文章编号:1007 - 4252(2023)03 - 0003 - 202　　DOI:10.20027/j.gncq.2023.0021

面向大行程垂直运动的电磁驱动式 MEMS 微反射镜

宋柯宇[1,2],凌必赟[1],陈栋[1],徐巧[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传感技术联合国家重点实验室,上海 200050;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:本文提出了一种具有大行程垂直位移的电磁驱动式 MEMS 微反射镜。该 MEMS 微反射镜基于杠杆原理,以电磁力驱动杠杆的短臂扭转,从而使连接长臂的反射镜面产生较大的位移;采用对称设计的弹性铰链结构,抵消水平方向的位移,以保证反射镜面仅在垂直方向位移。其中,电磁力由固定于镜体结构的永磁体和置于镜体结构周围的电磁驱动组件共同产生。本文通过 MEMS 工艺加工实现了该 MEMS 微反射镜的镜体结构部分,并通过机械装配将电磁驱动组件与镜体结构相对固定。机械结构仿真表明:该 MEMS 微反射镜的杠杆机构的扭转角度与驱动扭矩成正比。电磁仿真表明:基于电磁力的驱动扭矩与线圈电流正相关。实验结果表明:初步设计的镜体结构和电磁驱动组件构成的 MEMS 微反射镜可以在±70mA 的驱动电流情况下实现 4mm 的垂直位移,并表现出较好的重复性。由于线圈匝数、驱动电路和杠杆结构都有很大的优化潜力,因此该 MEMS 微反射镜的垂直位移在理论上还可以进一步提高。

关键词:MEMS 微镜;电磁驱动;放大杠杆;弹性铰链

中图分类号:TN253;TP211.4　　**文献标识码**:A

Electromagnetic driven MEMS micromirror for large piston stroke

SONG Ke-yu[1,2], LING Bi-yun[1], CHEN Dong[1], XU Qiao[1], WU Ya-ming[1,2]

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai 200050, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This research suggests an electromagnetic drive type MEMS micromirror with a large piston stroke. Lever-based, the MEMS micromirror employs electromagnetic force to drive the short arm's twist, which causes the micromirror attached to the long arm to produce a significant displacement. To ensure that the micromirror movement only occurs in the vertical direction, the displacement in the horizontal di-

收稿日期:2023-04-25;　　**修订日期**:2023-05-15

基金项目:上海市青年科技英才扬帆计划资助(20YF1456600).

作者简介:宋柯宇(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 微镜与 MEMS 光纤可调延迟线(E-mail:songkeyu0808@163.com).

通信作者:吴亚明(1966—),男,博士,研究员,主要研究方向为光学 MEMS 器件及其相关技术。(E-mail:yamingwu@mail.sim.ac.cn).

rection is offset using an elastic silicon hinge with symmetrical design. Wherein the permanent magnet fixed to the micromirror structure and the electromagnetic driving component positioned around the micromirror structure work together to generate the electromagnetic force. In this research, the MEMS process was used to fabricate the MEMS micromirror structure, and mechanical assembly was used to relatively fix the electromagnetic driving component to the micromirror structure. Mechanical structure simulation shows that the torsion angle of the lever mechanism of the MEMS micromirror is proportional to the driving torque. Electromagnetic simulation shows that the driving torque based on electromagnetic force is positively correlated with the coil current. The experimental findings demonstrate that the MEMS micromirror has high precision and can achieve a vertical displacement of 4mm at a driving current of about ± 70mA. Considering there is so much space for improvement in terms of coil turns, driving circuit, and lever structure, the MEMS micromirror can theoretically accomplish more piston stroke.

Key words: MEMS micromirror, Electromagnetic actuation, Silicon lever, Elastic silicon hinge

0　引言

MEMS 微反射镜是一种利用微加工技术实现的具有可驱动的反射镜面的光学 MEMS 器件,用于实时控制光束的传输,目前已广泛应用于光通信、光成像与光显示、可调谐激光器、光学测量、光谱分析及光传感等领域[1-9]。

MEMS 微反射镜的核心在于其内部集成的驱动器,该驱动器需根据应用需求,提供足够的行程、驱动精度和响应速度,以实现对光束的完全、及时、准确的调控。其中,对于更大驱动行程的追求,无论是角位移还是线位移,一直是 MEMS 微反射镜的驱动器的研究重点,对拓展 MEMS 微反射镜的应用具有重要意义。以垂直运动的 MEMS 微反射镜为例,更大的行程意味着更大的光程调节范围和光相移范围,从而可大幅度降低光学系统的体积、成本和复杂度,也可避免为了实现同等光程情况下的经过多次光学反射造成的光学插入损耗,这对傅里叶变换光谱仪、光学断层成像及 MEMS 可调光延迟线等研究尤为重要(往往需要数十至数万倍激光波长的垂直位移,实现数十微米至数十毫米的光程调节范围)。

然而,目前已报道的垂直运动的 MEMS 微反射镜研究均未突破毫米级行程,对于需要数十毫米级的光程调节范围的应用而言,仍要数十次以上的光学反射才能实现。2010 年,Wu 等提出了一种垂直运动的热电驱动式 MEMS 微反射镜,可以实现 200μm 的行程[10];2016 年,Yuan 等报道了一种垂直运动的电磁驱动式 MEMS 微反射镜,在 1cm×1cm 的芯片尺寸实现了 123μm 的驱动行程[11];此外,2023 年,Ou 等对垂直运动的电磁驱动式 MEMS 微反射镜进一步优化,其在 1cm×1cm 的芯片尺寸下实现了 800μm 的行程[12],这也是目前所见报道的最大的垂直运动行程。

为此,本文提出了一种面向大行程垂直运动的电磁驱动式 MEMS 微反射镜。该 MEMS 微反射镜基于杠杆原理,以电磁力驱动杠杆的短臂扭转,从而在长臂产生较大的位移;采用对称设计和弹性铰链结构,抵消水平方向的位移,从而保证该反射镜仅在垂直方向位移。本文介绍了该垂直运动的 MEMS 微反射镜的结构、微加工工艺和封装工艺,并进行了相关的测试和讨论。

1　面向大行程垂直运动的 MEMS 微反射镜的结构设计

该 MEMS 微反射镜的结构包括一个镜体结构和两组对称布置的电磁驱动组件,如图 1 所示。每个电磁驱动组件由一个 C 型的导磁柱和其两端缠绕的导电线圈构成;该导磁柱的材料为相对导磁率可达 10^6的软磁材料;通过对导电线圈施加交流电,该电磁驱动组件能够产生沿着导磁柱的强度和方向可调的环形磁场。镜体结构由一个反射镜面和其两端对称布置的费力杠杆机构组成。该杠杆机构的短臂端布置着磁场方向为水平的钕铁硼永磁体(其剩磁可达 1.2T),该永磁体插入 C 型的导磁柱的开口处,用于与电磁驱动组件产生的磁场相互作用,最终感应出电磁力;杠杆机构的长臂端通过一个弹性铰链连接着反射镜面,用于在短臂端的电磁力的作用下驱动反射镜面;镜体结构两端的蛇形梁用作该杠杆机构的支点。因此,该 MEMS 微反射镜的垂直方

向的行程 H 由杠杆机构的旋转角度 θ 和长臂的长度 L 决定,为 $H = L\sin\theta$ 。需要注意的是:由于该镜体结构采用对称设计,因此在左右两侧杠杆结构的转动角度相同的情况下,反射镜面的水平方向位移能够被抵消,进而保证反射镜面仅沿着垂直方向运动。

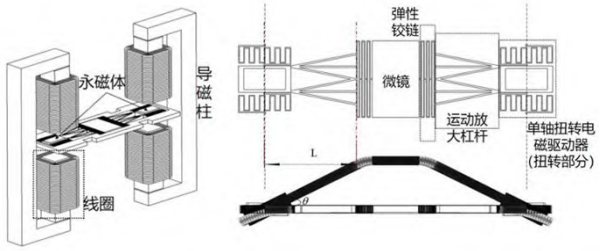


图 1 MEMS 垂直运动微镜结构示意图

Fig.1 Structure diagram of piston actuation MEMS micromirror

该 MEMS 微反射镜的电磁扭转驱动原理如图 2 所示。在电流磁效应的作用下,导电线圈产生可控的偏置磁场 B 的方向遵循右手定则,大小正比于安匝数 NI,其中 N 为线圈匝数、I 为导电线圈的电流。当永磁体的磁矩矢量 M 在磁场矢量 B 的偏置磁场中,会受到 M×B 的电磁扭矩的作用,产生类似“指南针”的效果。

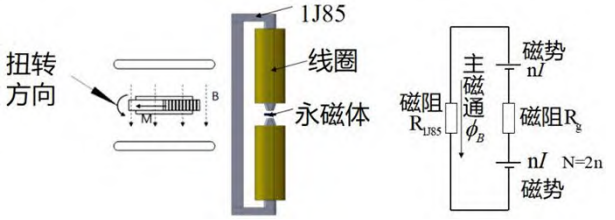


图 2 电磁扭转驱动原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of electromagnetic torsional drive

其产生的磁力矩近似为:

$$T_1 = \frac{V \cdot NI}{S_g \cdot (R_{1J85} + R_g)} M_0 \times e_B \qquad (1)$$

其中,T_1 为电磁输出扭矩、M_0 为永磁体的磁化强度、V 为永磁体体积、S_g 为气隙的磁极的截面积、N 为线圈匝数、R_{1J85} 为导磁柱的总磁阻、R_g 为气隙磁阻、e_B 为线圈绕组通电方向遵循右手定则的方向上的单位向量。由公式(1)可知,调整安匝数是调整磁力矩的最有效的方式。考虑到该 MEMS 微反射镜的功耗(其与电流的平方成正比,也与电阻成正比;电阻与线圈匝数成正比),本文拟适当增加线圈匝数,以降低电流,进而减小功耗。

为了便于对本文提出的 MEMS 微反射镜方案的进行可行性验证,本文确定了该 MEMS 微反射镜的镜体结构的关键参数,如表 1 所示。

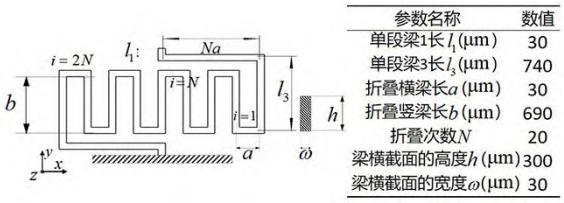
表 1 镜体结构关键参数

Table1 Parameters of micromirror structure

关键参数	数值
杠杆长臂等效长度 L(mm)	4
微反射镜尺寸(mm^2)	1.8×2.9
最大扭转角度 θ_{max}(°)	30

2 镜体结构的扭转运动分析

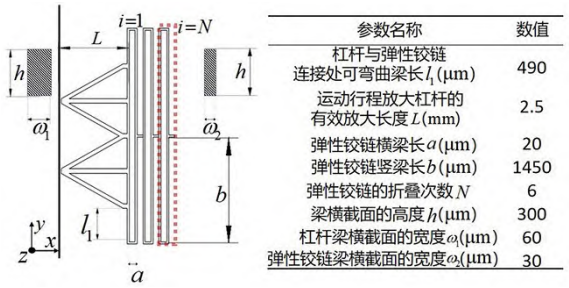
由于弹性铰链的存在,MEMS 微反射镜在扭转方向的等效弹性系数并不一定为定值,因此磁力矩形成的扭转角度的计算较为复杂,进而难以直接获得扭矩与垂直位移之间的关系。为此,本文采用有限元软件,开展相应的研究。其中,蛇形梁和弹性铰链的相关参数如图 3、4 所示。



参数名称	数值
单段梁1长 l_1(μm)	30
单段梁3长 l_3(μm)	740
折叠横梁长 a(μm)	30
折叠竖梁长 b(μm)	690
折叠次数 N	20
梁横截面的高度 h(μm)	300
梁横截面的宽度 ω(μm)	30

图 3 蛇形梁参数图示

Fig.3 Parameter illustration of the serpentine beam



参数名称	数值
杠杆与弹性铰链连接处可弯曲梁长 l_1(μm)	490
运动行程放大杠杆的有效放大长度 L(mm)	2.5
弹性铰链横梁长 a(μm)	20
弹性铰链竖梁长 b(μm)	1450
弹性铰链的折叠次数 N	6
梁横截面的高度 h(μm)	300
杠杆梁横截面的宽度 ω_1(μm)	60
弹性铰链梁横截面的宽度 ω_2(μm)	30

图 4 弹性铰链参数图示

Fig.4 Parameter illustration of elastic silicon hinge

使用 Comsol 软件对芯片结构进行静力学仿真,图 5(a)为仿真所得驱动扭矩-微镜 Z 向位移的关系曲线,对应微镜±2mm 位移时的结构应力分布图如图 5(b)。

由图 5(a)可知,对称布置的一对电磁扭转驱动

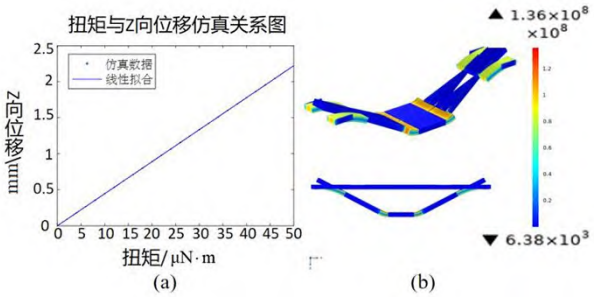


图 5　芯片结构的静力学仿真（a）驱动扭矩与微镜垂直位移的关系曲线（b）MEMS 垂直运动微镜应力分布图

Fig.5 Static simulation of the chip structure (a) Relationship between driving torque and piston displacement of the micromirror (b) Stress distribution diagram of piston actuation MEMS micromirror

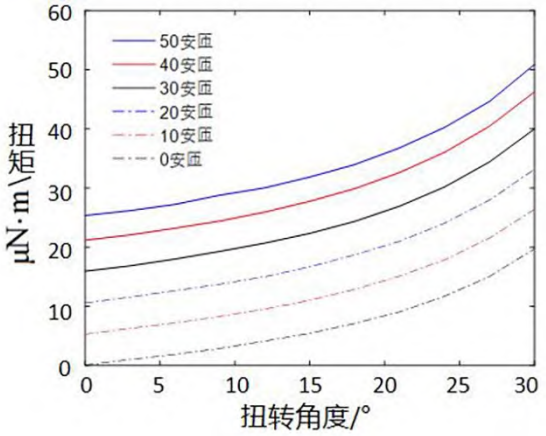


图 6　电磁驱动器输出扭矩与永磁体的扭转角度的关系

Fig.6 Relationship between output torque of electromagnetic actuator and torsion angle of permanent magnet

器,通过运动行程放大杠杆与弹性铰链的组合结构,可将扭转驱动器的扭转角度转化为直线位移输出,其驱动扭矩与输出垂直位移为线性关系,通过计算其非线性度远小于 0.001%。由图 5(b)可得,芯片结构在微镜±2mm 位移处的最大应力为 136MPa,小于硅断裂的安全应力。

3　电磁驱动组件设计

设置磁路参数如表 2 所示,该参数是利用 Comsol 软件在驱动功耗与器件体积的约束下,进行磁路仿真优化所得。结合式(1)可知,在初始位置时 $M_0 \times e_B$ 有最大值,随着扭转角度 θ 的增加呈现出正弦衰减的趋势,电磁扭矩将同时受到电流 I 增大和 $\sin\theta$ 减小的共同作用,导致非线性。基于此,通过进一步仿真得到了在同一安匝数条件下,电磁驱动器输出扭矩与永磁体的扭转角度的关系曲线如图 6 所示。

表 2　　磁路参数

Table2 Parameters of magnetic circuit

磁路参数	数值
软磁材料在导磁回路的长度(mm)	65
气隙长度 d(mm)	1
软磁柱的横截面积 S(mm^2)	1.6×1.6
钕铁硼(永磁体)尺寸 V(mm^3)	1.6×0.8×0.3
气隙截面面积 S_g(mm^2)	0.8×1.6

由图 6 可得,在同一扭转角度下,电磁驱动器的输入安匝与输出电磁扭矩成正比。在同一安匝输入下,随着扭转角度的增大,输出扭矩快于线性增大。因此在整个工作范围内,其驱动扭矩与输入安匝数存在非线性关系。

将电磁扭转驱动器的目标最大扭转角度设置为 $\theta_{max} = 30°$,则此角度对应永磁体在扭转过程中所能获得的最大驱动扭矩。需要注意的是,在最大角度时要确保电磁驱动器撤去驱动电流后,永磁体与软磁芯的直接作用产生的扭矩不能超过驱动器的蛇形梁与弹性铰链(后文统称弹性扭转结构)因形变所产生的回复扭矩,否则将出现类似于静电驱动的“吸合现象(pull-in)”。从图 6 中可以看出,0 安匝时的扭矩与扭转角度的关系曲线可得在扭转角度 30°时,仍有 20μNm 的扭矩(永磁体直接对软磁芯磁化),如果弹性扭转结构的回复扭矩小于 20μNm,驱动器自身不能自动归至零位,将“吸合”到最大角度处,即出现不稳定。虽然电磁驱动是一种双向驱动,可以通过输入反向电流来使其归位,这将导致电磁驱动器驱动特性的变化,所以在设计中仍需要避免。因此,单轴扭转驱动器的磁路设计需要注意三点:1)永磁体有足够的扭转空间;2)在目标扭转角度时,驱动功率限制下的最大电磁驱动扭矩要大于或等于弹性扭转结构因形变产生的回复扭矩;3)在目标扭转角度时,撤去输入电流,此时的永磁体与软磁芯的作用不能超过驱动器的弹性扭转结构因形变产生的回复扭矩。

当扭转驱动器的电磁扭矩与弹性扭转结构的回

复扭矩相等时,每一个输入安匝数(线圈匝数确定,可与输入电流等价)对应一个平衡的驱动角度,将输入安匝数与对应的平衡驱动角度绘制为曲线,此即为“驱动曲线”,它代表了扭转驱动器的基本驱动特性。将静力学仿真中回复扭矩与扭转角(可以通过 $\theta=\arcsin\frac{H}{L}$ 与输出位移对应)的关系曲线与电磁扭矩与扭转角的关系曲线结合,如图 7 所示,两曲线的交点即为每一个输入安匝数与对应的平衡扭转角度。将一系列的交点绘制为安匝数与平衡扭转角度的关系曲线,再将扭转角度替换为微镜的 Z 向位移,即为整个 MEMS 微镜的仿真驱动曲线,如图 8 所示。在小安匝输入情况下驱动曲线近似为线性,但随着安匝数的增大使得扭转角度增大,永磁体周围的磁感应强度很快增大,影响线圈软磁芯磁导率,进而导致电磁驱动器输出扭矩较快增大,所以在整个驱动角度范围内其驱动曲线是非线性的。随着安匝数的进一步增大,电磁驱动扭矩曲线和弹性扭转结构回复扭矩与扭转角度的关系直线不再有交点,此时将不再有平衡点,电磁扭矩大于回复扭矩,将促使电磁扭转驱动器进一步扭转,造成“吸合”,这需要额外增加机械限位设计以避免梁结构的损坏。通过以上分析可知,芯片设计满足电磁驱动能提供在希望的最大扭转转角对应的输出扭矩,此状态对应于 MEMS 微镜的法向±2mm 位移,同时也满足硅微结构应力小于最大可承受应力(本文保守假设最大可承受应力 0.2GPa)的安全可靠性要求。单个 MEMS 垂直运动微镜芯片尺寸为 12mm×4mm×0.3mm,可以满足芯片阵列化的尺寸要求。

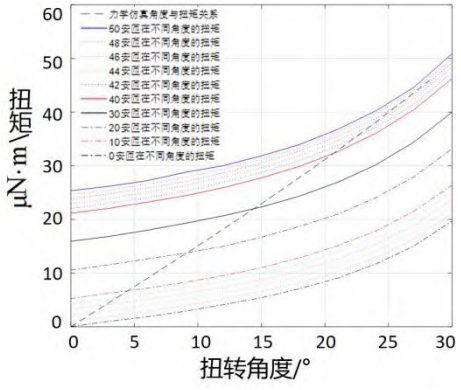


图 7 静力仿真与电磁仿真角度与扭矩的关系曲线

Fig.7 Relationship between angle and torque in Static and Electromagnetic Simulation

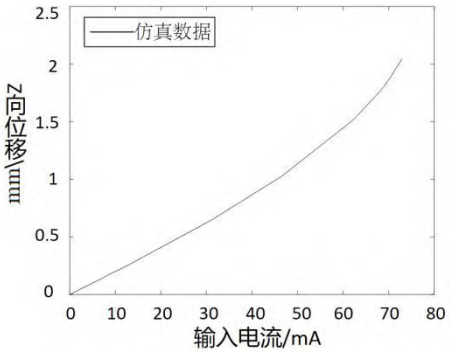


图 8 仿真所得 MEMS 微镜驱动曲线

Fig.8 Driving Curve of MEMS micromirror from Simulation

4 面向大行程垂直运动的 MEMS 微反射镜的加工与组装

该镜体结构由 MEMS 工艺加工而得,工艺流程如图 9 所示。

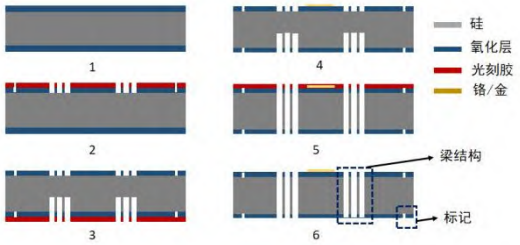


图 9 MEMS 垂直运动微镜芯片工艺流程图

Fig.9 Process flow of piston actuation MEMS micromirror chip

步骤一:对 300μm 硅片进行热氧化,使硅片的两面形成 1μm 的氧化层。

步骤二:在硅片正面涂胶、光刻和显影,随后采用 RIE(Reactive Ion Etching,反应离子刻蚀)刻蚀氧化层,使光刻图形转移至正面的氧化层。

步骤三:在硅片背面涂胶、光刻和显影,随后采用 RIE 刻蚀氧化层,使光刻图形转移至背面的氧化层;再使用 DRIE(Deep Reactive Ion Etching,深反应离子刻蚀)对背面刻 100μm。

步骤四:在硅片正面涂胶、光刻和显影,随后溅射 Cr/Au,厚度分别为 300A 和 2000A,最后采用 lift-off 工艺使 Cr/Au 图形化。

步骤五:在硅片正面涂胶、光刻和显影,主要用于保护图形化的 Cr/Au,随后使用 DRIE 对正面刻蚀 200μm,直至最后刻蚀穿通。

步骤六:在刻穿后,使用丙酮溶液清洗释放芯

片,最终获得的 MEMS 微镜芯片实物如图 10。

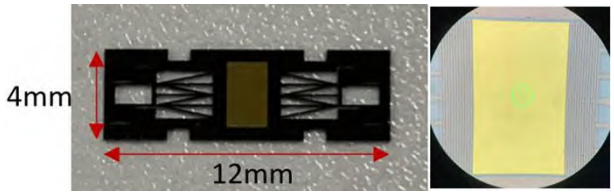


图 10　MEMS 垂直运动微镜芯片照片

Fig. 10 Photograph of piston actuation MEMS micromirror chip

本文设计并加工了相应的铝制装配结构,用于固定镜体结构与两组电磁驱动组件,如图 11 所示。此外,永磁体通过点胶固定到 MEMS 芯片上的永磁体载台。组装完成后的整体系统如图 12 所示,其尺寸为 15mm×9mm×29mm,重量为 18g。

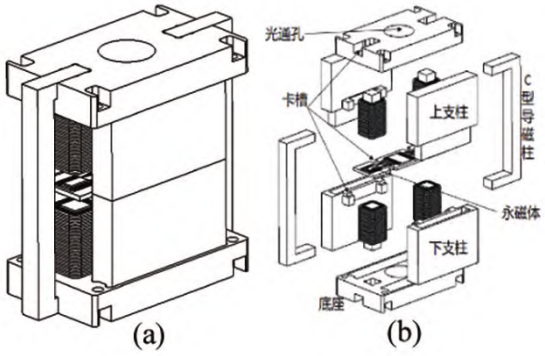


图 11　1×1 MEMS 垂直运动微镜封装 CAD 图(a) MEMS 垂直运动微镜封装结构 CAD 图;(b) MEMS 垂直运动微镜封装结构爆炸图

Fig.11 Packaging CAD diagram of 1×1 piston actuation MEMS micromirror (a) Packaging CAD diagram of piston actuation MEMS micromirror (b) Packaging explosion diagram of piston actuation MEMS micromirror

5　测试与讨论

采用准闭合磁路双边线圈封装的 MEMS 微镜器件如图 13(a)。使用原理为三角测量法的位移传感器(KEYENCE LK-H155 型高精度 CMOS 激光位移传感器)进行测量,如图 13(b),其测试范围为-50mm 至+50mm,精度为 1μm,其测试流程具体为:将传感器输出的激光照射在微镜上,再对线圈施加不同大小的电流,可以直接读出镜面 Z 向位移的变化。

准闭合磁路双边线圈封装的 MEMS 微镜器件

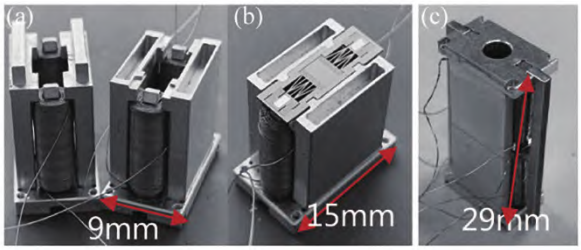


图 12　MEMS 垂直运动微镜封装实物照片(a) 线圈与上支柱、下支柱的固定结构实物照片;(b) MEMS 微镜芯片与下支柱的装配实物照片;(c) 整体封装结构实物照片

Fig.12 Photograph of the package of piston actuation MEMS micromirror (a) Photograph of coil and upper strut, lower strut fixed structure (b) Photograph of MEMS micromirror chip and the assembly of the lower strut (c) Photograph of overall package structure

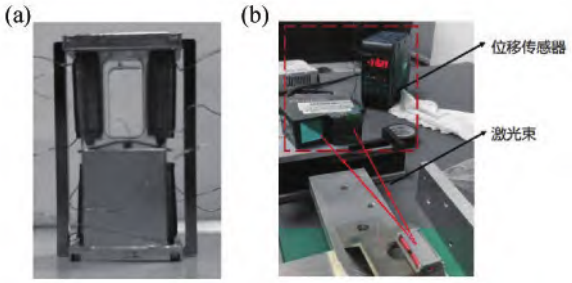


图 13　双边线圈封装的 MEMS 微镜测试环境图(a) 双边线圈封装 MEMS 微镜实物图;(b) 位移传感器测试系统图

Fig. 13 Test environment photograph of MEMS micromirror packaged withdouble-side coil (a) Photograph of MEMS micromirror packaged with double-side coil (b) Photograph of displacement sensor test system

的测试曲线如图 14 所示,仿真曲线与实验曲线的变化趋势基本一致。在小角度(此时磁场方向与永磁体夹角的正弦的减小与永磁体扭转带来的磁感应强度增强相当),驱动曲线为线性;随着驱动电流的增大,扭转角度的变化使永磁体周围的磁感应强度也增大,进而影响电磁扭矩的趋势变大使得驱动曲线出现非线性。MEMS 微镜位移超过 2mm 之后,输入电流由 70mA 到 75mA 时,微镜会发生吸合达到机械限位的 2.5mm 左右,这符合仿真结果,即安匝数增加到某一值时,电磁扭矩和静力扭矩分别与角度的关系的曲线不再有交点,电磁扭矩不能与静力回复扭矩相平衡,需要依靠机械限位限制保护梁结构。

该实验曲线与仿真曲线在 60mA 时具有最大的偏差为 200μm,实验与仿真的偏差可能是由于电磁仿真误差、电磁封装的安装误差以及测量误差所致。需要进一步说明的是,实验曲线与仿真曲线的偏差不会影响 MEMS 微镜器件的应用,但在理论上分析清楚原因是必要的,这有利于改进器件的设计。

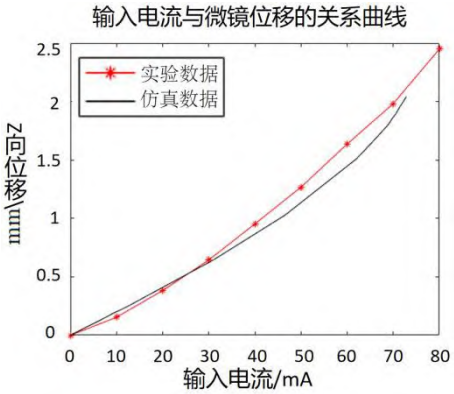


图 14 双边线圈封装的 MEMS 垂直运动微镜器件驱动曲线测试与仿真结果

Fig.14 Relationship between current in double side coil package on displacement of micromirror, comparison between Experiment and Simulation

图 15 为 MEMS 微镜器件的正向、负向垂直运动的驱动曲线测试结果,曲线具有较好的以零点为中心的对称性,但存在较小的偏差,其原因是由于上下两边线圈组装高度的差异导致上下电流激发的磁场并不对称所致。与此同时,还进行了驱动曲线的重复性测试,第一段为起始驱动曲线为初始零位置到最大正向位移(等同于图 14),第二段为最大正向位移到最大负向位移,第三段为负向最大位移到输入电流为零的位置。相同的输入电流,其位移重复偏差为十几微米,在 0 安匝时,有 12 微米的重复偏差。其原因是软磁材料坡莫合金 1J85 的磁滞特性所致,但该软磁材料的磁滞较小,与所测曲线吻合。

6 结论

本文提出了一种面向大行程垂直运动的电磁驱动式 MEMS 微反射镜。该 MEMS 微反射镜基于杠杆原理,通过驱动杠杆的短臂从而在长臂产生较大的位移;通过在结构中引入永磁体和导电线圈,使两者之间产生大小和方向可调的电磁驱动扭矩。本文通过 MEMS 工艺加工实现了该 MEMS 微反射镜的

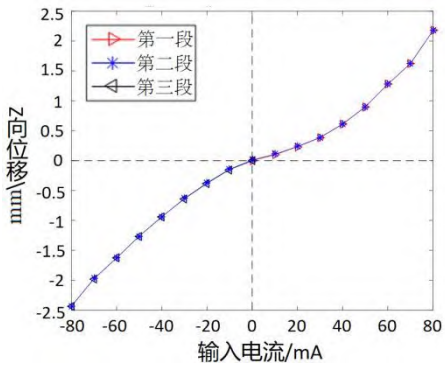


图 15 MEMS 微镜器件驱动曲线的重复性测试

Fig.15 Repeatability experiment of piston actuation MEMS micromirror device

镜体结构部分,并通过机械装配将电磁驱动组件与镜体结构相对固定。实验结果表明,该 MEMS 微反射镜能够在±70mA 的驱动电流情况下实现 4mm 的垂直位移,并具有较好的重复性,此时对应的单个线圈热功率为 44mW。考虑到,线圈匝数、驱动电路和杠杆结构均有大量的优化空间,因此该 MEMS 微反射镜理论上可以获得更大的垂直位移。

参考文献:

[1] Solgaard O, Godil A A, Howe R T, et al. Optical MEMS: From Micromirrors to Complex Systems[J], Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(3): 517-538.

[2] Calaza C, Fonseca L, Moreno M, et al. A surface micromachining process for the development of a medium-infrared tuneable Fabry-Perot interferometer[J], Sensors and Actuators A, 2004, 113(1): 39-47.

[3] 杜善义,张晓晶,陈吉安等.光纤氢传感技术的研究现状及其应用前景[J].宇航学报, 2004, 25(4): 466-472.

[4] 刘惠兰,冯丽爽,单志刚等.一种新型谐振式 MOEMS 陀螺的设计及分析[J].传感技术学报, 2008, 21(2): 244-247.

[5] Dickensheets D L. Requirements of MEMS membrane mirrors for focus adjustment and aberration correction in endoscopic confocal and optical coherence tomography imaging instruments[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, 2011, 7(2): 021008-021008-9.

[6] Moghimi M J, Wilson C R, Dickensheets D L. Improved micro-optoelectromechanical systems deformable mirror for in vivo optical microscopy[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2012, 11(4): 043006-043006.

[7] Noell W, Clerc P A, Dellmann L, et al. Applications of SOI-based optical MEMS[J].IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 2002, 8(1): 148-154.

[8] Wu L, Dooley S, Watson E A, et al. A tip-tilt-piston micromirror array for optical phased array applications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(6): 1450-1461.

[9] Shioda T, Fujii K, Kashiwagi K, et al. High-resolution spectroscopy using interleaved 100 GHz optical frequency comb scanned by phase modulator[J]. Optics Communications, 2011, 284(21): 5180-5184.

[10] Wu L, Dooley S, Watson E A, et al. A Tip-Tilt-Piston Micromirror Array for Optical Phased Array Applications[J], Microelectromechanical Systems, 2010, 19(6): 1450-1461.

[11] Xue Y, He S. A translation micromirror with large quasi-static displacement and high surface quality[J], Micromechanics and Microengineering, 2016, 27(1): 015009.

[12] Ou C H, Toan N V, Ono T. A Large-Stroke Tip-Tilt-Piston Micromirror with Electromagnetic Actuators Based on Metallic Glass[C], 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Munich, Germany, 2023: 1103-1106.