [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 773-775.
- 刘旭, 吴云峰, 叶玉堂, 等. 无掩膜激光辅助刻蚀 GaAs 图形中的衍射条纹分布[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 773-775.
- [8] WATT F, BREESE M B H, BETTIOL A A, *et al.* Proton beam writing[J]. *Materials Today*, 2007, **10**(6): 20-29.
- [9] XU Hong-bo, LU Nan, QI Dian-peng, *et al.* Broadband antireflective Si nanopillar arrays produced by nanosphere lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, **86**(46): 850-852.
- [10] DINELLI F, MENOZZI C, BASCHIERI P, *et al.* Scanning probe nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2010, **21**(7): 5305-5310.
- [11] ZHANG Jin. Study on laser interferometric lithography[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003.
- 张锦. 激光干涉光刻技术[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [12] ADAMS J, TIZAZU G, STEFAN J, *et al.* Large-area nanopatterning of self-assembled monolayers of alkanethiolates by interferometric lithography [J]. *Langmuir*, 2010, **26**(16): 13600-13606.
- [13] CHEN Xin, ZHAO Qing, FANG Liang, *et al.* Fabrication of 100 nm mask by laser interference lithography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 806-810.
- 陈欣, 赵青, 方亮, 等. 激光干涉光刻法制作 100 nm 掩模[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 806-810.
- [14] JOHANNES D B, NADINE G, WITTEMANN J V, *et al.* Sub-100 nm silicon nanowires by laser interference lithography and metal-assisted etching[J]. *Nanotechnology*, 2010, **21**(9): 95302.
- [15] SPALLAS J P, BOYD R D, BRITTEN J A, *et al.* Fabrication of sub-0.5 μm diameter cobalt dots on silicon substrates and photoresist pedestals on 50 cm × 50 cm glass substrates using laser interference lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1996, **14**(3): 2005-2007.
- [16] HE Feng-tao, ZHOU Qiang, YANG Wen-zheng, *et al.* Femtosecond laser multi-beam interference lithography antireflective microstructure on silicon surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 515-520.
- 贺锋涛, 周强, 杨文正, 等. 飞秒激光多光束干涉光刻硅表

- 面减反微结构[J]. 光子学报, 2013, **42**(5): 515-520.
- [17] LI Xiang, PANG Zhao-guang, ZHANG Xin-ping. Fabrication of large-area gold nanowires grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1850-1854.
李响, 庞兆广, 张新平. 大面积金纳米线光栅的制备[J]. 光子学报, 2011, **40**(12): 1850-1854.
- [18] ZHANG Jin, FENG Bo-ru, GUO Yong-kang. Theoretical analysis for fabricating nanometer hole array with 4 laser beams interference lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 398-401.
张锦, 冯伯儒, 郭永康. 四激光束干涉光刻制造纳米级孔阵的理论分析[J]. 光子学报, 2003, **32**(4): 398-401.
- [19] ZHANG Wei, LIU Wei-ping, GU Xiao-yong, *et al.* Multi-beam laser interference lithography pattern [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(12): 3157-3162.
张伟, 刘维萍, 顾小勇, 等. 多光束激光干涉光刻图样[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(12): 3157-3162.
- [20] DAI Long-gui, XUAN Ming-dong, DING Peng, *et al.* A simple and efficient method for preparing silicon nanopit arrays [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(15): 156104.
戴隆贵, 襴铭东, 丁芑, 等. 一种简单高效的制备硅纳米孔阵结构的方法[J]. 物理学报, 2013, **62**(15): 156104.
- [21] FENG Bo-ru, ZHANG Jin, GUO Yong-kang. Implementation methods for wave-front division in maskless laser interference photolithography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(2): 8-10.
冯伯儒, 张锦, 郭永康. 波前分割无掩模激光干涉光刻的实现方法[J]. 光电工程, 2004, **31**(2): 8-10.
- [22] XU Jia, WANG Zuo-bin, WENG Zhan-kun, *et al.* Laser interference nanolithography with a 405nm fiber semiconductor laser [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, **552**: 262-267.
- [23] KIM T U, KIM J A, PAWAR S M, *et al.* Creation of nanoscale two-dimensional patterns of ZnO nanorods using laser interference lithography followed by hydrothermal synthesis at 90°C [J]. *Crystal Growth & Design*, 2010, **10**: 4256.
- [24] ZHANG Jin, FENG Bo-ru, GUO Yong-kang. Implementation methods for amplitude division maskless laser interference photolithography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(2): 11-15.
张锦, 冯伯儒, 郭永康. 振幅分割无掩膜激光干涉光刻的实现方法[J]. 光电工程, 2004, **31**(2): 11-15.

Foundation item: The Key Laboratory Research Program of Education Department of Shaanxi Provincial Government (No. 13JS038), the Key Laboratory Project of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (No. 2013SZS14-P01), the Hi-Tech Zone Development and Guidance Project of Guangdong Provincial Department of Science and Technology (No. 2011B010700101) and the President Research Foundation of Xi'an Technological University (No. XAGDXJJ1303)