

## 基于超表面和 MEMS 的结构光投影芯片研究

翟雷应<sup>1,2\*</sup>, 赵礼宇<sup>1</sup>, 王义杰<sup>1</sup>, 南敬昌<sup>1,2</sup><sup>1</sup>辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;<sup>2</sup>辽宁省无线射频大数据智能应用重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105

**摘要** 结构光三维成像中广泛使用的数字光处理(DLP)投影仪存在结构复杂、设备体积大及投影非线性等问题,制约了结构光三维成像在高探测精度、小探测场景领域的应用。提出了一种集成超表面阵列和微机电系统(MEMS)二维扫描平台的结构光投影芯片设计。设计了基于几何相位原理的超表面阵列,用于生成格雷码和相移法混合编码结构光条纹。通过二维扫描平台突破单一静态超表面的限制,实现了基于时间编码的结构光条纹投影。结果表明:所设计的超表面结构对入射光具有良好的线性相位调制能力,光源转换效率为 88.61%;生成的相移条纹符合正弦分布特性,很好地解决了 DLP 投影非线性问题;产生的条纹宽度均匀,最小宽度为 2 mm,探测精度可达亚毫米级。有限元分析结果表明:所设计的二维平台的最小模态频率为 511.91 Hz,抗干扰能力强,响应时间为 2.4 ms,帧率为 333 Hz,投影速率高。芯片尺寸为 3 mm×3 mm。最后设计了芯片的集成制造工艺流程,为高探测精度、高投影速率微型化投影设备的制造提供了理论模型和系统解决方案。

**关键词** 表面光学; 结构光; 三维成像; 超表面; 微机电系统

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231445

## 1 引言

结构光三维成像<sup>[1-4]</sup>作为光场成像中的一种主动三维探测技术,具有高精度、抗干扰等特点,已被广泛应用于工业测量、文物保护、医学成像等领域。当前,结构光三维成像系统中的主流投影设备为数字光处理(DLP)<sup>[5]</sup>投影仪,其具有投影清晰度高、对比度强等优点,其核心部件为数字微镜器件(DMD)。但是,DLP系统的结构和成像过程复杂。对于预投影图案,DLP系统先将图案转换为DMD阵列控制信号,然后通过控制DMD单元偏转角度实现对入射光线的控制。受控光线通过色轮等光学元件照射在目标探测物体上,生成预定图案。复杂的处理电路和精密光学部件使得DLP无法实现设备小型化。而且,DLP投影仪存在投影非线性<sup>[6]</sup>,导致投影的相移条纹光强呈非正弦变化。这种非正弦波形引起的相位误差是测量的主要误差来源,需要额外进行非线性Gamma校正<sup>[7]</sup>和误差补偿才能获得精确的结果,这给后续算法开发和程序设计增加了难度。

对于投影设备的小型化以及非线性等问题的改善,国内外研究人员进行了探索。Heist等<sup>[8]</sup>提出一种基于LED阵列的三维结构光成像技术,阵列尺寸

为 136 mm×136 mm,每秒投影 330 幅,投影速率高,仅通过简单的驱动电路和光学镜头就能完成投影系统的搭建,系统整体尺寸小。其成像精度取决于LED阵列的空间排布,对LED器件尺寸有很高要求。Zhang<sup>[9]</sup>提出了基于投影仪离焦的光栅投影三维测量方案,该方案较好地解决了投影仪的非线性问题。Zhu等<sup>[10]</sup>简化了投影设备中的光学部件,通过DMD与偏振片的组合实现了投射多幅偏振编码结构光图案。但是,上述方案均难以兼顾DLP投影仪小型化和改善投影非线性。

近年来,超表面<sup>[11-15]</sup>以其强大的光源调控能力引起了国内外研究人员的广泛关注。超表面是一种亚波长结构的新兴平面光学元件,能够对光的偏振、振幅、相位等进行精确调控,具有体积小、性能优良、集成度高等特点,已被广泛应用于全息成像、三维成像、特殊光束激发等领域<sup>[16-18]</sup>。超表面的微纳尺寸结构和半导体兼容制造工艺,降低了超表面单元与电子电路芯片、微机电系统(MEMS)芯片<sup>[19-20]</sup>的集成难度。

笔者提出了一种芯片级的结构光投影器件设计方案:将超表面阵列与MEMS二维扫描平台集成,通过二维扫描平台运动实现超表面阵列单元分别与光源高精度耦合,投影出一系列结构光条纹。超表面单元生

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-01-14; 录用日期: 2024-01-30; 网络首发日期: 2024-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61971210)、辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300275)、辽宁工程技术大学横向课题(21-2334)

通信作者: \*zlygs@hotmail.com

成符合格雷码和相移法条纹分布特性的结构光条纹, 条纹宽度均匀、对比度强, 确保了投影条纹的探测精度。二维扫描平台突破了单一静态超表面元件的限制, 实现了结构光条纹的高速动态投影。两者集成减少了对电路的依赖, 有效减小了结构光投影系统中器件的体积, 可以满足高探测精度、高投影速率的微型化投影设备的设计需求。

## 2 设计方案与基本原理

### 2.1 结构光投影芯片结构设计

所提出的结构光投影芯片集成超表面阵列和

MEMS 二维扫描平台, 其结构如图 1(a) 所示。投影芯片包含了超表面阵列、梳齿驱动器、蛇形梁、驱动电极等结构。芯片可分为器件层 1、器件层 2 和基底层, 如图 1(b) 所示。超表面阵列位于器件层 1 的平台中心处, 器件层 1 和器件层 2 的梳齿驱动器分别实现器件层在 X、Y 方向的运动。最终的平台运动位移为两层结构运动位移的矢量叠加。光路通孔组位于基底层, 用于实现准直光的入射, 入射光波长为 605 nm。蛇形梁为驱动结构提供较小的弹性系数, 降低驱动电压。三层结构之间通过 SiO<sub>2</sub> 层实现电隔离, 通过 Au 焊盘引出 6 组驱动电极。

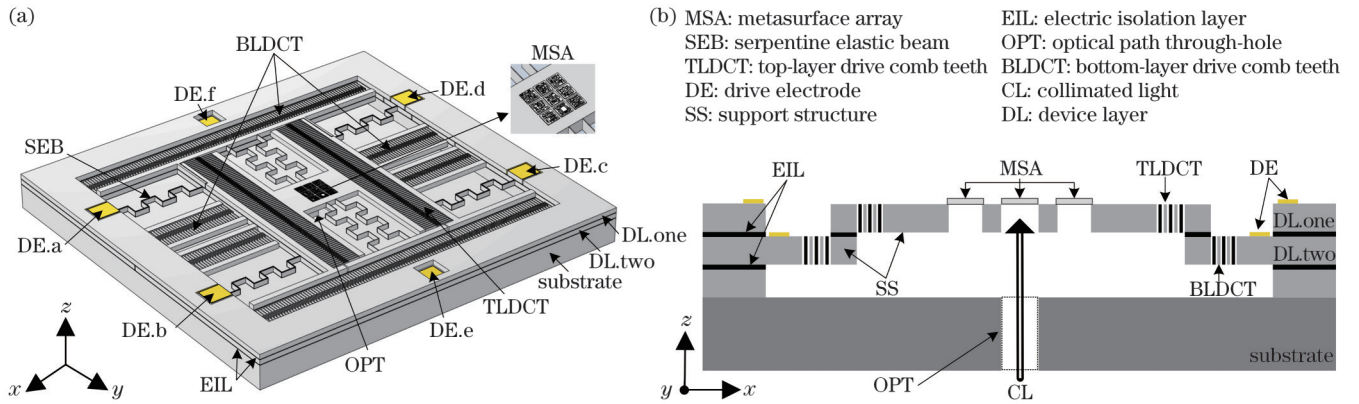


图 1 结构光投影芯片的三维结构图和剖面图。(a) 三维结构图; (b) 剖面图

Fig.1 Three-dimensional structural and cross-sectional diagrams of the structured light projection chip. (a) Three-dimensional structural diagram; (b) cross-sectional diagram

设计的二维扫描平台基于静电梳齿驱动原理工作 (在电极 a、b、c 上施加偏压, 器件层 1 在 X 方向上往复扫描; 在电极 d、e、f 上施加偏压, 器件层 2 在 Y 方向上往复扫描), 实现超表面阵列单元依次与底部准直光源耦合,

进而投射出一系列基于时间编码的结构光图案。

超表面基于几何相位原理设计而成, 其单元由众多不同偏转角度的纳米柱组成。如图 2(a) 所示, 超表面阵列包含 9 个超表面单元, 超表面单元以 3×3 方式等距

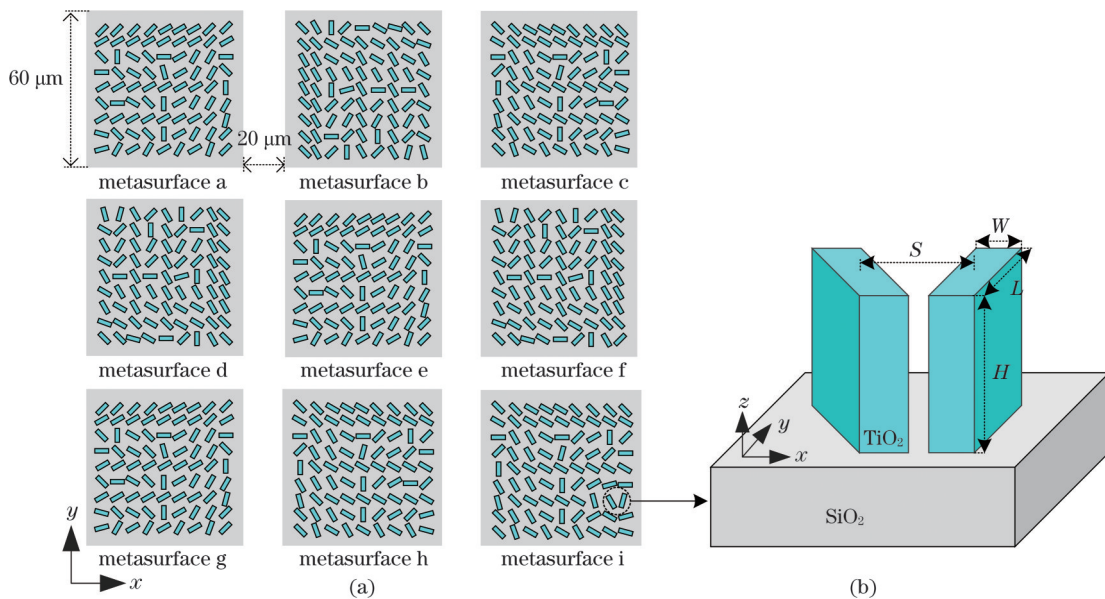


图 2 超表面阵列示意图以及纳米柱结构图。(a) 超表面阵列示意图; (b) 纳米柱结构图

Fig.2 Schematics of the metasurface array and nanopillar structure diagram. (a) Schematic of the metasurface array; (b) nanopillar structure diagram

分布。每个单元尺寸为  $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ , 单元之间的间隔为  $20\ \mu\text{m}$ 。因此, 切换超表面单元的单向位移量为  $80\ \mu\text{m}$ 。如图 2(b) 所示, 超表面单元中的纳米柱材质为  $\text{TiO}_2$ , 基底材质为  $\text{SiO}_2$ 。根据入射光波长等特性, 设计纳米柱长  $L$ 、宽  $W$ 、高  $H$ 、分布距离  $S$  等尺寸参数, 以实现入射光的高转换效率以及良好的相位调制性能。

## 2.2 几何相位超表面设计原理与结构光编码方案

几何相位超表面通过微纳米结构引入光学相位差, 不依赖于共振特性或材料的色散特性就可以实现对入射光的调控。采用的  $\text{TiO}_2$  纳米柱介质易于集成在半导体硅基底上, 与 MEMS 二维平台制作工艺兼容。对于几何相位超表面, 可以通过琼斯矩阵  $T$  表征其透射特性, 即

$$T = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中  $t_{xx}$  表示  $x$  方向的线偏振光入射时  $x$  方向的透射系数, 其余同理。同时, 定义一个旋转矩阵  $R(\theta)$ ,

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中  $\theta$  为纳米柱单元的旋转角。当右旋圆偏振光入射时, 透射矩阵为

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{2}(t_{xx} + t_{yy}) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2}(t_{xx} - t_{yy}) \exp(-i2\theta) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

式(3)中等号右侧第一项为透射后的同向圆偏振光, 第二项为调制了  $2\theta$  相位的交叉圆偏振光。当纳米柱偏转  $\theta$  后, 交叉圆偏振光的偏振相位是偏转前的 2 倍。左旋圆偏振光同理。因此, 通过设计纳米柱尺寸和偏转角度, 可以实现对入射光的调控。

为满足高精度三维成像, 采用基于时间编码的混合编码结构光方案。编码条纹由 5 幅格雷码结构光条纹与 4 幅四步相移法编码条纹 (以下简称“相移条纹”) 组成。格雷码条纹的光强呈离散分布, 经被测目标调制后, 可得到目标的绝对相位信息。格雷码条纹如图 3(a)~(e) 所示。相移条纹的光强呈正弦分布, 在绝对相位周期内可以得到目标的相对相位信息。两种编码条纹结合可以大幅提升三维成像精度。相移条纹如图 3(f)~(i) 所示。

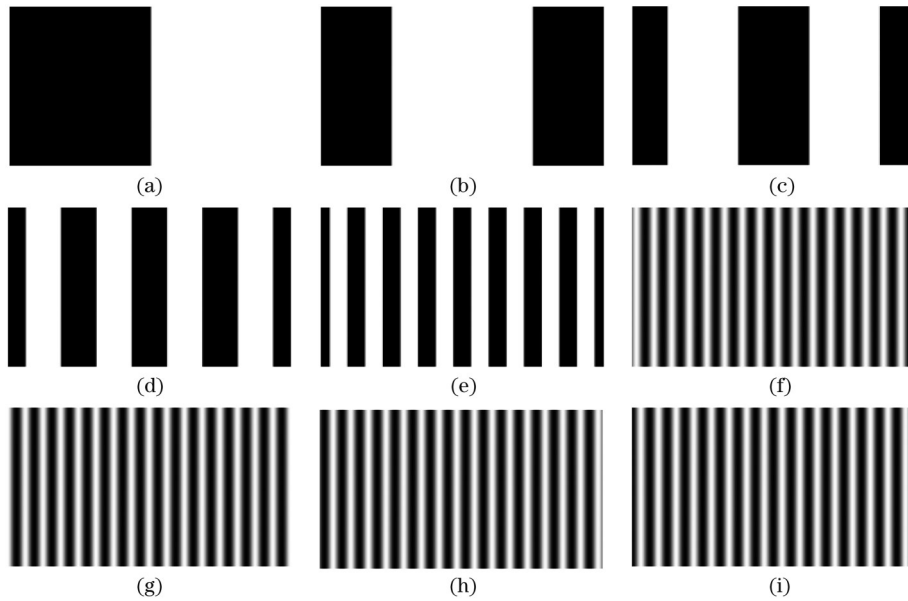


图 3 混合编码结构光条纹

Fig. 3 Hybrid coded structured light patterns

对于上述混合编码结构光条纹, 通过 Gerchberg-Saxton 算法 (以下简称“GS”算法) 求解其相位信息。

GS 算法是一种基于标量衍射理论的可恢复实际振幅相位的算法, 其流程如图 4 所示。

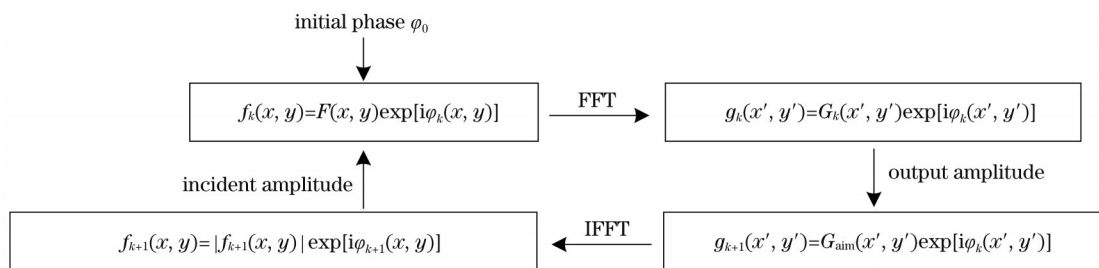


图 4 GS 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of GS algorithm

相位求解过程如下:

- 1) 取任意相位作为入射面的初始相位分布  $\varphi_0$ , 将其与入射振幅  $F(x, y)$  结合, 得到入射面的复振幅  $f_k(x, y)$ , 此时  $k=0$ 。
- 2) 对复振幅  $f_k(x, y)$  进行傅里叶变换 (FFT), 得到复振幅  $G_k(x', y')$ 。
- 3) 取  $G_k(x', y')$  的相位函数  $\varphi_k(x', y')$  与目标幅度函数  $G_{\text{aim}}(x', y')$  结合, 得到新的光场分布函数  $g_{k+1}(x', y')$ 。
- 4) 对  $g_{k+1}(x', y')$  作傅里叶逆变换, 得到  $f_{k+1}(x, y)$ 。
- 5) 取  $f_{k+1}(x, y)$  中的相位  $\varphi_{k+1}(x, y)$  并将其代入步骤 1), 替代初始任意相位后继续进行迭代, 重复上述

运算步骤。当输出面光场分布满足设计要求时停止迭代, 输出最终相位。

通过上述方案, 可以求解得到对应波长下超表面纳米柱的尺寸和混合编码结构光条纹的相位信息, 进而生成所需的超表面阵列。

### 2.3 MEMS 二维平台驱动原理

MEMS 二维扫描平台通过静电梳齿驱动, 能够实现超表面单元的快速切换, 从而高速投射出结构光条纹。二维扫描平台的制造工艺与 IC 制作工艺兼容, 易于集成制造。静电梳齿驱动器具有驱动力密度高、响应速度快、位移与驱动电压线性相关等优点, 其结构如图 5 所示。

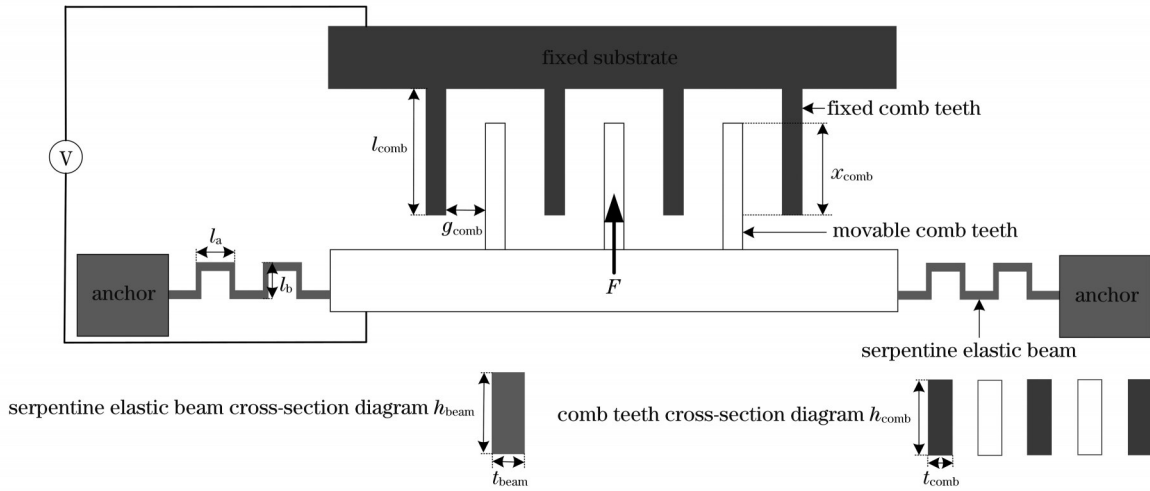


图 5 静电梳齿驱动器结构示意图

Fig. 5 Schematic of electrostatically driven comb structure

静电梳齿驱动器中的固定梳齿和可动梳齿尺寸一致, 梳齿长度为  $l_{\text{comb}}$ , 宽度为  $t_{\text{comb}}$ , 梳齿厚度为  $h_{\text{comb}}$ 。可动梳齿通过弹性梁支撑, 与固定梳齿等距交错排列, 其间距为  $g_{\text{comb}}$ 。固定梳齿与可动梳齿的交叠长度为  $x_{\text{comb}}$ , 梳齿长度和交叠长度决定了驱动器的最大行程。当在固定梳齿与可动梳齿之间加载驱动电压  $V$  时, 梳齿间会产生静电吸引力  $F$ 。该力的计算公式为

$$F = \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{n_{\text{comb}} \cdot \epsilon \cdot h_{\text{comb}} \cdot V^2}{g_{\text{comb}}}, \quad (4)$$

式中:  $n_{\text{comb}}$  为梳齿的成对数;  $\epsilon$  为极板间的相对介电常数;  $C$  为交叠梳齿间的平板电容值。

蛇形梁由数量为  $n_{\text{beam}}$ 、长度分别为  $l_a$  和  $l_b$  的单元梁折叠串联而成, 其弹性系数约为

$$k \approx \frac{48GJ}{l_a^2 n_{\text{beam}}^3 \left( \frac{GJl_a}{EI_x} + l_b \right)}, \quad (5)$$

式中:  $G$  为扭转模量;  $I_x$  为惯性矩;  $J$  为扭转常数;  $E$  为蛇形梁材料的弹性模量。考虑残余应力时, 弹性系数的计算异常复杂, 常通过有限元工具进行求解。当确定静电吸引力  $F$  和蛇形梁弹性系数  $k$  后, 由胡克定理可求得静电梳齿驱动器产生的位移。

## 3 分析与讨论

### 3.1 超表面设计结果与分析

几何相位超表面单元中的纳米柱尺寸参数决定了其对入射光的转换效率, 通过调整纳米柱的偏转角度可以实现对入射光的相位调控。当纳米柱偏转角度固定时, 通过时域有限差分法 (FDTD) 分析连续波长入射光下不同尺寸纳米柱对入射光的转换效率, 结果如图 6(a) 所示。当  $\text{SiO}_2$  基底厚度为  $1 \mu\text{m}$ , 纳米柱尺寸为  $L=285 \text{ nm}$ 、 $W=75 \text{ nm}$ 、 $H=650 \text{ nm}$  时, 纳米柱对  $605 \text{ nm}$  波长入射光的最高转换效率为  $88.61\%$ ; 而且当纳米柱高度  $H$  在  $640 \sim 660 \text{ nm}$  范围内时, 转换效率均高于  $88\%$ 。这为  $\text{TiO}_2$  沉积厚度提供了一定的容差, 降低了制造难度。

确定纳米柱尺寸后, 通过 FDTD 分析纳米柱偏转角度与入射光相位的关系, 如图 6(b) 所示。随着纳米柱旋转角度从  $-20^\circ$  变化到  $160^\circ$  (间隔为  $10^\circ$ ), 入射光归一化相位从  $-1$  变化到  $1$ 。相位变化具有很高的线性度, 证明了所设计的纳米柱对入射光具有良好的相位调制能力。

完成超表面纳米柱尺寸设计后, 通过 GS 算法求解混合编码结构光条纹的相位信息, 求解结果如图 7 所示。

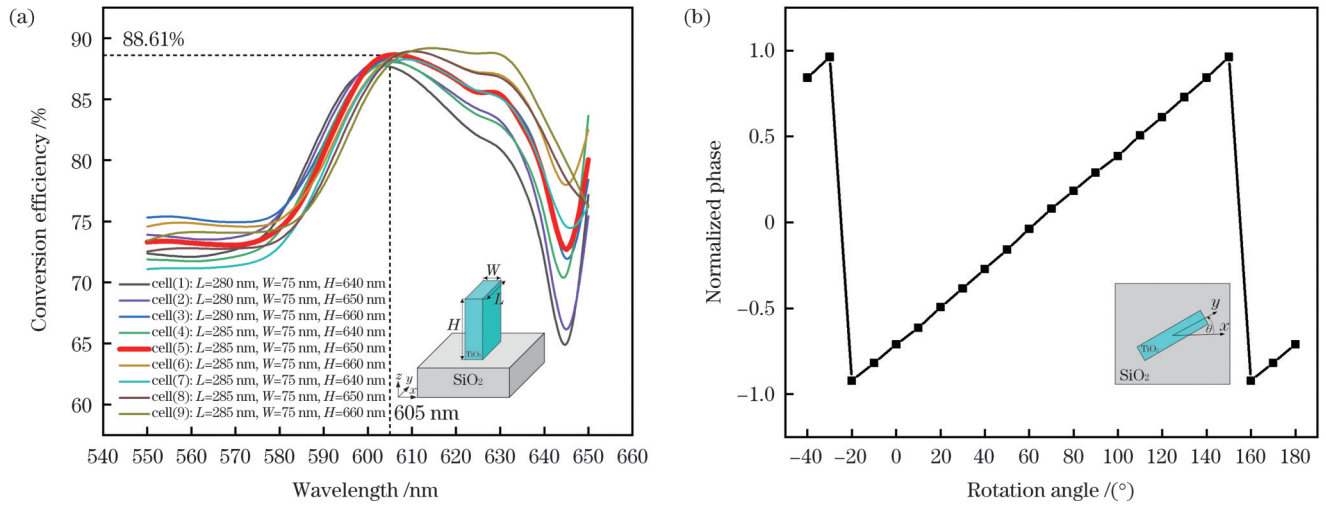


图 6 超表面纳米柱仿真。(a)超表面纳米柱尺寸对入射光的转换效率与入射波长的关系;(b)超表面纳米柱偏转角度与入射光归一化相位的关系

Fig. 6 Simulation of metasurface nanopillars. (a) Conversion efficiency of metasurface nanopillar dimensions to incident light versus incident wavelength; (b) relationship between rotation angle of metasurface nanopillars with normalized phase of incident light

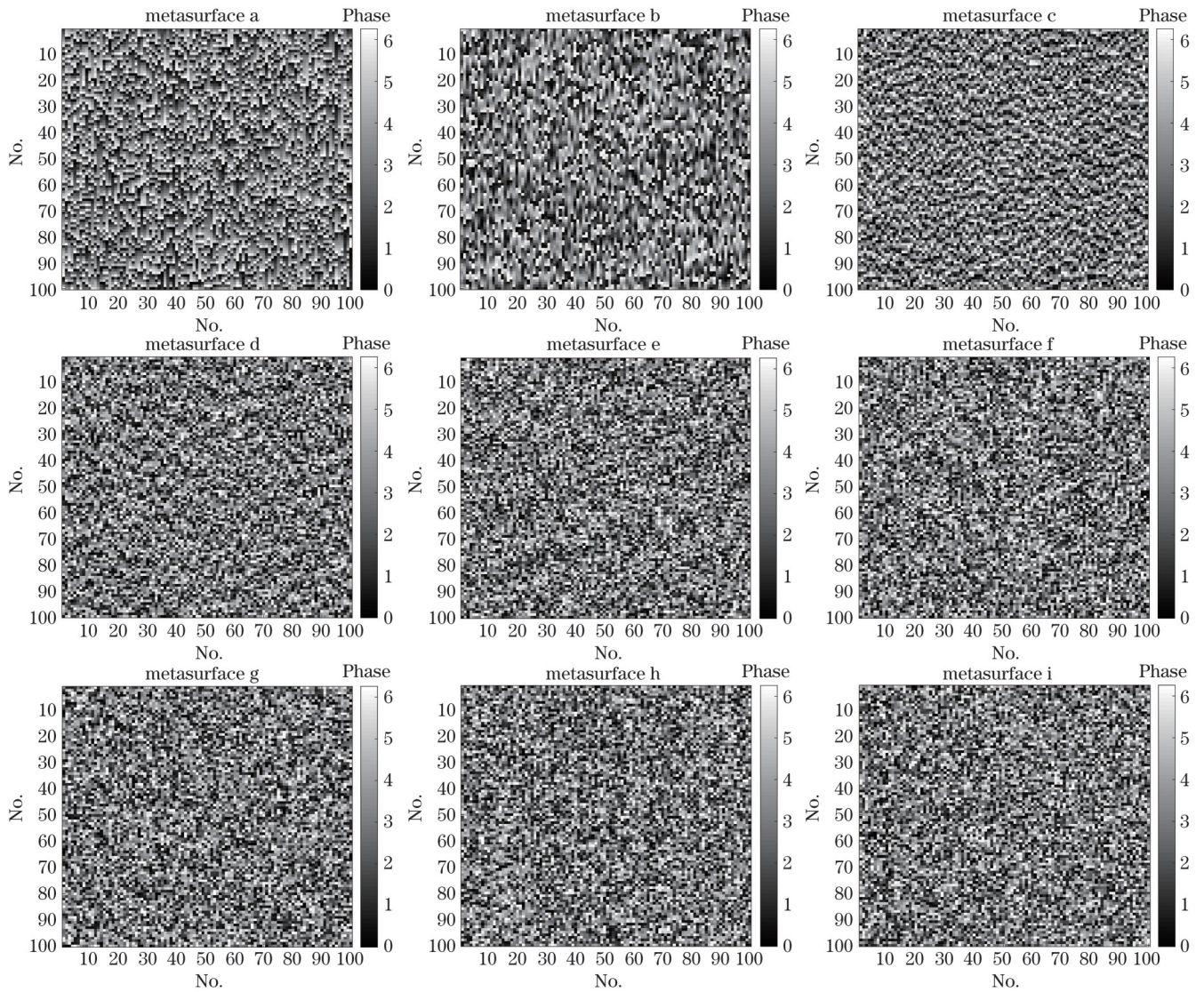


图 7 混合编码结构光条纹的相位图

Fig. 7 Phase of mixed coding structured light stripes

确定超表面纳米柱尺寸和混合编码结构光条纹的相位信息后,通过FDTD对9个超表面单元进行建模仿真。得到近场光强分布数据后,通过傅里叶远场变换,得到超表面单元在远场处投影的条纹图案。超表

面单元d的远场投影结果如图8(a)所示,超表面单元f的远场投影结果如图8(b)所示。投影结果分别与图3(d)所示的格雷码条纹和图3(f)所示的相移条纹相吻合。

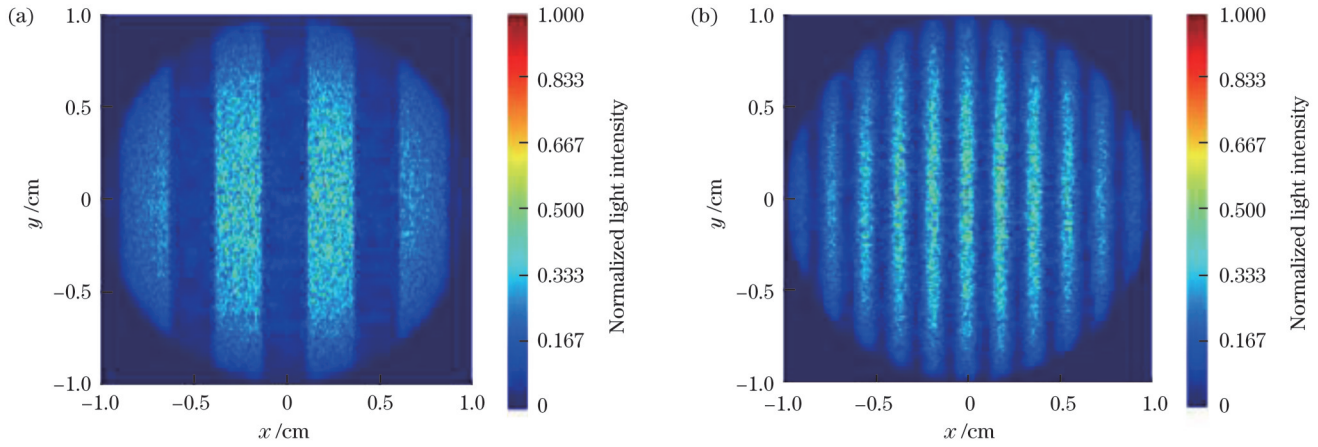


图8 超表面单元投影的格雷码条纹和相移条纹。(a)格雷码条纹;(b)相移条纹

Fig. 8 Gray code and phase-shifted strips projected by metasurface units. (a) Gray code strips; (b) phase-shifted strips

超表面单元d投影的条纹具有典型的格雷码条纹分布特征,其光强呈阶梯状离散分布,如图9所示。明暗条纹光强对比度高,光强峰峰值为0.76,中心处条纹的归一化光强可以达到0.96。条纹宽度均匀,投影焦距为50 mm时,投影编码条纹覆盖范围为20 mm×20 mm,条纹宽度约为3 mm。与中心处条纹相比,两边条纹的光强略有衰减。

可见,其光强分布可拟合为标准正弦函数。这表明超表面单元投射出的相移条纹具有良好的正弦特性。

超表面单元f投影的相移条纹分布特性如图10所示。由图10(a)可知,相移条纹的归一化光强呈周期性正弦分布,两边相移条纹的光强较中心处相移条纹的光强有所衰减。条纹明暗对比度高,光强峰峰值为0.88。中心处归一化光强峰值为0.98。条纹宽度均匀,投影焦距为50 mm时,投影编码条纹覆盖范围为20 mm×20 mm,相移条纹宽度约为2 mm。截取中心处条纹的光强进行拟合,结果如图10(b)所

上述结果表明,设计的超表面器件能够产生混合编码结构光所需要的格雷码条纹和相移条纹,其中投影的相移条纹具有良好的正弦特性,能够有效解决DLP投影仪投射相移条纹时的非线性问题。在50 mm的投影焦距下,所设计的超表面器件投射出的条纹宽度为毫米级,探测精度可达亚毫米级,满足改善传统投影设备投影非线性以及高探测精度的设计要求。

### 3.2 MEMS二维平台结构设计和仿真分析

MEMS二维平台的静电梳齿驱动器参数如表1、表2所示,其梳齿结构参数和蛇形梁结构参数是在驱动电压和器件尺寸约束下通过ANSYS有限元分析进行优化得到的。

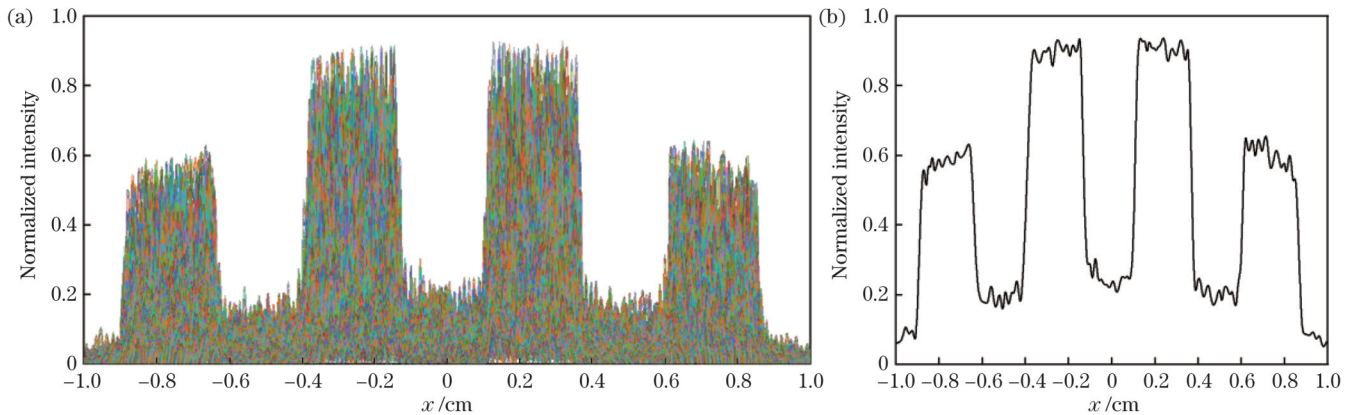


图9 格雷码条纹光强分布。(a)格雷码条纹沿x轴向的归一化光强分布;(b)归一化光强分布包络图

Fig. 9 Light intensity distribution of Gray code strips. (a) Normalized optical intensity distribution along  $x$ -axis of Gray code strips; (b) envelope of the normalized optical intensity distribution

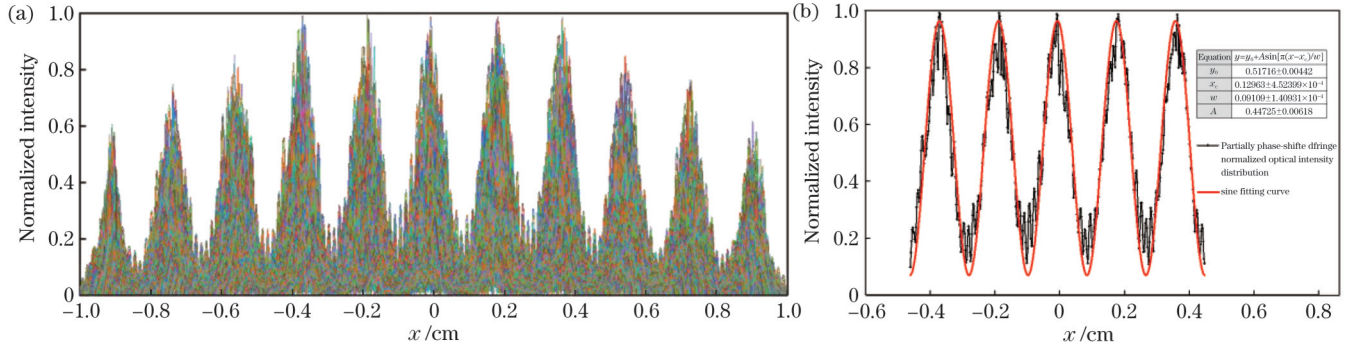


图 10 相移条纹光强分布。(a)相移条纹的归一化光强分布;(b)中心部分归一化光强分布拟合曲线

Fig. 10 Light intensity distribution of phase-shifted strips. (a) Normalized optical intensity distribution of phase-shifted strips; (b) fit curves of the normalized optical intensity distribution in the central region

表 1 MEMS 二维扫描平台驱动梳齿参数

Table 1 Driving comb parameters of MEMS 2D scanning platform

Parameter	Value
Comb length ( $l_{\text{comb}}$ ) / $\mu\text{m}$	140
Comb thickness ( $h_{\text{comb}}$ ) / $\mu\text{m}$	40
Comb width ( $t_{\text{comb}}$ ) / $\mu\text{m}$	3
Overlap length ( $x_{\text{comb}}$ ) / $\mu\text{m}$	40
Comb spacing ( $g_{\text{comb}}$ ) / $\mu\text{m}$	2.7
Comb teeth count of device layer 1 ( $n_1$ ) / pair	320
Comb teeth count of device layer 2 ( $n_2$ ) / pair	568

表 2 器件层 1、2 中蛇形梁的参数

Table 2 Parameters of serpentine beams in device layers 1 and 2

Device layer number	Serpentine beam parameter	Value
1	Beam length ( $l_{\text{beam1}}$ ) / $\mu\text{m}$	125
	Beam thickness ( $h_{\text{beam1}}$ ) / $\mu\text{m}$	3
	Beam width ( $t_{\text{beam1}}$ ) / $\mu\text{m}$	40
	Number of beams ( $n_3$ )	11
2	Beam length ( $l_{\text{beam2}}$ ) / $\mu\text{m}$	120
	Beam thickness ( $h_{\text{beam2}}$ ) / $\mu\text{m}$	3.3
	Beam width ( $t_{\text{beam2}}$ ) / $\mu\text{m}$	40
	Number of beams ( $n_4$ ) /	11

通过有限元分析得到:顶层蛇形弹性梁的弹性系数为 1.2 N/m,底层蛇形弹性梁的弹性系数为 1.8 N/m。由胡克定理可以得到平面梳齿驱动器驱动电压与位移的关系,如图 11 所示。

由图 11 可知,当二维扫描平台器件层 1 的梳齿驱动器驱动电压为 68.1 V,器件层 2 的驱动梳齿器驱动电压为 57.6 V 时,平台在 X 方向和 Y 方向的位移均为 80  $\mu\text{m}$ 。接下来通过有限元分析对应驱动电

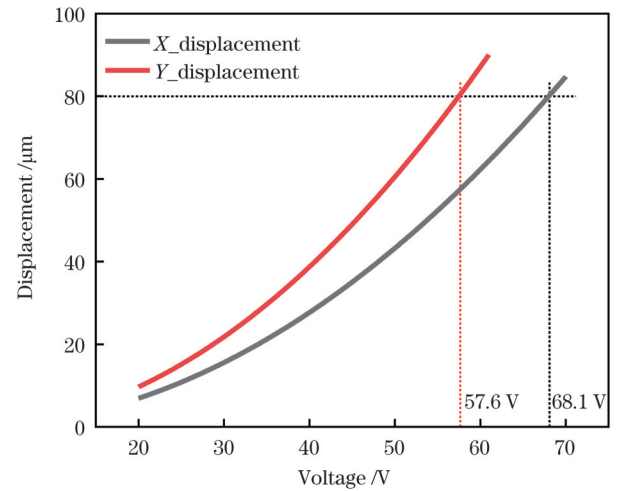


图 11 二维扫描平台位移与驱动电压的关系

Fig. 11 Relationship between displacement and drive voltage of 2D scanning platform

压下二维扫描平台位移和结构应力之间的关系。器件层 1 沿 X 方向的位移云图和结构应力云图如图 12(a)、(b)所示,可见:达到 80  $\mu\text{m}$  位移时,器件层 1 结构的应力集中分布在内部蛇形梁根部和弯曲处,最大应力值为 135 MPa。器件层 2 沿 Y 方向的位移云图和结构应力云图如图 12(c)、(d)所示,可见:达到 80  $\mu\text{m}$  位移时,器件层 2 结构的应力集中分布在外部蛇形梁根部和弯曲处,最大应力值为 164 MPa。内外蛇形梁的材质均为单晶硅,单晶硅的断裂应力为 600 MPa~7.7 GPa<sup>[21]</sup>。因此,达到目标位移时内外蛇形梁无断裂风险。这表明二维扫描平台具有良好的工作可靠性。

通过有限元分析二维扫描平台的模态,选取前四阶模态,其频率如表 3 所示,其振型如图 13 所示。一阶、二阶模态的振型分别为沿 Y、X 轴运动,符合二维扫描平台的运动特征。一阶模态频率大于 500 Hz,二阶、三阶模态与一阶模态相距较大,证明所设计的器件具有良好的抗振动、抗干扰特性。

接下来进一步分析二维扫描平台的响应特性。向

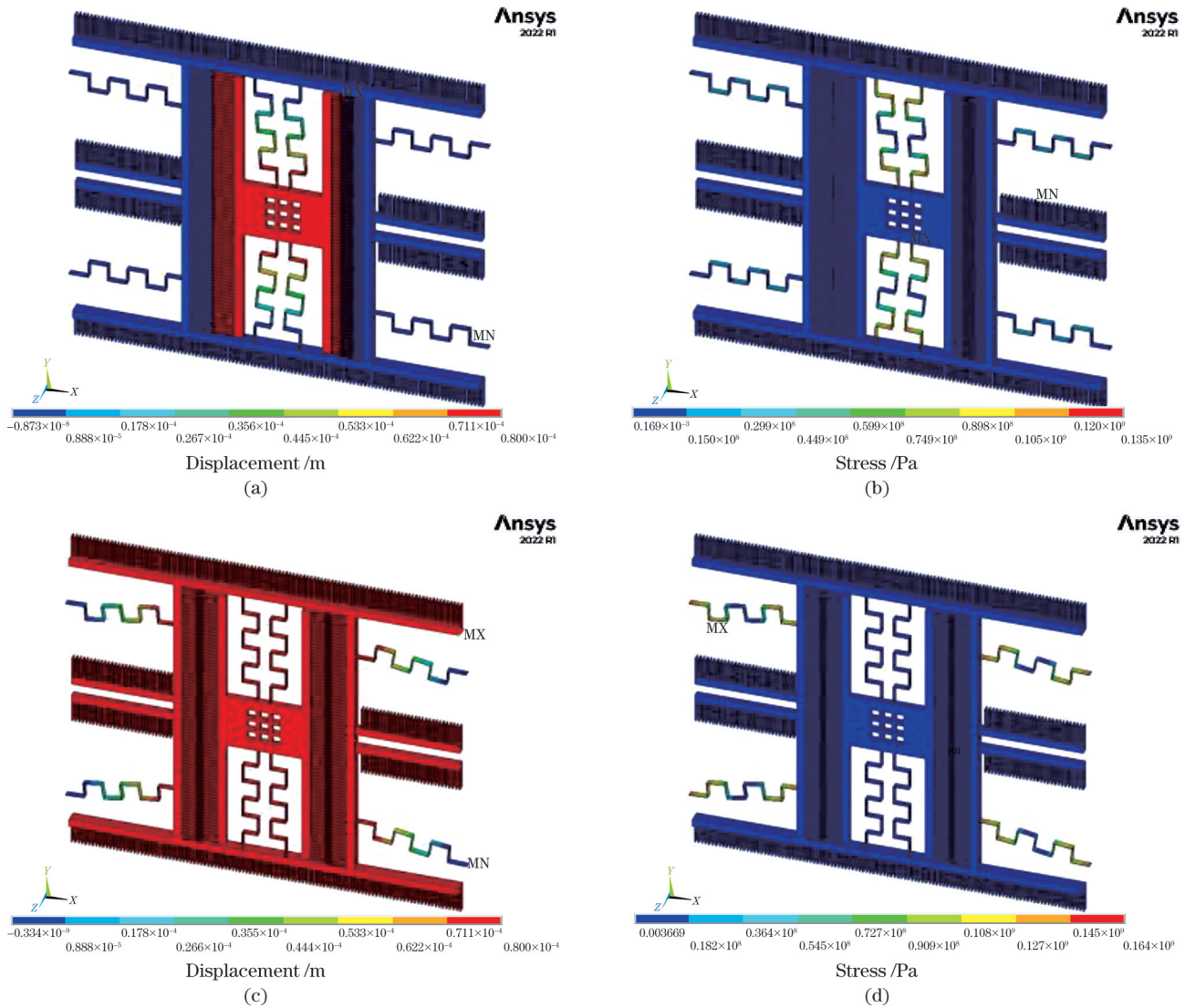


图 12 位移与应力云图。(a) 器件层 1 的位移云图; (b) 器件层 1 的应力云图; (c) 器件层 2 的位移云图; (d) 器件层 2 的应力云图  
 Fig. 12 Displacement and stress cloud maps. (a) Displacement cloud map of device layer 1; (b) stress cloud map of device layer 1; (c) displacement cloud map of device layer 2; (d) stress cloud map of device layer 2

表 3 MEMS 二维扫描平台前四阶模态的频率

Table 3 Frequencies of the first four orders of modals of the MEMS 2D scanning stage

Mode	Frequency / Hz
First	511.91
Second	837.06
Third	1011.30
Fourth	1047.20

器件层 1、2 的驱动电极分别施加 68.1 V 和 57.6 V 的阶跃电压, 二维扫描平台的器件层 1 在 X 方向上的响应特性以及器件层 2 在 Y 方向上的响应特性如图 14 所示。器件层 1 在 X 方向达到 80  $\mu\text{m}$  位移后趋于平稳的

响应时间为 1.4 ms, 器件层 2 在 Y 方向达到 80  $\mu\text{m}$  位移后趋于平稳的响应时间为 2.4 ms, 符合设计预期, 具有高响应速率。

二维扫描平台通过控制各电极的驱动电压实现 X、Y 方向的往复运动, 从而切换超表面单元, 实现芯片投影。超表面单元切换轨迹如图 15(a) 所示。各驱动电极的电压变化如图 15(b) 所示。驱动电极 c 接地, 驱动电极 a 和驱动电极 b 接入图 15(b) 中所示的驱动电压信号, 在对应的驱动时钟周期  $t$  下实现二维扫描平台的 X 方向往复运动。同理, 驱动电极 f 接地, 驱动电极 d 和驱动电极 e 接入图 15(b) 中所示的驱动电压信号, 实现二维扫描平台的 Y 方向往复运动。通过 X、Y 轴向位移矢量叠加, 可以将超表面 a~i 依次移动到光路通孔上方与光源耦合, 投射出对应的结构光条纹。



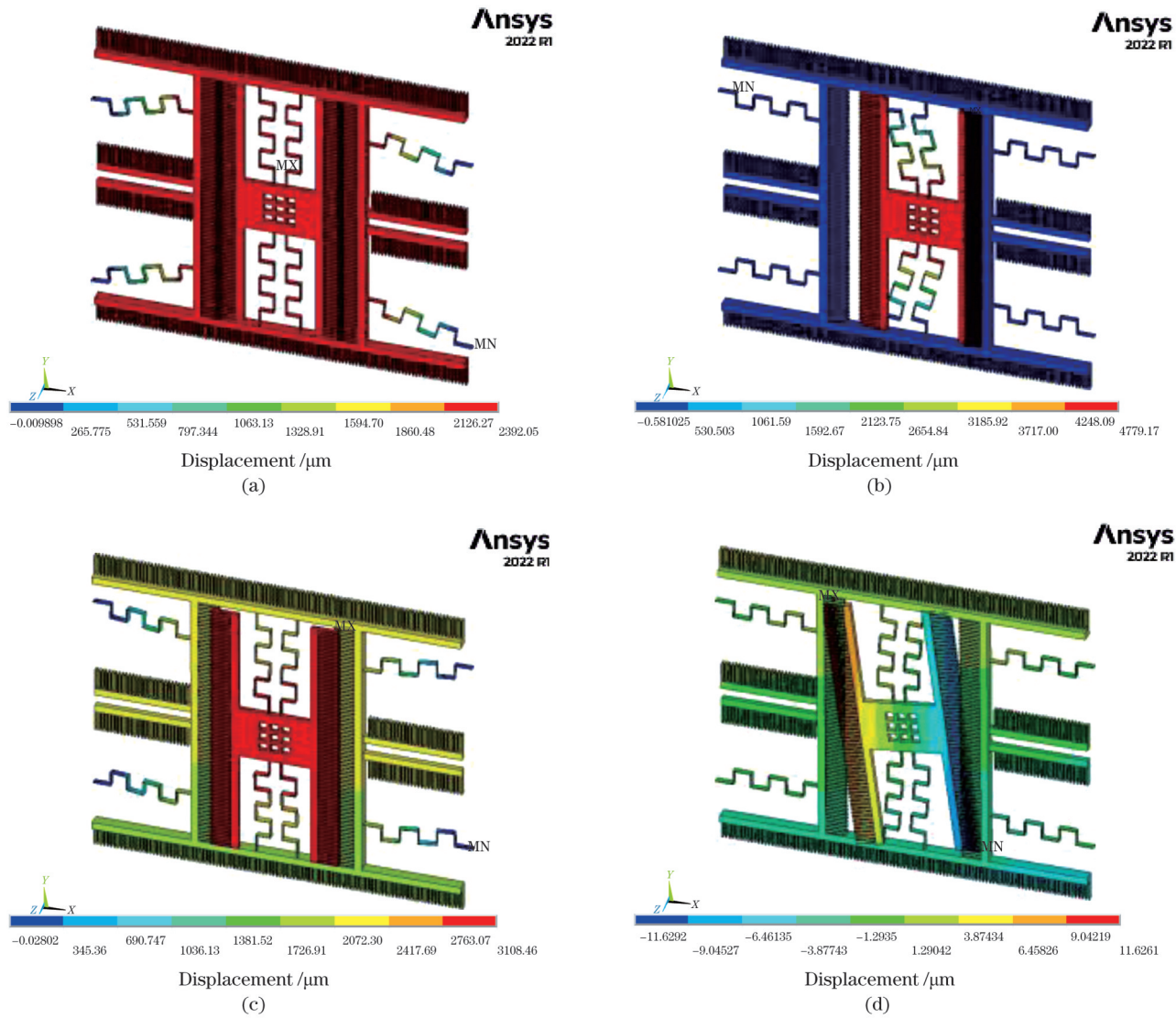


图 13 模态结果。(a)一阶模态;(b)二阶模态;(c)三阶模态;(d)四阶模态

Fig. 13 Modal results. (a) First mode; (b) second mode; (c) third mode; (d) fourth mode

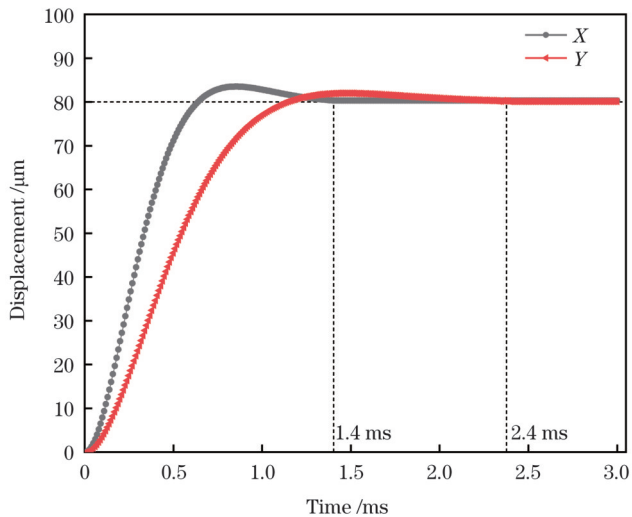


图 14 MEMS 二维扫描平台的响应特性

Fig. 14 Response characteristics of 2D MEMS scanning platform

依据图 15(b)所示的驱动电压,二维扫描平台在 X、Y 方向的位移变化如图 16 所示。动态位移曲线下的灰色栅格矩形代表了对应超表面单元的平稳时间。当驱动脉冲时钟周期  $t$  为 3 ms 时,最短平稳时间为 0.6 ms,此时芯片能够在 27 ms 内投射出 9 幅结构光编码图案。通过调整时钟周期  $t$ ,可以改变超表面单元的平稳时间,从而可以满足激光器开启发射激光所需的时间以及高速摄像机拍摄图案所需的时间。

上述结果表明,所设计的 MEMS 二维扫描平台具有高的切换速率,可在 27 ms 内将超表面单元依次与入射光源耦合,投影出 9 幅格雷码和相移法混合编码结构光条纹。理论帧率为 333 Hz,满足高速投影要求。通过集成超表面阵列和 MEMS 二维扫描平台实现了对传统 DLP 投影仪系统的简化,芯片尺寸约为 3 mm×3 mm,实现了投影设备的小型化。

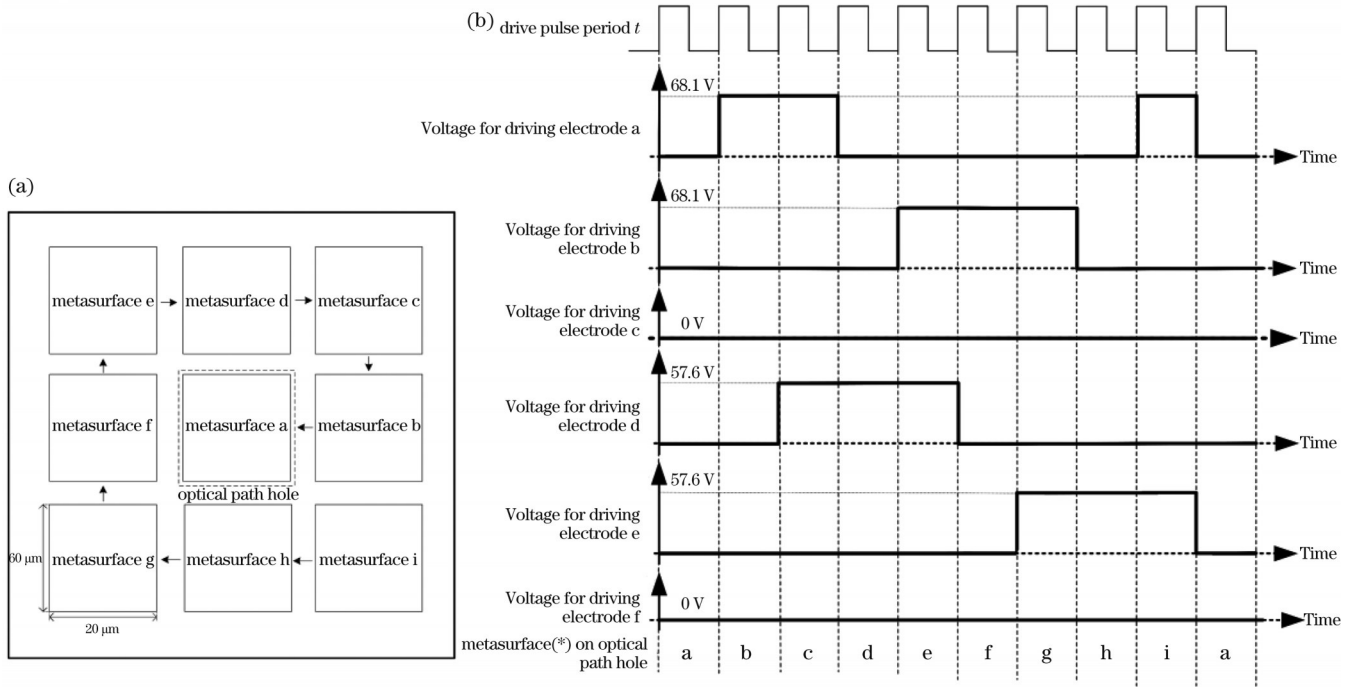


图 15 芯片投影方案设计。(a)超表面单元切换轨迹;(b)二维扫描平台电极的驱动电压

Fig. 15 Design of the chip's projection scheme. (a) Switching trajectory of metasurface unit; (b) driving voltage of the electrodes for 2D scanning platform

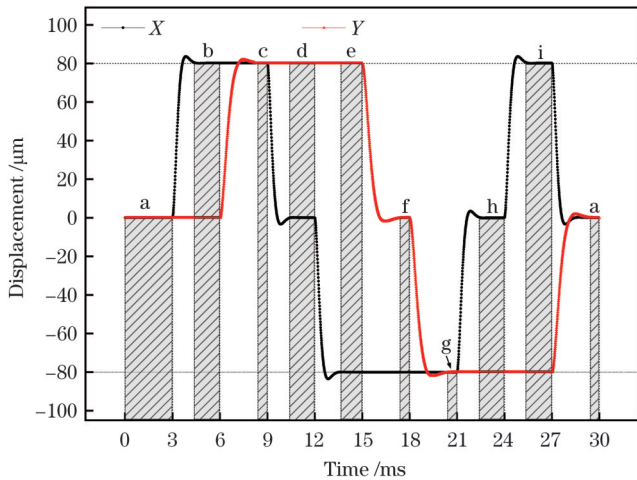


图 16 二维扫描平台的位移变化轨迹(a~f表示超表面)

Fig. 16 Displacement change trajectory of the 2D scanning platform (a~f denote metasurfaces)

### 4 结构光投影芯片工艺流程

采用两片 SOI 硅片完成超表面器件和 MEMS 二维扫描平台的制造,然后通过键合工艺将两者集成,实现 MEMS 结构光投影芯片的制备。超表面阵列的制备流程如图 17 所示。

a) SOI1 热氧化,正面生成 1 μm 厚的 SiO<sub>2</sub>,这层 SiO<sub>2</sub>作为超表面结构单元的基底。采用深反应离子刻蚀(DRIE)刻蚀出背面的对准标记,并再次热氧化,保护暴露出的 Si。

b) 正面旋涂光刻胶,曝光显影,生成超表面阵列

所在区域的掩模。采用 BOE 湿法去除裸露的 SiO<sub>2</sub>,暴露正面的 Si 表面,用于后续键合。

c) 去胶。正面旋涂光刻胶,曝光显影,暴露出保留的 SiO<sub>2</sub>。

d) 采用物理气相沉积(PVD)镀膜技术,通过控制真空电子束的蒸镀速率,在 SOI1 正面蒸镀一层厚度为 640 nm 的 TiO<sub>2</sub>薄膜(作为超表面结构材料)。

e) 采用 lift-off 工艺,通过溶剂去除光刻胶,剥离光刻胶上的 TiO<sub>2</sub>。

f) 正面旋涂光刻胶,覆盖保留的 TiO<sub>2</sub>。采用电子束光刻(EBL)直写出超表面结构图形,显影,形成超表面结构的图形掩模。

g) 采用 ICP 刻蚀(刻蚀气体为 Cl<sub>2</sub>)完成超表面结构的刻蚀。

h) 去除光刻胶,超表面阵列制作完成。

集成超表面阵列的 MEMS 二维扫描平台的制备流程如图 18 所示。

a) SOI2 热氧化,在硅片表面形成 1 μm 厚的 SiO<sub>2</sub>。采用 DRIE 刻蚀出背面的对准标记,并再次热氧化,保护暴露出的 Si。

b) 正面旋涂光刻胶,曝光显影,制作出梳齿、悬臂梁等结构的光刻胶掩模。采用反应离子刻蚀(RIE)刻蚀 SiO<sub>2</sub>,形成梳齿、悬臂梁等结构的 SiO<sub>2</sub>掩模。

c) 去胶。采用 DRIE 刻蚀正面的 Si,制作出器件层 2 的梳齿、悬臂梁等结构。

d) 采用直接键合工艺,将 SOI1 硅片倒扣,与 SOI2 正面键合,实现超表面阵列与二维扫描平台的

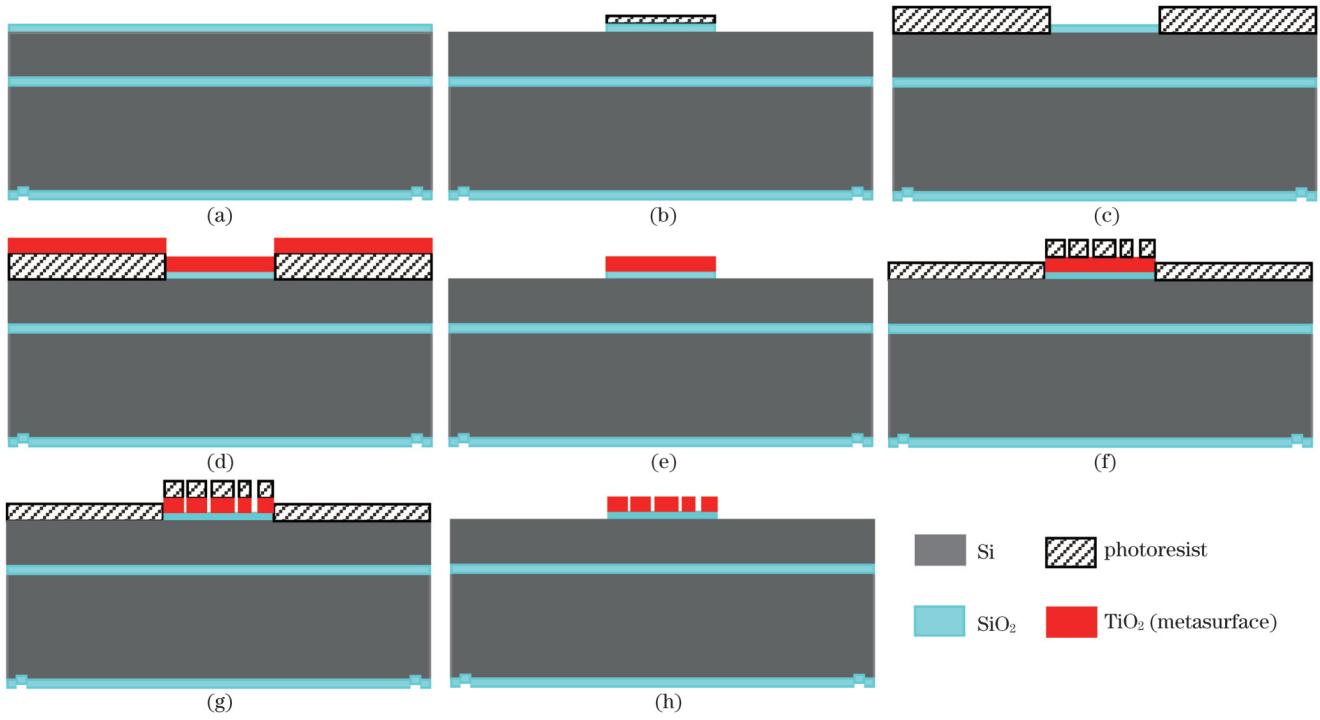


图 17 超表面阵列的制备流程  
Fig. 17 Preparation flowchart of metasurface array

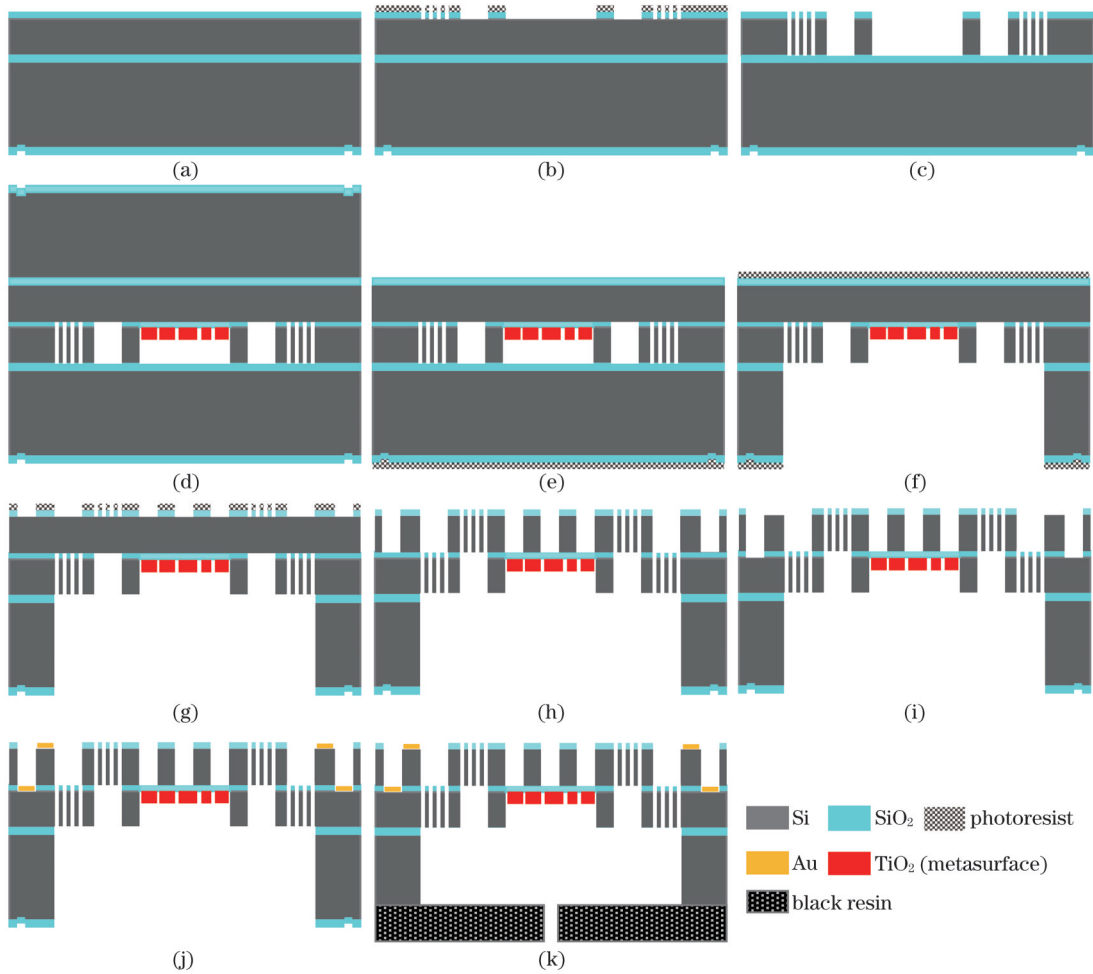


图 18 集成超表面阵列的 MEMS 二维扫描平台的制备流程  
Fig. 18 Preparation flowchart of MEMS 2D scanning platform integrated metasurface array

集成。

e) 在键合后的硅片背面涂胶保护,采用BOE(缓冲氧化硅腐蚀)去除正面的 $\text{SiO}_2$ ,再通过KOH腐蚀去除正面的衬底硅。

f) 去胶,正面涂胶保护;背面旋涂光刻胶,曝光显影;RIE刻蚀背面的 $\text{SiO}_2$ ;DRIE刻蚀背面的衬底Si;控制RIE的刻蚀速率,去除SOI2的埋氧层 $\text{SiO}_2$ 。最终形成器件层2梳齿、悬臂梁等结构的空腔。

g) 去胶。正面旋涂光刻胶,曝光显影。RIE刻蚀正面的 $\text{SiO}_2$ ,形成器件层1梳齿、悬臂梁等结构的 $\text{SiO}_2$ 掩模。

h) 去胶。DRIE刻蚀正面的Si,制作出器件层1的梳齿、悬臂梁等结构,实现器件层1和器件层2结构的释放。

i) 基于硬掩模和RIE刻蚀正面部分的 $\text{SiO}_2$ ,暴露出底层的Si表面(作为溅射电极区域)。

j) 在暴露出的Si区域,溅射Au电极。

k) 划片后,采用黑色不透光的树脂材料作为基底,进行芯片封装,并制作出底部光路通孔,完成结构光投影芯片的制造。

## 5 结 论

笔者提出了一种集成超表面阵列和MEMS二维扫描平台的结构光投影芯片设计。通过MEMS二维扫描平台实现超表面单元与光源耦合,投影出基于时间编码的混合结构光条纹。其中,超表面结构生成的格雷码条纹边界清晰,相移条纹具有良好的正弦特性,很好地解决了传统投影仪的非线性问题。产生的条纹宽度均匀,相移条纹最小宽度为2 mm,测量精度可达亚毫米级。二维扫描平台在X、Y方向实现80  $\mu\text{m}$  位移的驱动电压分别为68.1 V和57.6 V。一阶模态频率为511.91 Hz,其余高阶模态频率分界明显,表明器件具有良好的抗振动和抗干扰特性。二维扫描平台的动态响应时间为2.4 ms,投影帧率为333 Hz,具有高投影速率。芯片结构尺寸约为3 mm $\times$ 3 mm,小型化程度高。最后,设计了超表面阵列和MEMS二维扫描平台集成制造工艺,为结构光投影芯片的批量生产提供了工艺解决方案。本文提出的结构光投影芯片设计为高投影速率、高探测精度的微型化投影设备提供了理论模型和系统解决方案。

## 参 考 文 献

- 王浩然, 吴周杰, 张启灿, 等. 基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0112003.  
Wang H R, Wu Z J, Zhang Q C, et al. High-speed three-dimensional morphology measurement based on time multiplexing coding[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 0112003.
- Ding X M, Hu L, Zhou S B, et al. Snapshot depth-spectral imaging based on image mapping and light field[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2023, 2023(1): 24.
- Zhu L H, Tai Y P, Li H H, et al. Multidimensional optical tweezers synthesized by rigid-body emulated structured light[J]. Photonics Research, 2023, 11(9): 1524-1534.
- Hao Y, Yang S H, Ling C, et al. Ultralarge pixel array photothermal film based on 3D self-suspended microbridge structure for infrared scene projection[J]. Small, 2023, 19(20): e2208262.
- Yamasaki F, Deguchi M, Kakuda T, et al. High efficiency optical system design for a liquid crystal projector[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 851-856.
- Wang Y J, Zhang S. Novel phase-coding method for absolute phase retrieval[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2067-2069.
- Babaei A, Saadatseresht M, Kofman J. Exponential fringe pattern projection approach to gamma-independent phase computation without calibration for gamma nonlinearity in 3D optical metrology [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 24927-24938.
- Heist S, Mann A, Kühmstedt P, et al. Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 112208.
- Zhang S. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing: extended measurement range[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 934-936.
- Zhu Z M, Xie Y L, Cen Y G. Polarized-state-based coding strategy and phase image estimation method for robust 3D measurement[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4307-4319.
- 杨家伟, 崔开宇, 熊健, 等. 基于超表面的实时超光谱成像芯片[J]. 光学学报, 2023, 43(16): 1623004.  
Yang J W, Cui K Y, Xiong J, et al. Real-time ultraspectral imaging chip based on metasurfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(16): 1623004.
- 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823001.  
Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. On-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823001.
- Jiang Q, Cao L C, Zhang H, et al. Improve the quality of holographic image with complex-amplitude metasurface[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 33700-33708.
- Wang L, Kruk S, Tang H Z, et al. Grayscale transparent metasurface holograms[J]. Optica, 2016, 3(12): 1504-1505.
- Devlin R C, Khorasaninejad M, Chen W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(38): 10473-10478.
- 罗栩豪, 董思禹, 王占山, 等. 超表面VR/AR显示技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011002.
- Luo X H, Dong S Y, Wang Z S, et al. Research progress of metasurface-based VR/AR display technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011002.
- Schramm S, Dietzel A, Link D, et al. 3D retinal imaging and measurement using light field technology[J]. Journal of Biomedical Optics, 2021, 26(12): 126002.
- Li Z L, Dai Q, Mehmood M Q, et al. Full-space cloud of random points with a scrambling metasurface[J]. Light, Science & Applications, 2018, 7: 63.
- Chen R, Shao Y F, Zhou Y, et al. A semisolid micromechanical beam steering system based on micrometa-lens arrays[J]. Nano Letters, 2022, 22(4): 1595-1603.
- Holsteen A L, Cihan A F, Brongersma M L. Temporal color mixing and dynamic beam shaping with silicon metasurfaces[J]. Science, 2019, 365(6450): 257-260.
- 刘昶. 微机械: 微机电系统基础[M]. 黄庆安, 译. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 381.
- Liu C. Micromachinery: foundations of MEMS[M]. Huang Q A, Transl. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2013: 381.

# Research on Structured Light Projection Chips Based on Metasurfaces and MEMS

Zhai Leiying<sup>1,2\*</sup>, Zhao Liyu<sup>1</sup>, Wang Yijie<sup>1</sup>, Nan Jingchang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China;*

<sup>2</sup>*Liaoning Key Laboratory of Radio Frequency and Big Data for Intelligent Application, Huludao 125105, Liaoning, China*

## Abstract

**Objective** This study investigates the problems of the complex structure, large volume, and nonlinear projection of digital light processing (DLP) projectors, which are widely used in structured light 3D imaging systems. These problems restrict the application of structured light 3D imaging technology to small detection scenes. Therefore, this study proposes a structured light projection chip integrating a metasurface array with a micro-electromechanical system (MEMS) two-dimensional scanning platform. The metasurface array realizes the structured light stripe projection including the Gray code stripe and the phase-shifted stripe, and switching of the metasurface unit is achieved using a MEMS two-dimensional scanning platform. The experimental results demonstrate that the designed structured light projection chip exhibits superior characteristics in terms of precise detection accuracy, a rapid projection rate, and compactness, thereby satisfying the stringent detection requirements for small-scale application scenarios.

**Methods** The metasurface array is initially investigated based on the geometric phase principle, and an analysis is conducted on the conversion efficiency and phase modulation capability of the nanopillars in each unit toward incident light. Subsequently, the GS algorithm is employed to determine the phases of mixed-code structured light stripes. The metasurface array is designed by obtaining the sizes of the nanopillars and phase information. For the MEMS two-dimensional scanning platform, the electrostatic comb driver design is primarily investigated, and the static, modal, and transient characteristics of the two-dimensional scanning platform are analyzed using ANSYS to ensure that its performance meets design requirements. Finally, this study investigates an integrated manufacturing process for metasurface arrays and MEMS two-dimensional scanning platform, providing a comprehensive manufacturing scheme for subsequent processing.

**Results and Discussions** A chip model (Fig. 1) that integrates a metasurface array and an MEMS two-dimensional platform is proposed. By designing the size of the nanopillar in the metasurface unit, a high conversion efficiency of 605 nm incident light is achieved, with the highest conversion efficiency being 88.61%. Additionally, the linear phase regulation ability of the nanopillar to the incident light is verified (Fig. 6). The phase information required for constructing the metasurface unit is obtained by solving the mixed-code structured light stripes using the GS algorithm. After obtaining the optimal size of the nanopillars and the phase information, we establish a metasurface element model using FDTD and conduct simulations to evaluate its optical performance. The simulation results demonstrate that the fringes generated by the metasurface unit adhere to the characteristics of both the Gray code fringe (Fig. 9) and the phase-shifted method fringe (Fig. 10). The generated Gray code stripe exhibits distinct step distribution characteristics in terms of light intensity while maintaining a consistent width throughout. At a projection focal length of 50 mm, the stripe width is 3 mm. The generated phase-shifting stripe exhibits obvious sine distribution characteristics in terms of light intensity, and the stripe width is uniform. At a projection focal length of 50 mm, the stripe width is 2 mm. The generated stripe satisfies the high-detection accuracy requirements of the projection chip, and the static results (Fig. 12) demonstrate that the MEMS two-dimensional scanning platform exhibits a low driving voltage. Specifically, the driving voltages for achieving an 80  $\mu\text{m}$  displacement in the X and Y directions are measured to be 68.1 V and 57.6 V, respectively. The modal results (Fig. 13) indicate that the two-dimensional scanning platform exhibits excellent anti-vibration and anti-interference characteristics, with a first-order modal frequency of 511.91 Hz and distinct boundaries for higher-order modal frequencies. The transient analysis results (Fig. 14) demonstrate that the two-dimensional scanning platform exhibits a high response rate, with a response time of 2.4 ms obtained through the full transient method. Therefore, the structured light projection chip has a high projection rate, with a projection frame rate of 333 Hz. The chip size is 3 mm  $\times$  3 mm, which has the advantage of miniaturization. The integrated manufacturing process flow of the metasurface array and MEMS two-dimensional platform is ultimately designed (Figs. 17, 18), encompassing various manufacturing processes for MEMS devices, such as oxidation, lift-off, BOE wet etching, DRIE dry etching, and bonding.

**Conclusions** The results demonstrate that the designed metasurface exhibits excellent modulation performance for incident light while generating a striped pattern that satisfies the detection requirements of three-dimensional imaging technology. This effectively enhances the projection linearity of conventional projectors, thereby enabling submillimeter-level detection accuracy. The designed two-dimensional scanning platform exhibits dependable performance and a high projection rate. The integrated manufacturing process of the metasurface array and the MEMS two-dimensional platform provides a theoretical model and a system solution for designing a miniaturized projection device with high detection accuracy and projection rate.

**Key words** optics at surfaces; structured light; three-dimensional imaging; metasurface; micro-electromechanical system