

体硅 MOEMS 阵列光开关的制作

董玮^{1,2}, 梁静秋¹, 刘彩霞², 张歆东², 贾翠萍², 周敬然²,
王立军¹, 陈维友²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室, 长春 130012)

摘要: 设计了一种新型结构的 MOEMS 阵列光开关, 开关由上电极阵列、倾斜下电极阵列和准直光纤阵列三部分组成。上电极阵列利用 (110) 硅片制作, 其中包括反射镜阵列和扭臂驱动结构的上电极阵列。具有集成性好, 制作工艺简单, 微反射镜的表面平整垂直, 各单元的微镜面平行, 反射镜面的尺寸较大等优点。对光开关的参数进行了测试, 指出了体硅 MOEMS 阵列光开关制作过程中存在的问题。

关键词: 光开关阵列; 微光电子机械系统; 微反射镜; 倾斜下电极

中图分类号: TN 25; TN 929.11 文献标识码: A 文章编号: 1003-353X(2006)08-0573-03

Fabrication of the Bulk Silicon MOEMS Optical Switch Array

DONG Wei^{1,2}, LIANG Jing-qiu¹, LIU Cai-xia², ZHANG Xin-dong², JIA Cui-ping²,
ZHOU Jing-ran², WANG Li-jun¹, CHEN Wei-you²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. College of Electronic sciences & Engineering, Jilin University, State Key Laboratory on Changchun 130012, China)

Abstract: A novel MOEMS optical switch array was proposed, including upper electrode array, counter electrode array and collimation optical fibers array. The upper electrode array was fabricated on (110) silicon wafer, including reflectivemirror array and upper electrode of torsion beam actuator. The optical switches have many advantages, such as simple process, smooth and vertical surfaces of reflectivemicro mirrors, parallel reflectivemicro mirrors on every unit, large dimension of reflective micro mirror. The parameters of optical switches were tested. The drawback of bulk silicon MOEMS optical switches was indicated.

Key words: optical switch array; MOEMS; reflective micro mirror; slant counter electrode

1 引言

随着光通信系统的发展和密集波分复用技术的应用, 全光网络已经成为一种趋势, 光开关是全光网络的关键器件, 它可以实现全光层的路由选择、波长选择、光交叉连接和自愈保护等功能。从目前的技术形式看, 主要有波导型光开关和微光电子机

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60377019); 吉林省科技发展计划项目 (20050319)

械系统 (MOEMS) 光开关。波导型开关的开关速度较快, 体积较小, 但是插入损耗和串话等指标较差。MOEMS 光开关具有插入损耗和串话小、消光比高、透明性和可扩展性好、易于集成和稳定性好等优点, 它将与光衰减器、光调制器、激光/光纤耦合装置、滤波器以及微型激光器等微型器件相结合, 推动当前的光纤通信系统向小型化方向发展^[1-5]。

本文采用各向异性湿法腐蚀工艺利用 (110)

硅片制作微反射镜阵列，利用偏一定角度的(111)硅片实现倾斜下电极，制作了 8×8 光开关阵列。对光开关的性能指标进行了测试，并指出了体硅阵列光开关制作过程中存在的问题。

2 光开关阵列的结构

采用2D开关结构，开关阵列的示意图见图1，开关由上电极阵列、下电极阵列和准直光纤阵列组成。上电极阵列在(110)硅片上制作，包括微反射镜和扭臂驱动结构的上电极；采用具有倾斜下电极的扭臂驱动结构^[6]，并用偏一定角度的(111)硅片制作倾斜下电极阵列。上电极的形状见图2，具体尺寸见表1。根据开关阵列总体尺寸、硅的各向异性腐蚀特性、高斯光束的传播特点以及驱动电压等综合因素的限制，确定反射镜的尺寸：厚度为

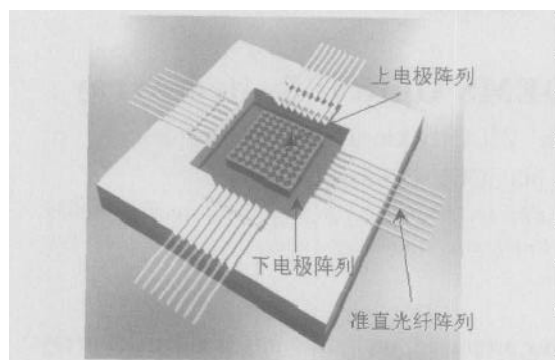


图1 8×8 开关阵列的结构示意图

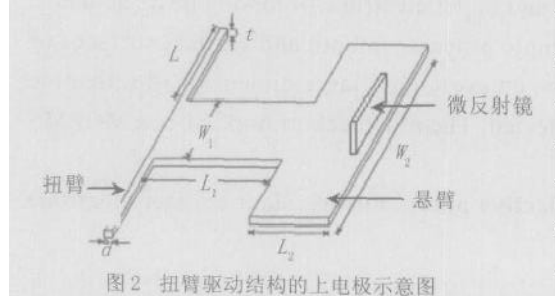


图2 扭臂驱动结构的上电极示意图

表1 扭臂驱动结构上电极的参数

参数	数值 / μm
扭臂长度 L	700
扭臂宽度 b	14
扭臂厚度 t	14
悬臂长度 L_1	1700
悬臂长度 L_2	600
悬臂宽度 W_1	800
悬臂宽度 W_2	1200
下电极倾斜的角度	4.5°

$100 \mu\text{m}$ ，高度为 $180 \mu\text{m}$ ，长度为 $450 \mu\text{m}$ 。

3 光开关阵列的制作

微反射镜阵列的制作使用电阻率为 $4 \sim 6 \Omega \cdot \text{cm}$ 的n型(110)硅片。倾斜下电极的制作使用偏 4.5° 的(111)硅片，其法线方向为由111方向向最近的110方向偏转 4.5° ，具体工艺步骤如下。

在(110)硅片上LPCVD(低压化学汽相淀积)生长氮化硅140nm作为腐蚀掩模；制作晶向对准图形^[7]；在制作晶向对准图形的硅片表面进行光刻、反应离子刻蚀(RIE)氮化硅，形成微反射镜阵列的掩模图形；使用40%(wt)的KOH作为腐蚀液，在68℃下腐蚀微反射镜阵列，同时保证扭臂的厚度，腐蚀时应加搅拌和回流冷凝装置；在硅片有图形的一面磁控溅射铝膜200nm，作为反应离子刻蚀硅形成上电极和扭臂结构时的掩模，光刻并用磷酸腐蚀铝形成RIE刻蚀上电极和扭臂的掩模；RIE刻蚀上电极和扭臂结构，使用 SF_6 和Ar；在微反射镜上溅射Cr/Au提高反射率，上电极阵列如图3所示；制作倾斜下电极和绝缘层。

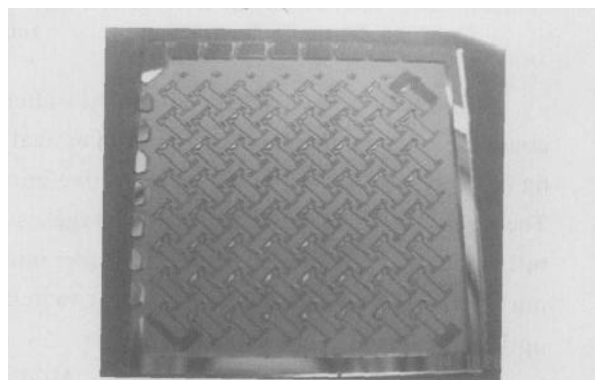


图3 光开关的上电极阵列的照片

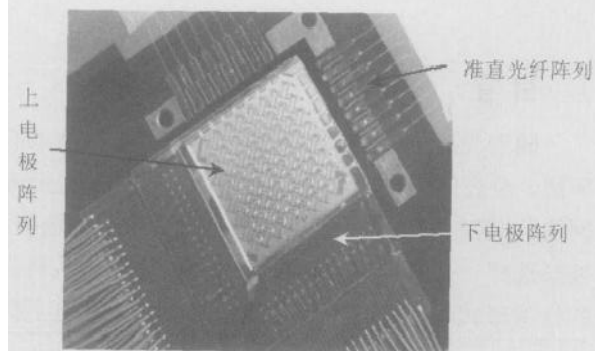


图4 8×8 MOEMS 光开关阵列的照片

当上、下电极阵列制作完成后,取上电极硅片和下电极硅片,在立体显微镜下调整,对准后将上下电极粘合在一起。然后通过精密五维光纤调整架实现反射镜阵列和准直光纤阵列对准,组装后的 8×8 MOEMS 光开关见图4。

4 性能测试

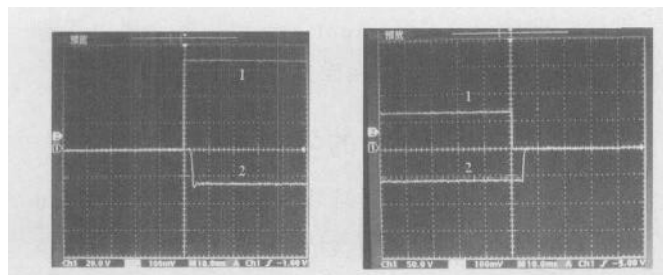
4.1 驱动电压的测试

将稳定化光源输出的光接入到耦合好的光开关中,由光功率计接收经反射镜反射后输出的光信号,利用可调稳压电源驱动光开关,慢慢增加驱动电压,同时观察光功率计检测的光功率的变化。当电压增加到一定值时,检测到的光功率急剧变小并接近于零,同时观察到明显的pull-in现象,这时的电压为pull-in电压,测试结果为67.2V。可见,光开关驱动电压比较高,因此,我们采用目前国内外比较广泛使用的加升压模块的方法降低驱动电压。升压驱动模块的输入为5V,通过调节电路中的可变电阻使输出电压达到光开关所需的驱动电压。

4.2 开关时间的测试

开关时间的测试采用自制高幅值矩形波发生器,脉冲幅值68V,频率为30Hz,占空比为50%。矩形波发生器产生的脉冲信号作为光开关的驱动信号,稳定化光源产生的光信号经光开关后通过光电转换接入示波器中,比较驱动信号和光电转换后的信号的延迟时间,就可得出光开关的开关时间。

图5为示波器所显示的两个信号波形的比较,图中信号1为驱动信号,信号2为经光开关后光电转换的信号。通过比较两波形的时间延迟,可以得出悬臂(微反射镜)下降的时间为4.2ms,恢复时间为5.4ms。



(a) 悬臂(微反射镜)下降的时间

(b) 恢复时间

图5 开关时间测试图

4.3 光学性能的测试

从准直光纤发出的光以 45° 入射角入射到微反射镜的表面,经反射后被相应的准直光纤接收。由于微反射镜阵列制作的不均匀性、各通道之间光程的差异、以及准直器对准工艺过程的不一致性造成了各通道之间插入损耗的不一致。经测试,开关插入损耗的最佳值为5dB,所有通道的串话均小于-50dB。

4.4 国内外同类器件的水平

由于MOEMS光开关有很多优点,国内外的研究机构在这方面开展了大量的研究工作。在2D结构的MOEMS光开关阵列方面,OMM于2002年推出了商用的 32×32 的MOEMS阵列光开关,开关阵列的性能指标为:插入损耗小于7dB,串话小于-50dB,交换时间小于13ms。在国内,上海光机所和上海交通大学联合研制的MOEMS无阻塞 16×16 阵列光开关性能指标较好:插入损耗小于4dB,串话小于-70dB,交换时间小于10ms。

5 结论

利用硅晶体的结晶学特征,配合各向异性腐蚀技术,制作出光开关阵列。这种制作方法具有集成性好、制作工艺简单、微反射镜的镜面平整垂直、各单元的微镜面间平行、反射镜面的尺寸较大等优点。同时,在体硅MOEMS阵列光开关的制作过程中还存在以下需要解决的问题。

由于采用2D结构, 8×8 光开关阵列需要64个开关单元,在制作的过程中,同时保证64单元的结构和尺寸的完整性比较困难,因此成品率较低。

硅材料本身比较硬而且脆,采用体硅技术制作开关时,在降低驱动电压、反射镜有较大位移以及降低开关时间之间存在矛盾。

耦合时,光程较长而对应的反射镜尺寸不够大,使开关的损耗很难降低。

参考文献:

- [1] HOFFMANN M, VOGES E. Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication system[J]. J

(下转第587页)

6 结束语

在该测试系统上利用设计的测试码和测试步骤,经软件编程可快速、准确的将总线可能出现的14个故障进行定位,准确度高达 $1-1/2^{20}$ 99.9%,测试时间不超过1s,故这种高效率的方法亦可用于MCM电路板的测试。由于这种技术借助于计算机程序来检查电路和/或连线的故障,所以非常适合于那些要求可靠性高,且及时检测、定位出故障的VLSI产业链的芯片测试场合。

参考文献:

- [1] IEEE Std 1149.1-2001, IEEE Standard Test Access, Port and Boundary Scan Architecture[S].

- [2] NAYES L, LAUENGER L. Adding boundary scan test capability to an existing multi-strategy tester[C]// IEEE Autotestcon, San Antonio, 1993:135.
[3] 杨士元. 数字系统的故障诊断和可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
[4] 胡政. 专用集成电路和集成系统自动化设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
[5] 游方 钱颜岭. 边界扫描测试软件系统开发[J]. 国防科技大学学报,2000,22(3):114-117.
[6] 高平,成立,王振宇. 数字VLSI电路测试技术-BIST方案[J]. 半导体技术2003,28(9):29-32.
(收稿日期:2006-04-18)

作者简介:

倪 军(1978-),男,硕士研究生,研究方向为集成电路测试和故障诊断方法;
杨建宁(1956-),男,江苏镇江人,副教授,研究方向为电子测试技术,参加科研课题多项,发表研究论文20余篇。

(上接第575页)

- Micromech Microeng, 2002(12):349-360.
[2] HECTH J. All-optical networks need optical switches[J]. Laser Focus World, 2000(5):189-192.
[3] LIN L Y, GOLDSTEIN E L. On the expandability of free-space micromachined optical cross connects[J]. J Lightwave Technol, 2000,18(4):482-489.
[4] LI J, ZHANG Q X, LIU A Q. Advanced fiber optical switches using deep RIE(DRIE) fabrication[J]. Sensor and Actuator A, 2003,102:286-295.
[5] WU W G, HAO Y L, LI D C, et al. Fabrication and electromechanical characteristics of 2×2 torsion-mirror optical switch arrays with monolithically in-

tegrated fiber self-holding structures[J]. Chinese J of Semiconductors, 2002,23(10):1024-1030.

- [6] 董玮,阮圣平,张歆东,等. 具有倾斜下电极的扭臂驱动结构的设计与制作[J]. 半导体学报,2003,24(11):1196-1199.
[7] 董玮,张歆东,刘彩霞,等. MOEMS阵列光开关的微反射镜的制作[J]. 高技术通讯,2005,15(3):53-55.
(收稿日期:2006-03-21)

作者简介:

董 玮(1973-),女,黑龙江富锦人,吉林大学副教授,主要从事MOEMS光通信器件的研究。

(上接第582页)

应变状态,如果氮化时间增长则应力在氮化层AlN中得到一定的释放。

参考文献:

- [1] 梁春广,张冀. GaN——第三代半导体曙光. [J] 半导体学报,1999,20:89.
[2] STRITE S, MORKOQ H. GaN, AlN and InN: A review[J]. J Vac Sci Technol, 1992, B10(4):1234.
[3] 权田俊一. 分子束外延入门[M]. 北京:国防工业出版社,1981.
[4] MULLER E W, TSONG T T. Field Ion Microscopy[M]. New York: Elsevier, 1969.
[5] 徐茵,顾彪,秦福文,等. GaN薄膜低温外延的ECR-PEMOCVD技术[J]. 半导体技术,1998,23(1):37-39.
[6] HOCHMAN R F, MULLER E W, RALPH B. Application of field ion microscopy in physics metallurgy

and corrosion[Z]. Georgia Institute of Technology Foundation Atlanta, Georgia, 1969.

- [7] PASKOVAA T, VALCHEVAA E, BIRCHA J, et al. Defect and stress relaxation in HVPE-GaN films using high temperature reactively sputtered AlN buffer[J]. J Cryst Growth, 2001,230:381-386.
[8] ONOJIMA N, SUDA J, MATSUNAMI H. Lattice relaxation process of AlN growth on automatically at 6H-SiC substrate in molecular beam epitaxy[J]. J Cryst Growth, 2002,237-239:1012-1016.
[9] 秦福文,顾彪,徐茵,等. 蓝宝石衬底的ECR等离子体清洗与氮化的RHEED研究[J]. 半导体学报,2003,24(5):668-672.
(收稿日期:2006-03-07)

作者简介:

郎佳红(1973-),男,讲师,硕士,毕业于大连理工大学,研究方向为微电子技术的应用。