

文章编号: 0258-7025(2005)07-0937-05

4×4 纵横交换微机械系统光开关阵列

胡巧燕¹, 袁 菁², 李 静¹, 李宝军¹

(¹中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)
(²华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 微机械系统(MEMS)光开关是微电机系统技术与传统光学技术相结合的新型机械式光开关。采用纵横交换网络和通断型微镜实现 4×4 微机械系统光开关阵列,利用球透镜单模光纤准直器作为微机械系统光开关阵列的输入、输出端口。运用高斯光束耦合理论对光开关阵列插入损耗(IL)进行了理论计算,并对引起插入损耗的主要因素进行了分析。对于失调容限:输入与输出光纤准直器位置失调 2 μm,定位角度失调 0.15°,微镜非垂直反射角度失调 0.15°,制作了 4×4 微机械系统光开关阵列,对其各个通道的插入损耗进行了实验测试,其中最大值为 2.77 dB。

关键词 光通信;光开关;光动态器件;微机械系统

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

4×4 Crossbar Micro-Electro-Mechanical System Optical Matrix Switches

HU Qiao-yan¹, YUAN Jing², LI Jing¹, LI Bao-jun¹

(¹ State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)
(² State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Optical switches made with micro-electro-mechanical systems (MEMS) technology bear advantages of both MEMS and traditional optics. In this paper, 4×4 MEMS optical matrix switches are proposed, in which on-off micro-mirrors are arranged with crossbar switching network. Ball-lensed single-mode optical fiber collimators are used as input and output ports. With theory of Gaussian beam coupling, the insertion loss (IL) of the optical matrix switches, and also its main origins, i. e. the position misalignments and the angular misalignments, are calculated and analyzed. Some useful conclusions are drawn to guide designing such devices. With the misalignment tolerances; 2 μm of input/output lateral positioning misalignment, 0.15° for input/output angular misalignment, and 0.15° for micro-mirror angular misalignment, the insertion loss of different channels in the pilot study is tested and the highest value of that is 2.77 dB.

Key words optical communications; optical switches; optical dynamic component; micro-electro-mechanical systems

1 引 言

高速大规模光开关阵列是全光网络核心节点设备光交叉连接(OXC)中关键的光电子器件之一,用于光通道交叉连接及保护/倒换。用于光开关阵列制作的技术有多种^[1~7],其中微机械系统(MEMS)^[8]光开关是微电机系统技术与传统光学技术相结合的新型机械式光开关。它利用半导体微细

加工工艺技术,制作出微小而活动的机械系统,具有结构紧凑、集成度高、矩阵规模大、便于批量生产的特点;同时具有传统光学技术全面的光性能,如插损低、串话小、偏振无关等,已逐渐成为实用化大型光交叉连接采用的核心器件。

插入损耗是评价光开关阵列性能的一个重要参数,同时直接限制了光开关阵列的规模。引起光开

收稿日期: 2004-03-03; 收到修改稿日期: 2004-10-18

基金项目: 广东省自然科学基金(04300432)资助项目。

作者简介: 胡巧燕(1974—),女,湖北人,中山大学光电材料与技术国家重点实验室博士后,主要从事光通信器件与微机械系统的研究。E-mail: qiaoyanhu@163.com

关插入损耗的因素有多种,其中横向位置失调、输入与输出端口纵向间距、角度失调是其关键。控制好这些失调的制作容差,对于保证微电机系统光开关性能具有重要意义。

2 微电机系统光开关阵列结构

图 1 所示为 4×4 微电机系统光开关阵列结构示意图。按照 4×4 纵横交换网络,微镜排列成 4×4 列阵,4 路输入与 4 路输出各排成一列,并互相垂直。输入单模光纤中的光信号经输入准直透镜准直,以 45° 入射角射向微镜阵列,相应的微镜对光束进行反射,最后折转 90° 的光束经输出准直透镜耦合至输出单模光纤。

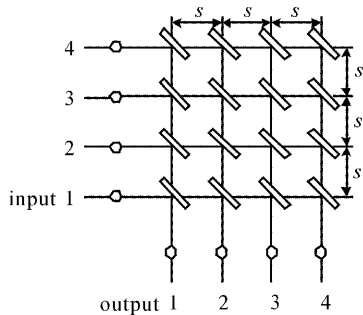


图 1 4×4 微电机系统光开关阵列纵横光交换网络
Fig. 1 Crossbar optical switching network for 4×4 MEMS optical matrix switches

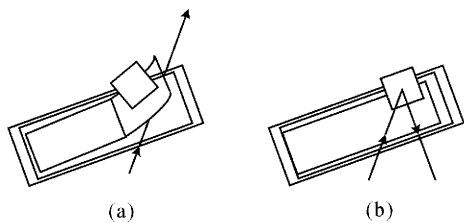


图 2 微镜结构与状态
(a) “通”状态, (b) “断”状态
Fig. 2 Structure and states of micro-mirror
(a) “on” state of micro-mirror, (b) “off” state of micro-mirror

微镜采用通断型动作,控制模块控制各个微镜所加电压。如图 2(a) 所示,当微镜电极间不加电压,则微镜翘起,不切入光路,光束直接通过,即“通”状态。如图 2(b) 所示,当微镜电极间加上电压时,微梁带着微镜吸附在硅衬底上,微镜切入光路,对入射光束反射,即“断”状态。

利用带球透镜的单模光纤作为微电机系统光

开关阵列的输入、输出端口,可以获得大的准直距离,减小插入损耗。球透镜单模光纤准直器结构如图 3 所示,它是将球透镜熔融连接在单模光纤端部形成。输入/输出单模光纤中,只有基模高斯光束被激励并约束传输。准直球透镜对高斯光束的变换仍为高斯光束。从球透镜端面出射的高斯光束模场半径为 w_T ,经过工作距离 D 的传输,到达束腰位置,束腰半径为 w_0 ,此后,高斯光束扩散传输。

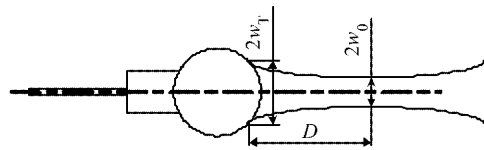


图 3 球透镜单模光纤准直器结构
Fig. 3 Illustration of single-mode ball-lensed fiber collimator

3 高斯光束传输与耦合

根据模场耦合理论,两个完全相同的准直器相互耦合,当二者束腰重合时,模场完全匹配,不会引起耦合损耗。两个参数不同的准直器相互耦合,或者两个准直器存在各种耦合失调时,会产生一定的附加耦合损耗。实际工作中,通常存在三种耦合失调^[9],如图 4 所示。

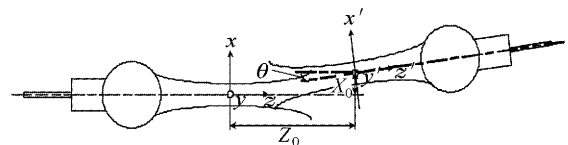


图 4 光纤准直器耦合失调
Fig. 4 Misalignments of fiber collimators

1) 径向失调:输入、输出高斯光束的横向位移 X_0 ,主要由输入、输出光纤准直器横向位置失调以及微镜对光束非垂直反射引起;

2) 轴向失调:两个光纤准直器束腰的纵向间距 Z_0 ,主要包括光纤准直器端面到束腰的距离,以及输入、输出光纤准直器端面间的距离;

3) 角向失调:输入、输出高斯光束光轴间夹角 θ ,主要由输入、输出光纤准直器定位角度失调以及微镜对光束非垂直反射引起。

不失一般性,分别在输入与输出光纤准直器束腰中心处建立直角坐标系 (x, y, z) 和 (x', y', z') 。该两个坐标系之间存在以下变换关系

$$x = x' \cos \theta - z' \sin \theta + X_0 \approx x' - z' \sin \theta + X_0, \quad (1a)$$

$$y = y', \quad (1b)$$

$$z = z' \cos \theta + x' \sin \theta + Z_0 \approx z' + x' \sin \theta + Z_0, \quad (1c)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 = (x' \cos \theta - z' \sin \theta + X_0)^2 + y'^2 \approx (x' - z' \sin \theta + X_0)^2 + y'^2. \quad (1d)$$

取光场矢量的 x 分量进行分析, 则光纤准直器输出光束在空间某点的光场为

$$E_x(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{w(z)} \exp \left\{ -i[kz - \eta(z)] - r^2 \left[\frac{1}{w^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)} \right] \right\}, \quad (2)$$

此处忽略了时间因子 $\exp(i\omega t)$, 其中 E_0 为 E_x 在原点 ($x=0, y=0, z=0$), 即束腰中心处的振幅, ω_0 为光纤准直器的束腰半径, r 为点 (x, y, z) 到 z 轴的距离。且有

$$k = 2\pi/\lambda, \quad (3a)$$

$$\eta(z) = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right), \quad (3b)$$

$$w^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right], \quad (3c)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]. \quad (3d)$$

根据模场耦合理论, 输入与输出光纤准直器在 x 方向上的耦合效率为

$$\eta_c = \frac{2}{\pi E_0 E_0' \omega_{0-in} \omega_{0-out}} \times \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} E_x(x, y, z) \Big|_{z=0} E_x^*(x', y', z') \Big|_{z=0} dx' dy', \quad (4)$$

其中 ω_{0-in} 和 ω_{0-out} 分别为输入和输出光纤准直器束腰半径。从输入准直器至输出准直器的传输系数 T 及插入损耗 L (单位: dB) 分别为

$$T = |\eta_c|^2 = \eta_c \eta_c^*, \quad (5)$$

$$L = -10 \lg(T), \quad (6)$$

4 计算与分析

如图 1 所示, 设计 4×4 纵横交换微机械系统光开关阵列, 采用 Corning OptiFocus™ 球透镜光纤准直器作为输入、输出端口。根据实际设计需要, 选取其束腰模场直径为 62 μm, 工作距离为 1.5 mm, 输入、输出光纤准直器到微镜阵列距离均为 500 μm。设微镜间距为 s , 输入、输出光纤准直器模场夹角为 θ_c , 微镜对光束非垂直反射引起的光束偏角为 θ_m 。输入、输出光纤准直器模场横向失调为 x 。

在微机械系统光开关阵列设计中, 微镜间距 s 是一个很重要的设计参量, 需要考虑单个微镜本身的物理尺寸, 还涉及到输入、输出光功率耦合效率问题, 减小微镜间距 s 的大小可以减小光开关阵列整体面

积, 或增大其开关端口数。对于如图 1 所示的纵横交换微机械系统光开关阵列, 图 5 所示为没有任何位置和角度失调情况下输入端口 4 到输出端口 4 插入损耗与微镜间距 s 之间的关系, 图中曲线在 $s=350 \mu\text{m}$ 处有一个最小值, 当微镜间距偏离该最小值时, 插入损耗均随之迅速增大。但考虑到微镜本身物理尺寸难以达到该值, 在实际光开关设计中选取微镜间距 $s=700 \mu\text{m}$, 此时对应插入损耗为 1.202 dB。

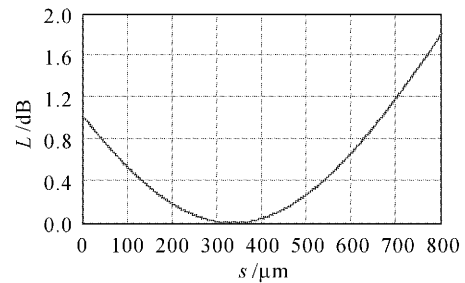


图 5 插入损耗与微镜间距的关系

Fig. 5 Relation between L and distance among micro-mirrors

微机械系统光开关阵列制作过程以及光纤准直器装配过程中都会引起一定的位置偏差和角度偏差, 致使插入损耗性能大大恶化。

图 6 为没有角度失调情况下, 输入端口 4 到输出端口 4 插入损耗与横向位置失调 x 之间的关系。随着横向位置失调增大, 插入损耗也随之增加, 特别是当横向位置失调大于 2 μm 后, 插入损耗增加更加迅速。

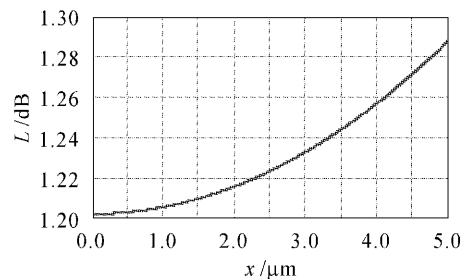


图 6 插入损耗与横向位置失调的关系

Fig. 6 Relation between L and lateral misalignment

图 7 为横向位置失调为 $2 \mu\text{m}$ 时,输入端口 4 到输出端口 4 插入损耗与角向失调之间的关系。其中实线表示微镜角向失调 $\theta_m=0$ 时光纤准直器角向失调 θ_c 对插入损耗的影响;虚线表示光纤准直器角向失调 $\theta_c=0$ 时,插入损耗随微镜角向失调 θ_m 的变化。从计算曲线可知,插入损耗对微镜角向失调更敏感,因此在光开关制作中,应严格控制微镜垂直度,以及微镜与输入、输出阵列的夹角。

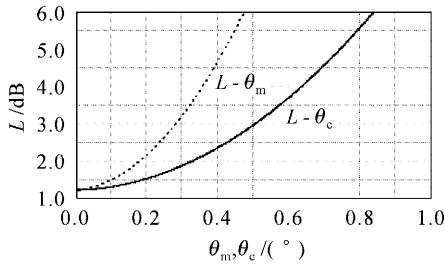


图 7 插入损耗与角向失调的关系

Fig. 7 Relation between L and angular misalignment

5 测试与结果

制作的单个微镜实物图如图 8 所示。对各个光通道的插入损耗进行测量的实验装置如图 9 所示。光源选择 1550 nm 波长的半导体激光源。实验中,首先将光源与光功率计直接相连,读取光源输出光功率 P_0 。然后将光源通过活动连接器与微镜芯片的输入端口相连,同时将光功率计通过活动连接器连接至微镜芯片的输出端口。4 个输入端口和 4 个输出端口按全排列一一进行光功率测量,得到各通道输出光功率值 P_{ij} (其中 $i, j=1, 2, 3, 4$)。插入损

耗则为

$$L_{ij} = P_0 - P_{ij}, \quad (7)$$

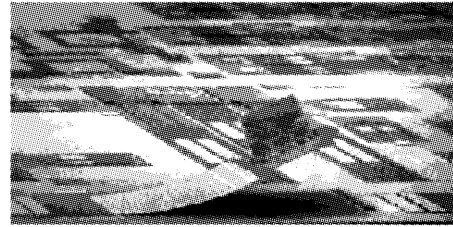


图 8 单个微镜实物图

Fig. 8 SEM of micro-mirror

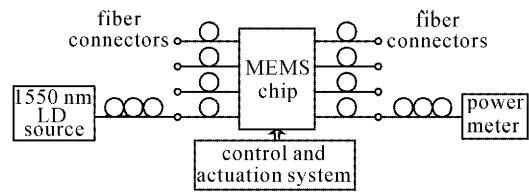


图 9 插入损耗测试实验装置示意图

Fig. 9 Illustration of test platform for L measurement

在实际的微机械系统光开关阵列设计中,我们将制作与装调的失调容差确定为: $x=2 \mu\text{m}$, $\theta_m=0.15^\circ$, $\theta_c=0.15^\circ$ 。表 1 为各个光通道理论插入损耗与实测插入损耗。表中有些光通道的实测插入损耗小于理论插损,这是因为在理论计算中,假定 θ_m 与 θ_c 方向一致,但实际制作过程中,有可能这两个角度方向相反,减小了角度失调的影响。此外,该部分计算中还没有考虑微镜反射率的大小,各个球透镜光纤准直器输出模场的非严格一致性,以及微镜微弯变形带来的插入损耗变化。

表 1 各个光通道理论插损与实测插损

Table 1 L of different channels: theoretical calculation and measured values

L / dB	Input ports								
	1		2		3		4		
	Theory	Measure	Theory	Measure	Theory	Measure	Theory	Measure	
Output ports	1	2.079	1.91	1.436	1.24	1.674	1.52	2.559	2.53
	2	1.398	1.42	0.956	0.98	1.141	1.01	1.852	1.98
	3	1.314	1.56	1.01	1.12	1.204	1.34	1.946	2.06
	4	1.973	2.05	1.522	1.65	1.766	1.81	2.668	2.77

6 结 论

采用纵横交换网络和通断型微镜实现 4×4 微机械系统光开关阵列,具有控制简单、易于实现等特点。利用带球透镜的单模光纤作为微机械系统光开关阵列的输入、输出端口,可以获得大的准直距

离,减小插入损耗。运用高斯光束耦合理论对光开关阵列插入损耗进行了理论计算,并对引起插入损耗的主要因素位置失调和角度失调进行了分析。可以看出随着横向位置失调增大,插入损耗也随之增加,特别是当横向位置失调大于 $2 \mu\text{m}$ 后,插入损耗

增加更加迅速。对于输入、输出光纤准直器定位角度失调和微镜对光束非垂直反射引起的高斯光束模场角度失调,插入损耗对后者更敏感。因此在光开关制作中,应严格控制微镜垂直度,以及微镜与输入、输出阵列的夹角。最后对各光通道插入损耗进行了测试,其中最大值为 2.77 dB。

参 考 文 献

- 1 M. Okuno, K. Kato, Y. Ohmori *et al.*. Improved 8×8 integrated optical matrix switch using silica-based planar lightwave circuits [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1597~1606
- 2 Y. Shimazu, S. Nishi, N. Yoshikai. Wavelength-division-multiplexing optical switch using acoustooptic deflector [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(12): 1742~1747
- 3 L. Y. Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach. Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 525~528
- 4 Myung-Hyun Lee, Yoo Hong Min, Suntak Park *et al.*. Fully packaged polymeric four arrayed 2×2 digital optical switch [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(5): 615~617
- 5 M.-C. Oh, H.-J. Lee, M.-H. Lee *et al.*. Asymmetric X-junction thermo-optic switches based on fluorinated polymer waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 813~815
- 6 J. Kobayashi, T. Matsuura, Y. Hida *et al.*. Fluorinated polyimide waveguides with low polarization-dependent loss and their applications to thermo-optic switches [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(6): 1024~1029
- 7 Hu Qiaoyan, Cao Mingcui, Luo Fengguang. Optical matrix switch based on polarization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 33~37
胡巧燕,曹明翠,罗风光. 基于偏振的光矩阵开关 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 33~37
- 8 Yuhua Zuo, Changjun Huang, Buwen Cheng. 1.55- μm Si-based MOEMS optical tunable filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 529~531
- 9 Shifu Yuan, Nabeel A. Riza. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3214~3222