

doi:10.3788/gzxb20154407.0713001

# 有机/无机热光开关制备及其测试系统研制

罗倩倩, 郑传涛, 黄小亮, 王希斌, 张大明, 王—丁

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

**摘要:**结合有机聚合物材料和无机 SiO<sub>2</sub> 材料,设计一种 1×2 多模干涉—马赫曾德尔干涉仪热光开关,优化器件参数,并对其性能进行模拟,利用化学气相沉积、光刻等工艺制备热光开关,并对其波导形貌进行表征。为了测试器件性能,采用 ARM7 处理器和 InGaAs 光电探测器,设计并研制了一种光开关性能测试系统。该系统主要由低纹波线性供电电源、光电探测器、前置放大器、主放大器、信号调理器、模数转换器、主控制器、显示器等构成。采用商用光功率计对该测试系统进行标定,其零点漂移小于 0.5 dBm。在光开关电极上施加不同的直流驱动电压,作为对比,利用自主研制的光功率计和商用光功率计分别测试光开关某端口的输出光功率。实验结果表明,两种情况下测得曲线的变化趋势一致,均在驱动电压为 10 V 时,输出光功率达到最小值。该测试系统具有良好的性能,可满足实际测试需要。

**关键词:**集成光学; 光开关; 聚合物; 热光效应; 测试系统; 功率计

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0713001-6

## Fabrication of Organic/Inorganic Thermo-Optical Switch and Development of Its Measurement System

LUO Qian-qian, ZHENG Chuan-tao, HUANG Xiao-liang, WANG Xi-bin,  
ZHANG Da-ming, WANG Yi-ding

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** A 1×2 multimode interference Mach-Zehnder interferometer thermo-optical switch was designed by combining the advantages of organic polymer and inorganic SiO<sub>2</sub> materials. The structural parameters were optimized and the device performances were simulated. Fabrication techniques, such as chemical vapor deposition and lithography, were adopted to fabricate the switch, and the waveguide appearance were characterized. Furthermore, in order to measure the performance of the device, a kind of measurement system for optical switch was developed using ARM7 processor and InGaAs photoelectric detector. The system is mainly composed of low-ripple linear power, photoelectric detector, preamplifier, main amplifier, signal regulator, AD converter, main controller, display module, etc. The system was calibrated with the help of a commercial optical power meter, and its zero drift is found to be smaller than 0.5 dBm. Applying different driving voltages on the electrode, the output optical power from one port of the switch was both measured by the self-developed optical power meter and the commercial power meter. The experimental results show that, the obtained two curves have the same variation trend, and when the driving voltage is 10 V, the two measured output powers both become the smallest. This shows that the measurement system has good performance and can meet the needs of the actual measurement. The system provides a solution for the performance measurement of optical switch due to its small size and high performance-cost ratio.

**Key words:** Integrated optics; Optical switch; Polymer; Thermo-optic effect; Measurement system;

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61107021, 61177027)、教育部博士学科点专项基金(Nos. 20110061120052, 20120061130008)、吉林省科技发展计划(No. 20130522161JH)和吉林大学面上项目种子基金资助

**第一作者:**罗倩倩(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向为光开关与光互连。Email: luo.qian.89@163.com

**导师(通讯作者):**郑传涛(1982—),男,副教授,博士,主要研究方向为集成光电子器件与系统。Email: zhengchuantao@jlu.edu.cn

**收稿日期:**2015-01-21; **录用日期:**2015-03-04

<http://www.photon.ac.cn>

Power meter

OCIS Codes: 130.4815; 250.5460; 060.6718

## 0 引言

光开关在光纤通信、光计算、光传感等领域都有重要的应用前景<sup>[1-5]</sup>,它具有一个或多个选择传输端口,是光纤通信中光分插复用器(Optical Add/Drop Multiplexer, OADM)和光交叉连接器(Optical Cross Connect, OXC)的重要元件.在波导光开关中,热光开关体积小、稳定性好、可扩展性强,是光开关领域的研究热点之一<sup>[6-8]</sup>.人们先后报道了不同材料的热光开关.如Gu等人报道的基于光子晶体波导的马赫曾德尔(Mach-Zehnder Interferometers, MZI)热光开关<sup>[9]</sup>、台湾的Chuang等人报道的基于SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>N</sub>/SiO<sub>2</sub>波导的多模干涉仪(Multimode Interference, MMI)热光开关<sup>[10]</sup>、Geis等人报道的基于SOI材料 MZI热光开关<sup>[11]</sup>等.

由于聚合物材料的热光系数高,基于该类材料的热光开关的功耗可小至几个mW.然而,聚合物材料的热传导系数比无机材料小很多,因此,基于无机材料的热光开关的响应速度更快.因此,全聚合物材料和全无机材料的热光开关分别在速度和功耗方面具有劣势.鉴于上述考虑,基于聚合物材料和SiO<sub>2</sub>材料的混合波导热光开关可综合利用有机材料和无机材料的优点,使得这类热光开关在功耗和响应速度方面兼具优势.因此,本文采用有机聚合物材料作为上包层材料、无机SiO<sub>2</sub>材料作为下包层材料,优化设计并制备了一种有机/无机混合波导结构的MMI-MZI热光开关.

光功率计是测量光信号功率大小的一种仪器,是光测试仪器中常用基础设备,广泛应用于光纤通信、光器件生产与研究等高新技术领域<sup>[12-13]</sup>,同时也是光开关测试系统中不可缺少的工具.光功率计可以对光开关的静态性能进行测试,即通过给光开关施加不同的驱动功率,光功率计可以测试出器件的开关电压,进一步可以分析器件功耗、消光比等性能.目前,国外进口产品大都在几万元左右,日本日置公司HIOKI3664型光功率计,分辨率0.01dBm,价格22000元;美国BIRD公司便携式指针功率计价格10000元;美国光波公司WaveTester型光功率计价格7500元.为了测试所研制光开关的静态特性,自主研制了一种光功率计.通过选用噪声小的线性电源、性能优良的前置放大器以及精度高的模数转换器,使光功率计呈现出与商用仪器可比拟的性能,满足实际测试需要.

## 1 光开关设计与制备

### 1.1 热光开关结构

图1(a)为有机/无机复合波导1×2 MMI-MZI热

光开关结构图,它由输入波导、1×2 MMI 3 dB分束器、热光相互作用区、2×2 MMI 3 dB合束器、输出波导和微加热电极6部分组成.当光耦合输入到波导后,在MMI型3 dB分束器作用下,被分成强度相等的两部分,当微加热电极不加热时,强度相等的两束光在MMI合束器再次发生多模干涉,最后变为强度相同的两束光经输出波导输出;当在一个加热电极上施加电压时,会形成热场梯度,从而改变波导材料的折射率,进而使MZI两臂中光信号的相位发生改变.此时,两束光在MMI区发生多模干涉作用后,会在两个输出口输出强度周期性变化的光信号,且两个端口光强的变化趋势相反.在一定的外加电压下,可完成开关作用.

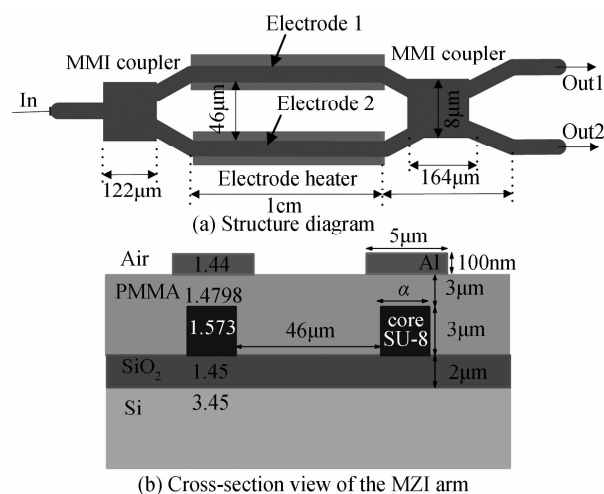


图1 1×2 MMI-MZI热光开关结构

Fig. 1 Structure of the 1×2 MMI-MZI thermo-optic switch

为保证1550 nm波长处波导的单模传输和低损耗,利用先前对波导结构参数优化的方法对波导结构进行优化<sup>[14-15]</sup>.器件的输入、输出区采用矩形波导结构,波导的宽度和厚度都是2.5 μm. MMI部分的宽度都为8 μm,1×2 MMI 3 dB分束器长122 μm,2×2 MMI 3 dB合束器MMI长164 μm.相移臂横截面示意图如图1(b),热光相互作用区部分长1 cm,两波导的内间距为46 μm,和输出波导部分的内间距相同.电极由Al制成,长1 cm,宽5 μm,厚100 nm.波导的下包层是无机材料SiO<sub>2</sub>,当SiO<sub>2</sub>层很薄时,高折射率衬底Si造成的波导模式的泄漏损耗显著,当其太厚,不利于热量的消退,响应时间变慢,因此必须对下包层进行优化,下包层厚度越大,泄漏损耗越小<sup>[14]</sup>,由于厚度不能太厚,因此选择下包层厚度为2.0 μm,此时泄漏损耗降至0.001 dB/cm.

芯层是SU-8 2005负型光刻胶,总厚度为3.0 μm;上包层是PMMA,当上包层很薄时,加热电极对模式

的吸收作用显著;当其太厚,又不利于加热电极产生的热量扩散至芯层.因此必须对上包层厚度进行优化<sup>[14]</sup>,在  $E_{00}^y$  模式下选取上包层厚度为  $3.0\ \mu\text{m}$ .  $\text{SiO}_2$  在  $1550\ \text{nm}$  波长下的折射率为  $1.45$ ;SU-8 在  $1550\ \text{nm}$  波长下的折射率为  $1.573$ ;PMMA 在  $1550\ \text{nm}$  波长下的折射率为  $1.4798$ ;Al 在  $1550\ \text{nm}$  波长下的折射率为  $1.44$ .

对所设计的  $1\times 2$  MMI-MZI 热光开关进行模拟.该器件有 2 种工作状态:当在图 1 的电极 2 上施加一定大小的驱动电信号时,可使光功率都从 Out 1 端口输出,Out 2 端口基本没有光输出,如图 2(a),定义为 Out 1 状态;当在图 1 的电极 1 上施加一定大小的驱动电信号时,可使光功率都从 2 端口输出,端口 1 基本没有光输出,如图 2(b),定义为 Out 2 状态.模拟结果显示,通过施加一定的驱动电压,该器件可很好的实现开关功能.

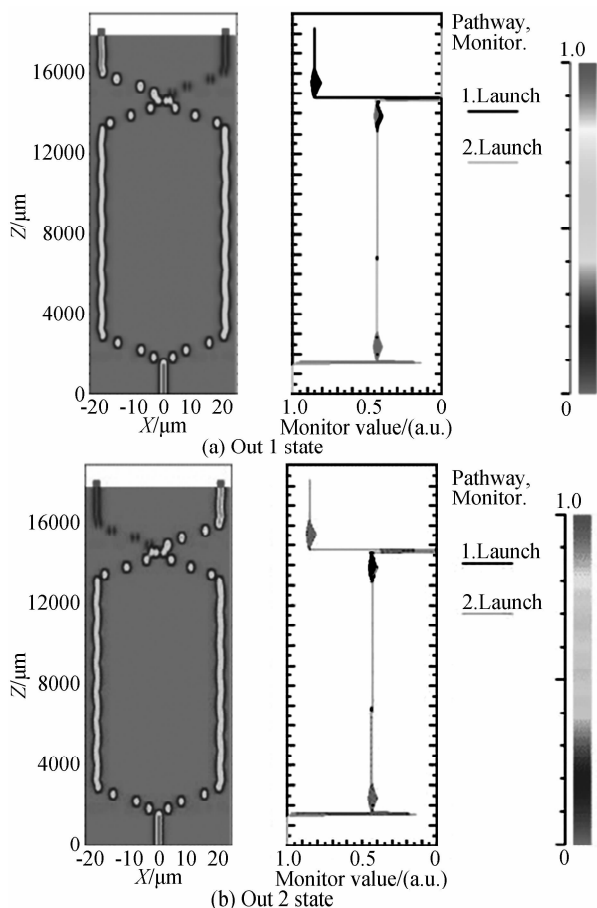


图 2  $1\times 2$  MMI-MZI 热光开关在不同工作状态下的光场传输  
Fig. 2 Optical field transmission of the  $1\times 2$  MMI-MZI thermo-optical switch

### 1.2 制备与表征

该 MZI 热光开关的制备包括波导的制备和微加热电极的制备.

波导的制备工艺流程包括:1)衬底清洗.硅衬底会有杂质、有机物等,衬底的清洁程度会影响波导的传输

特性,所以分别用丙酮、乙醇、去离子水冲洗干净,之后烘干.2)下包层制备.应用化学气相淀积工艺在 Si 衬底上生长厚度为  $2.5\ \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$ ,生长过程中要精确控制氧化层的厚度,过厚会造成热散失速度慢,从而延长开关时间,如果过薄,模式泄漏损耗大,开关插入损耗变大.3)芯层制备.旋涂厚度为  $2.5\ \mu\text{m}$  的 SU-8 光刻胶,SU-8 光刻胶为负性胶,负性光刻胶曝光后,光刻胶硬化,不溶解;匀胶后,将制备的样品放入烘箱内烘烤;而后,利用设计好的波导光刻板和光刻机对制备的样品进行紫外光刻,紫外光功率密度为  $15\ \text{mW}/\text{cm}^2$ ,曝光时间为  $8\ \text{s}$ ;使用热板对样品进行中烘;在室温下,使用专用显影液对样品进行显影,显影时间为  $18\ \text{s}$ ;最后将显影后的样品进行后烘.4)制备上包层,在样品上旋涂 PMMA,使其厚度为  $3.0\ \mu\text{m}$ .

电极制备流程包括:在蒸发台上蒸镀均匀厚度的 AL 膜;旋涂 BP218 光刻胶,烘烤后并用光刻板对版曝光;显影,在浓度为千分之五的 NaOH 溶液中显影出电极形貌.

最后,对制备的器件进行表征.图 3(a)为输入波导横截面显微镜照片,图 3(b)为多模干涉区横截面显微镜照片.可以看到所制备器件的波导侧壁陡直,形貌良好.将该有机无机材料热光开关与聚合物材料热光开关和  $\text{SiO}_2$  材料热光开关进行了比较,如表 1.从表中可以看出有机无机材料制备的热光开关综合利用了两种材料的优势.

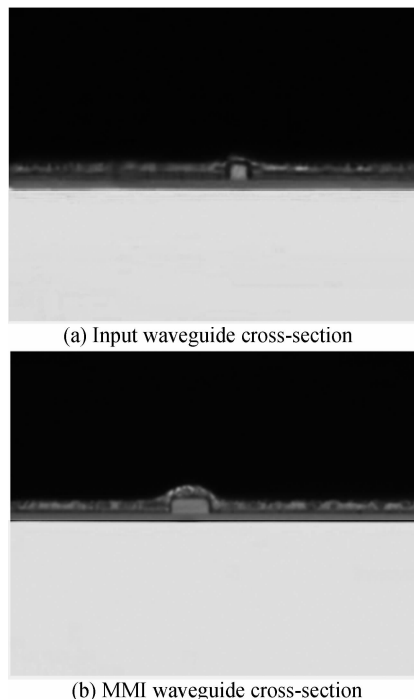


图 3 制备的输入波导和 MMI 波导的显微镜照片  
Fig. 3 Photographs of the Input waveguide and MMI waveguide obtained from microscope measurement

表 1 不同结构的热光开关性能比较

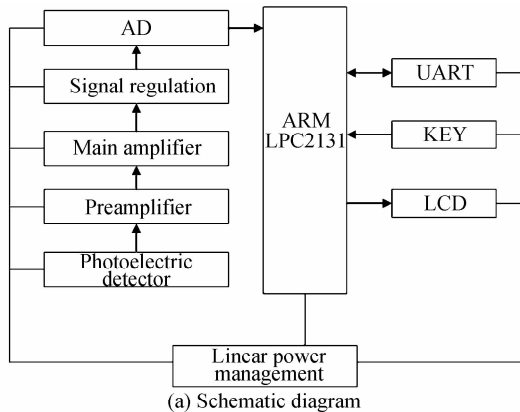
Table 1 Comparison of the performance among the TO Switches with different structures

Structure	Power consumption/mW	Rise time/ $\mu$ s	Fall time/ $\mu$ s	Ref.
Si/SiO <sub>2</sub>	250.0	0.72	0.7	[16]
Si/SiO <sub>2</sub>	40.0	30.0	30.0	[7]
Polymer	1.85	300.0	700.0	[17]
SiO <sub>2</sub> /polymer	9.6	264.0	444.0	Ours

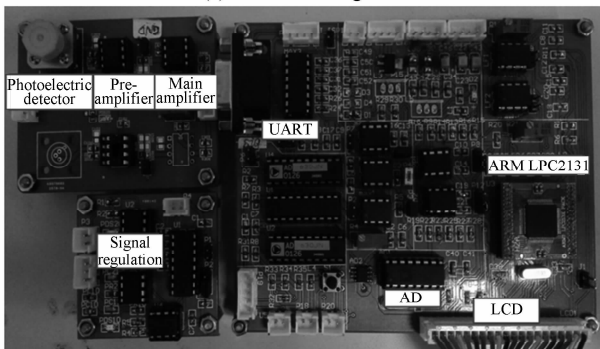
## 2 测试系统研制

### 2.1 系统构成

光开关静态测试系统原理和实物如图 4(a)和 4(b)所示. 该系统主要包括: 低纹波线性供电电源、光电探测器、前置放大器、主放大器、信号调理器、模数转换器、主控制器、显示器. 1) 供电电源采用实验室自主研制的线性电源, 其优点是噪声干扰小(在 3 mV 以内), 供电电压可调. 2) 光电探测器采用美国 Judson 公司的 J22 系列 InGaAs 探测器, 提供从 0.8  $\mu$ m 到 1.7  $\mu$ m 光谱范围内的高性能和可靠性, 光敏面积为 0.25 mm<sup>2</sup>. 它的重要特性主要表现为稳定的响应与温度、宽的功率范围、良好的线性. 3) 前置放大器的运算放大器采用



(a) Schematic diagram



(b) Fabricated measurement system

图 4 光开关测试系统框图和实物图

Fig. 4 Schematic diagram of the measurement system and fabricated measurement system

AD810, 其主要特点表现为低功耗、低噪声, 用于完成探测器输出信号的 I/V 转换, 此时输出电压为负值; 主放大器为同相放大电路, 同相放大电路输入阻抗高, 可以对微小信号进行放大; 信号调理器为多量程选择性反向放大电路, 可以进行量程的切换; 4) 模数转换器采用 16 位的 AD7705 作为转换芯片, 它具有 0.003% 的非线性, 片内可编程增益、双通道全差分输入、三线串行接口等特点, 适用于低速小信号的采样应用. 5) 主控制器为 ARM7 处理器, 其型号为 LPC2131.

### 2.2 系统标定

用实验室现有的商用光功率计和功率可调谐激光光源(中心波长为 1550 nm)对研制的光功率计进行标定. 标定原理和过程: 探测器将激光光源发出的光信号转换为电流信号, 前置放大器及主放大器将电流信号转换为电压信号并进一步放大, 通过模数转换得到电压信号, 即记为  $U$ . 在同一光强下, 再用商用功率计测出激光器输出光的功率值, 记为  $P$ .

考虑到光开关的输出光信号非常微弱, 所以仅对小功率的光信号标定. 图 5 为不同光强下, 自主研制的光功率计输出的电压  $U$  (横轴) 和商用光功率计测得的光功率  $P$  (纵轴) 的关系曲线. 最终得到二者拟合关系公式为

$$P_{\mu W} = 0.02736 \times U_{mV} - 0.03382 \quad (1)$$

将测得的单位为 W 功率形式转换为以 dBm 表示的形式, 转换公式为

$$P_{dBm} = 10 \lg \left[ \frac{P_{mW}}{1mW} \right] \quad (2)$$

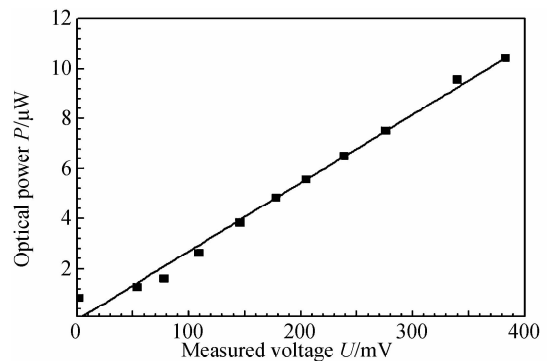


图 5 光功率计标定曲线

Fig. 5 Calibration curve of the developed optical power meter

### 2.3 零点漂移

室温条件下, 待光功率计开机稳定后, 在无光信号输入时, 测量并记录 LCD 显示的光功率读数. 平均每半分钟后记录一次, 一直到 30 分钟, 测试结果如图 6. 表中结果显示, 零点漂移最大 0.48 dBm (小于 0.5 dBm). 因此, 所研制的光功率计具有较好的稳定性.

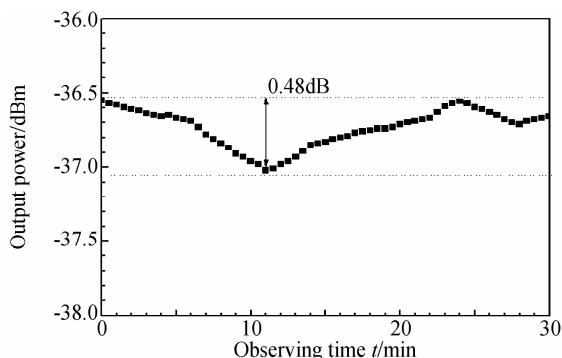


图6 所研制光功率计的零点漂移测量结果  
Fig.6 Measurement result on the zero drift for the developed power meter

### 3 光开关的性能测试

#### 3.1 测试装置

图7为利用自主研制的光功率计对光开关静态性能测试的实验框图;测试系统主要包括1)光源部分:包括可调谐激光器,中心波长1550nm以及单模光纤.2)开关耦合部分:主要包括精密微调架、光开关及光纤.3)观察系统:主要包括显微镜、可见光摄像机(CCD).4)红外观测系统:主要包括手动微调架、红外摄像机.5)静态测试系统:自主研制的光功率计(Optical Power Meter, OPM)和商用光功率计.6)驱动系统:直流驱动电源.

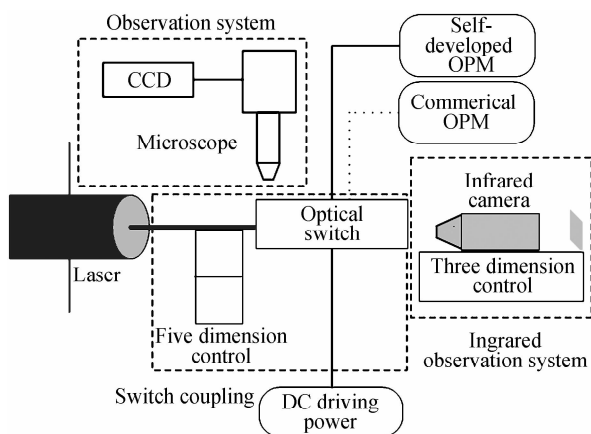


图7 光开关性能测试实验框图

Fig.7 Schematic diagram of the optical switch measurement

#### 3.2 测试结果

测试过程如图7,将激光器产生的1550nm光信号通过光纤耦合到光开关的输入波导中,仅测试光开关的Out 1端口的输出光功率.利用显微镜观测光纤和输入/输出波导的相对位置,直到从输出端口观测到良好的远场光斑.逐步调节施加在光开关电极1上的直流驱动电压,利用商用光功率计和自主研制的光功率计分别测量Out 1端口输出的光功率,分别记录二者的测量结果.

利用商用光功率计和自主研制的光功率计分别测

得的光开关Out 1端口的输出功率随外加驱动电压的变化曲线如图8.可以看出,两种情况下的测试结果能够很好的吻合,当驱动电压为10V时,输出光功率最小.这表明,该测试系统具有良好的性能,可满足实际测试需要.

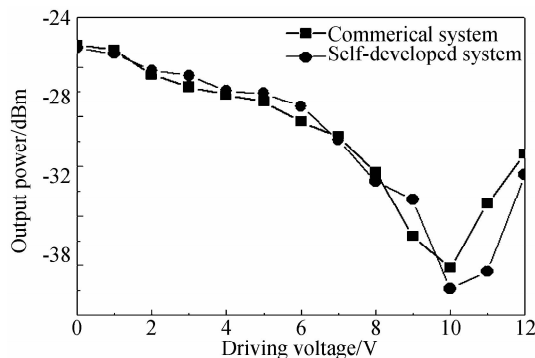


图8 两种测试条件下,端口1输出光功率随驱动电压的变化

Fig.8 Under the two measurement conditions, curves of the output optical power from port 1 versus the driving voltage

### 4 结论

采用有机/无机复合波导结构,设计并制备了一种MMI-MZI热光开关.采用LPC2131处理器,设计并研制了一种光开关特性的测试系统.结合商用光功率计和可调谐激光器对测试系统进行标定.在光开关电极1上施加不同大小的直流驱动电压,用商用光功率计和自主研制的光功率计分别测量了光开关Out 1端口的输出光功率,两者的测量结果变化趋势相同,且均在驱动电压为10V时,Out 1端口的输出功率达到最小.这表明,自主研制的光功率计具有较好的性能,可满足实际测试需要.

#### 参考文献

[1] LI V, LI Chun-yin, WAI P. Alternative structures for two-dimensional MEMS optical switches[J]. *Journal of Optical Networking*, 2004, 3(10): 742-757.  
 [2] LU Zhi-yong, WAN Ling-yu, CHAO Liang-fang. Design and simulation of planar 4 × 4 electro-optic switches based ferroelectric inverted domains[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7): 794-799.  
 卢志勇, 万玲玉, 超亮芳. 畴反转结构片状集成4 × 4电光开关的设计与仿真[J]. *光子学报*, 2012, 41(7): 794-799.  
 [3] ZHANG Ai-ling, CHAN Kam-tai, DEMOKAN M S, et al. Integrated liquid crystal optical switch based on total internal reflection[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 211108.  
 [4] WENG Zi-hua, ZHU Jin-pan, HE Jing-yan, et al. ALL-fiber magneto-optic switch with the nanosecond-level switching-time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1441-1446.  
 翁梓华, 朱金攀, 何竞颜, 等. 纳秒量级开关时间的全光纤磁光开关[J]. *光子学报*, 2012, 41(12): 1441-1446.  
 [5] ZHENG Chuan-tao, MA Chun-sheng, YAN Xin, et al. Optical design of a high-speed polymer Mach-Zehnder

- interferometer electro-optic switch over 260 GHz [J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(5): 0350-0354.
- [6] WANG Wei, SUN Xiao-qiang, WANG Xi-bin, *et al.* Low power consumption polymer thermos-optic switch with Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 610-613.  
王微, 孙小强, 王希斌, 等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 610-613.
- [7] SUN Xiao-qiang, GAO Wei-nan, SUN Jie, *et al.* Polymer 2×2 directional coupler electro-optic switches[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3084-3087.  
孙小强, 高伟男, 孙杰. 聚合物 2×2 定向耦合型电光开关[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3084-3087.
- [8] ESPINOLA R L, TSAI M C, YARDLEY J T, *et al.* Fast and low-power thermo-optic switch on thin silicon-on-insulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(10): 1366-1368.
- [9] GU Lan-lan, JIANG Wei, CHEN Xiao-nan, *et al.* Thermo-optically tune photonic crystal waveguide silicon-on-insulator Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(5-8): 342-344.
- [10] CHUANG R W, HSU Mao-teng, LIAO Zhen-liang. Integrated SiO<sub>2</sub>/SiON/SiO<sub>2</sub> Thermo-Optical Switch Based on the Multimode Interference Effect[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49**(4): 04DG21.
- [11] GEIS M W, SPECTOR S J, WILLIAMSON R C, *et al.* Submicrosecond submilliwatt silicon-on-insulator thermo-optic switch[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(11): 2514-2516.
- [12] ZHANG Xin-ming, YE Hong-an, ZHU Yong. Design and research of a high precision digital optical power meter based on multitasking [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(6): 547-550.  
张昕明, 叶红安, 朱勇. 基于多任务处理的高精度数字光功率计的设计与研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(6): 547-550.
- [13] THEOCHAROUS E. Evaluation of a pyroelectric detector with ac carbon multiwalled nanotube black coating in the infrared[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(6): 1093-1097.
- [14] LIANG Lei, YAN Yun-fei, SUN Xiao-Qiang, *et al.* Design and fabrication of an organic/inorganic hybrid thermos-optic switch with low power consumption [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, **23**(7): 1246-1251.  
梁磊, 闫云飞, 孙小强. 低功耗有机/无机混合波导热光开关的研制[J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(7): 1246-1251.
- [15] ZHENG C T, MA C S, YAN X, *et al.* Simulation and optimization of a polymer directional coupler electro-optic switch with push-pull electrode[J]. *Optical Communication*, 2008, **281**(14): 3695-3702.
- [16] ENAMI Y, DEROSE C T, LOYCHIK, *et al.* Low half-wave voltage and high electro-optic effect in hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(14): 143506.
- [17] RYOICHI K, KEI W, MIKITAKA I, *et al.* Extremely low power consumption thermo-optic switch (0.6mW) with suspended ridge and silicon silica hybrid waveguide structure [C]. 34th European Conference on Optical Communication, 2008, **5**: 1-2.