

扫描积分塔尔博特光刻条纹质量影响因素模拟分析

邓 茜^{1,2} 赵立新¹ 唐 燕¹ 姚靖威^{1,2} 刘俊伯^{1,2*} 胡 松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, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于角谱衍射理论,对扫描积分塔尔博特光刻术进行了理论分析与数值模拟。研究了扫描距离、扫描起始位置、扫描速度非匀速以及照明光源不同特性对扫描积分塔尔博特光刻所得光栅条纹质量的影响。模拟结果表明,当扫描距离为塔尔博特周期的整数倍时,扫描起始位置、扫描速度的非匀速性对扫描积分塔尔博特光刻的成像质量影响较小;当入射光源存在一定谱宽或发散角不大于 0.05° 时,扫描积分塔尔博特光刻仍可得到对比度较一致的倍频光栅条纹,证实了扫描积分塔尔博特光刻具有良好的工艺适用性。扫描积分塔尔博特光刻不需要昂贵而复杂的投影光学系统,可克服塔尔博特自成像有限焦深问题,对掩模与基片的定位精度及涂胶基片的平整度容忍度较高。该方法具有在非平面基底上制备大面积、低成本、高精度周期微纳结构的应用前景。

关键词 衍射; 光刻; 数值模拟; 塔尔博特效应

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1205001

Simulation Analysis on Influencing Factors of Fringe Quality by Displacement Talbot Lithography

Deng Qian^{1,2} Zhao Lixin¹ Tang Yan¹ Yao Jingwei^{1,2} Liu Junbo^{1,2} Hu Song¹

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Both theoretical analysis and numerical simulation for displacement Talbot lithography are conducted based on angular spectrum diffraction. The factors which influence the grating fringe quality obtained by displacement Talbot lithography such as displacement distance, starting position, non-uniform displacement velocity and different characteristics of lighting source are also discussed in detail. Simulation results show that, when the displacement distance is integer multiples of Talbot period, the factors of initial position and non-uniform displacement velocity have little influence on imaging quality of displacement Talbot lithography. When there is a certain spectral width of the incident light source or the divergence angle is not larger than 0.05° , the displacement Talbot lithography can still obtain double frequency grating fringes whose contrast is more consistent, which verifies that the displacement Talbot lithography possesses an outstanding process applicability. Displacement Talbot lithography does not require expensive and complicated projection optical system, and can overcome the problem of limited depth of focus for Talbot self-imaging. Meanwhile, displacement Talbot lithography has higher tolerance for the positioning accuracy between mask and substrate as well as the substrate planeness. The method has promising potential to be applied in non-planar substrate for the manufacture of periodical micro structures with wide area, low expense and high precision.

Key words diffraction; photolithography; numerical simulation; Talbot effect

收稿日期: 2016-06-16; **收到修改稿日期:** 2016-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(61274108,61376110)

作者简介: 邓 茜(1992—),女,硕士研究生,主要从事紫外光刻及光学设计方面的研究。

E-mail: dengqian2016@126.com

导师简介: 赵立新(1972—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事微电子专用设备方面的研究。

E-mail: zhaolixin@ioe.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: ljbopt@126.com

1 引 言

在科研和工业领域中,周期微纳结构(如光栅条纹、小孔阵列等)在 LED/OLED 光子晶体、微流控、二元衍射器件等方面有着广泛的应用^[1-6]。目前制备周期微纳结构的常用方法主要有接近接触式光刻法、纳米压印法、电子束光刻法、X 射线光刻法等^[7-10]。电子束光刻法^[7]可获得很高的分辨率,但由于邻近效应的影响,高深宽比图形难于制作,且存在效率低、成本高等难题。接近接触式光刻^[8]技术成熟,生产率高,成本低,但受设备、掩模等限制,分辨力较低。纳米压印法^[10]是一种新兴的微纳加工手段,其优势在于可实现大面积、高精度的周期微纳结构制备,但其高精度压印模板的制作难度极高,存在基片易弯曲、压印表面聚合物易残留、脱模复杂等诸多有待解决的问题。接近接触式光刻、纳米压印、电子束光刻技术等是目前生成掩模版的主要手段。

自 1836 年塔尔博特发现了周期性物体的自成像(即塔尔博特效应)以来,研究人员对各类周期结构的塔尔博特效应和分数塔尔博特效应进行了十分深入的研究,并使之得到广泛应用^[11-17]。随着对塔尔博特效应的深入研究,利用塔尔博特效应所产生的自成像和相移自成像制备周期微纳结构在很多学术研究中被提及^[18-27],但塔尔博特自成像的焦深较浅,需要对掩模与基片之间的距离进行十分精确的定位,同时必须保证基片的平整度和涂胶一致性^[23]。在实际光刻过程中,光源高温照射极易引起基片的弯曲及变形,这使得塔尔博特效应在制备周期微纳结构的应用中受到严重限制。近年, Solak 等^[24]提出利用连续宽光谱光源照射周期掩模,不同波长成分将在掩模后形成相互叠加的连续光场,以此克服有限焦深问题。随后,该研究团队^[25-27]又提出利用单色平面光垂直照射掩模,在曝光过程中将涂胶基片移动一个塔尔博特周期进行扫描积分塔尔博特光刻,该方法同样可以克服有限焦深问题,并能够得到倍频的周期掩模结构。

众所周知,在高精度周期结构的光刻加工过程中,定位系统及运动扫描系统受到机械、材料、环境、电控精度等因素影响,易存在运动精度误差、定位误差以及 z 向扫描积分的速度控制误差等问题。同时,光刻照明系统光源(如高压汞灯或 LED 光源)大多由匀光准直系统对出射光线进行匀光准直,再通过滤光保证其单色性。因此,实际照明系统所发出的照明光线并不是严格的单色光垂直入射,而是存在一定的光谱宽度和微小的入射角度。为进一步掌握与应用扫描积分塔尔博特光刻技术,本文基于角谱衍射理论^[11],对透过线性光栅后的衍射光场分布及扫描积分塔尔博特光刻所得条纹图像和光强分布进行了模拟。结合光刻相关工艺提出以条纹对比度为光刻成像质量评价标准,模拟分析了扫描距离、扫描起始位置、扫描速度以及光源不同入射特性对该方法制备光栅条纹质量的影响。本文旨在更清楚地了解影响扫描积分塔尔博特光刻质量的主要因素及这些因素对质量影响的程度,为扫描积分塔尔博特光刻方法的应用以及扫描积分塔尔博特光刻设备的研制提供一定的理论依据。

2 扫描积分塔尔博特光刻基本原理及数值仿真

2.1 扫描积分塔尔博特光刻基本原理^[25]

1836 年塔尔博特发现用单色平面波垂直照射周期性物体,将会在物体后周期性距离处出现物体的像,这种自成像效应即为塔尔博特效应^[11]。对于一维线性光栅,其自成像重复出现的距离约为 $2p^2/\lambda$,其中 p 为光栅周期常数, λ 为入射波长。假设置于 xy 平面的一维线性光栅的透射函数为 $T(x)$,则其复振幅透射率可表示为

$$T(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m \exp\left(i2\pi \frac{m}{p}x\right), (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (1)$$

式中 A_m 为频谱函数,表示各平面波分量的相对振幅与相位分布, $\left(\frac{m}{p}, 0\right)$ 为频率取离散值的频率分量。当用单位振幅的单色平面波沿 z 方向垂直照明时,利用角谱衍射理论^[11]可得出在照明方向上的振幅分布为

$$E(x, z) = \sum_m A_m \exp\left(i \frac{2\pi m}{p}x\right) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda}z \sqrt{1 - \frac{(m\lambda)^2}{p^2}}\right]. \quad (2)$$

一般来说,(2)式求和应从 $-\infty$ 到 $+\infty$,但由于光栅的近场衍射中高级次衍射是逐渐消逝且衰减十分迅速,因此仅考虑 $m\lambda < p$ 的情况。进一步地,假设 $m\lambda$ 远小于周期 p ,则此时傅里叶系数可通过计算获得。在这一前提下,利用傍轴近似可计算得出透过光栅后的衍射光强分布为

$$I(x, z) = \sum_{m,n} A_m A_n^* \exp\left[i \frac{2(m-n)\pi}{p} x\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{z_t} z (m^2 - n^2)\right], \quad (3)$$

式中 $z_t = 2p^2/\lambda$ 为一个塔尔博特周期。观察(3)式,当 $z = N \cdot z_t$, ($N = 1, 2, 3, \dots$)时, $\exp\left[i \frac{2\pi}{z_t} z (m^2 - n^2)\right] = 1$,单色平行光透过光栅在 z 方向的光强以距离 z_t 为周期呈重复性分布。

假设在曝光过程中将涂胶基片在 z 方向上匀速运动一定距离,如由 z_0 到 $z_0 + d$,这一扫描过程中,涂胶硅片相当于一个光场积分探测器,在涂胶样片的 x 位置所接收到的曝光剂量可通过对(3)式进行积分获得,具体如下:

$$D(x) = \sum_{m,n} A_m A_n^* \exp\left[i \frac{2(m-n)\pi}{p} x\right] \int_{z_0}^{z_0+d} \exp\left[i \frac{2\pi}{z_t} z (m^2 - n^2)\right] dz. \quad (4)$$

观察(4)式积分可发现,当扫描距离 $z = N \cdot z_t$, ($N = 1, 2, 3, \dots$)时,当且仅当 $m = \pm n$ 时积分项不为零。同时,当 $d = z_t$ 时,无论 z_0 取何值, $D(x)$ 沿 z 方向的取值不变即 $D(x)$ 与起始位置 z_0 的取值相独立。也就是说,在曝光过程中,将涂胶基片从光栅掩模后的任意位置移动一个塔尔博特周期,涂胶基片通过曝光所接收的积分光强均相同,其在 x 方向上的积分光强可等价于:

$$D(x) = z_t \left[\sum_m |A_m|^2 - |A_0|^2 + S(2x) \right], \quad (5)$$

式中 $S(x) = \sum_m A_m A_{-m}^* \exp\left(i \frac{2m\pi}{p} x\right)$ 为光栅透射函数 $T(x)$ 与其自身的卷积。因此可进一步等价于:

$$S(x) = \int_{-p/2}^{p/2} T(x') T^*(x - x') dx'. \quad (6)$$

可见,上述结果对任意的一维透射光栅的透射函数 $T(x)$ 均有效。尽管(5)式中还存在前两项参数,但其均为常数,因此可得出结论:对光栅进行扫描积分塔尔博特光刻所得光强分布为掩模光栅的自相关函数。(5)式中 $S(2x)$ 同时说明积分所得条纹的频率是掩模光栅的两倍,即相应的条纹分辨率可提高一倍。

2.2 扫描积分塔尔博特光刻模拟仿真

基于上述理论,借助 Matlab 软件进行模拟仿真,得到透过光栅的衍射光场分布如图 1 所示。其中,照明光源波长 λ 为 365 nm,光栅周期常数为 $5 \mu\text{m}$,占空比为 0.5。仿真过程中 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 10$ 。

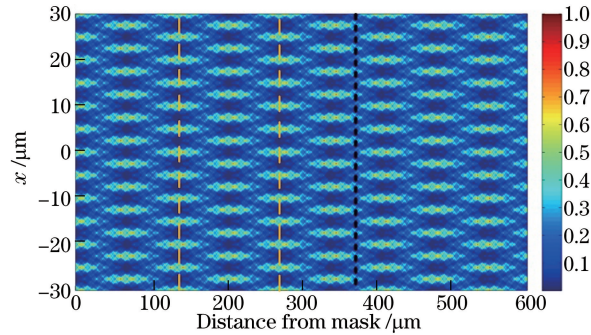


图 1 透过线性光栅的衍射光强分布

Fig. 1 Diffraction intensity distribution after linear grating

由图 1 可见,沿光栅透射方向,透射光强以 $z_t \approx 137 \mu\text{m}$ 为一个塔尔博特周期呈重复性分布,黄色虚线在 z 向所处位置即为塔尔博特自成像位置,两虚线间的距离即为一个塔尔博特周期。紧挨条纹光栅后 $z = 0, z_t, 2z_t$ 处在 x 方向上所得光栅条纹的衍射光强分布分别如图 2(a) ~ (c) 所示。在光栅两塔尔博特自成像的中间位置存在光栅相移自成像, $z = 0.5z_t, 1.5z_t, 2.5z_t$ 处在 x 方向上所得相移自成像的衍射光强分布曲线分

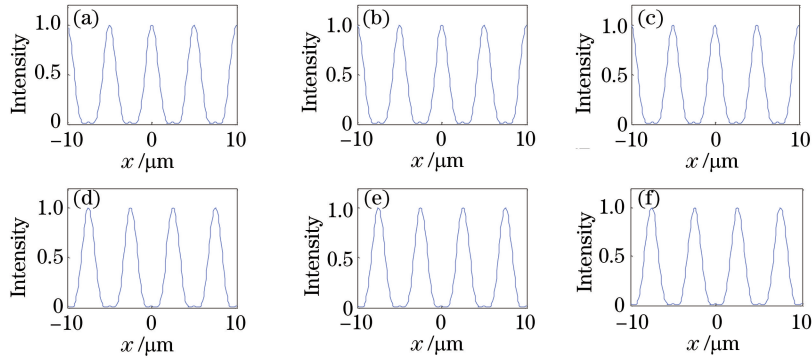


图 2 不同位置处(a)~(c)塔尔博特自成像及(d)~(f)相移自成像的光强分布。(a) $z=0$; (b) $z=z_1$; (c) $z=2z_1$;
(d) $z=0.5z_1$; (e) $z=1.5z_1$; (f) $z=2.5z_1$

Fig. 2 Intensity distributions of (a)-(c) Talbot self-images and (d)-(f) phase shifted self-images at different positions.

(a) $z=0$; (b) $z=z_1$; (c) $z=2z_1$; (d) $z=0.5z_1$; (e) $z=1.5z_1$; (f) $z=2.5z_1$

别如图 2(d) ~ (f) 所示。在塔尔博特自成像与相移自成像之间还存在光强较弱的倍频塔尔博特子像,其光栅图样及光强分布如图 3 所示。

进一步地,将涂胶基片从光栅后 $z \approx 137 \mu\text{m}$ 处匀速移动一个塔尔博特周期至 $z \approx 274 \mu\text{m}$ 处,模拟得到的扫描积分塔尔博特光刻条纹的光栅图样及光强分布如图 4 所示,可以看到,扫描积分塔尔博特光刻条纹周期变为 $2.5 \mu\text{m}$,相比于光栅掩模周期缩小一半,相应的条纹分辨率提高了一倍,扫描积分塔尔博特光刻可利用扫描积分过程同时对光栅的塔尔博特像、相移塔尔博特像、塔尔博特子像进行光刻成像。仿真结果与上述理论分析一致。

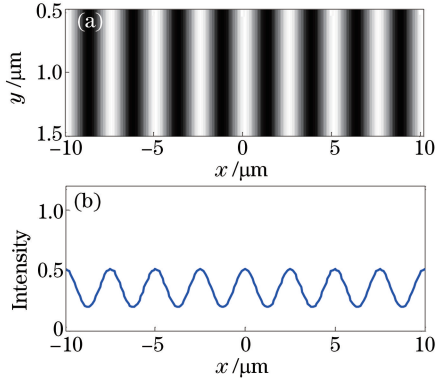


图 3 倍频塔尔博特子像的(a)光栅图样和(b)光强分布

Fig. 3 (a) Grating pattern and (b) intensity distribution of double frequency Talbot sub-image

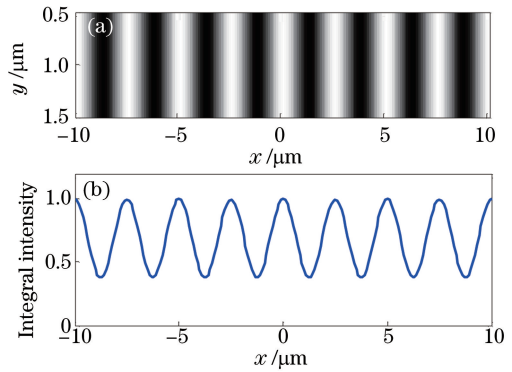


图 4 扫描积分塔尔博特光刻条纹的(a)衍射图样和(b)归一化光强分布

Fig. 4 (a) Diffraction pattern and (b) normalized intensity distribution of displacement Talbot lithography fringe

3 不同扫描参数对扫描积分塔尔博特光刻条纹质量的影响

在讨论分析扫描积分塔尔博特光刻质量的影响因素之前,本文将通过扫描积分所得图样中光栅自成像与相移自成像条纹的对比度作为扫描积分塔尔博特光刻成像质量的评判标准,对比度值越高,说明条纹的可见度越好。将光栅自成像与相移自成像的对比度差值作为条纹成像质量的一致性评价标准,当对比度差值趋近于零时,说明塔尔博特像与相移塔尔博特像对比度越一致,所得倍频条纹光栅的成像质量越高。其中对比度的定义为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (7)$$

式中 I_{\max} 、 I_{\min} 分别为光强分布的最大值和最小值。

3.1 扫描距离的影响

根据上述理论,以第一塔尔博特自成像位置($z_1 \approx 137 \mu\text{m}$)为起始位置,以 $0.1 \mu\text{m}$ 为步长进行积分叠加。扫描距离每增加 $0.05z_1$,对积分所得光栅图样及其光强进行一次采样输出,进一步模拟了不同扫描距离所得扫描积分塔尔博特光刻条纹的光强分布,如图 5 所示。从图 5 可以看出,当扫描距离 $d = \frac{N}{2} \cdot z_1$, ($N=1, 2, 3, \dots$),即半个塔尔博特周期的整数倍时,所得光栅条纹周期由 $5 \mu\text{m}$ 减小到 $2.5 \mu\text{m}$,可实现条纹倍频且条纹自成像和相移自成像条纹光强大小相同。

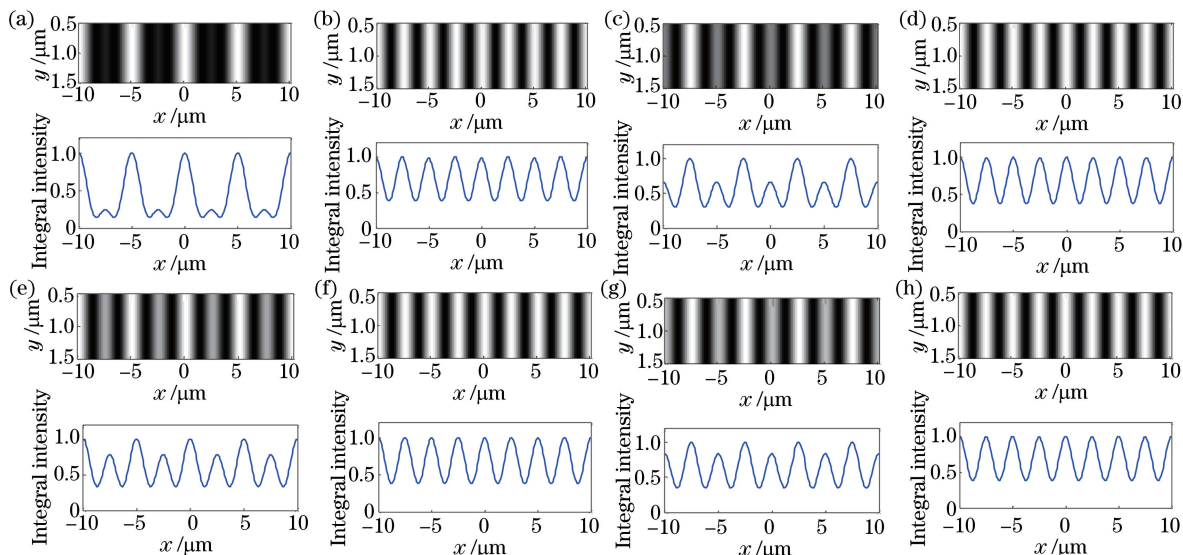


图 5 不同扫描距离时塔尔博特光刻条纹的光栅图样及对应的光强分布。(a) $0.25z_1$; (b) $0.5z_1$;
(c) $0.75z_1$; (d) z_1 ; (e) $1.25z_1$; (f) $1.5z_1$; (g) $1.75z_1$; (h) $2.0z_1$

Fig. 5 Grating patterns and intensity distributions of Talbot lithography fringes with different displacement distances.

(a) $0.25z_1$; (b) $0.5z_1$; (c) $0.75z_1$; (d) z_1 ; (e) $1.25z_1$; (f) $1.5z_1$; (g) $1.75z_1$; (h) $2.0z_1$

扫描距离从零增加到 $3z_1$ 的过程中,扫描积分不同距离所得条纹中光栅自成像和相移自成像的条纹对比度及其对比度差值如图 6 所示。由图 6 可见,塔尔博特像和相移塔尔博特像的对比度在一定范围内呈周期振荡,当扫描距离 $d = \frac{N}{2} \cdot z_1$, ($N=1, 2, 3, \dots$) 时,光栅自成像与相移自成像的对比度相等。随着扫描距离的不断增加,塔尔博特像与相移塔尔博特像对比度差值波动逐渐变缓,倍频光栅条纹一致性逐渐变好。相应地,扫描距离的控制精度对所得光栅条纹的成像质量影响将逐渐减小。

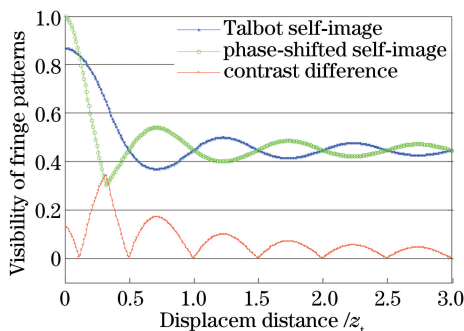


图 6 不同扫描距离所得积分图像各条纹对比度

Fig. 6 Fringe contrast of integral images with different displacement distances

3.2 扫描起始位置的影响

采用类似的方法,进一步模拟得出扫描起始位置对扫描积分塔尔博特光刻条纹对比度的影响。扫描距

离 $d=0.5z_t$ 和 $d=z_t$ 时所得光栅条纹的自成像和相移自成像的对比度及其对比度差值分别如图 7(a) 和 (b) 所示。当扫描距离 $d=0.5z_t$ 时, 其结果受扫描起始位置的限制, 当且仅当扫描起始位置 $z_0 = \frac{N}{2} \cdot z_t$, ($N=1, 2, 3, \dots$) 时, 光栅自成像和相移自成像的对比度相等, 所得积分光栅条纹在实现倍频的同时具有良好的 consistency。但在这些位置的附近对比度差值曲线斜率较大, 对比度差值随着扫描起始位置的变化十分明显。因此, 对扫描起始位置的定位要求十分精确。当扫描距离 $d=z_t$ 时, 无论扫描从何处开始, 塔尔博特像与相移自成像条纹对比度均相等, 且保持不变。在任意起始位置开始扫描一个塔尔博特周期, 均可获得完全一致的倍频光栅条纹, 光刻成像质量不受扫描起始位置的限制。因此, 当扫描距离 $d=z_t$ 时, 扫描积分塔尔博特光刻无需对掩模与涂胶基片进行精确的定位, 同时无论基片平整或凹凸, 所得的曝光剂量与平面基底所得曝光剂量一致, 因此扫描积分塔尔博特光刻不仅可以克服塔尔博特像的有限焦深问题, 同时可以避免基片定位不准确以及高温或外部环境引起的基片不平整等问题对光刻成像质量的不利影响, 具有在非平面基底上制作微纳周期结构的潜力。

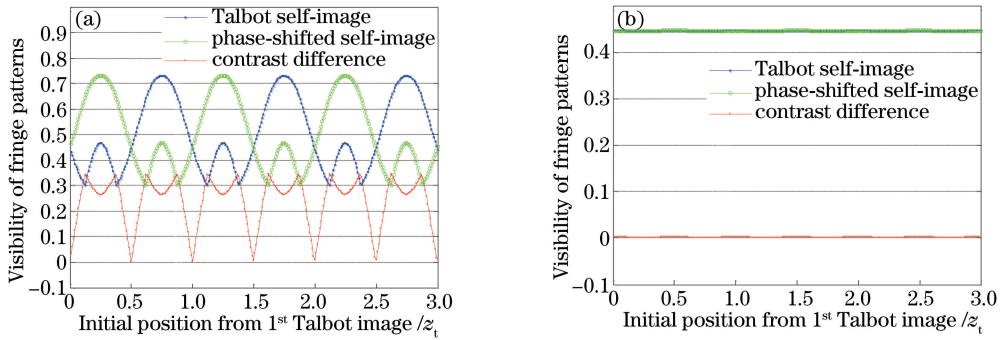


图 7 不同扫描起始位置时的条纹对比度。(a) $d=0.5z_t$; (b) $d=z_t$

Fig. 7 Fringe contrast with different initial positions. (a) $d=0.5z_t$; (b) $d=z_t$

3.3 扫描速度的影响

在实际扫描过程中, 步进扫描电机运动精度存在一定误差, 机械结构之间不同界面处运动摩擦不同, 另外外界环境以及扫描上升机构的重力等因素都易导致扫描积分塔尔博特光刻中 z 向扫描速度不均匀。为模拟分析非匀速扫描速度对扫描积分塔尔博特光刻成像质量的影响, 假设理想情况下, z 向匀速扫描的速度为 v , 在计算过程中将其归一化为 1, 并对扫描速度加入不同的随机分布来模拟实际扫描过程中的速度。本文模拟得到了扫描速度呈不同的随机分布时, 从不同初始位置处开始扫描一个塔尔博特周期所得光栅条纹的成像质量。假设扫描速度在 $[0.5, 1.5]$ 和 $[0, 2]$ 上均匀分布, 所得条纹对比度结果分别如图 8(a) 和 (b) 所示。由图 8(a) 可见, 当扫描速度在 $[0.5, 1.5]$ 上服从均匀分布时, 扫描积分塔尔博特光刻所得结果与理想情

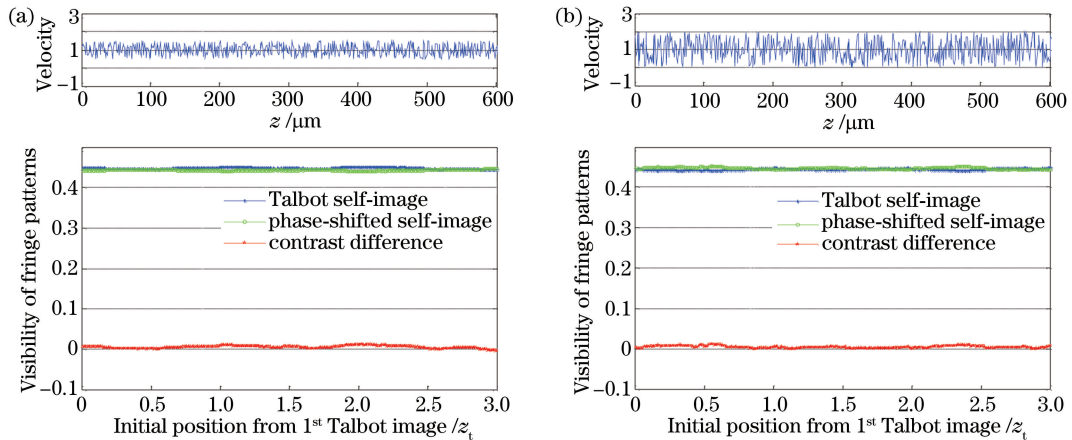


图 8 扫描速度呈不同分布时积分条纹图样的对比度。(a) $U(0.5, 1.5)$; (b) $U(0, 2)$

Fig. 8 Contrast of integral fringe patterns with different displacement velocity distributions. (a) $U(0.5, 1.5)$; (b) $U(0, 2)$

况下所得结果基本一致,塔尔博特像与相移塔尔博特像条纹对比度差值(条纹对比度波动幅度)小于平均对比度的1%。由图8(b)可见,当扫描速度在 $[0,2]$ 上服从均匀分布时,条纹对比度具有轻微的波动,但其波动幅度仍低于条纹平均对比度的2%。

为了更真实地模拟实际情况下扫描速度对扫描积分塔尔博特光刻成像质量的影响,进一步对匀速扫描和高斯分布不同 $[N(1,0.25), N(1,0.49), N(1,1)]$ 时的条纹对比度进行模拟仿真,结果如图9所示。由图9分析可得,当匀速扫描服从正态分布,方差为0.25时,扫描积分塔尔博特光刻所得结果与匀速扫描时所得结果一致,条纹的波动幅度趋近于零;当方差分别为0.49和1时,扫描积分塔尔博特光刻所得结果与匀速扫描时所得结果相比,条纹对比度具有微小波动,条纹的波动幅度分别低于条纹平均对比度的3%和5%。而在实际的上升扫描过程中,扫描速度的波动幅度不会超过该正态分布的范围。因此可以认为,一般情况下扫描速度的非匀速误差对扫描积分塔尔博特光刻结果几乎没有影响,可忽略不计。

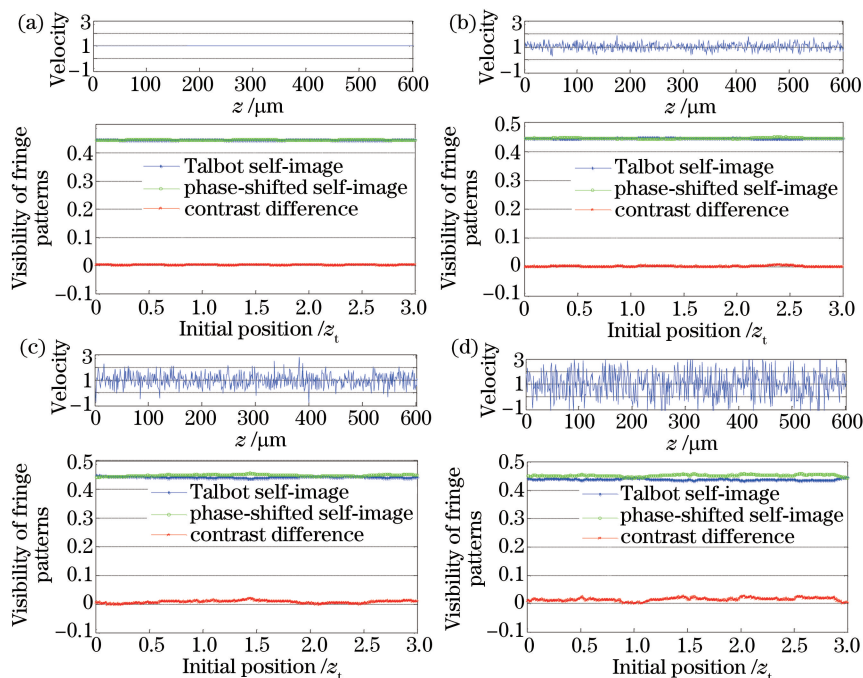


图9 匀速扫描和高斯分布不同时,积分条纹图样的对比度。

(a) 匀速运动; (b) $N(1,0.25)$; (c) $N(1,0.49)$; (d) $N(1,1)$

Fig. 9 Contrast of integral fringe patterns with constant velocity and different Gaussian distributions.

(a) Constant velocity; (b) $N(1,0.25)$; (c) $N(1,0.49)$; (d) $N(1,1)$

4 不同入射条件对扫描积分塔尔博特光刻条纹质量的影响

张伟^[12]通过理论分析和数值仿真的方法对不同入射条件下光栅的塔尔博特效应进行了较为深入的研究。下面以文献[12]的理论为基础,结合光刻照明系统中的光源特性,就不同入射条件(平行光小角度斜入射、点光源入射以及非单色光入射)对扫描积分塔尔博特光刻条纹对比度的影响进行仿真分析。

4.1 平行光小角度斜入射的影响

分析平行光小角度斜入射对扫描积分塔尔博特光刻结果的影响,对不同角度(0.01° 、 0.05° 、 0.1°)斜入射时,从不同起始位置开始扫描一个塔尔博特周期所得光栅条纹的成像质量进行模拟仿真,结果如图10所示。由图10可见,当斜入射角度为 0.01° 时,所得条纹的质量与垂直入射时一致;当斜入射角度为 0.1° 时,扫描所得条纹对比度波动较大。斜入射角度越小,所得倍频条纹对比度及一致性越好。当以小角度斜入射时,扫描起始位置越靠近掩模光栅,扫描积分塔尔博特光刻所得结果与理想情况下所得结果越一致。这是由于光源小角度斜入射条件下,光栅的衍射光场将沿光栅方向倾斜,光栅的衍射仍能呈现自成像现象,但各自成像的位置沿着光栅方向进行了与斜入射角度有关的平移^[12]。因此,在进行扫描积分塔尔博特光刻时,为获得对

比度一致的倍频光栅条纹,照明光源的入射发散角应尽可能保证小于 0.05° ,扫描起始位置应取在靠近光栅掩模的第一塔尔博特自成像位置。

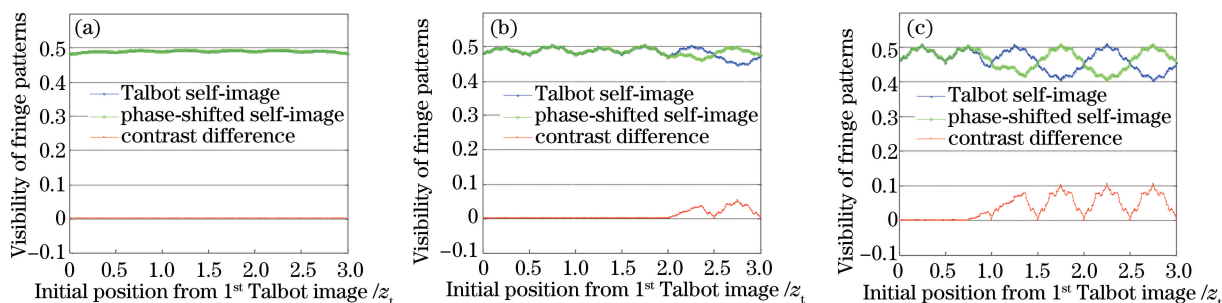


图 10 平行光入射角度不同时,积分条纹图样的对比度。(a) 0.01° ; (b) 0.05° ; (c) 0.1°

Fig. 10 Contrast of integral fringe patterns with different incident angles of parallel light. (a) 0.01° ; (b) 0.05° ; (c) 0.1°

4.2 点光源入射的影响

为分析不同距离处点光源入射对扫描积分塔尔博特光刻结果的影响,下面对距离掩模光栅不同距离(1、10、50、100 cm)处的点光源入射,从不同位置开始扫描一个塔尔博特周期获得的光栅条纹的成像质量进行仿真分析,结果如图 11 所示。由图 11 可见,当点光源距离掩模光栅 1 cm 时,所得条纹对比度随起始位置不同波动较大,且自成像和相移自成像的对比度差值波动很大,扫描积分塔尔博特光刻无法获得对比度均一的倍频光栅条纹;随着点光源与光栅掩模距离的增大,扫描积分塔尔博特光刻所得条纹的对比度及对比度差值趋于稳定,倍频条纹的对比度也趋于一致。当点光源距光栅掩模 50 cm 以上时,所得结果与理想的垂直入射情况基本一致。这是由于当点光源与掩模的距离增加时,相应的投射到光栅掩模上的光束发散角减小,距离增大到一定的程度时,可以近似于平行光入射。

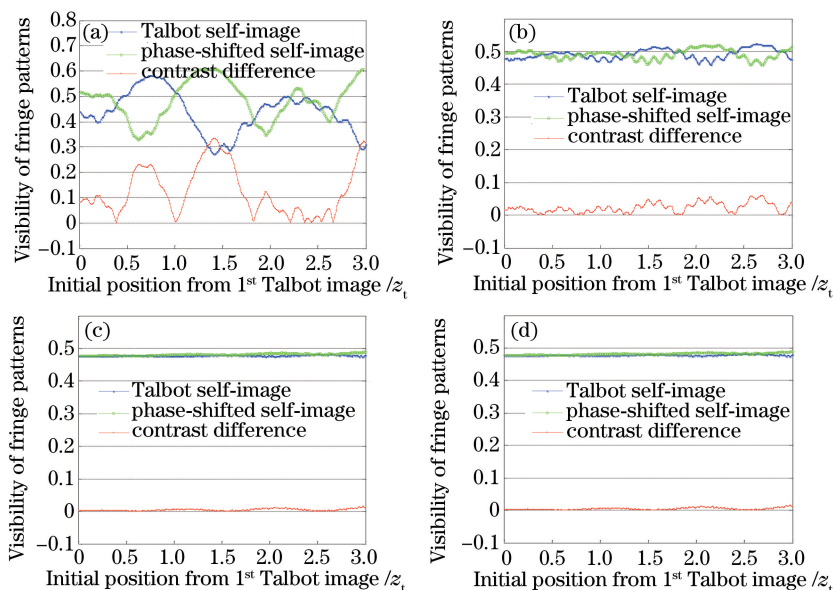


图 11 点光源在不同距离入射时,积分条纹图样的对比度。(a) 1 cm; (b) 10 cm; (c) 50 cm; (d) 100 cm

Fig. 11 Contrast of integral fringe patterns with different positions of point source. (a) 1 cm; (b) 10 cm;

(c) 50 cm; (d) 100 cm

4.3 光源非单色性的影响

如前所述,一般照明系统发出的照明光经过滤光后存在一定范围的谱宽,并非严格的单色光。假设在光刻设备中采用高压汞灯光源照明,经过滤光后照明光谱中仅保留 (365 ± 5) nm 波段的光线,采用该波段照明所得的扫描积分塔尔博特光刻的自成像和相移自成像对比度及其对比度差值如图 12 所示。由图 12 可见,当照明光源不是严格的单色光,而是存在微小光谱范围时,塔尔博特像与相移塔尔博特像条纹对比度存在微

小波动,但条纹对比度波动幅度以及对对比度差值均小于平均对比度的 5%。因此,可以认为光源的非单色性对仿真所得扫描积分塔尔博特光刻条纹对比度影响较小。



图 12 光谱范围为 360~370 nm 的汞灯光源入射时积分条纹图样的对比度

Fig. 12 Contrast of integral fringe patterns with 360-370 nm spectral bandwidth of mercury lamp

5 结 论

基于角谱衍射理论,对扫描积分塔尔博特光刻进行了理论仿真。在此基础之上,进一步研究了扫描距离、扫描起始位置、扫描速度非匀速以及光源不同入射情况对该方法光刻成像的影响。结果表明,随着扫描距离的增加,扫描距离的控制精度对所得光栅条纹的成像质量影响将逐渐减小。当扫描距离为塔尔博特周期的整数倍时,扫描积分塔尔博特光刻不受扫描起始位置的限制。在任意起始位置开始扫描一个塔尔博特周期,均可获得完全一致的倍频光栅条纹。当扫描速度相对于平均速度存在微小波动时,其对扫描积分塔尔博特光刻结果的影响较小,可忽略不计。同时,对实际光刻设备中照明光源存在一定光谱宽度和微小的入射角度的情况进行讨论,光源的非单色性对仿真所得扫描积分塔尔博特光刻条纹对比度影响较小;当光源存在微小的入射角度时,扫描起始位置越靠近第一塔尔博特自成像位置,所得光栅条纹质量越接近理想垂直入射情况;照明光源的发散角越小,扫描积分塔尔博特光刻所得结果越好。在进行扫描积分塔尔博特光刻时,为获得对比度一致的倍频光栅条纹,照明光源的入射发散角应尽可能保证不大于 0.05° ,扫描起始位置越靠近光栅掩模的第一塔尔博特自成像位置,光刻成像质量越稳定。

总之,扫描积分塔尔博特光刻不需要昂贵而复杂的投影光学系统,可克服塔尔博特自成像有限焦深问题,对掩模与基片的定位精度及涂胶基片的平整度容忍度较高。因此,扫描积分塔尔博特光刻是一种低成本、工艺适用性强、可大面积制备高分辨周期结构的光刻方法。同时,由于扫描的起始位置对光刻结果无影响,因此该方法具有在非平面基底上进行微纳周期结构制备的应用前景。

参 考 文 献

- Zhou Changhe. 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.
- Zhuang Jie, Zhang Dawei, Tao Chunxian, *et al.* A generalization of the application about optical micro-nano structure on LEDs[J]. Optical Technique, 2012, 38(1): 98-103.
庄 杰, 张大伟, 陶春先, 等. 微纳光学在 LED 芯片中应用研究的综述[J]. 光学技术, 2012, 38(1): 98-103.
- Wang Jinguang, Li Ming, Liu Jianfeng, *et al.* The applications of microfluidic in medical detection[J]. Modern Scientific Instruments, 2007, 17(6): 60-63.
王金光, 李 明, 刘剑峰, 等. 微流控芯片在医学检测中的应用[J]. 现代科学仪器, 2007, 17(6): 60-63.
- Jin Yonglong, Zhang Yu, Gu Ning. Fabrication of microchip with embedded optical fibers by excimer laser processing technique[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1821-1824.
金永龙, 张 宇, 顾 宁. 基于准分子激光加工技术的内嵌光纤型微流控器件的制备[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1821-1824.
- Yang Lianchen, Li Guohua, Song Lianke, *et al.* Design of polarizing devices based on the binary-grating diffraction[J].

- Acta Photonica Sinica, 1998, 27(9): 833-837.
杨连臣, 李国华, 宋连科, 等. 二元衍射光栅式偏光器件的设计[J]. 光子学报, 1998, 27(9): 833-837.
- 6 Sun Qing. Study on high-speed fiber Bragg grating demodulation system based on diffraction grating[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
孙 庆. 基于衍射光栅的高速光纤光栅解调系统的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- 7 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin, *et al.* Micro- and nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.
- 8 Yao Hanming, Hu Song, Xing Tingwen. Optical projection exposure technology of micro and nano fabrication[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006.
姚汉民, 胡 松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006.
- 9 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.
- 10 Ding Yucheng. Research progress of nanoimprint lithography and its technical challenges [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31(1): 9-15.
丁玉成. 纳米压印光刻工艺的研究进展和技术挑战[J]. 青岛理工大学学报, 2010, 31(1): 9-15.
- 11 Lü Naiguang. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 90-93.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 90-93.
- 12 Zhang Wei. Talbot effect of grating and its application in wave-front sensing[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
张 伟. 光栅塔尔博特效应及其在波前传感中的应用[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- 13 Teng Shuyun, Liu Liren, Zu Jifeng, *et al.* Equivalence of Talbot effect of the grating illuminated by the pulsed laser and continuous polychromatic light[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(10): 1177-1182.
滕树云, 刘立人, 祖继锋, 等. 脉冲和连续多色光源照明下光栅塔尔博特效应的等价性[J]. 中国激光, 2004, 31(10): 1177-1182.
- 14 Wang Junhong. Study about fractal grating and its self-image effect[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
王俊红. 分形光栅及其自成像效应的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- 15 Zhang Baohao, Zhou Sumei, Yang Xiaoming, *et al.* Talbot effect of square-aperture microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0523001.
张宝昊, 周素梅, 杨晓铭, 等. 方形孔径微透镜阵列的塔尔博特效应[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0523001.
- 16 Qu Weijuan, Yan Aimin, Liu Liren, *et al.* Fractional Talbot effect of 2D skewed periodic array[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(3): 356-360.
曲伟娟, 闫爱民, 刘立人, 等. 二维斜周期阵列的分数塔尔博特效应[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 356-360.
- 17 Tan Qiaofeng, Zhang Yan, Jin Guofan. High-efficiency spatial color separation method based on fractional Talbot effect [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(11) : 975-977.
- 18 Isoyan A, Jiang F, Cheng Y C, *et al.* Talbot lithography: self-imaging of complex structures[J]. J Vac Sci Technol B, 2009, 27(6): 2931-2937.
- 19 Dunbar L A, Nguyen D, Timotijevic B, *et al.* Talbot lithography as an alternative for contact lithography for submicron features[C]. SPIE, 2014, 8974: 89740F.
- 20 Dammann H, Groh G, Kock M. Restoration of faulty images of periodic objects by means of self-imaging[J]. Applied Optics, 1971, 10(6): 1454-1455.
- 21 Stuerzebecher L, Fuchs F, Zeitner U D, *et al.* High-resolution proximity lithography for nano-optical components[J]. Microelectronic Engineering, 2014, 132: 120-134.
- 22 Sato T, Yamada A, Suto T, *et al.* Printability of defects in Talbot lithography[J]. Microelectronic Engineering, 2015, 143: 21-24.
- 23 Zanke C, Qi M H, Smith H I. Large-area patterning for photonic crystals via coherent diffraction lithography[J]. J Vac Sci Technol B, 2004, 22(6): 3352-3355.
- 24 Solak H H, Ekinci Y. Achromatic spatial frequency multiplication: a method for production of nanometer-scale periodic structures[J]. J Vac Sci Technol B, 2005, 23(6): 2705-2710.
- 25 Solak H H, Dais C, Clube F. Displacement TalbotLithography: a new method for high-resolution patterning of large areas[J]. Optics Express, 2011, 19(19): 10686-10691.

- 26 Solak H H, Dais C, Clube F, *et al.* Phase shifting masks in Displacement Talbot Lithography for printing nano-grids and periodic motifs[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 143: 74-80.
- 27 Wang L, Clube F, Dais C, *et al.* Sub-wavelength printing in the deep ultra-violet region using Displacement Talbot Lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 161: 104-108.