文章编号: 1007-4252(2025)04-0292-10 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0030 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0030

集成梳齿电容位移传感器的静电驱动 MEMS 光学移相器研究

韩雨薇[1,2], 夏彧虎[1,2], 周碧青[1,2], 蔡敏力[1,2], 王潇悦[1], 吴亚明[1,2,*]
(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出并制作一种集成梳齿电容位移传感器的静电驱动型微机电系统(MEMS)光学移相器。针对当前 MEMS 光学移相器普遍存在的驱动电压较高、控制精度不足问题, 通过设计镂空蛇形弹性梁结构, 在有限芯片尺寸内减小了弹性梁的面外垂直运动刚度以降低驱动电压, 并通过集成梳齿电容位移传感器来构建光学镜面位移传感系统, 从而提高控制精度。实验结果表明, 在 59 V 驱动电压下, 微镜可实现 2.139 5π rad 的光学相位调制量, 集成的梳齿电容传感器的检测误差小于 0.5 fF, 对应的光学移相误差小于 0.016 2π rad。作为相位调控器件, 该器件在光通信系统和矢量相控阵等方面展现了良好的应用前景。

关键词: 微机电系统; 光学移相器; 微镜; 静电驱动
中图分类号: TN253; TN211.4 **文献标志码:** A

Research on electrostatically driven MEMS optical phase shifter with integrated comb capacitive displacement sensor

HAN Yuwei[1,2], XIA Yuhu[1,2], ZHOU Biqing[1,2], CAI Minli[1,2], WANG Xiaoyue[1], WU Yaming[1,2,*]
(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We designed and fabricated an electrostatically actuated micro-electro-mechanical system (MEMS) optical phase shifter incorporating a comb capacitive displacement sensor. To overcome the technical challenges of high driving voltage and inadequate control precision in current MEMS optical phase shifters, this study employed a hollow serpentine elastic beam structure to reduce the out-of-plane vertical stiffness of the elastic beam within the constrained chip dimensions, thereby lowering the actuation voltage. Furthermore, a comb-capacitive displacement sensor was integrated to facilitate an optical mirror displacement sensing system, significantly enhancing control accuracy. Experimental results indicate that at a driving voltage of 59 V, the micromirror achieves an optical phase modulation of 2.139 5π rad. The integrated comb-capacitive sensor demonstrates a detection error of less than 0.5 fF, corresponding to an optical phase-shifting error below 0.016 2π rad. This device shows promising

收稿日期: 2025-05-02; **修订日期:** 2025-05-15
作者简介: 韩雨薇 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高精度光学 MEMS 移相器 (E-mail: yuweihan@mail.sim.ac.cn).
通信作者: 吴亚明 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为光学 MEMS 器件相关技术 (E-mail: yamingwu@mail.sim.ac.cn).

potential for applications in optical communication systems and vector optical phased arrays as a phase modulation element.

Key words: micro-electro-mechanical system (MEMS); optical phase shifter; micro mirror; electrostatic drive

0　引言

微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术是实现微尺度传感器与执行器批量制造的重要手段, 其与光学领域的融合推动形成了光学 MEMS 技术, 并在投影显示[1-3]、光通信[4]、光纤传感及光学加工制造等领域得到了广泛应用[5]。特别是集成光学反射镜与 MEMS 驱动器的 MEMS 微反射镜, 能够实现对微结构位移的精准驱动点, 也是实现高精密光路调控的有效方案[6-7], 已成为光学 MEMS 领域的研究热。

光学相位是表征激光光束特性的重要参数, 对该参数的动态调控是激光技术的关键。光学相位调制器(也称光学移相器)通过外部调制光程或折射率实现光学相位调控, 是动态相位调控的核心器件, 在光学干涉仪、激光波前校正及光学相控阵等领域具有广阔的应用前景[8]。基于 MEMS 技术的光学移相器利用 MEMS 驱动器来驱动光学微反射镜进行法向移动, 通过改变光程实现对光学相位的调控。相较于传统热光、声光等相位调制方法, 该器件具有光学损耗低、偏振不敏感、尺寸小、驱动功耗低、成本低、易于阵列化制造以及可单片集成等显著优势[9-10]。

在 MEMS 光学移相器的各类微驱动技术中, 静电驱动因速度快、重复性好、结构简单且工艺兼容性优异等优点, 被认为是最有希望实现批量化制造和产业化的技术之一。然而, 现有准静态型静电驱动 MEMS 光学移相器面临驱动电压较偏高(可达百伏特量级[11])的技术瓶颈, 导致驱动电路成本高昂。谐振型静电驱动光学 MEMS 微反射镜器件可大幅降低驱动电压, 但因其仅能在谐振状态下工作, 工作带宽较窄。此外, MEMS 光学移相器的移相精度是其应用过程中的关键指标。现有的开环电压前馈控制方法难以保证移相精度, 也无法实现对指定相位的动态跟踪。因此, 研究一种高精度、低电压准静态驱动、集成位移传感器且体积小巧的 MEMS 光学移相器具有重要意义。

基于上述研究现状与应用需求, 本文提出一种集成位移传感器的准静态型静电驱动 MEMS 光学移相器。通过采用单片集成制造的梳齿电容作为 MEMS 微镜的位移传感器, 实现了 MEMS 光学移相器的高精度实时相位传感与调控。该器件采用镂空弹性蛇形梁结构, 在较小的 MEMS 芯片尺寸下有效降低了弹性梁刚度与驱动电压, 较好地满足了矢量光学相控阵等应用场景对相位调控精度、调制带宽及阵列化的需求[12]。下文详细阐述该 MEMS 光学移相器的结构与工作原理、驱动与传感设计、仿真分析与制备工艺, 以及初步的电学测试结果。

1　器件工作原理与结构设计

1.1　工作原理

本文提出的静电驱动 MEMS 光学移相器的工作原理如图 1 所示。该系统由双光纤准直器、MEMS 光学移相器芯片和控制电路组成。双光纤准直器用于实现低插入损耗的外界光信号输入, 并输出镜面反射后经光学移相的光信号; MEMS 光学移相器芯片包括 MEMS 垂直运动微镜、平板驱动结构和梳齿传感结构, 驱动结构产生的静电场可驱动微镜实现精确垂直(z 向或 piston 向)运动, 从而实现对光相位的调节; 控制电路则负责输出驱动信号并处理梳齿传感信号, 以确保系统的精度与稳定性。

该静电驱动光学系统构建了完整的光-机-电

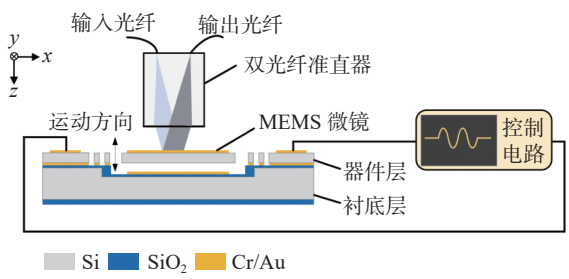

图 1　MEMS 光学移相器的工作原理

Fig. 1　Working principle of MEMS optical phase shifter

耦合链路：入射激光从输入光纤准直输入后，经微镜反射面精确反射至输出光纤。在微光路构建过程中，微镜的活塞运动直接调制光波传输路径的光程：当施加驱动电压使微镜产生 Δz 的垂直位移时，光束的往返光程变化量为 $2n\Delta z$（n 为介质折射率，本文中 $n=1$），对应的相位调制量为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n\Delta z}{\lambda} \tag{1}$$

式中，λ 为工作波长，本文取 $\lambda = 1550$ nm。最终实现了精确的光学相位控制。

由此可见，MEMS 光学移相器系统的核心驱动机制在于通过静电力实现对光学镜面沿法线方向的精准位移控制。静电力主要来源于光学镜面与其下方平板电极构成的静电平板驱动结构。为便于理论分析，将光学垂直于反射面的方向定义为活塞运动方向（piston），并设定其运动学坐标系如下：光学镜面朝衬底方向位移时为正向驱动，反之为反向回弹或上拉运动。

1.2 结构设计

图 2 展示了该 MEMS 光学移相器的微结构，其由上器件层和下衬底层组成，二者分别基于超平硅片与绝缘体上硅（SOI）晶圆，采用金-金热压键合技术集成。其中，器件层包含可动和固定微结构。可动微结构位于器件中心，包括垂直运动的光学镜面、对称分布并支撑光学镜面的 4 根硅弹性梁以及伴随光学镜面运动的梳齿结构（称为动梳齿）。固定微结构为与衬底锚定的梳齿结构（称为定梳齿），动梳齿与定梳齿共同构成位移传感器的电容传感电极。

器件层和衬底层表面各设计有 4 个焊盘（pad），用于封装中的引线键合或测试中的探针连接。衬底层包含与光学镜面共同构成静电平板驱动器的平板驱动电极以及为光学镜面活塞运动提供空间的运动空腔。

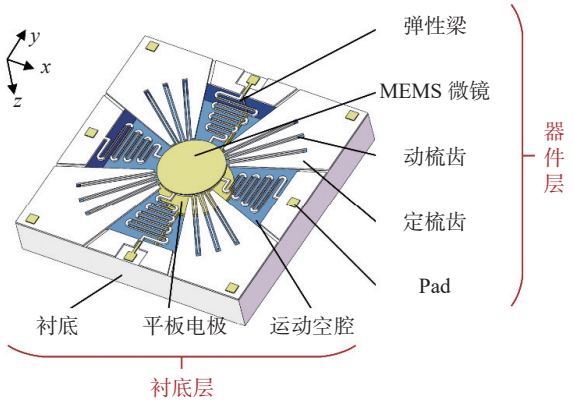

图 2 MEMS 光学移相器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the MEMS optical phase shifter

图 3 展示了该 MEMS 光学移相器的驱动与传感电路示意图。其中，在衬底层沿 x 轴分布的左右 pad 均连接地信号，而沿 y 轴分布的上下 pad 则连接平板驱动信号（U_{drive}）。器件层 4 个角上的 pad 分别输出电容传感信号 C_1、C_2、C_3 和 C_4。4 路电容传感信号输入基于 PCAP01 芯片（德国 Acam 公司）的电容检测电路，以进行传感电容测量。

该检测芯片的测量过程与原理如下：（1）将被测电容与参考电容连接至同一电阻，构成低通滤波器；（2）被测电容被充电至电源电压，并通过电阻放电，其放电时间取决于被测电容与放电电阻的阻值；（3）通过测量放电时间，确定被测电容的数值。测得的传感电容信号首先传输至 STM32 微处理器，然后通过串口将数据发送至 PC 端进行信号处理并下发驱动信号指令，从而实现光学镜面运动的闭环控制[13-14]。

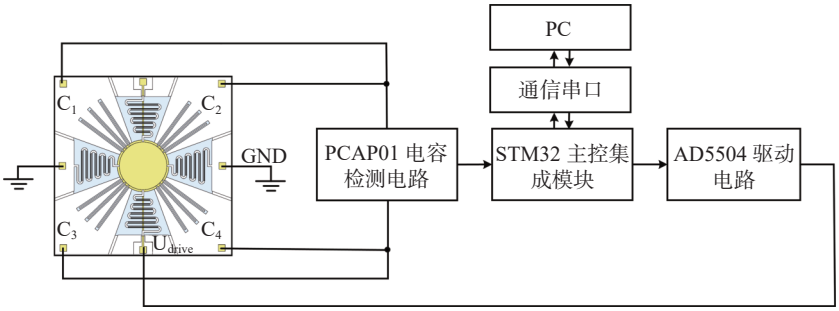

图 3 电容传感与静电驱动的电路原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the circuit principle for capacitive sensing and electrostatic actuation

2　结构建模与仿真分析

2.1　弹性梁结构建模

微弹性梁兼具减振、连接其他系统组件、提供弹性恢复力及实现精细定位的功能, 在 MEMS 系统的运动与平衡中起着至关重要的作用, 因而被广泛应用于各类 MEMS 执行器与传感器中。弹性梁结构设计需在多重约束条件下寻求最优解, 关键约束包括以下几个方面。

(1)固体力学约束: 弹性梁的一阶固有振动模式应严格限定于设计所需的 z 轴方向运动, 且弯曲时的最大应力需低于单晶硅的断裂强度阈值。

(2)空间紧凑性: 在保证机械性能的前提下, 需通过拓扑优化最大限度地压缩结构尺寸, 以满足阵列化器件的高密度集成需求。

(3)工艺兼容性: 结构几何特征需与微加工工艺(如深反应离子刻蚀)相匹配, 避免高深宽比结构导致的制造缺陷。

(4)低刚度需求: 为降低驱动电压并使静电力能够克服弹性恢复力以产生有效位移, 弹性梁需具备足够低的 piston 轴向刚度, 同时确保设计刚度与目标位移量的一致性。

相较于直梁等基础构型, 传统扇形蛇形梁通过多弯折路径设计, 在有限空间内显著降低了其刚度并提升了芯片的面积利用率。通常以弹性梁的弹簧常数与梁面积之比(k/A_{spring})作为其性能评价指标。Chou 等[15] 的研究表明, 扇形蛇形梁在面外运动时的 k/A_{spring} 小于传统蛇形梁, 因此在同等面积下可实现更低的刚度。但实心梁的截面惯性矩的空间压缩能力存在局限, 难以在有限区域内实现极低刚度设计。

在此基础上, 本文提出一种新型的、经拓扑优化的镂空扇形蛇形梁结构, 其示意图和详细参数分别如图 4 和表 1 所示。通过在部分横梁的梁体关键区域引入规则性的矩形镂空图案, 实现了以下优化效果: (1)刚度调控。在其他结构参数保持一致的情况下, 镂空设计大幅降低了梁的截面惯性矩, 使系统 piston 轴向刚度从 232.02 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 降至 23.69 $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, 降幅达 89.79%。(2)动态特性优化。镂空后系统的 1 阶本征频率同步降低, 主振动模态更集中于垂直运动方向, 有效抑制了非期望运动模态。该部分内容将在 2.4 节结合有限元仿真结果进行详细讨论。总体而言, 该结构为高密度阵列化移相器的实现提供了创新性解决方案。

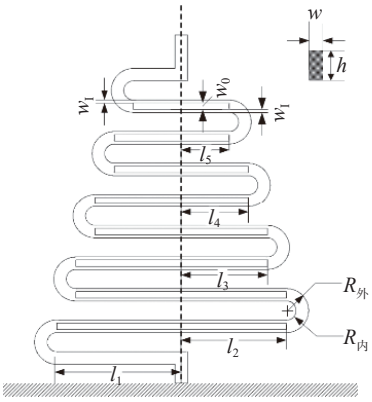

图 4　镂空蛇形梁结构示意图

Fig. 4　Structural schematic diagram of hollow serpentine beam

表 1　镂空蛇形梁的结构参数

Table 1　Structural parameters of hollow serpentine beam

参数名称	数值
梁的宽度w/μm	13
梁的镂空宽度w_0/μm	7
梁的非镂空宽度w_1/μm	3
梁的高度h/μm	25
折叠横梁长l_1/μm	130
折叠横梁长l_2/μm	110
折叠横梁长l_3/μm	90
折叠横梁长l_4/μm	70
折叠横梁长l_5/μm	50
梁弯折处的内半径$R_{内}$/μm	10
梁弯折处的内半径$R_{外}$/μm	23

2.2　驱动结构解析与建模

与电磁驱动、压电驱动及热电驱动等方式相比, 静电驱动具有重复性优异、温度不敏感、功耗低以及结构简单等显著优势。本文设计的 MEMS 光学移相器中光学镜面的活塞式运动采用静电平板驱动方式。具体而言, 以光学镜面为上电极, 衬底上的平板驱动电极为下电极, 构成平板驱动结构。在微镜运动过程中, 硅弹性梁的弹力与垂直行程呈

线性关系；当微镜达到稳定状态时，平板驱动产生的静电力与弹性力形成静力平衡，此时的静力平衡方程如式(2)所示。

$$kx = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{A}{d^2}U^2 \tag{2}$$

式中，k 为可动结构在活塞式运动中的等效弹性刚度，x 为光学镜面在活塞方向的位移，ε_0 为真空介电常数(计算中取 8.854×10^{-12} F·m^{-1})，ε_r 为空气的相对介电常数(计算中取 1)，A 为平板驱动结构中的电极正对面积，d 为光学镜面与平板驱动电极之间的初始间距，U 为施加于平板电极间的动电压(包含预偏置电压与驱动电压)。

值得注意的是，在静电平板驱动器中，当施加于平板电极上的电压达到一定阈值时，平板之间会突然发生相互吸合。这种静电吸合效应会限制光学镜面的运动行程，因此在设计阶段需对其给予重点关注。通常情况下，当平板电极的运动行程达到其初始间距的 1/3 时，便会出现吸合现象[16]。在本设计中，采用波长为 1550 nm 的光源，MEMS 光学移相器的目标移相量为 4π rad，对应的光学镜面的设计位移为 1.55 μm。根据静电吸合原理，静电平板驱动器极板的初始间距应大于该位移的 3 倍，即 4.65 μm。考虑到微镜运动过程中可能出现的“过冲”现象以及制造工艺误差和行程裕度，初步确定极板间隙在 5~8 μm 的范围。

2.3 传感结构解析与建模

本文提出的 MEMS 光学移相器单片集成了基于梳齿结构的电容位移传感器，该传感器通过测量可动梳齿结构的电容变化来获取光学镜面的位移量。具体而言，当施加驱动电压使光学镜面向下位移时，原本在同一平面排列的梳齿结构会随光学镜面的垂直运动转变为高度差化的梳齿结构。在此过程中，梳齿间隙 g 保持恒定，而交叠高度 H 随光学镜面的位移发生变化，导致梳齿电容器的有效交叠面积的改变，从而引起电容值的相应变化。梳齿电容的变化量 ΔC 可表示为：

$$\Delta C = N\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r l}{g}\Delta H = -N\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r l}{g}\Delta z \tag{3}$$

式中，N 为传感结构梳齿对数，l 为梳齿交叠长度，ΔH 为交叠高度的变化量，Δz 为光学镜面的垂直位移量。该公式表明，在 N、l 及 g 均保持不变的情况下，ΔC 与 Δz 成正比。通过实时检测电容变化，即可精确测量 Δz，从而实现非接触式的高精度位移传感，为驱动电压控制系统提供核心控制参量。

本研究选用的基于 SOI 晶圆的器件层厚度为 25 μm，因此设定梳齿厚度 t 为 25 μm。此外，由于芯片面积的限制，梳齿对数 N 取 36。经计算，4 组梳齿电容的总电容值 C 为 1868.6 fF。在 1.55 μm 光学镜面活塞式运动行程下，对应的梳齿电容变化量为 123.5 fF，能够被本文设计的电容检测系统准确测量。

2.4 模态有限元仿真

MEMS 垂直运动微镜是实现光学移相功能的关键器件，对其物理场的仿真可有效解析微纳尺度下力学、电学等多物理场的作用，为器件的性能预测与优化设计提供定量依据，因此显得尤为重要。

有限元分析(finite element analysis, FEA)是一种常用的数值计算方法，该方法将连续的几何模型离散化为数量有限且相互关联的单元网格，并结合物理定律进行近似求解，现已成为解决复杂物理或工程问题的核心工具。本研究采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对 MEMS 光学移相器的可动结构进行了模态仿真。表 2 列出了所设计的 MEMS 光学移相器的关键设计参数。结果表明，其一阶模态频率为 6.448 kHz，运动模态表现为 piston 向运动，如图 5 所示。此外，二至五阶模态频率分别为 10.243 kHz、10.247 kHz、13.094 kHz 和 13.094 kHz。其中，二阶模态频率为一阶模态频率的 1.59 倍，这一特性有助于降低非期望模态的激发概率，从而验证了该结构设计的合理性。MEMS 光学移相器的二阶和三阶模态分别表现为绕 x 轴和 y 轴的离面扭转运动，而四阶和五阶模态则分别表现为沿 x 轴和 y 轴的面内横向扭动。

通过仿真对比了镂空蛇形梁系统与非镂空蛇形梁系统的模态特性，其前 4 阶模态振型的对比如表 3 所示。仿真分析表明，在其他结构参数保持一致的情况下，非镂空蛇形梁系统的活塞运动模态频率(19.513 kHz, 二阶)高于镂空蛇形梁系统的频率(6.448 kHz, 一阶)。然而，非镂空蛇形梁系统的面内扭转模态频率(19.351 kHz, 一阶)与镂空蛇形梁系统的(18.274 kHz, 六阶)差异较小。这表明，镂空蛇形梁的设计在降低其 z 向弯曲刚度的同时，对 x

表 2　MEMS 光学移相器关键参数

Table 2　Key parameters of MEMS optical phase shifter

参数类别	参数名称	物理意义	数值
几何参数	微镜直径D/μm	垂直运动反射硅微镜的直径	350
	器件层厚度h_0/μm	包括微镜、梳齿在内的结构层厚度	25
	空腔高度d_0/μm	微镜下表面至衬底空腔上表面的高度	6~9
	梳齿交叠长度l/μm	定梳齿与动梳齿的交叠长度	500
	可动结构质量m/kg	MEMS微镜、弹性梁和动梳齿的理论总质量	$1.176\,5\times10^{-8}$
	芯片尺寸/mm^3	MEMS光学移相器芯片尺寸	$4.0\times4.0\times0.9$
驱动性能参数	系统刚度k/(N·m^{-1})	微镜、动梳齿与弹性梁的面外垂直运动系统刚度	23.69
	驱动电压U/V	对平板电极Pad施加的电压	0~59

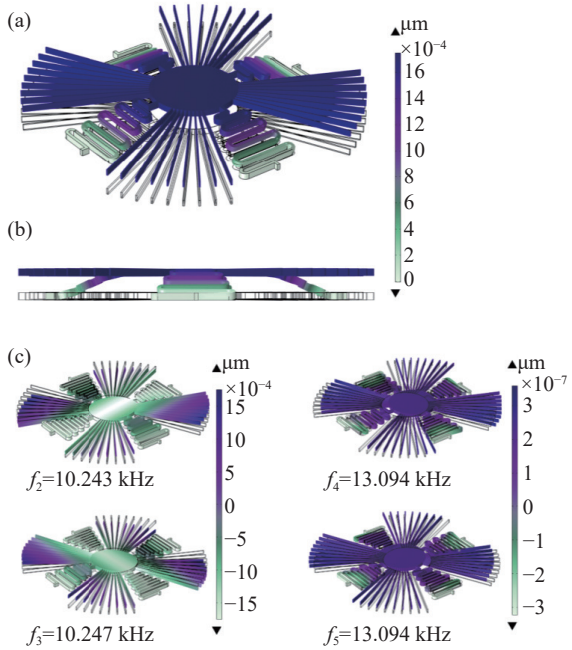

图 5　MEMS 光学移相器的(a)一阶模态仿真变形云图、(b)一阶模态仿真变形云图侧视图和(c)二至五阶模态仿真变形云图

Fig. 5 The deformation contour plots of modal simulation of MEMS optical phase shifter: (a) the first-order mode and its (b) side view, (c) the second- to fifth-order modes

表 3　前四阶模态振型对比

Table 3　Comparison of the first four modal modes

模态阶次	模态		模态频率/kHz	
	镂空梁	非镂空梁	镂空梁	非镂空梁
一阶	z轴方向平动	x-y面内扭转	6.448	19.351
二阶	绕x轴扭转	z轴方向平动	10.243	19.513
三阶	绕y轴扭转	x-y面内扭转	10.247	21.392
四阶	x-y面内平动	x-y面内扭转	13.094	21.443

向弯曲刚度的影响较小。这种镂空设计不仅显著降低了系统的主振动模态频率, 还使主模态主要集中于垂直方向, 有效抑制了非期望模态的激发概率。具体而言: 非镂空蛇形梁的一阶模态为面内扭转, 且其频率与二阶垂直运动模态非常接近; 而采用镂空梁设计后, 一阶模态转变为垂直运动模态, 且二阶模态频率为一阶模态频率的 1.59 倍。

除了固体力学模态分析外, 还需对 MEMS 光学移相器的可动结构开展固体力学稳态分析。通过仿真和计算, 该分析可获取垂直运动硅微镜在采用镂空扇形蛇形梁和非镂空扇形蛇形梁时的系统运动刚度, 以验证设计刚度和位移量目标的一致性。根据刚度的定义, 对与镂空梁和非镂空梁相连的微镜平面施加 1 mN 的荷载后, 通过仿真得到微镜在 piston 向的位移量, 并计算出活塞式运动的等效弹性刚度分别为 23.69 N·m^{-1} 和 232.02 N·m^{-1}。由此可见, 镂空设计使等效弹性刚度下降约 89.79%, 显著降低了结构的驱动电压, 验证了该镂空弹性梁结构设计的可行性和优化效果。

此外, 还对单根梁的轴向刚度进行了仿真与计算分析。其中, 在进行 y 轴和 z 轴的刚度仿真时, 对运动端施加了辊支承约束。对两种蛇形梁的运动端各施加 1 mN 的荷载, 得到各轴向刚度的对比结果, 如表 4 所示。结果表明, 与非镂空设计相比, 镂空蛇形梁仅使 y 轴轴向刚度降低了 8.98%, 但 z 轴轴向刚度降低了 88.32%。这表明, 镂空设计能够实现良好的 z 向模态集中效应, 并显著降低 z 向刚度。

2.5　热应变有限元仿真

本小节通过有限元仿真研究温度对 MEMS 光

表 4 单根梁轴向刚度对比

Table 4 Comparison of axial stiffness of single beam $N\cdot m^{-1}$

轴向	镂空蛇形梁	非镂空蛇形梁
*x*向	4.8648	87.2316
*y*向	158.7686	174.4263
*z*向	6.0976	52.2038

学移相器传感功能的影响。器件主体采用硅基材料(热膨胀系数为 $2.6\times10^{-6}\ K^{-1}$),关键光学反射层为金薄膜(热膨胀系数为 $14.2\times10^{-6}\ K^{-1}$)。两种材料的热膨胀系数存在差异,因此在温度变化时结构内部会产生热应变。基于此,本研究采用 COMSOL Multiphysics 软件对 MEMS 光学移相器可动结构进行热应变仿真分析,以量化因热应变引起的传感误差。

在 235~355 K 温度范围内对 MEMS 光学移相器进行固体力学稳态响应的仿真计算。图 6 展示了当温度为 300 K 时,放大 20000 倍的可动结构热应变仿真示意图及其截面图。结果表明:最大热应变出现在微镜上,使其略微向上隆起;动梳齿随之倾斜,与定梳齿之间的交叠面积会发生变化,从而导致梳齿电容产生相应变化。经计算,电容温度系数为 $1.527\times10^{-5}\ K^{-1}$。

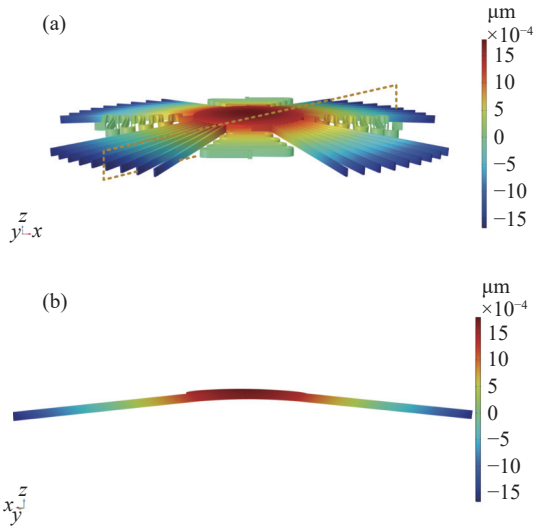

图 6 在 300 K 温度下,放大 20000 倍的可动结构的(a)总体热膨胀仿真示意图和(b)简化热膨胀截面图

Fig. 6 (a) Overall thermal expansion simulation diagram and (b) simplified thermal expansion cross-sectional diagram of the movable structure magnified by 20,000 times at 300 K

3 制备工艺

基于中国科学院上海微系统与信息技术研究所的 4 英寸 MEMS 工艺线,基于 1 张 SOI 晶圆和 1 张超平硅片,完成了 MEMS 光学移相器芯片的制备。如图 7 所示,具体工艺步骤如下。

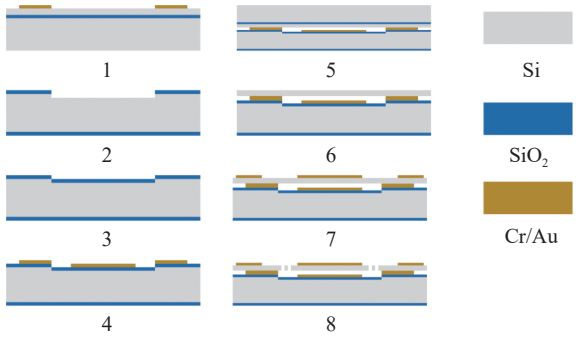

图 7 MEMS 光学移相器芯片的工艺流程

Fig. 7 Process flowchart of MEMS optical phase shifter chip

(1)选取器件层厚度为 25 μm、衬底层厚度为 400 μm 的 SOI 片,在器件层表面溅射 50 nm/700 nm 厚的 Cr/Au,随后进行图形化光刻和湿法腐蚀,形成键合金属焊盘。

(2)选取厚度为 500 μm 的超平硅片,通过热氧化在其表面生长 1 μm 厚的 SiO_2 绝缘层。随后在正面氧化层上进行光刻、反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)以去除氧化硅,并采用深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching, DRIE)工艺形成微镜运动所需的空腔结构,刻蚀深度为 6.5 μm。

(3)对该超平硅片进行第二次氧化处理,在空腔表面生成绝缘层。

(4)在超平硅片的空腔面溅射 50 nm/700 nm 厚的 Cr/Au,随后进行图形化光刻和湿法腐蚀,形成键合金属焊盘以及平板驱动器的下电极。

(5)将完成上述步骤的 SOI 片与超平硅片进行金-金热压键合。

(6)对键合片的 SOI 侧衬底层进行机械减薄处理,然后利用湿法腐蚀(采用 KOH 溶液)和 RIE 去除多余的 Si 和埋氧层,仅保留 SOI 上的器件层。这两步减薄工艺可有效确保微镜的高良率。

(7)在器件层表面溅射 50 nm/300 nm 厚的 Cr/Au,随后进行图形化光刻和离子束刻蚀,形成镜面和 pad 图案。

(8)对器件层表面进行图形化光刻和 DRIE,释放器件层结构,完成器件结构的图形化,最终获得

MEMS 光学移相器芯片。

图 8 展示了所制备的 MEMS 光学移相器芯片实物图及其光学显微镜图。

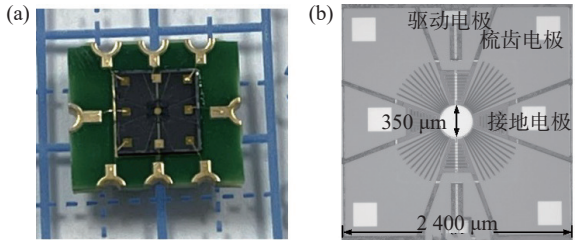

图 8　单个 MEMS 光学移相器芯片的(a)实物图和(b)光学显微镜图

Fig. 8 (a) Physical view and (b) optical micrograph of a single MEMS optical phase shifter chip

4　测试与讨论

为便于电容检测, 本文设计并加工了相应的电学封装结构及电容检测电路, 如图 9 所示。为尽可能减小杂散电容, 所用 MEMS 光学移相器芯片的印制电路板引脚被简化为镀金半孔。

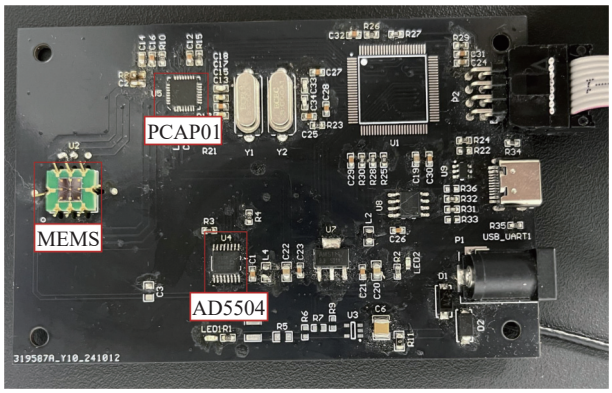

图 9　电学封装后的器件与电容检测电路

Fig. 9 Devices and capacitance detection circuits with electrical packaging

完成测试系统的电路设计后, 委托外部协作单位加工制作了实物电路。该电路系统主要由微控制器(STM32)、电压驱动芯片(AD5504)、稳压器(LM5502)、电容检测芯片(PCAP01)、串口通信模块(USB-UART)以及跳线焊盘等元件构成。利用电压源表, 将所设计的电路构建成 MEMS 光学移相器芯片的电学测试环境, 如图 10 所示。电压源表可输出 12 V 的直流稳压信号, 为电容检测单元供电; STM32 主板通过电源插头供电, PC 通信串口则作为测试系统状态读取与指令下发的媒介。

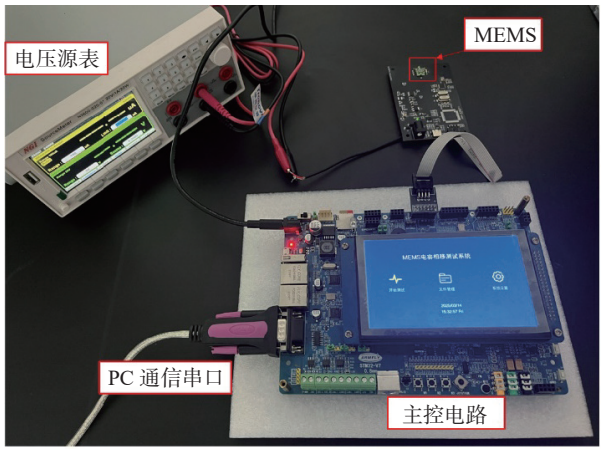

图 10　电学测试环境

Fig. 10 Electrical testing environment

检测电路中采用了德国 Acam 公司生产的 PCAP01 电容检测芯片, 其检测量程为 1 pF, 分辨率可达 aF 级别, 能够实现对梳齿电容量的高精度检测。此外, 所使用的驱动芯片为 Analog 公司生产的 DAC 驱动芯片 AD5504, 其电压输出峰值可达 60 V, 输出精度为 12 位, 满足 MEMS 芯片的高精度电压驱动需求。

基于前述测试环境, 首先对标定值为(2.7±0.25) pF 的参考电容进行了电路性能验证测试。在施加直流电压后, 进行 300 次电容检测并对测试结果取平均值, 得到参考电容测量结果为2.768 03 pF。不同次测试结果之间的误差小于 0.1 fF, 表明所用测试电路能够实现较高精度的静态电容测试。

对 MEMS 光学移相器芯片施加直流稳态电压, 该电压即为平板驱动电压 V_{plate}。以 1 V 为步长, 在 0~59 V 范围内进行驱动测试。对每个电压-电容数据点进行 300 次电容测试, 并取测试结果的平均值。同时, 以驱动电压为 0 V 时的数据为基准, 通过数学处理消除端口的分布电容和噪声。根据式 (1)、式 (3) 可知, 芯片移相量和电容变化量均与微镜位移量呈线性关系, 故电容变化量可线性地转换为芯片移相量。实验测得的移相量-驱动电压关系曲线与理论计算曲线的对比如图 11 所示。

分析表明, 梳齿电容总量 C 为 1 926.2 fF, 测试电容值与其拟合曲线的误差小于 0.5 fF, 换算后总移相量为 2.139 5π rad, 对应的移相误差小于 0.016 2π rad。实验曲线与理论曲线具有高度的一致性, 验证了单片集成梳齿位移传感器的 MEMS 光学移相器芯片功能的有效性。

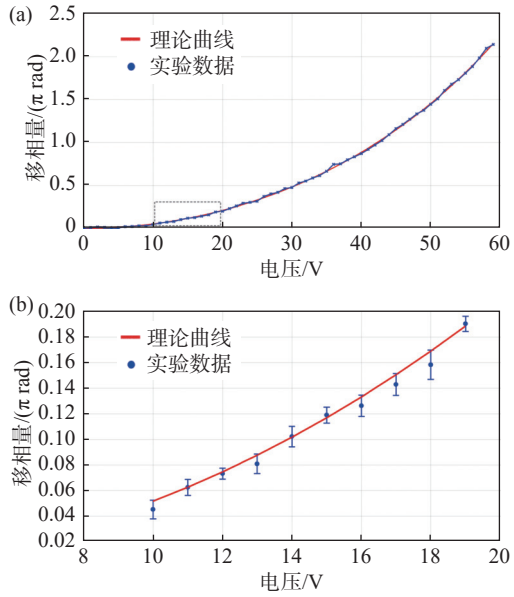

图 11 MEMS 光学移相器(a)完整和(b)局部放大的移相量-驱动电压曲线

Fig. 11 (a) Complete and (b) locally amplified phase shift vs. drive voltage curve for MEMS optical phase shifter

测试误差主要来源于电路中较大的杂散电容，以及测试环境中存在的电磁干扰和随机扰动。移相结果与理论设计值之间的偏差可能源于刻蚀工艺误差导致的镂空蛇形梁镂空面积变化，或极板间距增大引起的静电驱动力减小，最终导致移相量的降低。目前的测试仍处于初步阶段，尚不足以充分体现 MEMS 光学移相器在高精度移相与检测方面的技术优势。在后续工作中，需通过进一步优化测试电路、改进驱动与传感芯片选型以及完善器件电路封装等手段来提升电容检测的精度与速度。此外，基于光电封装实施光电测试，可获取驱动电压-电容-光学移相量之间的对应关系，从而进一步标定和修正误差。

本文还选取了部分国内外具有代表性的 MEMS 光学移相器及垂直位移 MEMS 微镜进行横向对比，具体结果如表 5 所示。与谐振式器件[11,17] 相比，本研究设计的集成了梳齿电容位移传感器的准静态静电驱动器件具有更高的工作带宽；而相较于热电、电磁等其他驱动方式的 MEMS 器件，我们的器件对温度变化的敏感性更低。此外，集成的梳齿电容传感器能够实时传感 MEMS 微镜的位移，并且该器件还具有易于实现批量化制造和集成的特点，可作为相位调控器件应用于光通信系统和矢量相控阵等场景。

表 5 本文 MEMS 光学移相器与其他 MEMS 器件的对比

Table 5 Comparison of MEMS optical phase shifter in thie paper with other MEMS devices

驱动原理	移相量/rad	位移量/μm	工作电压/V	特点	文献
静电	4π	1.55	59	重复性好，驱动速度快，温度敏感性低	本文
热电	—	218	5	工作电压低，行程大，工作温度要求严格	[9]
静电	2π	0.325	28	工艺较简单，未集成传感器	[11]
静电	—	30	15.5	工作电压较低，未集成传感器	[17]

5 总结

本文提出并制作了一种集成梳齿电容位移传感器的静电驱动型高精度 MEMS 光学移相器。在结构设计上，采用镂空蛇形弹性梁以降低机械刚度，实现低电压驱动，并通过集成梳齿电容位移传感器构建了光学镜面位移传感控制系统。该器件在 4 英寸 MEMS 工艺线上完成制备，实验结果表明，在 59 V 驱动电压下可产生 2.1395π rad 的光学相位调制量；集成的梳齿电容传感器检测误差小于 0.5 fF，对应的光学移相误差小于 0.0162π rad，验证了单片集成梳齿位移传感器及 MEMS 光学移相器芯片的功能有效性。本研究开发的器件在光通信系统、矢量相控阵等应用中作为相位调控器件，具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] MA J. Advanced MEMS-based technologies and displays[J]. Displays, 2015, 37: 2-10.

[2] ZHOU G, LIM Z H, QI Y, et al. Single-pixel MEMS imaging systems[J]. Micromachines, 2020, 11(2): 219-247.

[3] DUDLEY D, DUNCAN W M, SLAUGHTER J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]//MOEMS

Display and Imaging Systems. Bellingham: SPIE, 2003: 14-25.

[4] WU M C, SOLGAARD O, FORD J E. Optical MEMS for lightwave communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4433-4454.

[5] CHEN S, ZHANG Y, HONG X, et al. Technologies and applications of silicon-based micro-optical electromechanical systems: a brief review[J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(8): 081301.

[6] XIN C, XU Y, ZHANG Z, et al. Micro-opto-electro-mechanical systems for high-precision displacement sensing: A review[J]. Micromachines, 2024, 15(8): 1011.

[7] 马阎星, 吴坚, 粟荣涛, 等. 光学相控阵技术发展概述 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20201042.

[8] PRIBOŠEK J, BAINSCHAB M, SASAKI T. Varifocal MEMS mirrors for high-speed axial focus scanning: A review[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9(1): 135-149.

[9] REN A R, DING Y T, YANG H Z, et al. A tip-tilt-piston electrothermal micromirror array with integrated position sensors[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2025, 11: 45-58.

[10] AHMAD M, BAHRI M, SAWAN M. MEMS micromirror actuation techniques: A comprehensive review of trends, innovations, and future prospects[J]. Micromachines, 2024, 15(10): 1233.

[11] ZHAI L Y, XU J, ZHONG S L, et al. A novel offset vertical comb-driven micromirror as an optical phase modulator[J]. Microelectronic Engineering, 2013, 105: 51-59.

[12] HAN R L, SUN J F, HOU P P, et al. Multi-dimensional and large-sized optical phased array for space laser communication[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 5026-5037.

[13] ACAM-Messelectronic Gmbh. PCap01 datasheet[EB/OL]. [2025-02-05]. https://downloads.sciosense.com/pcap01.

[14] 邓丽莉, 桑胜波, 张文栋, 等. 基于 Pcap01 芯片的高精度微电容检测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2013, 26(8): 1045-1049.

[15] CHOU H M, LIN M J, CHEN R S. Fabrication and analysis of awl-shaped serpentine microsprings for large out-of-plane displacement[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(9): 095018.

[16] ZHANG W M, YAN H, PENG Z K, et al. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 214: 187-218.

[17] JEONG K H, LEE L P. A novel microfabrication of a self-aligned vertical comb drive on a single SOI wafer for optical MEMS applications[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(2): 277-281.