

基于 MOEMS 技术的一种 F-P 光开关 的设计与制作

徐 杨 吴 霖 虹 刘 理 天 陈 竞 董 良

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 研制了一种用于 WDM 光通信系统的多层介质膜 Fabry-Perot 腔结构式光开关, 面积为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$. 光开关采用多层复合膜消除内应力, 防止产生过度变形; 中心的十字复合梁有利于提高机械灵敏度, 降低驱动电压。体硅腐蚀出的硅杯既减小了光开关的插损, 又便于端面输入输出光纤的精确对准与固定, 有效降低封装成本。制成的开关转换电压为 20V, 关态隔离度为 87%, 开态插损为 0.15dB. 其结构和工艺简单, 易于与 IC 工艺相结合形成规模生产, 如增加膜的层数便能制成基于 F-P 干涉仪结构的滤波器。

关键词: F-P 腔; 光开关; MOEMS

EEACC: 4250

中国分类号: TN 223

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)08-0840-06

1 引言

在目前的光通信网络中, 骨干网的主流技术是波分复用网络(WDM networks), 因此最需要的是具有波长选择功能的器件。基于多光束干涉工作原理的 Fabry-Perot 干涉仪正好决定了其具有波长选择方面的特长。考虑到在全光网中, 波长选择器件将是应用非常广泛的一类, 它通常采用单层或多层介质作为高反射镜, 因此, 采用这一核心结构, 不仅可以制成简单的 MOEMS 光开关, 更能得到很多与波长相关的光学元器件, 例如: 垂直腔表面发射激光器、宽/窄带滤波器、光探测器、波分复用系统中的解复用器、MARS(mechanical anti-reflection switch)可调节衰减器等。

目前, F-P 干涉仪结构研究较多的是采用 InP 材料的窄带滤波器^[1], 它利用了 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 两种材料所具有的腐蚀速率差, 将这两种材料配对生长, 同时又以其中的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为牺牲层, 因此最终得到的是 InP/空气腔的交替层。这样加大了高低折射率差, 从而可以大大减少所需的介质层数。但是由于空气腔很薄, 这对牺牲层腐蚀及出水工

艺会带来很大的难度, 工艺十分复杂, 成品率低。Bell 实验室发表的 MARS 器件^[2]结构比较简单, 只需在 Si 衬底上先淀积一层 $3\lambda_0/4$ (中心波长 $\lambda_0 = 1.55\mu\text{m}$) 厚的 PSG 牺牲层, 再在它上面淀积一层 $\lambda_0/(4n_{\text{Si}_3\text{N}_4})$ 厚的 Si_3N_4 , 最后用电子束蒸发的方法在最上层制做金属电极, 但高反射状态(反射率 $R \approx 72\%$)的关断性能不好, 且采用的是膜结构, 其灵敏度低。

基于此, 本文以硅基 F-P 干涉仪为核心结构设计制作的光开关不仅工艺和结构简单, 工作电压较低, 采用的复合梁结构灵敏度高, 关断状态隔离度为 87%, 开通状态下开关插损为 0.15dB, 性能较好, 面积较小($1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$), 而且非常易于与 IC 工艺相结合进行规模生产。

2 基本工作原理

F-P 光开关是利用多光束干涉效应来选择某一频率(或频段)透射光, 即利用入射光在谐振腔两端的高反射镜面处不断产生的反射光和透射光分别干涉, 从而在反射光和透射光之间重新分配能量。由于光波传输经过谐振腔, 使各光束之间产生了固定的

相位差, 只有相邻光束波长满足极大干涉条件的光波才能透过, 这一波长即为谐振波长, 调节其谐振腔长, 就能改变分别从两个镜面反射光波的相位差, 从而改变谐振波长。

本文设计的 F-P 光开关的示意结构如图 1 所示。其核心结构就是一个多层介质结构的 F-P 干涉仪, 中间的空气腔为 F-P 谐振腔, 两边的高反射镜由分布式布拉格反射镜(DBR)构成。其中用于配对的高/低折射率介质, 分别选用了 Si_3N_4 和 SiO_2 , 它们的折射率大约分别为 1.99 和 1.455。在上层 Al 电极和 Si 衬底之间加上驱动电压后, 空气腔上方的微机械梁结构的镜面会在静电引力的作用下发生位移, 可使两镜面间的距离 d (即空气腔的厚度)发生改变, 从而达到改变谐振频率的目的。若考虑光线正入射, 由物理光学中的等效折射率法^[3]和计算机数值模拟的传输矩阵法^[4]可得, 当空气腔厚度的改变量达到四分之一中心波长时, 即可完成开、关转换。可以看出, 该器件的基本结构与光学上常用的 F-P 干涉仪并没有很大的不同, 但 MEMS 工艺的引入, 大大地缩小了器件的体积, 提高了器件的稳定性。在控制方面采用静电驱动, 既节省了能耗, 提高了响应速度, 又方便与控制电路部分集成, 极好地迎合了目前光通信系统的需求。

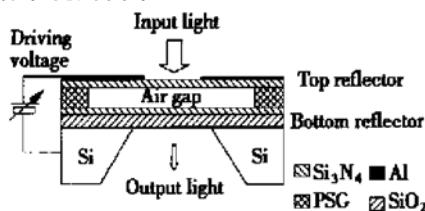


图 1 F-P 光开关的示意结构图

Fig. 1 Sketch of a F-P switch

3 结构设计

F-P 光开关的结构设计主要可以分为力学结构设计和光学结构设计两部分。力学设计主要是出于力学角度考虑, 对多层复合梁内应力问题和平面梁的机械灵敏度设计, 而光学结构设计是根据透射谱/反射谱的要求进行各层介质厚度的设计。

从力学设计角度出发, 由于器件在制作流程中采用的薄膜淀积、生长和掺杂, 会使不同的材料形成的不同内应力, 根据我们的工艺条件 Si_3N_4 会形成约 1000 MPa 的张应力, SiO_2 会形成约 130 MPa

的压应力, 与之相比 Al 的内应力则可以忽略。这种内应力会在微结构形成时以残余应力的形式释放出来, 对器件的力学特性造成很大的影响, 甚至在结构释放后会令器件的功能失效。由于存在应力刚化(stress stiffening)效应, 即平面内应力和横向刚度的耦合效应, 还将极大地影响微结构的机械灵敏度。对于设计的梁结构, 残余应力越大, 机械灵敏度越低。同时, 由于残余应力的存在, 还会导致梁结构在释放时产生过大的形变(即静态挠度过大), 破坏器件的整体结构, 造成器件失效。然而, 残余应力与制备时的工艺参数、环境温度和器件的封装都密切相关, 难以精确控制。为改进这一问题, 我们采用的方法是将具有不同初始应力的材料组成复合膜(氧化硅/氮化硅)结构, 使氮化硅的张应力为氧化硅的压应力所补偿, 从而提高膜的机械灵敏度, 减小初始变形。理论上讲, 当组成复合膜的各层膜满足条件: (1) 总应力为张应力; (2) 每层膜材料内应力均匀; (3) 复合结构无弯曲时, 等效的复合膜应力 σ_e 、等效膜厚度 t_e 、弹性模量 E_e 和各层膜 ($i = 1, 2, \dots$) 对应量的关系为

$$\sigma_e t_e = \sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2 + \dots \quad (1)$$

$$t_e = t_1 + t_2 + \dots \quad (2)$$

由公式(1)可知, 设置合适的各层膜厚度可使复合膜应力 σ_e 接近为 0。由材料力学理论可知, 受匀布荷载作用的固端复合梁挠度公式为:

$$y_{\max} = -\frac{BF_y L^4}{384E_e J_e} \quad (3)$$

其中 L 为梁长; B 为梁宽; 等效的梁宽为 B_e ; 各层的梁厚度为 t_i ; E_e 为等效弹性模量; F_y 为均衡荷载力, 在此它是内应力 σ_e 和静电力 F 的综合。固端梁的截面二次矩 I_i 为:

$$I_i = \frac{B_e t_i^3}{12} \quad I_e = \sum I_i \quad (4)$$

$$E_e B_e = E_1 B_1 E_e B_e = E_2 B_2 \dots \quad (5)$$

$$F = \frac{\epsilon_0}{2} \left[\frac{V}{t_e} \right]^2 \quad (6)$$

为防止梁在工作时出现疲劳或形变难以恢复原状的情况, 要考虑形变在完全塑性形变范围内, 即弯曲向下位移为 $1/4$ 波长时产生的形变最大应力要远远小于屈服应力。根据此原理可知, 各层薄膜材料的厚度对复合膜的材料参数有着重要的影响, 可以通过改变复合膜各层材料的厚度来减小整个复合膜由于残余应力造成的刚化效应, 即减小残余应力对可

动结构的影响。

但是,目前对这种具有初始应力的结构尚无精确的解析解法,只能针对某些简单的结构,采用近似解析法进行初步分析,因此进行这种机械特性分析是相当困难的。对于较复杂的实际结构,只有采用有限元分析(FEA)等数值算法进行求解。有限元分析的结果表明,如果采用复合介质梁,在初始应力的作用下,即使没有任何外界压力,梁也具有初始的静态挠度。向上的静态挠度将有利于梁的释放,而向下的挠度则会减小梁和下层镜面之间的空气间隙。当最大向下挠度大于牺牲层释放造成的间隙时,器件就

会失效。

我们利用有限元软件 Ansys 模拟了十字复合梁,由于十字复合梁是中心对称结构,只需模拟其 1/4 结构,如图 2(a)、(b) 所示。满足公式(1) 复合应力 $\sigma_c \approx 0$ 的 Al/Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 复合膜(厚度比为 100 : 6 : 64 : 5) 的十字梁不仅提高了中央通光镜面的水平度,而且其中心区域综合应力为较小的张应力(如图 2(a) 所示),这是有利于牺牲层的释放和测试时的调试,且梁的灵敏度较高,所需驱动电压较低。图 2(b) 所示梁加电压约为 18V 时,梁中心产生的形变为 $\lambda_0/4$,即开关转换电压设计值约为 18V。

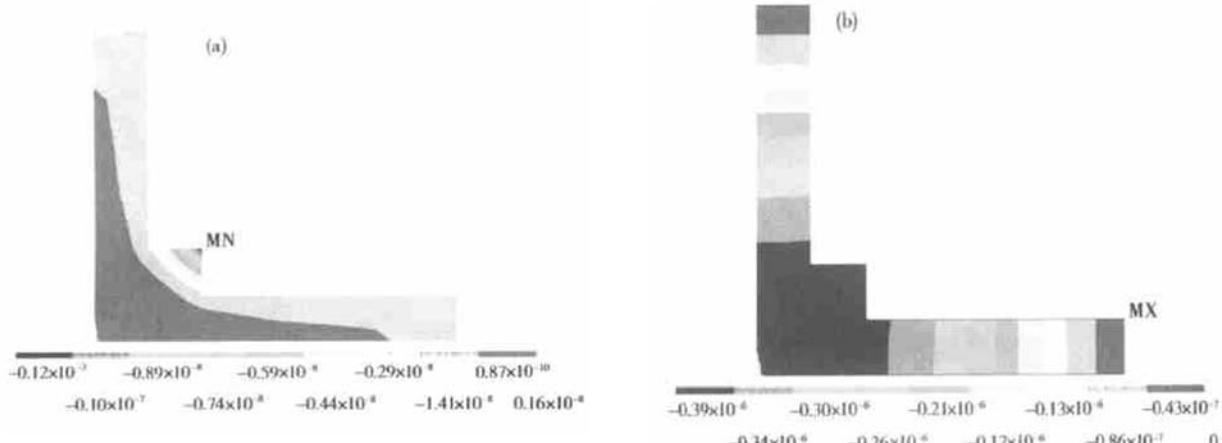


图 2 Ansys 模拟的十字复合梁 (a) 梁的初始变形; (b) 加电压耦合场的梁变形

Fig. 2 Simulation results of optical switch (a) Original deflection of the cross beam; (b) Electrostatic deflection of the beam

在光学结构设计方面,采用矩阵光学^[4]的方法,将整个 F-P 光开关看作一个多层次介质体系来建模^[5],进行计算机模拟,同时考虑到多层次复合膜内应力问题,得到复合膜各层厚度由上至下分别为: Si₃N₄ 60nm, SiO₂ 640nm, Si₃N₄ 50nm, PSG 2325nm, Si₃N₄ 194nm, SiO₂ 530nm。

在设计时还要考虑电容极板的坍塌效应。即当电容极板的电压加大到一定值时,梁形变的最大距离达到 1/3 极板间距时,两极板会吸引到一起而失去调节极板间距的功能。此电压的域值为^[7]:

$$V_{th} = 0.6476 \frac{(t_c d)^{\frac{3}{2}}}{L^2} \left| \frac{2E_c}{3\epsilon_0} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

由本开关设计的空腔厚度为 $6\lambda_0/4$, 开关转换的距离为 $\lambda_0/4$, 形变距离小于 $d/3$, 即开关工作时,既要在完全塑性形变内,又不会发生坍塌效应。

4 制作工艺

图 3 为制作工艺流程简图。图 4(a) 是十字复合梁 SEM 像,图 4(b) 为梁的正中间 Al 层留有一个 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 的通光窗口。

光开关的制作工艺主要有两个关键步骤。一个是体硅腐蚀,体硅腐蚀制作的硅杯可以减小器件插损,由高斯光束发散角 θ 公式

$$\theta = \frac{\lambda_0}{\pi n \omega_0}, \quad \omega_0 \text{ 为光束 } 1/e \text{ 半宽度} \quad (8)$$

可知,从光纤向自由空间输出的高斯光束会很快发散。因此两侧光纤的端面距离越近越好。制作合适大小的硅杯不仅可以大大减小两侧光纤的端面距离,同时可去除相对中心波长 $\lambda_0 = 1.55\mu\text{m}$ 反射系数($R = 0.299$) 较大的 Si,代之以反射系数($R = 0.034$) 较

小的 SiO_2 作为光开关的入射端面从而减小插损。采用超声辅助 KOH 体硅腐蚀工艺进一步提高了腐蚀面的均匀性和表面平整度^[6], 可减小开关表面散射

导致的插损。测试表明, 有无硅杯的器件插损分别为 0.15dB 和 1.63dB。可见, 采用硅杯结构对于减小器件的插损是非常重要的。

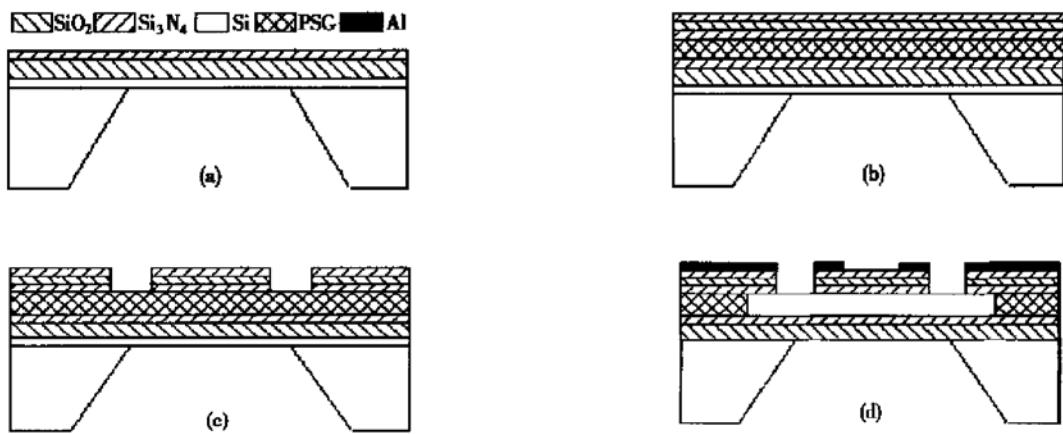


图 3 制作工艺流程简图 (a) 体硅腐蚀和淀积下层镜面; (b) 淀积上层镜面; (c) 制作上层镜面梁结构; (d) 背面彻底腐蚀减薄硅杯, 制作铝电极和牺牲层释放

Fig. 3 Process flow for fabricating optical switch (a) Silicon bulk micromachining and deposition of bottom layers; (b) The deposition of PSG and upper layers; (c) Etching of upper beam structure; (d) Releasing the F-P cavity

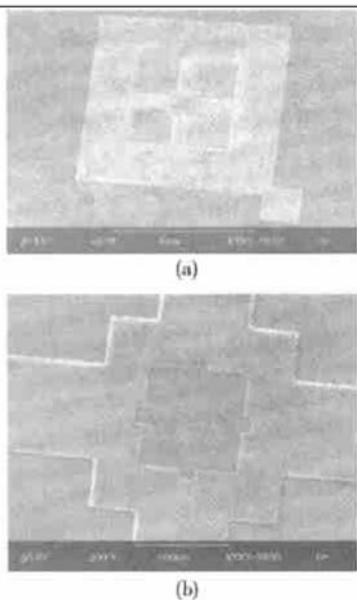


图 4 光开关的上层十字复合梁 SEM 像

Fig. 4 SEM photograph of a cross beam optical switch

另一个关键步骤是牺牲层的释放。牺牲层采用磷硅玻璃(PSG), 停止层为 Si_3N_4 。氢氟酸缓冲液(BHF) 作牺牲层腐蚀剂。粘连是释放牺牲层最主要的问题, 表面张力和悬梁结构的弯曲变形是产生粘连的主要因素。我们采用的十字复合梁避免了弯曲

变形, 并用低表面张力系数的异丙醇最后脱水, 获得了很好的效果。图 5 为 PSG 牺牲层释放后的 SEM 照片。

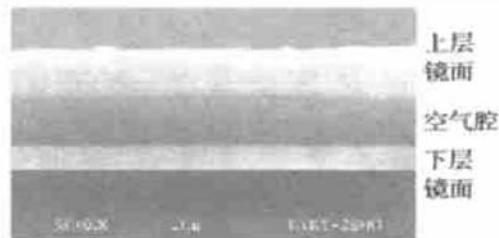


图 5 PSG 牺牲层释放后的 SEM 照片

Fig. 5 Cross section of F-P cavity

5 测试系统的设计及实验结果

测试系统结构简图如图 6、7 所示。图中的光纤架右侧上下两个同心圆柱孔用于插入输入输出的光纤头。为了减小损耗, 在输入端和输出端可分别采用如图 7(a)、(b) 所示的两种自聚焦透镜, 将输入器件的斑缩小到 $10 \sim 20 \mu\text{m}$, 同时输出端光纤可以接收直径 2mm 左右范围的光能量, 这样既提高了光功率的耦合效果, 也缩小了器件的所需镜面尺寸。为了便于端面光纤的精确对准与固定, 设计了如图 8 所

示的装置. 在两硅片上进行体硅腐蚀形成同样大小的硅杯, 将无光开关的一块硅片反扣固定或粘结(bonding)在被测试的光开关上. 这种方法能较方便的固定和对准上下光纤. 减少因光纤对准误差而带来的插损.

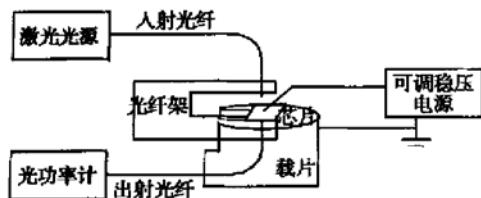


图 6 测试系统框架图

Fig. 6 Structure of testing system

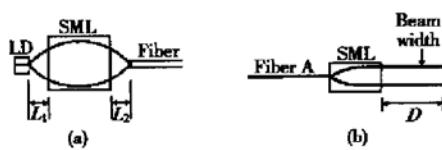


图 7 节距为 $1/2$ 和 $1/4$ 波长的自聚焦透镜图

Fig. 7 Schematic view of self-focus lens

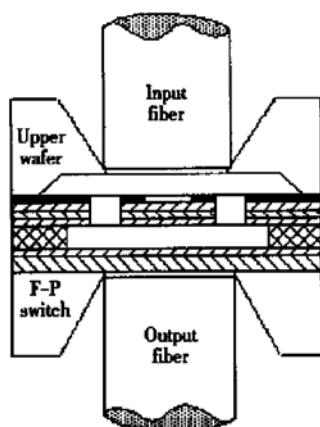


图 8 端面光纤的对准与固定

Fig. 8 Sketch of fiber fixation

测试采用的是波长为 1553nm , 输出功率为 5mW 的单色光源, 功率计灵敏度可达 1nW . 图 9 为开关特性的测试结果. 理论分析的特性曲线透射峰对应偏置电压为 0V , 但实测的透射峰位于 5V . 这是由于形成空腔的 PSG 层的厚度与原来设计的值误差导致的. 由实测的 PSG 厚度 2430nm 和设计值 2325nm 比较, 利用公式(3)和(6)计算得到, 5V 偏压恰好补偿了这一初始厚度误差, 导致透射峰右移.

峰值状态下, 器件接近完全透射; 随着偏置电压的加大, 透射率下降, 当偏置电压 25V 时, 器件处于较高反射的状态, 其态隔离度为 87% . 所以, 考虑到有 5V 的补偿电压, 本开关的转换电压应为 20V , 这与设计值 18V 基本相符. 通过测试开关工作的可重复性表明开关在工作时既在完全塑性形变内, 又未见发生坍塌效应.

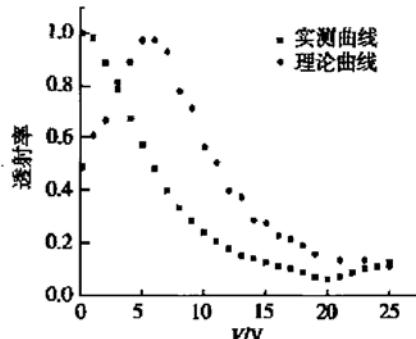


图 9 光开关特性曲线

Fig. 9 Characteristics of the switch

6 结论

本文在 MEMS 与传统光学技术相结合的趋势下, 选择了具有 F-P 腔的光开关作为研究对象. 本文制成的开关转换电压为 20V 左右, 关断状态隔离度为 87% , 开通状态下开关插损为 0.15dB , 结构和工艺简单, 而且非常易于与 IC 工艺相结合规模生产, 如增加膜的层数便能制成基于 F-P 干涉仪结构的滤波器. 在控制、体积上都迎合了现代光纤通信系统发展的需要, 是一类非常有应用前景的器件.

致谢 本文的测试工作得到清华大学电子工程系刘晓明教授的大力支持与帮助, 在此表示感谢.

参考文献

- [1] Wu M S, Vail E C, et al. Widely and continuously tunable micromachined resonant cavity detector with wavelength tracking. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(1): 98
- [2] Goossen K W, Walker J A, Arney S C. Silicon modulator based on mechanically-active anti-reflection layer with 1 Mbit/sec capability for fiber-in-the-loop applications. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1994, 6(9): 40
- [3] Liao Yanbiao. Optical physics. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1986[廖延彪. 物理光学. 电子工业出版]

社, 1986]

- [4] Pochi Yeh. Optical waves in layered media. John Wiley & Sons Inc Published, 1996
- [5] Wu Jihong. Design and fabrication study of F-P optical switch based on MOEMS technology. Thesis of Master degree, Institute of Microelectronics Tsinghua University, 2001[吴霁虹. 基于 MOEMS 技术的 F-P 光开关的设计与制作工艺研究. 清华大学微电子学研究所硕士论文, 2001]
- [6] Chen Jing, Liu Litian, Tan Zhimin, et al. Study of anisotropic etching of (100) Si with ultrasonic agitation. Sensors and Actuators, 2002, A96: 152
- [7] Jia Yubin, Chen Lianghui, Li Yuzhang. Analysis and design for a micro-mechanical optical switch. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(7): 837

Design and Fabrication of a F-P Optical Switch Based on MOEMS Technology

Xu Yang, Wu Jihong, Liu Litian, Chen Jing and Dong Liang

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A micro-optic-mechanical F-P cavity switch with composite membrane driven by electrostatic actuator for fiber-optic communication applications is reported. The area of the switch is 1.5mm × 1.5mm. To eliminate the effect of residual stress, the beams are sandwiched layers consisting of oxide/nitride, where the large tensile stress of nitride is partly compensated by the compression stress of oxide. Therefore, the initial deflection is greatly reduced with the mechanical sensitivity increased at the same time. The silicon bulk micromachining is not only useful for decreasing the insertion loss of the switch, but also easily fixing the fibers and their accurate alignment. The driven voltage is about 20V, and isolation of shutting status is 87% and insertion loss 0.15dB.

Key words: Fabry-Perot cavity; optical switch; MOEMS

EEACC: 4250

Article ID: 0253-4177(2002)08-0840-06