引用格式: LIU Yamei, MA Haihang, GU Yan, et al. Preparation of Double-sided Grating Structure Film by Vibration-assisted Nanoimprinting Lithography[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):0631002 刘亚梅,马海航,谷岩,等,振动辅助纳米压印制备双面光栅结构薄膜[J].光子学报,2022,51(6):0631002

# 振动辅助纳米压印制备双面光栅结构薄膜

刘亚梅,马海航,谷岩,黄洲,张顺

(长春工业大学机电工程学院,长春130012)

摘 要:针对纳米压印过程中压印胶填充率低导致图案转移质量不佳,压印力过大损坏模板表面形貌 等问题,提出一种基于压电驱动低频、低幅的振动辅助纳米压印方法制备光栅结构。在压印时施加横 向一维振动,减小纳米压印过程中所需的压印力,提高压印胶对模板空腔的填充率。为研究双面光栅 薄膜的周期变化对透射率的影响规律,运用时域有限差分法在波长 500~1 500 nm 范围内对不同周期参 数的双面光栅结构进行仿真分析,得到周期参数变化对透射率的影响规律。在研制的振动装置上进行 振动辅助纳米压印实验,并对制备出的双面光栅结构进行表面形貌表征以及透射率检测。实验结果表 明,与无振动纳米压印技术相比,压印胶填充率显著提高,并改善了图案转移质量,减少大面积表面缺 陷。在波长 500~1 500 nm 范围内,涂覆振动辅助纳米压印制备的双面光栅薄膜的 SiO<sub>2</sub>平均透射率提高4%,较无薄膜的 SiO<sub>2</sub>平均透射率提高6%。 关键词:纳米压印;光栅结构;振动辅助;薄膜;填充率;透射率

**中图分类号:**TH162 **文献标识码:**A

doi:10.3788/gzxb20225106.0631002

#### 0 引言

增透膜又称减反膜,在光学元件上涂覆增透膜可以有效减少光学元件表面处的反射光,增加光的透射率<sup>[1]</sup>。微纳结构阵列具有多种光学特性以及机械特性,例如增透、结构色<sup>[2]</sup>、疏水性<sup>[3]</sup>等。在工业应用中,利用微纳结构阵列的增透性能可以有效提高太阳能电池的光电转换效率<sup>[4]</sup>与显示器的可视性<sup>[5]</sup>。随着微纳结构制造技术的高速发展,微纳结构薄膜在增透膜中脱颖而出。光栅作为诸多传统微纳结构中的一种,其制备手段多、制造成本低,被应用于 3D 传感、车载光学、太阳能电池等众多领域。

由于微纳结构对加工技术的精度要求极高,目前微纳结构的制备手段主要集中在光刻技术上<sup>[6]</sup>。光刻 技术按曝光光源分为两类<sup>[7]</sup>,一类是以光子为光源的光刻技术,其工艺成本过高并且加工周期漫长,目前不 适合进行批量化加工;另一类是以粒子为光源的光刻技术,该技术可以制备出线宽10 nm以下高分辨率的微 纳图案,但是在曝光效率上不及光学光刻曝光<sup>[8]</sup>。纳米压印技术作为一种新颖的光刻技术,由普林斯顿大学 周郁教授于1995年提出<sup>[9]</sup>。该技术不同于传统光刻技术,其规避了传统光刻技术中的复杂工艺,以工艺流 程简单、制造成本低的特点受到广泛关注<sup>[10]</sup>。但纳米压印制备微纳结构时仍有一些问题需要解决:例如,压 印胶填充效率低下导致了图案转移效果不佳、压印力过大导致模板形貌损坏等。为了解决上述传统纳米压 印存在的问题,许多研究人员将振动引入了纳米压印加工工艺中。其中,超声波振动辅助纳米压印是一种 常见的在压印过程中施加振动的方法。MEKARUH等<sup>[11]</sup>在纳米压印技术中引入了超声波振动,施加振动 后压印过程中的气泡明显减少,压印效果有了很大提高。YUHW等<sup>[12]</sup>利用超声振动纳米压印使聚合物填 充率显著提高,不但改善了微结构表面形貌,还缩短了微结构成型时间。LUOH等<sup>[13]</sup>通过叠加超声振动对 熔融态玻璃进行充模成型的研究,证明了振动参数对填充率与成型时间有很大影响。虽然振动引起的冲击

http://www.photon.ac.cn

基金项目:中央引导地方科技发展资金吉林省基础研究专项(No.202002034JC),吉林省教育厅科学技术研究项目(No.JJKH20210722KJ) 第一作者:刘亚梅(1970—),女,教授,硕士,主要研究方向为机械电子工程/自由曲面精加工。Email:liuym\_cc@126.com

**通讯作者**:谷岩(1980—),男,副教授,博士,主要研究方向为微纳制造与数控装备。Email:guyan@ccut.edu.cn 收稿日期:2021-12-13;录用日期:2022-02-17

力可以减小粘弹性流体对模板空腔侧壁的摩擦力,从而提高填充率。但是,微纳结构的制备对加工精度要求极高,由于超声波振动的振动频率较高、振动幅度较大,会影响微结构转印的效果,甚至导致模板结构损坏。因此,需要一种新型振动辅助纳米压印方法解决上述问题。GUY等<sup>[14]</sup>通过振动辅助纳米压印方法有效提高了压印胶的填充率,制备出形貌完整的纳米柱结构。

本文提出一种基于压电驱动的低频率、低振幅的振动辅助纳米压印方法制备双面光栅结构。首先,运 用有限差分时域法(FDTD)对双面光栅结构在波长500~1500 nm范围内进行光学仿真分析,探究光栅周期 对透射率的影响关系,从而优化出透射性能最佳的双面光栅结构并作为纳米压印实验模板。通过建立振动 辅助纳米压印数学模型研究振动对压印胶填充行为影响的机理,通过仿真模拟得到了引入振动后填充率随 振动参数的变化规律,从而选择最佳振动参数。根据仿真结果进行振动辅助纳米压印,将制备出的双面光 栅结构进行表面形貌表征,验证了引入振动后压印胶的填充率明显提高,制备出的光栅表面完整、连贯。与 传统纳米压印相比,引入振动制备出了具有更高质量的光栅结构。最后对覆有振动辅助纳米压印制备的双 面光栅薄膜的SiO<sub>2</sub>进行透射率检测,相较于传统纳米压印制备的双面光栅薄膜的SiO<sub>2</sub>与无薄膜的SiO<sub>2</sub>透射 率得到显著提高。

### 1 双面光栅结构薄膜对透射性能的影响

#### 1.1 仿真模型建立

在进行振动辅助纳米压印实验之前,通过使用有限差分时域法对光栅结构进行仿真,以研究其周期变 化对光学性能的影响规律。仿真模型由三个部分组成,如图1。第一部分为光源,选择平面波光源(波长 500~1500 nm)作为仿真光源垂直入射至光栅结构。第二部分为光栅结构,材料选用后续实验所用压印光 刻胶。第三部分为基板,材料选用SiO<sub>2</sub>。在仿真的边界条件设置中,将X方向设置为反对称边界条件(Anti-Symmetric),Y方向设置为对称(Symmetric)边界条件,Z方向设置为完美匹配层(PML)边界条件。在光栅 结构与光源之间设置反射率监视器,基板中心设置透射率监视器。在双面光栅结构的设计中,相比于其他 参数对透射率的影响,周期参数对透射率的影响是主导性的。为了研究双面光栅结构的周期参数对透射率 的影响,通过调整上表面与下表面光栅的周期参数讨论光栅周期对透射率的影响规律。



图 1 FDTD 仿真模型示意 Fig. 1 Schematic of FDTD simulation model

#### 1.2 上表面光栅的周期对透射率的影响

为了研究上表面光栅结构的周期对透射率的影响规律,通过固定下表面光栅结构参数,仅改变上表面的周期参数进行讨论。将下表面光栅结构设置周期为2000 nm,占空比为0.5,光栅结构高度为500 nm。将上表面光栅结构周期分别设置为800 nm,1000 nm,1200 nm,1400 nm,占空比均为0.5,高度均为500 nm。基于结构参数的设置,仿真模拟不同周期的上表面光栅在波长500~1500 nm内的透射率,如图2。从图中可以观察到,上表面周期为800 nm的光栅在700 nm波长的透射率可以达到95%。通过计算,上表面光栅结构的周期参数与在500~1500 nm波长范围内的平均透射率的对应关系如表1。当下表面光栅尺寸参数一定,上表面光栅占空比、高度不变时,上表面光栅周期越小,平均透射率越高。



图 2 波长 500~1 500 nm 范围内不同周期上表面光栅的透射率

Fig. 2 Transmittance of upper surface gratings with different periods in the wavelength range of  $500 \sim 1500$  nm

表1 上表面光栅周期参数与平均透射率的对应关系

Table 1	Correspondence between	the period parameters o	of the upper surface gratings	s and the average transmittance
---------	------------------------	-------------------------	-------------------------------	---------------------------------

Period/nm	Average transmittance
800	92.7%
1 000	91.9%
1 200	91.6%
1 400	90.8%

#### 1.3 下表面光栅的周期对透射率的影响

为了研究下表面光栅结构的周期对透射率的影响规律,设置上表面光栅周期为1000 nm,占空比为0.5, 高度为500 nm。将下表面光栅结构周期分别设置为1200 nm,1400 nm,1600 nm,1800 nm,占空比与高度 均设置为0.5、500 nm。仿真结果如图3,从图中可以看出随着波长的增加,四条透射率曲线均呈上升趋势。 下表面光栅结构的周期参数与在500~1500 nm波长范围内的平均透射率的对应关系如表2。当上表面光 栅结构参数一定,下表面光栅占空比、高度不变时,下表面光栅周期越大,平均透射率越高。





Fig. 3 Transmittance of lower surface gratings with different periods in the wavelength range of  $500 \sim 1500$  nm

表 2 下表面光栅周期参数与平均透射率的对应关系

Table 2	Correspondence	between the per	iod parameters	of the lower s	surface gratings a	nd the average	transmittance
---------	----------------	-----------------	----------------	----------------	--------------------	----------------	---------------

Period/nm	Average transmittance		
1 200	90.8%		
1 400	91.2%		
1 600	92.1%		
1 800	93.1%		

通过对FDTD仿真结果的分析,分别得到了上表面光栅结构与下表面光栅结构的周期对透射率的影响 关系,并且选择周期为800 nm,占空比为0.5,高度为500 nm的光栅结构作为压印实验的上表面结构。选择 周期为1800 nm,占空比为0.5,高度为500 nm的光栅结构作为压印实验的下表面结构。

#### 2 振动辅助纳米压印机理

#### 2.1 振动辅助纳米压印数学模型的建立

表面图案转移是纳米压印技术的关键步骤之一,而压印胶的填充率是影响表面图案转移质量的重要因素。在压印过程中,如果压印胶填充率低,会降低图案转移后微结构的复制率,导致复制精度不能达到预期。在平面对平面的压印过程中,由于压印胶的粘附力和压印胶与模板之间摩擦力的共同作用,产生了一个与压印力方向相反的阻力,使得压印过程中所需的压印力变大。

压印胶和模板空腔侧壁之间的受力[15]为

$$F' = \mu H \tag{1}$$

$$H = \sqrt{1.5\pi\gamma K r^3} \tag{2}$$

式中,F'为压印胶在模板空腔侧壁所受的力;μ为压印胶与模板侧壁间的摩擦系数;H为压印胶与侧壁间的 粘附力;γ为压印胶与模板间所存在的粘附能;K为两材料(模板与压印胶)的综合弹性模量;r为侧壁接触面 的有效半径。

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \tag{3}$$

$$\frac{1}{K} = 0.75 \left( \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right) \tag{4}$$

式中,γ<sub>1</sub>为模板本身的表面能;γ<sub>2</sub>为压印胶本身的表面能;γ<sub>12</sub>为模板与压印胶间的界面能;*E*<sub>1</sub>为模板的弹性模 量;*E*<sub>2</sub>为压印胶的弹性模量;v<sub>1</sub>为模板的泊松比;v<sub>2</sub>为压印胶的泊松比。于是,所需压印力*F*为

$$F = F' \tag{5}$$

压印胶层厚度与压印力的关系由 Reynolds 定理和 Navier-Stockes 方程得到<sup>[16]</sup>,即

$$h_i = \sqrt[3]{\frac{3\pi\eta v R^4}{2F}} \tag{6}$$

式中,*h*<sub>i</sub>是未填入模板空腔的压印胶层高度;η是压印胶粘度;v是压印速度;R是压印胶与模板的接触半径; F是压印力。

通过增加压印力,使得一部分压印胶被填充到微结构模板空腔内,此时剩余部分压印胶层厚度减小。 但是在施加压力时,压印胶会与模板发生挤压,从而产生挤压力。挤压增加了侧壁的接触半径,由式(1)、 (2)可得粘附力与摩擦力也会相应增大,导致所需压印力变大,从而对压印产生影响。

本文在压印过程中引入一种压电驱动的低频率、低振幅的横向一维振动的方法,在这种周期性振动下 压印胶承受正弦变化的应力 σ,表示为

$$\sigma_t = \sigma_{\max} \sin(\omega t) \tag{7}$$

式中, omax 为应力最大值; w为角频率; t为时间。

由于施加振动所产生的冲击力的影响,实际应力σ发生变化,即

$$\sigma = \sqrt{F'^2 + \sigma_t^2} \tag{8}$$

从图4中压印胶的受力分析可以看出,在压印胶填充模板空腔的过程中,由于施加振动产生的应力σ, 压印胶在横向上从两侧向中间流动,使得压印胶与模板空腔侧壁的有效接触面积减小。由式(1)、(2)、(5) 可知,当压印胶侧壁接触面的有效半径r减小时,压印胶与侧壁间的粘附力H、压印胶在模板空腔侧壁所受 的力F'相应减小,使得在压印过程中所需的压印力F减小。通过所建立的数学模型验证了引入横向一维振 动可以有效减小压印实验中所需要的压印力,提高压印胶对模板的填充效果。



图 4 振动辅助纳米压印数学模型 Fig. 4 Mathematical model of vibration-assisted nanoimprint mechanism

#### 2.2 振动参数对填充效果的影响

在施加振动的过程中,如果振动幅度大于光栅横向线宽,会导致过大的振幅破坏模板以及制备出的微 结构表面形貌。由于上、下表面光栅是两种不同周期尺寸的光栅结构,振动参数的研究分别针对上、下表面 光栅结构两部分进行讨论。

对于周期为800 nm,占空比为0.5的上表面光栅结构,其横向线宽为400 nm。在研究振动频率对填充率的影响时,设置振动幅度恒定为100 nm,振动频率分别为50 Hz,100 Hz,150 Hz,200 Hz,仿真结果如图5。 从图中可以观察到振动频率对填充率影响并不明显,四种振动频率对应填充率均在65%左右,最高与最低 填充率仅相差1%。当振动幅度一定时,振动频率对填充率几乎没有影响。



图 5 振动频率对上表面填充率的影响 Fig. 5 Influence of vibration frequency on filling rate of the upper surface

通过设置振动频率为100 Hz,振动幅度分别为100 nm,200 nm,300 nm,400 nm 来探究振动幅度对上表 面光栅结构填充率的影响规律,仿真结果如图 6。从图中可以观察到振动幅度为300 nm 时,填充率达到最 大值约为90%。当振动幅度为400 nm 与光栅横向线宽相同时,填充率下降到了80%。这可能是因为振动 幅度过大,压印胶横向加速度增加,由于惯性作用部分压印胶与模板侧壁发生粘连,从而导致填充率下降。 并且当振幅过大时,压印胶不断撞击模板光栅侧壁,容易导致模板表面形貌被破坏。

由于振动频率对填充率的影响不大,针对下表面光栅的振动参数仅进行振动幅度的讨论。下表面光栅 周期为1800 nm,占空比为0.5,高度为500 nm,设置振动频率恒定100 Hz,振动幅度分别为400 nm,500 nm, 600 nm,700 nm,仿真结果如图7。从图中可以看到,振动幅度为600 nm时,填充率可以达到91.7%。当振 动幅度为700 nm时,填充率略有下降,为88.8%。



图 6 振动幅度对上表面填充率的影响 Fig. 6 Influence of vibration amplitude on filling rate of the upper surface



图 7 振动幅度对下表面填充率的影响 Fig. 7 Influence of vibration amplitude on filling rate of lower surface

经过仿真分析,选用振动频率与振动幅度分别为100 Hz、300 nm 作为制备上表面光栅结构的振动参数; 选用振动频率与振动幅度分别为100 Hz、600 nm 作为制备下表面光栅结构的振动参数。

## 3 振动辅助纳米压印制备双面光栅实验

#### 3.1 实验预处理

图 8 为振动辅助纳米压印实验流程。首先,使用乙醇溶液清洗基板以除去基板表面的杂质与污渍。随 后将清洗好的基板放入预热到 90℃的干燥箱烘干 5 min,通过此步骤处理之后的基板表面几乎没有气泡,可 以保证压印胶充分附着到基板表面。使用 NIP-010 负型光刻胶作为压印胶,将压印胶以 2 500 r/min 的转速 旋涂到基板上,旋涂时间为 20 s。将旋涂好压印胶的基板放入 80℃的干燥箱内烘干 1 min,以消除在旋涂压 印胶时产生的微小气泡。将准备好的基板放置于振动辅助纳米压印装置上进行压印实验,振动辅助纳米压 印装置如图 9。



图 8 振动辅助纳米压印实验流程 Fig. 8 Flow chart of vibration-assisted nanoimprinting experiment



图 9 振动辅助纳米压印装置 Fig. 9 Vibration-assisted nanoimprinting device

#### 3.2 振动辅助纳米压印实验

在进行基板上表面结构压印时,将经过预处理后的基板放置于振动平台中央,软模板固定在压印装置 下方。通过计算机调整X、Y轴位置,使软模板与基板在Z轴方向重合。驱动振动平台,在XY平面上产生频 率为100 Hz,振幅为300 nm的横向一维振动。使用计算机控制压印装置沿Z轴方向的下降位移,当软模板 与基板接触时,压印装置下降的步进位移调整为100 nm。继续下压,当振动装置底部的测力计显示40 N时 停止下压,持续15 s,此时软模板处于轻微形变状态。随后,将软模板与基板放入紫外固化箱内,固化时间为 15 min。采用揭开式脱模的方法进行脱模,上表面光栅结构制备完成。

进行基板下表面压印时,需要重新进行实验预处理,保证基板下表面符合压印实验要求。在进行预处 理之后,将基板下表面朝上放置于振动平台中央。在XY平面施加频率为100 Hz,振幅为600 nm的横向一 维振动,压印步骤与制备上表面光栅压印步骤相同。压印完成后紫外固化15 min,最后采用揭开式脱模方 法脱模,下表面光栅结构制备完成。

## 4 结果与讨论

基于振动辅助纳米压印制备出的两种不同周期参数的光栅结构,其表面形貌表征如图10。在引入振动 之后,制备出的光栅结构表面形貌完整,对模板的复制精度良好。制备出的光栅结构高度与模板光栅结构 高度基本一致,这说明在压印时,压印胶对模板空腔的填充效果良好,可以实现对模板高质量的复制。







(b) Vertical view of lower surface grating



(c) End view of upper surface grating



(d) End view of lower surface grating

图 10 光栅结构 SEM 检测图 Fig. 10 SEM inspection image of grating structure

为了研究传统纳米压印与振动辅助纳米压印的区别,通过设计对比实验进行研究。在进行传统纳米压 印实验时,使用与振动辅助纳米压印相同的压印力40N进行压印,并对其表面进行SEM形貌检测,检测结 果如图11。从图中可以看出,光栅结构表面出现大面积的粘连现象,表面缺陷严重。这是因为在没有引入 振动的情况下,40N的压印力不足以使压印胶大量填充到模板空腔内,导致填充效果不理想,光栅图案转移 质量较差。

对振动辅助纳米压印制备好的双面光栅结构 SiO<sub>2</sub>、传统纳米压印制备的双面光栅结构 SiO<sub>2</sub>与无薄膜的 SiO<sub>2</sub>分别进行透射率检测,检测结果如图 12。在 500~1 500 nm 波段范围内振动辅助纳米压印制备的双面 光栅结构 SiO<sub>2</sub>平均透射率为 92%,传统纳米压印制备的双面光栅结构 SiO<sub>2</sub>平均透射率为 88%,而无薄膜的 SiO<sub>2</sub>平均透射率为 86%。振动辅助纳米压印制备出的双面光栅结构薄膜对比无薄膜的 SiO<sub>2</sub>平均透射率提 升了 6%,传统纳米压印制备出的双面光栅结构薄膜由于表面形貌不佳,影响了透射性能,较无薄膜的 SiO<sub>2</sub>透射率仅提高了 2%。



图 11 传统纳米压印所制备的光栅结构 SEM 检测图 Fig. 11 SEM inspection image of grating structure prepared by traditional nanoimprint



图 12 振动辅助纳米压印、传统纳米压印制备的双面光栅结构 SiO<sub>2</sub>与无薄膜 SiO<sub>2</sub>透射率检测图

# 5 结论

本文提出了一种基于压电驱动的新型振动辅助纳米压印方法制备双面光栅结构。通过对双面光栅进 行光学仿真分析,探究上、下表面光栅周期参数对透射率的影响关系。对振动辅助纳米压印进行理论分析 与实验,得出以下结论:1)在使用纳米压印技术制备光栅结构时,通过施加一维横向低频率、低振幅的振动, 可以有效提高压印胶对模板的填充效果,减小传统纳米压印所需的压印力,在保护模板的同时实现高质量 的光栅结构复制。2)使用FDTD对双面光栅结构进行光学性能仿真分析,研究光栅周期参数变化对透射率

Fig. 12 The transmittance test diagram of SiO<sub>2</sub> without film and SiO<sub>2</sub> with double-sided grating structure film prepared by vibration-assisted nanoimprinting and conventional nanoimprinting

的影响关系。所有尺寸参数一定时,上表面光栅周期越小,下表面光栅周期越大,平均透射率越高。最终选择制备的双面光栅结构上表面光栅周期为800 nm,下表面光栅周期为1800 nm。经过测试,传统纳米压印 所制备出覆有双面光栅结构薄膜的SiO<sub>2</sub>在500~1500 nm 波段内的平均透射率为88%,振动辅助纳米压印 制备的覆有双面光栅结构薄膜的SiO<sub>2</sub>平均透射率高达92%,较无薄膜的SiO<sub>2</sub>平均透射率提高了6%。3)将 进行振动辅助纳米压印制备出的光栅结构与传统纳米压印制备出的光栅结构分别进行表面形貌检测。施 加振动制备出的光栅高度与模板空腔高度基本一致,证实了施加振动后压印胶的填充率有明显提升,光栅 表面形貌得到改善。

#### 参考文献

- WANG K X, YU Z, SANDHU S, et al. Condition for perfect antireflection by optical resonance at material interface [J]. Optica, 2014, 1(6):388-395.
- [2] DONG Xiaobin, ZHOU Tianfeng, HE Yupeng, et al. Research on micro-nano structure machining and property manipulation of the structural color surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 59(19):239-245 董晓彬,周天丰,贺裕鹏,等.微纳结构飞切加工与表面结构色调控[J].机械工程学报,2021,59(19):239-245.
- [3] WANG D, SUN Q, HOKKANEN M J, et al. Design of robust superhydrophobic surfaces[J]. Nature, 2020, 582:55–59.
- [4] LIU X, LI K, SHEN J, et al. Hot embossing of moth eye-like nanostructure array on transparent glass with enhanced antireflection for solar cells[J]. Ceramics International, 2021, 47(13):18367-18375.
- [5] TAN G, LEE J H, LAN Y H, et al. Broadband antireflection film with moth-eye-like structure for flexible display applications[J]. Optica, 2017, 4(7):678-683.
- [6] LAN H, LIU H. UV-nanoimprint lithography: structure, materials and fabrication of flexible molds [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 13(5):3145-3172.
- [7] SHAOW, LIANG H. Challenges and solutions of lithography[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2021, 29(4):1-4. 邵微,梁红波.光刻技术的挑战和解决思路[J]. 精细与专用化学品, 2021, 29(4):1-4.
- [8] OKAZAKI S. High resolution optical lithography or high throughput electron beam lithography: the technical struggle from the micro to the nano-fabrication evolution[J]. Microelectronic Engineering, 2015, 133:23–35.
- [9] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(21):3114-3116.
- [10] SCHOOT J, SCHIFT H. Next-generation lithography- an outlook on EUV projection and nanoimprint [J]. Advanced Optical Technologies, 2017, 6(3-4):159-162.
- [11] MEKARU H, TAKAHASHI M. Ultrasonic nanoimprint on engineering plastics at room temperature[C]. 2007 Digest of Papers Microprocesses and Nanotechnology, 2007:300-301.
- [12] YU H W, CHI H L, JUNG P G, et al. Polymer microreplication using ultrasonic vibration energy[J]. Journal of Micro/ Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2009, 8(2):55-56.
- [13] LUO H, YU J, LOU H, et al. Thermal/tribological effects of superimposed ultrasonic vibration on viscoelastic responses and mold-filling capacity of optical glass: A comparative study[J]. Ultrasonics, 2020(108C):106234.
- [14] GU Y, CHEN S, LIN J, et al. High-quality efficient anti-reflection nanopillar structures layer prepared by a new type vibration-assisted UV nanoimprint lithography[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61:461-472.
- [15] GUO Y, GANG L, ZHU X, et al. Analysis of the demolding forces during hot embossing [J]. Microsystem Technologies, 2007, 13(5-6):411-415.
- [16] 周伟民.纳米压印技术[M].北京:科学出版社, 2012.

# Preparation of Double-sided Grating Structure Film by Vibrationassisted Nanoimprinting Lithography

LIU Yamei, MA Haihang, GU Yan, HUANG Zhou, ZHANG Shun (College of Mechanical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: To solve the problems of the low filling rate of the photoresist leads to poor pattern transfer quality, and excessive imprinting force damages the surface morphology of the template in the nanoimprinting process. A low-frequency and low-amplitude vibration-assisted nanoimprinting method based on piezoelectric driving is proposed. This method is used to prepare grating structures. Applying lateral one-dimensional vibration reduces the imprinting force required for nanoimprinting and improves the filling rate of the photoresist to the template cavity in nanoimprinting process. To study the influence of the periodic change of the double-sided grating film on the transmittance, the Finite Difference Time Domain (FDTD) method is used to simulate and analyze the double-sided grating structure with different period parameters in the wavelength range of  $500 \sim 1500$  nm. The influence law of period parameter on transmittance is obtained. When all the dimension parameters of the grating structure are constant, the smaller the upper surface grating period, the larger the lower surface grating period, and the higher the average transmittance. The double-sided grating structure is selected to prepare the upper surface grating period of 800 nm, and the lower surface grating period of 1 800 nm. Study the mechanism of vibration effect on photoresist filling by establishing a mathematical model of vibration-assisted nanoimprint. The variation law of the filling rate with the vibration parameters after the vibration is introduced by the simulation simulation. Simulation results show that the vibration frequency has almost no effect on the filling rate when the vibration amplitude is constant. As the vibration amplitude increases, the filling rate first increases and then decreases. Through simulation analysis, the frequency of 100 Hz and the amplitude of 300 nm are selected as the vibration parameters of the upper surface grating. The frequency of 100 Hz and the amplitude of 600 nm are selected as the vibration parameters of the lower surface grating. The vibration-assisted nanoimprinting experiment is carried out on the developed vibration device. Characterize the surface topography of the double-sided grating structure, and perform the transmittance test. Experimental results show that compared with vibration-free nanoimprinting lithography technology, the filling rate of photoresist is significantly improved. It also improves the quality of pattern transfer and reduces large-area surface defects. The height of the grating prepared by applying vibration is basically the same as the height of the template cavity. It is confirmed that the filling rate of the photoresist is significantly improved after vibration applying, and the surface topography of the grating is improved. By the transmittance detection, compared with  $SiO_2$  without film, the average transmittance of  $SiO_2$  with double-sided grating film prepared by vibration-assisted nanoimprinting is increased by 6% in the wavelength range of  $500 \sim 1500$  nm.

**Key words**: Nanoimprint lithography; Grating structure; Vibration-assisted; Film; Filling rate; Transmittance

OCIS Codes: 310.6628; 240.0310; 050.2770; 050.6624

Foundation item: Central Government Guides the Local Science and Technology Development Fund Jilin Province Basic Research Project (No.202002034JC), Jilin Province Educational Department Scientific Research Planning Project (No. JJKH 20210722KJ)