

新型大尺寸电磁驱动 MEMS 光学扫描镜的研制*

穆参军^{1,2,†} 张飞岭³ 吴亚明¹

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 飞索半导体(中国)有限公司, 苏州 215021)

摘要: 设计并制作了一种结构新颖的镜面尺寸为 $6\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的电磁驱动 MEMS 光学扫描镜. 这种背面为微型铜驱动线圈的 MEMS 硅基扭转镜面沉浸在由包含永磁体的磁回路产生的磁场中, 当电信号通过驱动线圈时, MEMS 光学扫描镜绕着扭转梁发生了大角度的扫描运动. 采用 MEMS 体硅加工工艺和电镀技术制作的器件显示出了优良的性能, 实验获得的扫描镜静态转角斜率为 $0.03^\circ/\text{mA}$, 当器件进行动态扫描时, 在 381Hz 的谐振频率下获得了最大 $\pm 10.2^\circ$ 的光学扭转角度, 空气中的 Q 因子为 221, 相应的功耗为 $13\mu\text{W}$, 与此同时 MEMS 光学扫描镜具备了出色的镜面粗糙度、光学反射率和镜面平整度. 实验证明该器件完全适合于微型光谱仪和可调光滤波器的应用.

关键词: MEMS; 大尺寸光学扫描镜; 电磁驱动; 大角度转动; 光学反射率

EEACC: 2575F; 4250

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)03-0583-05

1 引言

微电子机械系统(micro electronic mechanical system, MEMS)光学扫描镜作为光束偏转操控器件在投影显示、全息存储、光开关等领域^[1~3]已有广泛的应用. 目前随着 MEMS 加工工艺的日趋成熟, 新型激光共焦显微系统^[4]、高性能光通信可调滤波器^[5]等系统中也逐渐采用 MEMS 光学扫描镜作为核心扫描器件. 这些均源于采用 MEMS 工艺制作的光学扫描镜, 除了具备 MEMS 器件所共有的易于实现批量生产, 成本低的特点之外, 还具有相对于传统光学扫描镜更加出色的机械和光学性能, 尤其是在获得大扭转角度、低功耗方面^[6]. 在众多新的应用场合中, 为了减小光束反射过程中的衍射效应或者提高光学分辨率, 光学系统中光束尺寸均在 mm 甚至 cm 量级^[7], 此时就需要 MEMS 光学扫描镜在保持较高转动频率和大扭转角度等特性的同时, 增加镜面尺寸以匹配光学系统的要求.

基于上述需求, 本文设计了一种镜面尺寸为 $6\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的电磁驱动 MEMS 光学扫描镜, 并且利用 MEMS 体硅加工工艺和电镀技术, 采用常规的 n 型 (100) 单晶硅片成功实现了器件的制作. 器件测试和性能分析表明: 以单晶硅材料作为扭转镜面和扭转梁的大尺寸 MEMS 光学扫描镜, 不仅获得了 $0.03^\circ/\text{mA}$ 的静态转角斜率, 而且实现了在 381Hz 谐振频率下得到 $\pm 10.2^\circ$ 的动态光学扭转角度, 与此同时还确保了光学器件需要的良好的镜面粗糙度、光学反射率和镜面平整度. 器件采用的高效率电磁驱动方式不仅提供了大尺寸器件所需要的驱动力矩, 并且有效降低了器件的驱动功

耗. 上述结果均表明高速大尺寸电磁驱动 MEMS 光学扫描镜性能完全满足大部分应用场合的使用要求.

2 原理与结构设计

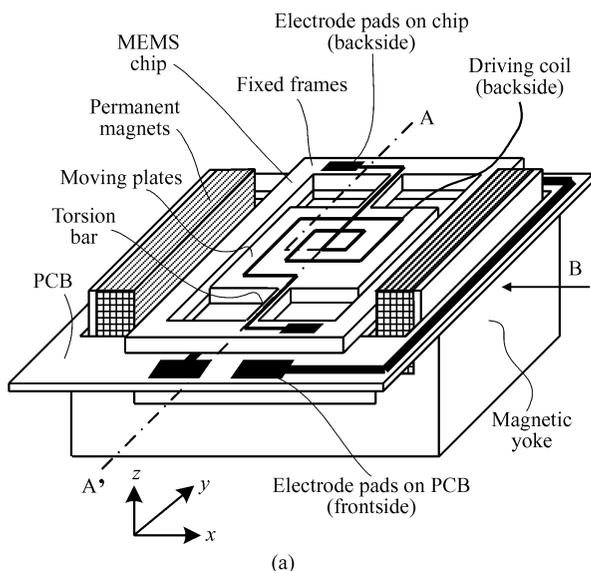
对于大尺寸大角度转动的 MEMS 光学扫描镜而言, 需要采用工作范围大, 驱动效率高, 功耗低, 并且易于集成的驱动机制实现器件动态转动. 人们通常用于实现 mm 甚至 cm 量级尺寸的 MEMS 器件的驱动方式有压电陶瓷驱动和电磁驱动^[7]. 其中早期采用的压电驱动机制尽管驱动力比较大, 但是因为不易与 MEMS 工艺兼容, 难以实现集成, 并且由于只适合于谐振式扫描器驱动的原因而较少被采用; 而电磁驱动机制以其灵活的驱动方式、高的驱动效率, 以及与 MEMS 工艺良好的兼容性而得到了更为广泛的应用. 根据结构的不同, 电磁驱动机制又分为磁性薄膜结合交变磁场驱动方式和转动线圈结合永磁体驱动方式. 前者产生的驱动力矩较大, 并且驱动方式灵活, 但是因为器件表面溅射的磁性薄膜通常会产生很大的固有表面应力, 通常会严重影响光学器件需要满足的平整度, 因此其使用范围受到限制. 而后者不仅具备工作范围大, 驱动效率高, 驱动方式灵活等优点, 而且更易于与 MEMS 工艺集成, 此外也不会产生因为磁性薄膜应力导致的器件表面翘曲, 因此在我们器件中就采用了转动线圈结合永磁体驱动方式.

图 1(a) 为 MEMS 光学扫描镜结构原理图 (线圈面朝上). 扭转镜面通过一对扭转梁与固定的框架连接, 扭转镜面的下表面布满了驱动线圈, 上表面则为铝反射镜面, 两个扭转梁上分别为用于连接硅板上金属焊点和驱动线圈的电镀金属导线. 如图 1(a) 所示, 采用体硅微加

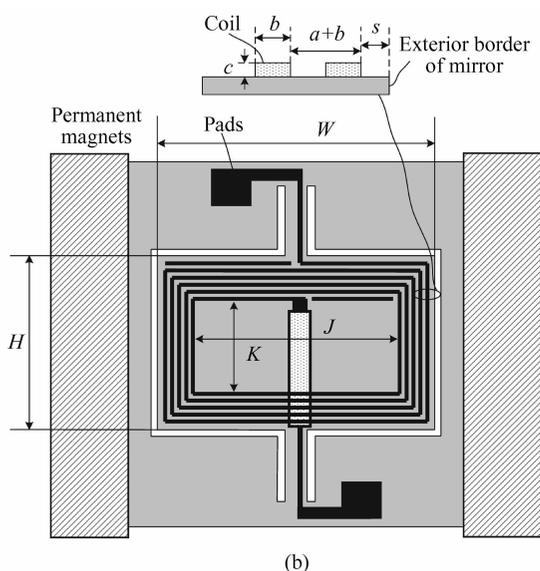
* 上海市科学技术委员会光技术专项资助项目 (批准号: 046105006)

† 通信作者. Email: cjmu@msn.com; cjmu@mail.sim.ac.cn

2007-08-15 收到, 2007-10-22 定稿



(a)



(b)

图 1 (a)MEMS 光学扫描镜结构原理图(线圈面朝上);(b)MEMS 光学扫描镜驱动线圈俯视图(上部小图为线圈的剖面图)

Fig.1 Perspective drawing of MEMS optical scanning mirror (a) Operating principle of scanner; (b) Schematic drawing of coil structure

工和电镀工艺制作完成的 MEMS 芯片驱动线圈面朝上放置在预先设计的中心挖孔的印刷电路板(printed circuit board, PCB)上(在此是为了描述清楚的目的),实际器件装配时,铝反射面应该朝上.封装过程中,通过导电银胶将芯片硅板上的金属焊点与 PCB 板上的金属焊点导通,PCB 板上导线的另外一端较大的金属焊点与外接驱动信号导线相连.最终承载着 MEMS 光学扫描镜芯片的 PCB 板被安装在由两块钕铁硼永磁体和良导磁材料构成的磁回路的磁轭上.两块沿 x 方向磁化的永磁体以相同的方向放置,从而产生了主要沿 x 方向的磁场.当扭转镜上的驱动线圈内通过 $\pm y$ 方向(与扭转轴平行)的驱动电流信号时,交流信号与外部恒定磁场相互作用产生了 $\pm z$ 方向的洛伦兹力,从而获得扫描镜

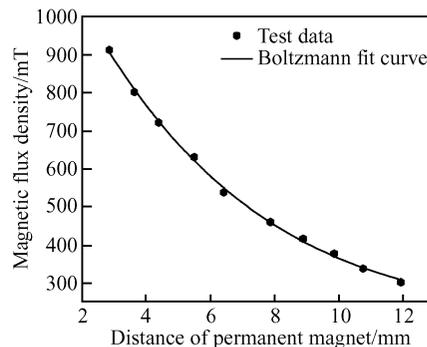


图 2 磁场感应强度随磁轭间隙变化关系

Fig.2 Magnetic flux density with the magnetic yoke

绕扭转轴转动需要的力矩.对于图 1(b)所示 MEMS 光学扫描镜结构而言,绕扭转轴的总驱动力矩为

$$T = iB\cos\theta \left\{ \sum_{n=1}^N \left[\frac{W - 2N(a+b) - 2s - b}{2} + (n-1)(a+b) \right] [2(H - 2N(a+b) - 2s - b) + (4n-3)(a+b)] \right\} \quad (1)$$

其中 i , B 和 θ 分别为驱动电流、外部恒定磁感应强度和扫描镜的机械扭转角度;扭转镜面宽度为 W ;高度为 H ;镜面最外圈驱动线圈与镜面边缘间的空白区域宽度为 s ;线圈宽度为 b ;重复周期为 $a+b$.根据(1)式,并结合相应矩形截面扭转直梁的扭转弹性系数,即可计算得到 MEMS 光学扫描镜的扭转角度,并且由(1)式可以看出,当扭转角度较大时,驱动电流与产生的力矩不再是线性关系.

为了保证 MEMS 光学扫描镜实现大角度扭转的同时,获得较高的扭转频率,设计中采用硬度较大的单晶硅材料作为扭转梁.此外为了降低大尺寸 MEMS 光学扫描镜在动态扫描过程中产生的镜面形变,保证动态扫描中反射光束的光学分辨率^[8],在芯片制作中直接用厚度为 $310\mu\text{m}$ 硅片作为扫描镜,通过在其表面溅射 Al 或 Au 金属膜实现反射镜面.采用厚的硅基平板作为反射镜面,直接结果就是增加了扭转镜的转动惯量,这样势必会降低扫描镜的扫描频率,因此为了尽可能提高 MEMS 光学扫描镜的转动频率,就需要扭转梁的刚度大,这无疑又增加了扫描镜扭转的驱动力矩.对于转动线圈结合永磁体驱动的电磁驱动机制而言,通常在一定驱动电流情况下,为了获得大的扭转驱动力矩,就必须提供较大的外部恒定磁场.为此,实验中除采用了能够产生较大磁通量密度的尺寸为 $30\text{mm} \times 6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 钕铁硼材料作为永磁体之外,还采用了导磁性较好的钢材为磁路导体构成闭合回路的磁轭,以产生驱动扭转镜所需的强磁场.图 2 为磁轭间隙中磁感应强度强弱随着永磁铁间隙变化的测试曲线.在我们器件的实际结构中永磁铁间隙为 7mm ,相应的磁感应强度为 510.2mT .

对于大扭转角度扫描结构,在扭转梁与扭转镜面和硅板框架连接端部,通常会出现因为结构表面曲率突变引起的应力集中问题,该现象在扭转梁发生大应变扭转

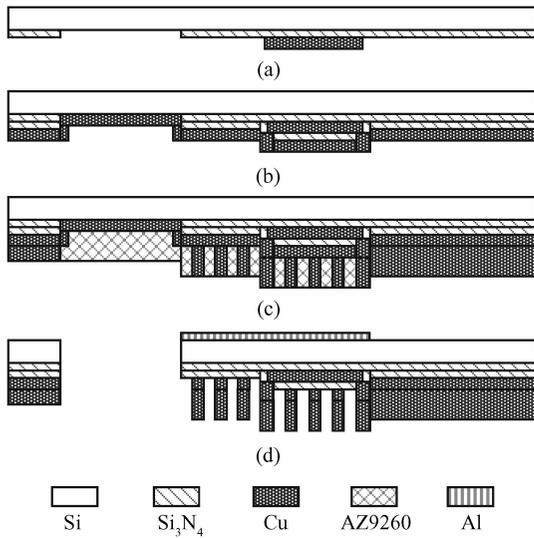


图 3 沿图 1 (a)中虚线 A-A' 截面的工艺流程图

Fig.3 Cross-sectional process flow of the scanner at the dashed line A-A' in Fig.1(a)

过程中更加明显,严重影响了 MEMS 光学扫描镜的抗震性能,为此在设计扭转梁时特意在根部采用了半径为 $50\mu\text{m}$ 的圆弧曲面处理,用于降低因为应力集中而引起扭转梁断裂的风险.针对器件的使用需求,充分考虑到 MEMS 光学扫描镜的扫描频率,扭转角度以及应力分布等参数,结合有限元仿真软件 Ansys 模拟分析结果,最终确定的器件几何参数为:扭转镜的长、宽、厚分别为 6mm , 4mm , $310\mu\text{m}$;扭转梁的长、宽、厚分别为 2mm , $40\mu\text{m}$, $310\mu\text{m}$;扭转镜面与磁轭底面距离大于 2cm ;驱动线圈材料为 Cu,单根线宽度 $90\mu\text{m}$,厚度为 $10\mu\text{m}$,线间距为 $18\mu\text{m}$,线圈总数为 15.

3 器件制作工艺

实验中采用 MEMS 体硅加工工艺,结合金属表面电镀技术完成了整个器件制作.具体工艺流程如图 3 所示.(a)准备一片厚度为 $310\mu\text{m}$,电阻率为 $1\sim 10\Omega\cdot\text{cm}$ 的 n 型(100) 100mm 双面抛光硅片,在下表面用等离子增强化学气相淀积系统(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)生长 300nm 的高质量氮化硅作为绝缘层,采用氮化硅而不是氧化硅作为绝缘层的目的在于确保介质绝缘的同时,保证扭转镜面与随后制作的驱动线圈之间的导热性,之后涂胶光刻硅片下表面,并通过 BOE 腐蚀实现图形化,并且绝缘层表面溅射厚度为 $1\mu\text{m}$ 的 Cu/TiW 金属层,其中 100nm 的 TiW 层用于增加 Cu 金属层与硅材料之间的黏附性,经过光刻之后,通过 I-Beam 干法刻蚀实现图形化,获得驱动线圈的里外连通导线;(b)再次在下表面 PECVD 生长 300nm 的氮化硅作为两层金属导体之间的绝缘层,经过光刻在连通导线两端开孔,利用反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)去掉开孔内的氮化硅,随后溅射 200nm Cu/TiW 金属层作为铜电镀种子层;(c)旋涂 AZ9260 型光刻胶并进行光刻,获得金属电镀掩模,采

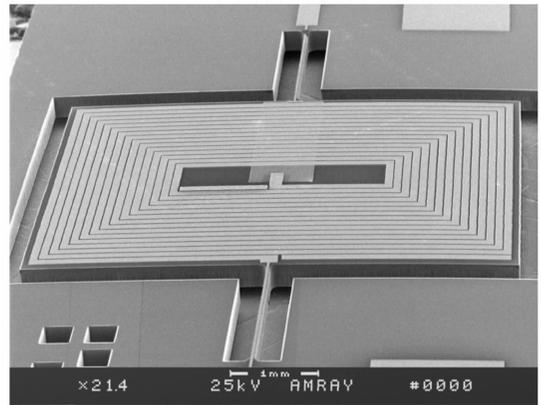


图 4 MEMS 光学扫描镜芯片全貌的 SEM 照片(驱动线圈面朝上)
Fig.4 SEM photograph of MEMS optical scanning mirror chip (coil side up)

用铜电镀技术获得厚度为 $10\mu\text{m}$ 的铜线圈;(d)去胶后,利用 I-Beam 刻蚀掉电镀金属种子层,成功获得驱动线圈.随后溅射 $1.2\mu\text{m}$ 的 Al 金属层作为镜面反射层,经过光刻,并利用湿法腐蚀去掉了除了结构释放区域的 Al 金属层.最后一步,在下表面旋涂 AZ4620 型光刻胶作为干法刻蚀掩模,经过光刻,采用 Deep RIE 实现器件结构释放,整个工艺完成.图 4 给出了 MEMS 光学扫描镜的 SEM 照片.

4 性能与讨论

MEMS 光学扫描镜的静态转角斜率、扫描角幅度-频率响应、谐振频率、最大扭转角度、Q 因子等机械性能参数,以及镜面表面平整度和光学反射率等光学性能参数决定着器件的性能优劣,因此均需要进行测量.

图 5 给出了 MEMS 光学扫描镜机械性能参数测试装置.所用光源为波长 632.8nm 的氦氖激光器,激光光束经过测试扫描器反射后,由与静止位置反射光束相垂直方向放置的一维位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD)接收,经过光电转换后信号进入采集卡和示波器,获得 PSD 接收到的反射激光束扫描长度与扫描频率的响应曲线,然后精确测量光学扫描镜中心与 PSD 中心的垂直距离,经过简单的数学换算,即可得到光学扫描角度 θ 与扫描频率的相应关系.

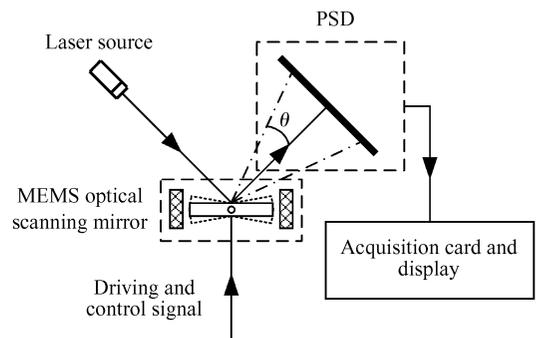


图 5 芯片测试装置示意图
Fig.5 Experimental setup for testing chip

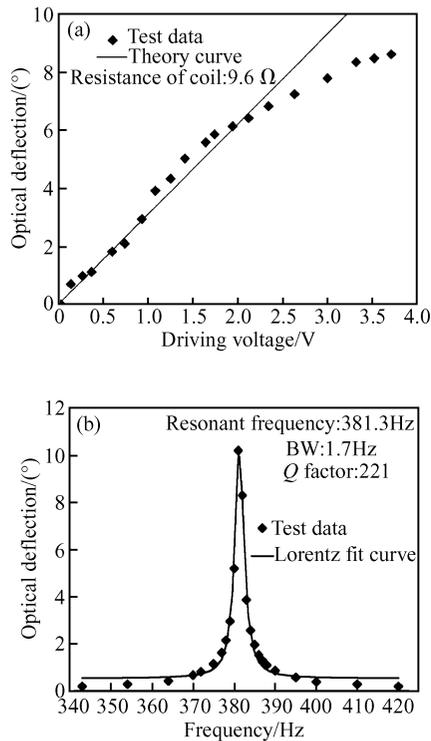


图 6 MEMS 光学扫描镜机械性能测试 (a)静态转角;(b)驱动电压有效值 $V_{\text{eff}} = 0.0113\text{V}$ 时,动态幅度-频率响应曲线

Fig.6 Mechanical performances measurement of MEMS optical scanning mirror (a) Static deflection; (b) Dynamic response of scanning angle and frequency at $V_{\text{eff}} = 0.0113\text{V}$

图 6 所示为 MEMS 光学扫描镜的机械性能测试曲线.图(a)为器件静态转角随驱动电压的变化曲线,驱动线圈电阻为 9.6Ω ,实验获得的 MEMS 光学扫描镜的静态转角斜率约为 $0.03^\circ/\text{mA}$,可以看出与理论模拟曲线相比,当驱动电压达到 3V 时,静态转角斜率明显降低,此时对应的扭转角度为 7.778° ;图(b)为器件动态响应曲线,测试中保证驱动信号幅度不变时,改变驱动信号的频率进行扫描,在 381Hz 时获得第一个谐振峰,此时获得的最大光学转角为 $\pm 10.2^\circ$,对应的 Q 因子为 221,此时器件功耗为 $13\mu\text{W}$.在静态测试中,当驱动电压达到 3.71V 时,发现扫描镜背面驱动线圈变黑,并且驱动线圈电阻略微减小至 8.7Ω ,此时扭转角度为 8.6° ,相应的电流为 386.5mA ;当驱动电压达到 4.02V 时,驱动线圈烧断,根据理论值推测,此时的驱动电流约为 462mA .图(a)中出现的大角度偏转时产生的静态转角斜率变小的原因还有待进一步研究.

作为光学器件, MEMS 扫描镜的光学性能非常重要,在此分别测量了器件的表面粗糙度、光学反射率和镜面表面翘曲度.图 7 为使用 WYKO NT2000 型表面轮廓仪测量的扭转镜表面粗糙度,其中采样面积为 $1.8\text{mm} \times 2.4\text{mm}$,表面粗糙度的均方根为 19.56nm .此外实验中采用精密六位调节系统(包括 EXFO-510P 型可调谐激光器,双光纤准直器和 ADVANTEST-Q8221 型光功率计)使用中心波长为 1550nm 激光束测量得到

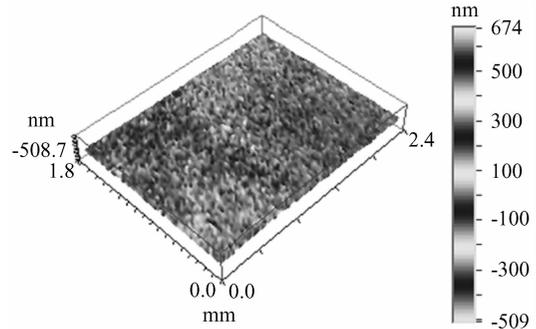


图 7 扫描镜面的表面粗糙度

Fig.7 Surface roughness of scanning mirror

镜面表面光学反射率比为 85% 左右.与此同时,良好的反射镜面平整度对于提高反射光束的光学分辨率有很重要的意义,实验中采用 ZYGO GPI-XP6 型光学测试仪测量到镜面大小为 $6\text{mm} \times 4\text{mm}$ MEMS 扫描镜的表面翘曲曲率半径为 4m ,相应的光学放大率为 1.2 (理想平面镜的光学放大率为 1).

5 结论

设计并采用 MEMS 体硅加工和表面金属电镀工艺制造了一种镜面尺寸为 $6\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的电磁驱动 MEMS 光学扫描镜,结合包含强永磁体并构成磁回路的磁轭,获得了 $0.03^\circ/\text{mA}$ 的静态转角斜率,在 381Hz 的动态谐振频率下,扫描镜的光学转角为 $\pm 10.2^\circ$,相应空气中的因子为 221,而此时器件的功耗为 $13\mu\text{W}$,与此同时扫描镜也确保了光学元件需要的出色的光学粗糙度和反射率.实验证明该器件完全适合于微型光谱仪和光通信可调谐滤波器等的.

参考文献

- [1] Urey H. Torsional MEMS scanner design for high-resolution display systems. *Optical Scanning II, Proc SPIE*, 2002, 4773: 27
- [2] Miller R A, Burr G W, Tai Y C, et al. Electromagnetic MEMS scanning mirrors for holographic data storage. *Technical Digest of Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, 1996: 183
- [3] Lin L Y, Goldstein E L. Opportunities and challenges for MEMS in lightwave communications. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(1): 163
- [4] Miyajima H, Asaoka N, Isokawa T, et al. A MEMS electromagnetic optical scanner for a commercial confocal laser scanning microscope. *J Micro-Electromechanical Systems*, 2003, 12(3): 243
- [5] Berger J, Ilkov F, King D, et al. Widely tunable, narrow optical bandpass Gaussian filter using a silicon microactuator. *Optical Fiber Communication Conference*, 2003: 252
- [6] Petersen K E. Silicon torsional scanning mirror. *IBM J Research and Development*, 1998, 24(5): 631
- [7] Oliveira C M, Barbaroto P R, Ferreira L O S, et al. A novel Si micromachined moving-coil induction actuated mm-sized resonant scanner. *J Micromechanical Microengineering*, 2006, 16(1): 165
- [8] Brosens P J. Dynamic mirror distortions in optical scanning. *Appl Opt*, 1972, 11(12): 2987

A Novel Large-Scale Electromagnetically Actuated MEMS Optical Scanning Mirror*

Mu Canjun^{1,2,†}, Zhang Feiling³, and Wu Yaming¹

(1 *Shanghai Institute of Micro-System and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(3 *Spanion (China) Co., Ltd., Suzhou 215021, China*)

Abstract: A novel configuration of an electromagnetically actuated MEMS optical scanning mirror with a large mirror area of $6\text{mm} \times 4\text{mm}$ is designed, fabricated, and characterized. This optical scanning mirror based on a silicon plate, in which a set of micro-coils for actuation are adhered to the back side of the mirror using the electroplating technique, is immersed in the magnetic field produced by the magnetic circuit, including a permanent magnet. The mirror rotates around one pair of torsion bars when the driving current signal is applied on the driving coils. This device, fabricated using silicon bulk processing and the electroplating technique, shows excellent performance. The slope of optical steering deflection of this device is $0.03^\circ/\text{mA}$, the optical deflection angle is 10.2° under a resonant frequency of 381Hz at a lower power consumption of $<1\text{mW}$, and the Q factor in air is 221. Additionally, the MEMS scanning mirror as a precise optics element presents good surface roughness of mirror and high reflectivity, so it can be applied in scanning systems such as high speed micro-spectrometers and optical tunable filters in optical communication.

Key words: micro-electronic mechanical system; large-scale optical scanning mirror; electromagnetically actuation; large rotation angle; optical reflectivity

EEACC: 2575F; 4250

Article ID: 0253-4177(2008)03-0583-05

* Project supported by the Commission of Science and Technology of Shanghai (No. 046105006)

† Corresponding author. Email: cjmu@msn.com; cjmu@mail.sim.ac.cn

Received 15 August 2007, revised manuscript received 22 October 2007