

MEMS 光开关*

梁春广 徐永青 杨拥军

(信息产业部电子第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 采用 MEMS 体硅工艺, 制作了三种结构的微机械光开关: 水平驱动 2D(二维)光开关、垂直驱动 2D 光开关和扭摆驱动 2D、3D(三维)光开关。水平驱动光开关采用单层体硅结构, 另外两种光开关都采用了硅-玻璃的键合结构。它们的工作原理都基于硅数字微镜技术。这三种光开关均采用了静电力驱动, 具有较低的驱动电压, 其中扭摆式光开关的驱动电压小于 15V。对于 2D 开关阵列, 在硅基上制作了光纤自对准耦合槽。对后两种光开关的开关特性进行了计算机模拟与分析, 结果表明这两种光开关具有小于 1ms 的开关时间。

关键词: 微机械; 光开关; 硅-玻璃键合

EEACC: 4180

中图分类号: TN 256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)12-1551-06

1 引言

20 世纪 90 年代以来, 光通信得到了快速的发展, 作为光通信中关键环节的光互连与光开关的地位也越来越重要, 传统的以电为核心的开关已不能满足高速大容量光通信的需求, 尤其是全光传输网, 而将代之以全光开关。全光开关是以光为核心实现光的通断和交叉连接的系统部件, 不存在光电的转换。要成为传统开关的替代者, 这种新型的全光开关必须具备低损耗和高稳定的特点, 而 MEMS 光开关具备了这些优点, 而且与传输的数据速率和信号协议无关, 此外 MEMS 光开关还具有体积小、成本低、易集成和容量大的优点。

MEMS 技术被认为是一项革命性技术, 给光学领域的应用带来了一股前所未有的光学 MEMS 研究热, 这些研究被称为 MOEMS(微光学电子机械系统), 人们对 MEMS 光开关研究始于 20 世纪 90 年代中期, 虽然起步较晚, 但发展较快, 而且研究单位和研究者众多, 成为一种最流行的光开关制作技术。贝尔实验室的“跷跷板”式光开关, 被称为世界上第

一个有实用价值的 MEMS 光开关; 美国的 OMM 公司的“Cross-Guard”光开关号称世界第一个 MEMS 光开关, 该公司的小阵列(4×4 和 8×8)光开关产品正处于试用阶段, 大于 32×32 阵列的光开关仍处于实验室水平; 另外, 美国的 Onix 公司也提供了基于微镜技术的光开关样品, 其中微镜技术是该公司的专利技术。在 MEMS 光开关的制作中, 这些国外的研究单位和公司大多采用了 MEMS 平面工艺, 而本研究采用了 MEMS 体硅工艺。和平面工艺相比, 体硅工艺具有更大的 3D 加工空间和简单性。本研究中 MEMS 光开关的一些制作技术是一种全新的技术。

2 MEMS 光开关的工作原理

2.1 水平驱动 2D 光开关

图 1(a)是光开关阵列的一个单元, 具有单层体硅结构。研究中采用正面释放深刻蚀浅扩散工艺在 Si 上制作出光开关的基本结构^[1]。它包括可动和固定两部分, 可动部分的悬梁侧壁可用作反射镜, 在自然状态下光有一反射输出。在可动和固定部分之间

* 国家八六三光电子主题、国家集成光电子联合重点实验室资助项目。

梁春广 男, 中国工程院院士, 主要从事微电子、光电子、MEMS 领域研究。

徐永青 男, 工程师, 主要从事 MEMS 传感器、光学 MEMS 等领域研究。

2001-01-08 收到, 2001-03-10 定稿

©2001 中国电子学会

有梳齿式的交叉电极, 在两电极间加上电压, 在静电力的作用下可动部分的悬梁在力的方向上将产生一

位移^[2], 悬臂梁的端部将不再对光有阻断作用, 这时悬梁侧壁的反射输出为零, 从而实现光的开关.

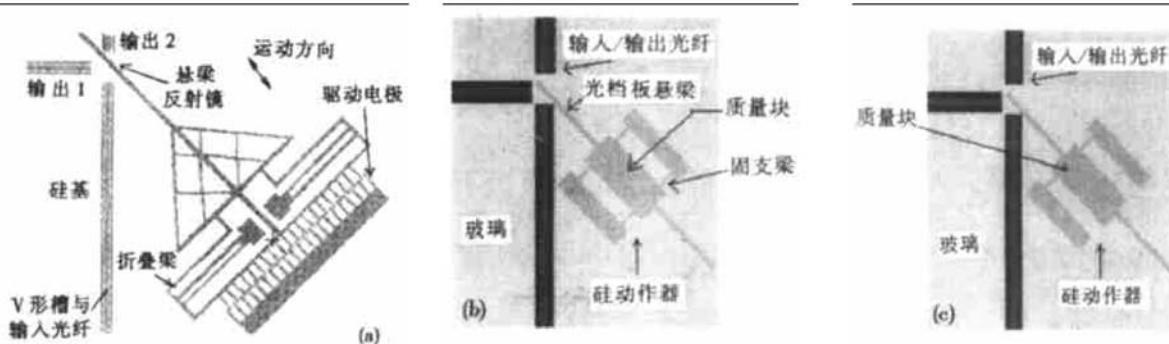


图 1 三种 MEMS 光开关原理简图 (a) 水平驱动; (b) 垂直驱动; (c) 扭摆驱动

FIG. 1 Sketch Map of Three Kinds of MEMS Optical Switchings (a) Horizontal Actuator; (b) Vertical Actuator; (c) Wiggly Actuator

2.2 垂直驱动 2D 光开关

如图 1(b) 所示, 采用 MEMS 硅-玻璃键合工艺, 在硅和玻璃上分别制作可动和固定的两电极, 在可动电极上制作悬梁式光挡板, 此悬梁式光挡板侧壁相当一个反射镜. 动作器由可动电极和悬梁式挡板组成, 在静电力的作用下可动电极产生运动, 使悬梁式挡板有一位移, 挡板对光起到阻挡和反射作用, 从而实现光的开关.

2.3 扭摆驱动 2D、3D 光开关

如图 1(c) 所示, 和前一种光开关具有相似的结构, 在静电力矩的作用下, 硅电极将产生扭转, 这样挡板对光起到阻挡和反射作用, 而硅电极表面也可用作硅反射镜对光起到偏转作用, 从而在 3D 空间

实现光的开关.

2.4 2D 与 3D 耦合方式

图 2 是 2D 与 3D 耦合方式示意图. 对于 2D 形式, 在硅或者玻璃上挖槽, 形成光纤自对准槽, 光纤与动作器所在基片在一个平面内, 光的通断由硅悬梁挡板控制, 对光阻断或反射, 这种形式的光开关实现光耦合较容易, 具有自对准的特点, 但这种方法不利于形成大的开关阵列; 对于 3D 形式, 光纤与动作器所在基片不在一个平面内, 光的通断由硅质量块表面反射来完成, 这种光开关实现光的耦合比较困难, 但有利于大规模集成. 水平驱动光开关与垂直驱动光开关可形成二维开关阵列, 而扭摆驱动光开关同时可形成二维与三维开关阵列.



图 2 光开关耦合方式示意图 (a) 2D 耦合方式; (b) 3D 耦合方式

FIG. 2 Sketch Map of Switching (a) 2D Switching; (b) 3D Switching

3 分析与设计

3.1 水平驱动 2D 光开关

开关速度是光开关的一个重要指标, 要有高的

开关速度, 就要有高的谐振频率. 对于图 1(a) 所示的结构, 谐振频率可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{folded}}{M_{mirror} + 0.5M_{truss} + 2.74M_{beam}}} \quad (1)$$

其中 M_{mirror} 、 M_{truss} 和 M_{beam} 分别是悬梁镜、端部构架

和折叠梁的质量; k_{folded} 是折叠梁的弹性系数, 有

$$k_{folded} = \frac{2Ehb^3}{L^3} \quad (2)$$

其中 E 为杨氏模量; h 、 b 和 L 分别为折叠梁的厚度、宽度和长度, 如图 3 所示。由(1)、(2)式可以看出谐振频率主要和折叠梁的宽度和长度有关, 增加宽度和减小长度将有利于提高谐振频率, 也就是能获得高的开关速度。

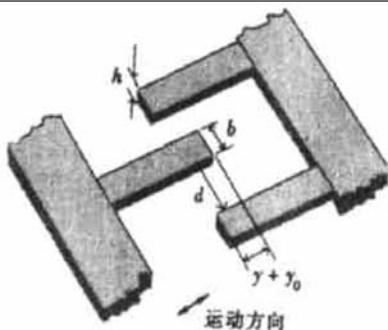


图 3 静电驱动电极阵列的一个单元

FIG. 3 A Unit of Electrostatic Actuators Array

可动电极的纵向位移

$$y = \frac{n\epsilon_0 L^3}{2dEb^3} V^2 \quad (3)$$

其中 n 为梳齿电极数; ϵ_0 为真空介电常数; y 为位移; y_0 为电极初始重合长度; d 为电极间间隙。由上式可以看出, 要增加开关灵敏度和隔离度, 减小功耗, 就要增加悬臂梁的长度和减小宽度, 这与提高谐振频率的要求相矛盾。

对于芯径为 $10\mu\text{m}$ 的单模光纤, 根据高斯束理论, 要降低衍射损耗, 悬梁的侧壁反射镜尺寸应大于 $30\mu\text{m}$ ^[3]。设计中采用近似图 1(a) 所示的结构, 为了便于集成并实现光开关阵列, 设计中保证输入光纤与反射镜成 45° 角, 并在硅片上设计自对准 V 形槽。

3.2 垂直驱动 2D 光开关

和前一种光开关一样, 开关速度和驱动电压是考虑的重要因素。动和定极板间的静电力

$$F = \frac{1}{2} \times \frac{\partial C}{\partial d} V^2 = -\frac{\epsilon_0 S}{2d^2} V^2 \quad (4)$$

其中 C 为动和定极板间的电容; ϵ_0 为真空介电常数; S 为质量块面积; d 为电极间间隙, 如图 1(b) 所示。由(2)和(4)式可得纵向位移

$$y \approx \frac{F}{4k_{folded}} = -\frac{\epsilon_0 S L^3}{16Ehb^3} V^2 \quad (5)$$

其中 E 为杨氏模量; h 、 b 和 L 分别为固支梁的厚度、宽度和长度; V 为驱动电压; k_{folded} 是固支梁沿 z 方向的弹性系数。由(5)式可以看出, 要增加开关灵敏度和隔离度, 减小功耗, 就要增加固支梁的长度和减小宽度。由于 $L \gg b$, 因此长度对弹性的影响远大于宽度。为此设计了折叠梁, 增加了梁的长度, 同时减小了芯片面积。

质量块的谐振频率可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (6)$$

由(2)和(6)式可以看出增加悬臂梁的长度和减小宽度, 谐振频率将降低, 不利于提高开关速度, 这与减小功耗又矛盾。因此应综合考虑这些因素, 此设计结构的 $f_0 > 2\text{kHz}$ 。图 4 是垂直式光开关的计算机有限元分析(FEA)结果, 分析表明此结构有高的谐振频率从而可得到高的开关速度(小于 1ms), 驱动电压小于 30V 。

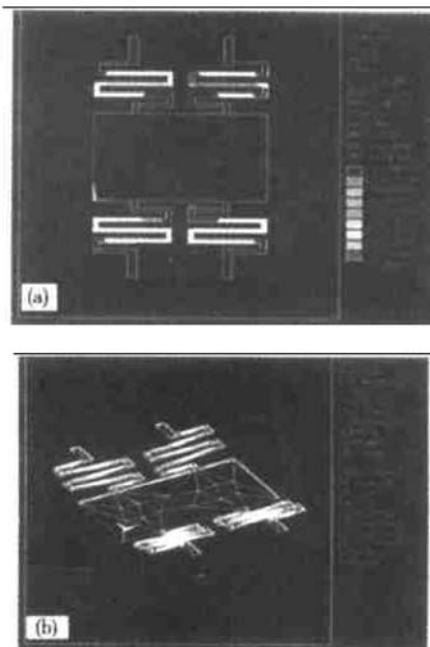


图 4 垂直式光开关的计算机有限元分析 (a) 静态耦合场分析(5V 电压, 最大位移 $1\mu\text{m}$); (b) 模态分析(第一模态大于 20kHz)

FIG. 4 FEA of MEMS Optical Switching with Vertical Actuator (a) Static Coupled-Field Analyses (5V dc, Maximal Displacement: $1\mu\text{m}$); (b) Modal Analyses($f_1 > 20\text{kHz}$)

3.3 扭摆驱动 2D、3D 光开关

对于扭摆式结构(如图 1(c) 所示), 设计了扭摆

式固支梁,在静电力的作用下,由于固支梁不是连接在质量块边沿的中心,因此质量块以固支梁为轴产生一扭转。理论研究表明,要减小驱动电压,应尽量减小梁的宽度和增加梁的长度。和垂直驱动式一样,

同时也要考虑结构对开关速度的影响。图 5 是垂直式光开关的计算机有限元分析结果,分析表明此结构有高的谐振频率,从而可得到高的开关速度(小于 1ms)和低的驱动电压(小于 15V)。

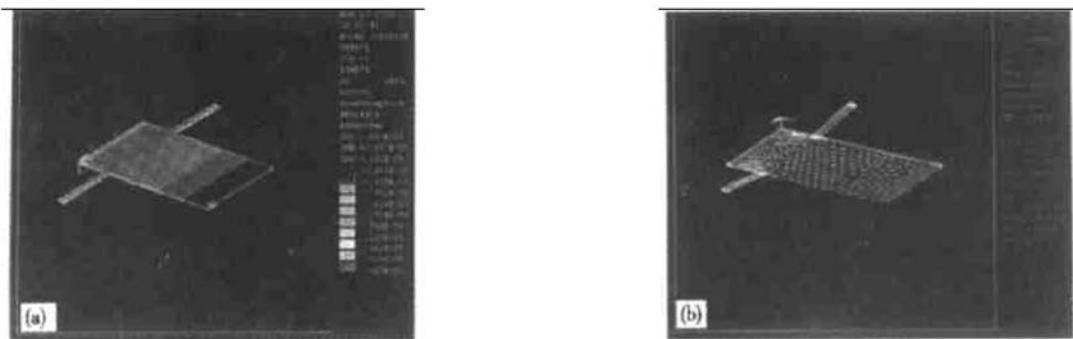


图 5 扭摆式光开关的计算机有限元分析 (a) 静态分析(10V 电压, 位移 $8\mu\text{m}$); (b) 模态分析(第一模态大于 10kHz)

FIG. 5 FEA of MEMS Optical Switching with Wiggly Actuator (a) Static Coupled-field Analyses(10V dc, Displacement: $8\mu\text{m}$); (b) Modal Analyses($f > 10\text{kHz}$)

4 实验

4.1 水平驱动 2D 光开关

在传统的 MEMS 体硅工艺中,由于存在较大的应力,而使结构变形,严重阻碍了体硅工艺的发展。本研究采用正面释放深刻蚀浅扩散新工艺,此工艺缩短了浓硼扩散的时间,极大限度地减小了扩散时引入的应力,而且本工艺不需要硅-玻璃键合,只需一块掩膜板,可一次完成反射镜、V 形槽的制作,具有自对准特点,减小了光开关损耗,缩短了工艺流程,提高了成品率。

由于不存在硅-玻璃键合,因此动和定电极间需要采用 pn 结隔离。选 n 型硅材料,在制作过程中扩 B, 形成 p^{++}n 结。采用 ICP 在硅片上刻蚀出悬梁和梳齿结构, 刻蚀深度为 $50\mu\text{m}$, 然后进行 P^{++} 扩散, 扩散深度为 $4\mu\text{m}$ 。扩散目的有两个,一是作体硅腐蚀的自停止层,二是形成 p^{++}n 结的 p^{++} 极。再用 ICP 刻蚀掉表面的浓硼扩散区,而留下悬梁侧壁的浓硼区。用 EPW 腐蚀液将硅片的轻掺硼区腐蚀掉, 释放出结构, $n = 150$, $d = 3\mu\text{m}$, $b = 3\mu\text{m}$, $L = 900\mu\text{m}$ 。为了降低散射损耗,悬梁侧壁反射镜要非常光滑,为此可采用氧化削尖和溅射 Au 工艺,来增加反射镜的平整度。图 6 是水平式光开关和光纤自对准 V 形槽 SEM 照片^[4]。

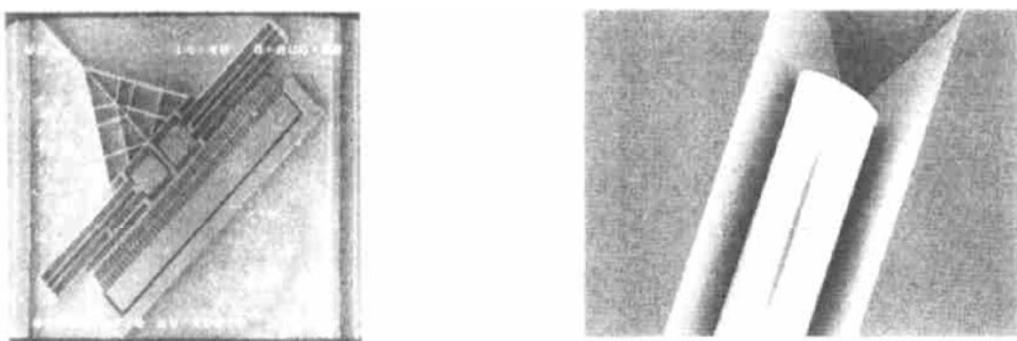


图 6 水平式光开关和光纤自对准 V 形槽 SEM 照片

FIG. 6 SEM Photograph of MEMS Optical Switching with Horizontal Actuator and Si-V Groove

4.2 垂直驱动与扭摆驱动 2D、3D 光开关

这两种光开关具有相同的工艺条件,在本研究中尽量缩短浓硼扩散时间以减小应力的影响,扩散层的深度在 $10\text{--}15\mu\text{m}$,浓度大于 1×10^{19} ,这种扩散层形成湿法腐蚀的自停止层,即形成硅动作器结构。由于浓硼扩散层对湿法腐蚀具有自停止效果,因此硅片正面的结构形成需用干法刻蚀,在本研究中采用反应离子刻蚀(RIE)工艺。

采用静电键合工艺对硅和玻璃进行贴合,为了

提高键合成品率,硅和玻璃要有良好的表面状态,并进行表面处理。结构的释放采用湿法腐蚀,选择EDP 腐蚀液,腐蚀时应严格控制腐蚀液的比例和腐蚀温度,为保证腐蚀的均匀性,腐蚀时加搅拌。图 7 是垂直式与扭摆式光开关的 SEM 照片, $d = 10\mu\text{m}$, $b = 10\mu\text{m}$, $h = 10\mu\text{m}$, $L = 2000\mu\text{m}$, 质量块面积为 $500\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$,厚度等同于折叠梁、硅悬梁挡板的厚度。对于 2D 耦合,可利用双面光刻在硅上制作光纤自对准 V 形槽。为提高反射率,在硅表面镀金属薄膜。

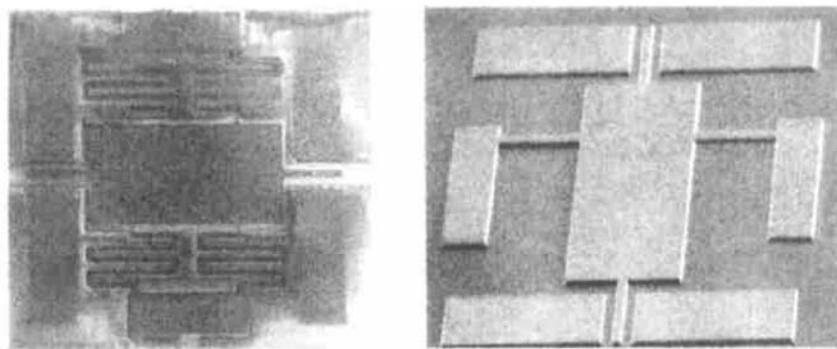


图 7 垂直式与扭摆式光开关 SEM 照片

FIG. 7 SEM Photograph of Vertical and Wiggly Driving MEMS Optical Switching

5 测试

选用直径约为 $125\mu\text{m}$,芯径约为 $10\mu\text{m}$ 的单模光纤,测试光开关的开关速度、寿命和损耗。对于 2D 光开关,测试较容易进行,因为设计了光纤自对准 V 型槽,光纤的一端入 V 型槽,另一端和光源或者光功率计相连。对于扭镜结构 3D 光开关,测试时遇到的最大困难是精确耦合,因此需要设计合适的封装形式。根据扭镜可能的转动角度,设计带有一定输入、输出角度光纤槽的管壳和管座。图 8 是垂直式光开关驱动电压与悬梁位移的关系曲线。

6 结论

采用 MEMS 体硅工艺,成功制作了 $1\times N$ 、 2×2 微机械光开关。在第一种光开关中采用了正面释放深刻蚀浅扩散新工艺,减小了扩散应力的影响,此工艺简单,不需要和玻璃键合,可同时在硅基上制作光纤对准 V 形槽。向 3D 大阵列方向发展成为光开

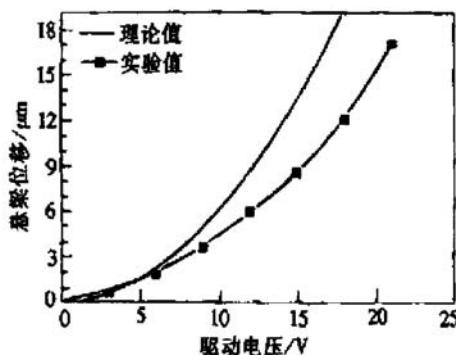


图 8 垂直式光开关驱动电压与悬梁位移的关系

FIG. 8 Static Response of Vertical Switching

关的发展趋势,但这种形式的光开关不适于制作大的光开关阵列,这是由于随着阵列数的增加,降低损耗将变得比较困难。但由于这种技术具有工艺简单、易于耦合、成本低的优点,因此对于制作小阵列光开关具有一定的优势。对于后两种光开关,采用的硅-玻璃的键合结构具有创新性,具有高的开关速度和低的驱动电压,其中扭摆式光开关兼有 2D 和 3D 开关的特性,并易于实现大的开关阵列。

致谢 感谢我所微电子机械专业部所有为此研究提供帮助和支持的同事,感谢光电子专业部的刘会民同志为此研究进行的测试工作.

参考文献

- [1] E. Ollier and P. Mottier, Integrated Electrostatic Microswitch for Optical Fiber Networks Driven by Low Voltage, *Electronics Letters*, 1996, **32**(21) : 2007.
- [2] Y. B. Gianchandani and K. Najafi, A Bulk Silicon Dissolved Wafer Process for Microelectromechanical Devices, *IEEE J. Microelectromechanical Syst.*, 1992, **1**(2) : 77—85.
- [3] A. W. Groeneweld and M. Elwenspoek, Comb-Drive Actuators for Large Displacements, *J. Micromech. Microeng.*, 1996, **6**: 320—329.
- [4] XU Yong-qing, LIANG Chun-guang *et al.*, Silica-on-Silicon Optical Waveguides, *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, **22**(12) : 1546[徐永青, 梁春广, 等, 硅基 SiO₂ 光波导, 半导体学报, 2001, **22**(12) : 1546].

Fabrication of MEMS Optical Switches*

LIANG Chun-guang, XU Yong-qing and YANG Yong-jun

(The Electronic 13th Institute of Information Industry Ministry, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Three kinds of MEMS optical switches with different mechanical structures are produced by the bulk-micromachining processes. The first is 2D optical switch with horizontal actuator, the second is 2D optical switch with vertical actuator, and the third is 2D、3D optical switch with wiggly actuator. The first is formed with monolayer bulk-silicon structure, the others use the silicon-on-glass bonding structures. Their principles of operation are all based on silicon digital micromirrors technology. The electrostatic actuators with low driving voltage are used in the three kinds of optical switch. The actuation voltages for the third kinds of optical switch are less than 15V. The grooves used for optical fibers being self-aligned coupling are made on silicon substrate for the 2D switch arrays device. Computer simulation and analysis of on-off characteristic show that the second and the third optical switches have switching time less than 1ms.

Key words: MEMS; optical switching; silicon-on-glass bonding

EEACC: 4180

Article ID: 0253-4177(2001)12-1551-06

* Project by the National High Technology Development Program of China and by the State Key Laboratory for Integrated Optoelectronics.

LIANG Chun-guang male, academician of the Chinese Academy of Engineering. He is engaged in the research on microelectronics, optoelectronics and MEMS.

XU Yong-qing male, engineer. He is engaged in the research on MEMS actuators and optical MEMS.

Received 8 January 2001, revised manuscript received 10 March 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics