

基于扫描反射镜结构的多路光开关

肖泽华 李明宇 苏国帅 何泽南

Multi-channel optical switching based on scanning mirror instrumentation

XIAO Ze-hua, LI Ming-yu, SU Guo-shuai, He Ze-nan

引用本文:

肖泽华, 李明宇, 苏国帅, 何泽南. 基于扫描反射镜结构的多路光开关[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 136–143. doi: 10.37188/CO.2022–0020

XIAO Ze-hua, LI Ming-yu, SU Guo-shuai, He Ze-nan. Multi-channel optical switching based on scanning mirror instrumentation[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 136–143. doi: 10.37188/CO.2022–0020

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯的光学控制窄带太赫兹开关

Optically controlled narrowband terahertz switcher based on graphene

中国光学. 2018, 11(2): 166 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0166>

超小自聚焦光纤探头的研究进展

Research progress on ultra-small self-focusing optical fiber probe

中国光学. 2018, 11(6): 875 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0875>

温度变化对金属Ag膜反射镜偏振特性的影响研究

Influence of temperature variation on polarization characteristics of silver thin film mirror

中国光学. 2018, 11(4): 604 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0604>

采用超连续谱激光的双光束光纤光阱实验

Double-beam fiber optical trap experiments based on supercontinuum laser

中国光学. 2017, 10(3): 370 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0370>

光程补偿近红外光透射反射干涉重构微结构内部形貌

Internal profile reconstruction of microstructures based on near-infrared light transmission reflection interferometry with optical path compensation

中国光学. 2019, 12(2): 395 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0395>

光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望

Advances and prospects of molding for optical microlens array

中国光学. 2017, 10(5): 603 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0603>

文章编号 2097-1842(2023)01-0136-08

基于扫描反射镜结构的多路光开关

肖泽华, 李明宇*, 苏国帅, 何泽南
(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 本文设计了一种使用嵌入式 Linux 可编程控制的基于扫描反射镜的光开关, 在触摸显示器的 UI 界面上进行光纤阵列通道间的具体切换操作。此外, 还可以预先设定光开关的切换顺序、停留时间。光开关光路可自动对光校准来保证每个通道的输出功率最大。本文分析了此种光开关的设计原理, 通过实验测试了光开关的性能。实验结果表明: 当使用单模光纤阵列时, 平均插入损耗小于 17 dB, 相邻通道间的平均串扰低于 30 dB, 相邻通道间切换时间小于 1.3 ms; 对于多模光纤阵列, 平均插入损耗小于 2.4 dB。本文所设计的光开关具有低损耗、低延时、高精度、高稳定性、高重复性、通道间串扰小、人机交互良好等优点, 可用于波分复用器件、多路光波导传感器等光学器件的测试。

关键词: 光开关; 光纤阵列; 嵌入式 linux 编程; 自动校准

中图分类号: TH744 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0020

Multi-channel optical switching based on scanning mirror instrumentation

XIAO Ze-hua, LI Ming-yu*, SU Guo-shuai, He Ze-nan
(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: limingyu@cust.edu.cn

Abstract: An optical switch based on a scanning mirror was designed in this paper. The optical switch is programmable and controlled by an embedded Linux system that switches between the fiber array channels on the UI of the touch display. Meanwhile, the switching sequence and residence time of the optical switch can be preset. In addition, the optical switch can be self-calibrated to obtain the maximum output power of each channel. The principle of the optical switch is analyzed and the performance of the optical switch is tested experimentally. The experimental results show that the average insertion loss is less than 17 dB for the single mode fiber array, the average crosstalk between adjacent channels is more than 30 dB, and the switching time

收稿日期: 2022-01-23; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62027825); 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFC2004600); 吉林省自然科学基金 (No. 20220101130JC); 山东省自然科学基金 (No. ZR2019MC069); 高等学校学科创新引智计划 (111 计划 No. D21009)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62027825); the National Key R&D Program of China (No. 2020YFC2004600); Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20220101130JC); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2019MC069); the 111 Project of China (No. D21009)

between the adjacent channel is less than 1.3 ms. The average insertion loss is less than 2.4 dB for the multi-mode fiber array. It has the advantages of low loss, low delay, high precision, good stability, high repeatability, low cross-talk between the adjacent channel, and good man-machine interaction for the application of the Wavelength Division Multiplexing (WDM) and multi-channel optical waveguide sensors test device.

Key words: optical switch; optical fiber array; embedded linux programming; self-calibration

1 引 言

光开关是通过一定的方法将一个光通道中的光切换到另一个光通道的光学器件^[1-2], 其具有一个或多个可选择的传输端口。由于光信号不受电磁辐射的干扰, 因此光开关能够在光路之间进行直接交换^[3-4]。其在光纤传输、光纤测试、光纤环路、系统监测、光路监控等光通信和光网络中具有非常重要的作用^[5-7]。目前光开关的发展已经不再停留于点对点的连接, 而是要求能够在一点对多点之间进行复杂的光路切换与稳定的传输^[8-9]。这要求光开关器件可以完成多通道切换, 且可以满足较为复杂的功能。对于目前市面上常见的光开关, 根据其工作原理可以分为机械式光开关和波导式光开关。波导式光开关又分为磁光开关、热光式光开关、声光式光开关等^[10]。磁光开关是根据法拉第磁光效应, 即线偏振光在磁性介质中传播时其偏振面的旋转, 从而实现光开关的功能^[11-12]。热光式光开关是通过电流加热的方式, 改变介质温度, 使得光在介质中传播时介质的折射率和光的相位发生改变, 从而实现光开关的功能^[13]。波导式光开关的缺点为插入损耗较高、隔离度较差等。机械式光开关是最普遍最常用的光开关类型, 其主要依靠光纤或光学元件使光路发生改变^[14], 但是目前市面上鲜有大规模多路数的机械式光开关。在机械式光开关中使用驱动装置的多路数光开关, 随着光开关通道数量的增加, 驱动装置的数量也随之增加, 从而加大了使用成本, 也增加了操作难度。光开关结合嵌入式 Linux 编程, 可以完成相对复杂的光路切换, 所有对光开关的控制都可以在 UI 界面上进行操作, 从而提升了人机交互能力。此外, 根据嵌入式 Linux 可编程特性, 可以将光开关应用到更多的光学仪器中。然而, 目前鲜有将嵌入式 Linux 编程与光学系统相结合的光开关器件的相关报道。

本文利用可旋转反射镜设计了一种高速多路

光开关。光开关分为光学系统和软硬件系统两部分。光学系统主要是将宽带光源聚焦于光纤阵列的通光孔径中。其内部结构主要为扫描反射镜, 通过扫描反射镜可以将光纤中自由出射的光, 反射到光纤阵列的不同光纤中。软硬件系统用来控制光开关的切换工作。光开关整体由嵌入式 Linux 软件控制, 系统外接触摸显示屏, 能够在可视化 UI 界面上对光开关进行控制操作, 从而实现在各个通道间任意多次连续自动化切换。当光开关使用时间过长时, 如果出现插入损耗增大的情况, 还可通过硬件系统外接 PD 探测器, 对光开关进行自动扫描校准, 从而增加了光开关的使用稳定性和重复性。

本文提出使用空间光-光纤的光开关组合方式。这种方式可以实现传统机械式光开关难以做到的大规模多路数要求。受所测试光纤阵列通道数的限制目前只能进行 13 路通道的测试。经测量相邻通道间扫描反射镜的转角约为 0.123° 。在汇聚透镜限制的情况下, 扫描反射镜的有效旋转角度约为 18.18° 。因此, 使用特定的光纤阵列的情况下, 本课题可以满足至多 142 路光开关的设计, 且相邻通道的切换速度为 1.2 ms, 多模光纤插入损耗能保持在 2.31 dB 左右。目前市面上鲜有机械式 $1 \times N$ 光开关, 四川梓冠的 COF-FSW- $1 \times N$ 机械式多模光开关最高只能达到 1×48 , 平均插入损耗为 0.5 dB, 最大插入损耗为 0.8 dB, 相邻通道间切换速度为 8 ms 左右^[15]。OE Photonics 公司的机架式 $1 \times N$ 多模光开关, 在 N 为 12 时插入损耗为 1.2 dB, 在 N 为 128 时插入损耗为 2.2 dB, 相邻通道间切换速度为 30 ms^[16]。目前市面上处于业界领先水平的 Flyin 公司的 1×64 多模光开关平均损耗为 1.7 dB, 最大损耗为 2 dB, 切换速度约为 8 ms^[17]。相比以上三款 $1 \times N$ 光开关, 本课题所设计的光开关拥有支持更多切换通道数和相邻通道间切换时间更短且在插损增大后可进行自动校准的优势, 因此具有一定的发展前景。

2 系统分析

2.1 光学系统分析

光开关光学系统的主要作用是将从光源发出的光经过扫描反射镜和汇聚系统后射入光纤阵列,并且通过反射镜的旋转扫描实现不同光纤通道间的切换。

C 波段附近的红外光与可见光通过光纤耦合器耦合到输入光纤中,可见光作为对准光路的指示光,经过光纤准直镜后的空间光再经过扫描反射镜入射到聚焦透镜,最后在聚焦透镜焦面处放置光纤阵列。在光纤阵列的输出端连接探测器阵列,探测器与扫描反射镜由软件控制,可完成光开关的自动校准和通道切换。图 1 为光开关光路示意图。

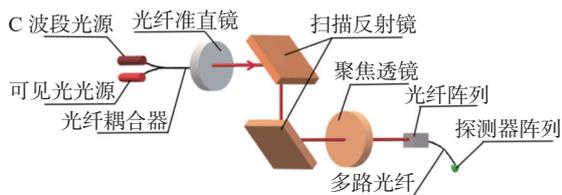


图 1 光路图示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical path

2.2 软硬件系统分析

硬件设计主要包括:处理器模块;LCD 屏幕显示模块;扫描反射镜模块;PD 探测模块,图 2 为硬件结构图。

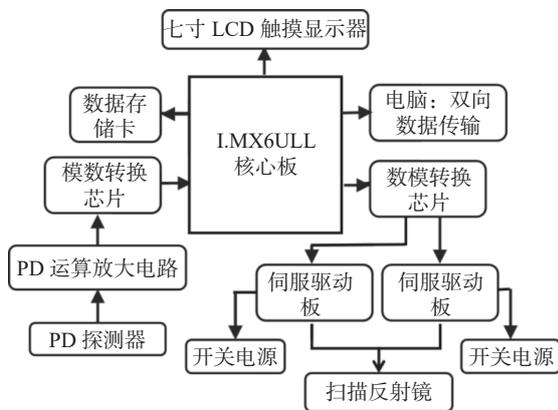


图 2 硬件结构图

Fig. 2 Hardware structure diagram

硬件设计整体分为两大部分:第一部分为对光开关光路切换设计。在光路切换时,由核心板发出扫描反射镜具体的旋转角度信号给 D-A(数

字-模拟)转换芯片,经过 D-A 转换芯片将角度值信号转换成电信号驱使扫描反射镜转动,从而完成光开关不同通道的切换。第二部分为校准光开关设计。在一定的扫描反射镜旋转角度内,对反射镜进行连续的最小角度值旋转,每旋转一次反射镜,核心板直连的 PD(探测器)就进行一次数据采集,然后将数据发送给开发板,开发板对数据进行处理运算,找出最大光功率对应的扫描反射镜旋转角度值,即为校准后的光开关通道所在位置。

(1)处理器模块选用以 ARM Cortex A7 为内核架构,以 IMX6ULL 为主控芯片的核心板。可以完成对 UI(界面)的控制,完成与扫描反射镜模块、PD 探测模块的 SPI(串行外设接口)通信。在核心板上插入 SD 卡(安全数字存储卡)后,可以将实验结果下载到外接 SD 卡中。

(2)七寸 LCD 显示模块由分辨率为 1024×600 的多点触摸电容屏构成,其像素时钟为 33.3 MHz,满足良好的人机交互要求,用户所有的控制操作全部可以通过 LCD 显示器完成。

(3)PD 探测模块由 A-D(模拟-数字)转换芯片 AD7606,PD 探测器及其运算放大电路组成。AD7606 为高速 A/D 转换器,其最大时钟频率为 200 kHz,可同时采集八路模拟信号值,分辨率高达 16 bit。PD 探测器选用的是北京光敏的 In-GaAs-4JKFC 款 PD 探测器,上面有法兰可以与光纤直接连接。PD 运算放大电路是深圳龙信达公司的光电流转电压信号放大模块,在该模块上可以直接连接 PD 探测器,与 PD 探测器结合使用可以将光信号转换成电压信号输出给 A-D 转换芯片,并且可以对放大增益进行调节。将 PD 接入运算放大电路,调整增益后将其连接至可调谐激光器进行功率-电压线性拟合。图 3 为测量所得的功率-电压图。

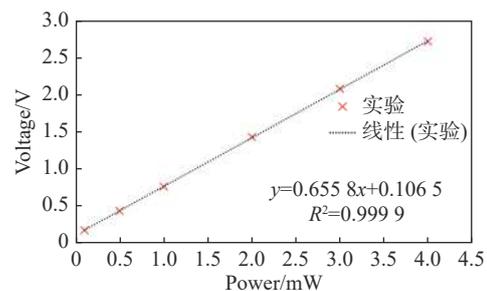


图 3 PD 探测器及其运算放大电路的响应曲线图

Fig. 3 Response curves of the PD detector and its amp circuit

根据图 3 数据, 测得的 PD 入射光功率与输出电压转换的线性拟合公式为:

$$y = 0.6558x + 0.1065 \quad (1)$$

其中 y 为 PD 运算放大电路输出电压值, 单位为 V, x 为输入的光功率值, 单位为 mW。

图 4 为 PD 模块的通信方式。AD7606 与核心板之间由 SPI 通信协议连接。PD 运算放大电路将接收到的光信号转换为电压值发送给 A-D 转换芯片, 再通过 A-D 转换芯片将模拟信号转换为数字信号发送给 I.MX6ULL 主控板, 主控板经过拟合公式计算将数字信号还原为光功率值并显示。

(4) 扫描反射镜模块由 D-A(数字-模拟)转换芯片 DAC8563, 扫描反射镜及其驱动板以及供电电路组成。该模块的主要作用为控制两面扫描反射镜的转角。图 5 为扫描反射镜模块的通信模式, DAC8563 与核心板之间由 SPI 通信协议连

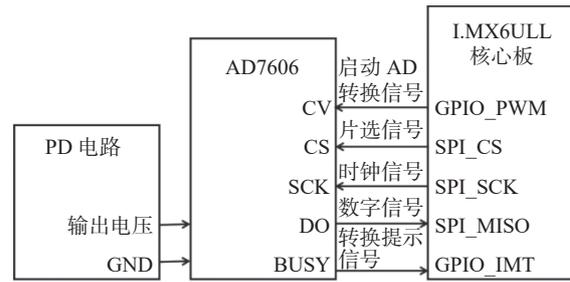


图 4 PD 探测模块通信方式

Fig. 4 Communication mode of PD detection module

接。核心板将旋转角度发送给 D-A 转换芯片, 由 D-A 转换芯片将角度值转换为电压值发送给伺服驱动板, 控制反射镜转动, 反射镜转动引起 PD 接收到的光功率值发生改变, PD 探测模块获得新转角所对应的接收功率值。DAC8563 为双通道 D-A 转换器, 可同时将数字信号转换成两路模拟信号, 从而驱动两面反射镜工作, 分辨率为 16 Bit, 最大时钟频率可达 16 MHz。

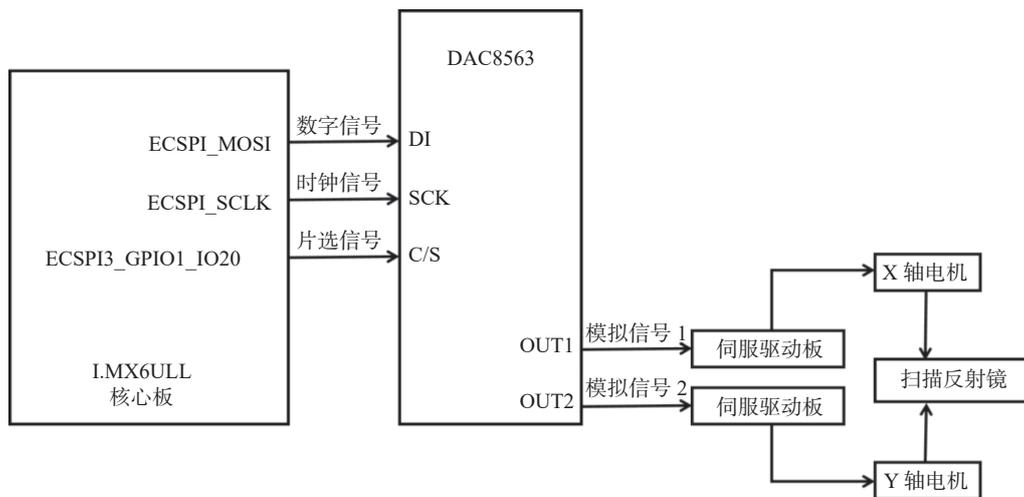


图 5 扫描反射镜模块通信方式

Fig. 5 Module communication mode of scanning mirror

多路光开关的应用程序界面如图 6 所示。第 1、2 区域为操作按键部分。可对通道切换顺序, 及在每个通道的停留时间进行设置, 并可以对光开关进行多通道校准。第 1 区域内的按键可使扫描反射镜在水平以及竖直方向上分别进行 0.0006° 和 0.003° 角度的转动。第 3 区域为校准时光功率-PD 采集次数的图形实时显示区域。第 4 区域为校准时光功率值的具体显示结果, 可精确到小数点后的 4 位数。因为光开关校准是对一个约为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 区域进行等间隔的阵列式扫

描, 扫描次数为 2500 次, 设置扫描频率为 20 次/s, 因此对一个通光孔径校准的时间为 125 s, 因此第 4 区域的进度条还会根据实时扫描次数和总扫描次数的比值显示校准进程占总进程的百分比。

图 6 中第 3 区域显示的曲线为进行光开关通道校准时的实时显示曲线图, 在进行校准时, 扫描反射镜的转动信号会触发 PD 检测模块对光功率进行检测, 并且将功率值以点线图的形式显示在第 3 区域。两面反射镜采用的扫描方式是以蛇形路径在扫描区域内进行等间隔阵列式扫描, 因此

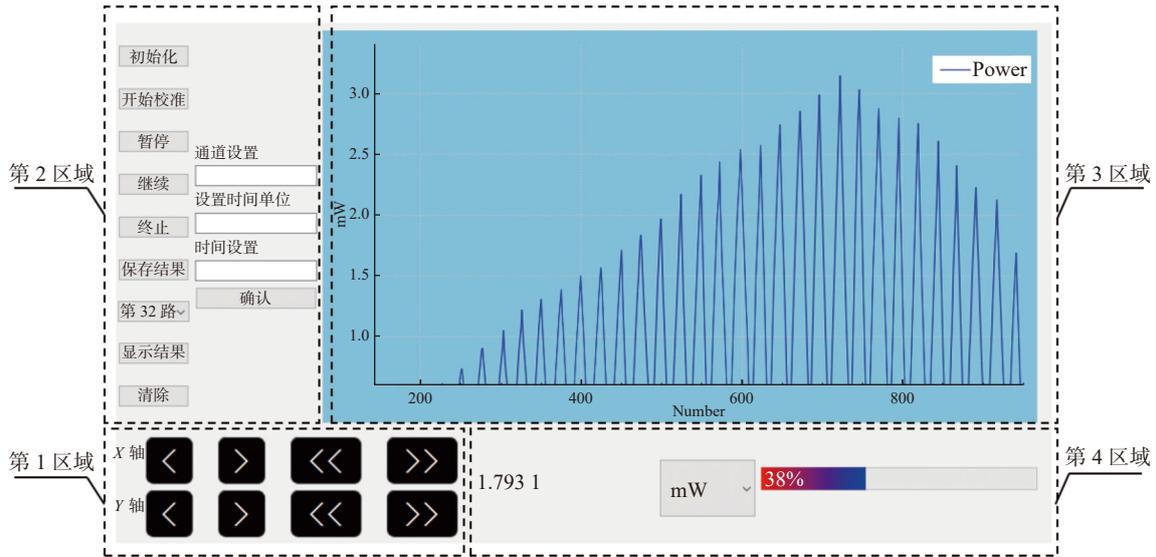


图 6 多路光开关应用程序

Fig. 6 Multichannel light switch application

得到的光功率曲线是周期性的、以不同幅度进行变化的。当测量曲线出现最大峰值时,反射镜旋转角度为最佳位置。在对光停止后,扫描反射镜会自动停止在此位置。

3 性能检测

图 7 为搭建好的实际系统结构图。其中图 7(a) 为搭建好的核心板与显示模块,其中包括 IMX 6ULL 核心板和 LCD 显示器。图 7(b) 为搭建好的光学平台。光源经过光纤耦合器输出端,被光纤准直镜准直后射入扫描反射镜,经反射镜两次反射后再由聚焦透镜汇聚后进入单模光纤阵列,单模光纤阵列后接 13 根单模光纤。

图 7 中,光纤准直镜是 Thorlabs 公司的准直镜 PAF2-7C,通过调节此款准直镜,对 1550 nm 光线准直后的平行光光斑大小为 1.42 mm。聚焦透镜为 Thorlabs 公司的透镜 LA1608,其为 BK7 玻璃材料,焦距为 75 mm。单模光纤阵列的单根光纤芯径为 9 μm,光纤纤芯中心间隔为 127 μm,光纤阵列共有 13 根光纤。扫描反射镜是 Thorlabs 公司的 GVS012,其内部结构为两面可旋转的银涂层扫描反射镜,两面反射镜中心距离为 14.7 mm,每面反射镜的最小转角为 0.0006°,最大旋转范围为 40°。

以第七路通光孔径为主光路,所使用的宽带光源功率为 6.09 dBm。表 1 为所使用的单模光纤阵列各个通道的功率损耗。

由表 1 可知,通道 7 为中心光路,通光性最好,接收端功率为 -10.37 dBm,插入损耗为 16.46 dB,通道 1 损耗最大,其接收端功率为 -10.81 dBm,损耗为 16.90 dB。平均功率为 -10.62 dBm,平均损耗为 16.71 dB。同时测得相邻通道之间的串扰在通道 1 和通道 2 之间有最大值,为 35.64 dB,在通道 7 和通道 8 之间串扰最小,为 38.85 dB。平均串扰为 37.47 dB。经过分析,由于准直镜内部的主要结构是一块可移动透镜,所以造成损耗大的原因是准直镜的出射光并不是实际的平行光。其次由于焦面处的光斑较大,也会降低耦合效率。此外,实验中光纤的第七通道并不在透镜光轴线上,也会引起一定的损耗。造成功率由第七通道

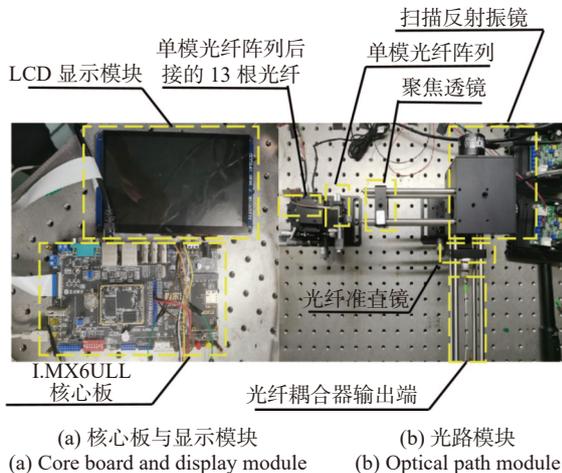


图 7 实际系统结构图

Fig. 7 Actual system structure

表 1 单模光纤阵列各通道功率及损耗

Tab. 1 Powers and losses of each channel of the single-mode fiber array

通道数	功率(dBm)	损耗(dB)
1	-10.81	16.90
2	-10.86	16.77
3	-10.72	16.81
4	-10.69	16.68
5	-10.54	16.63
6	-10.48	16.57
7	-10.37	16.46
8	-10.43	16.52
9	-10.51	16.60
10	-10.63	16.72
11	-10.69	16.78
12	-10.73	16.62
13	-10.79	16.89

向两边递减的原因是由于在扫描反射镜向两边转动时, 边缘的入射角度会比中心入射角度大。

将单模光纤阵列更换为芯径为 $52\ \mu\text{m}$ 的多模光纤阵列, 光纤间隔仍然为 $127\ \mu\text{m}$, 以第七路光纤为主光纤, 表 2 为多模光纤阵列各个通道的功率及损耗。

表 2 多模光纤阵列各通道的功率及损耗

Tab. 2 Powers and losses of each channel of the multimode fiber array

通道数	功率(dBm)	损耗(dB)
1	3.76	2.33
2	3.73	2.36
3	3.69	2.40
4	3.77	2.32
5	3.76	2.33
6	3.82	2.27
7	3.87	2.22
8	3.86	2.23
9	3.83	2.26
10	3.80	2.29
11	3.78	2.31
12	3.77	2.32
13	3.72	2.37

测得多模光纤阵列第七路功率最大, 为 $3.87\ \text{dBm}$, 损耗为 $2.22\ \text{dB}$ 。第 13 路功率最小, 为 $3.72\ \text{dBm}$, 损耗为 $2.37\ \text{dB}$ 。13 路通道平均功率为 $3.78\ \text{dBm}$, 平均损耗为 $2.31\ \text{dB}$ 。通过对比单模光纤阵列与多模光纤阵列可得知, 使用多模光纤阵列的平均损耗减少了 $14.4\ \text{dB}$ 。相较于单模光纤, 多模光纤损耗降低的原因为多模光纤的数值孔径大于单模光纤, 所以多模光纤接收到的能量多于单模光纤。多模光纤损耗由中心孔径向边缘增加的原因为边缘光纤入射光的中心角度大于中间光纤入射光的中心角度。

此光开关可用于波分复用器的测试。使用 Agilent 公司的 8164B 可调谐激光器作为光源, 将单模光纤阵列 1、2、3、4 通道接入波分复用器 (WDM) 的 4 个输入端口, WDM 四个通道的光谱范围分别为: $1520\sim 1540\ \text{nm}$ 、 $1540\sim 1560\ \text{nm}$ 、 $1560\sim 1580\ \text{nm}$ 、 $1580\sim 1600\ \text{nm}$ 。WDM 输出口接 Agilent 公司的 N7748A 功率计。第 5 通道不经过 WDM, 直接接入功率计, 用于归一化的参考曲线。这种设计可以非常方便地测试波分复用器每路通道的性能。图 8 (彩图见期刊电子版) 为经过光开关系统和不经过光开关系统的 WDM 光谱曲线对比图。图中从左往右分别是 WDM 各个通道经过光开关与不经过光开关的光谱对比。

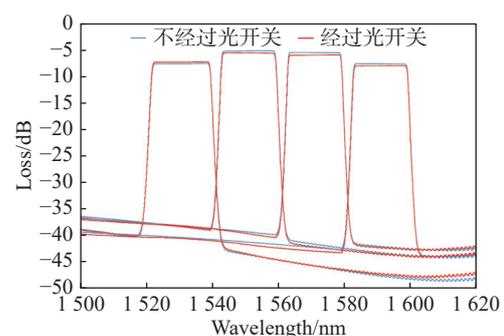


图 8 WDM 光谱曲线图

Fig. 8 WDM spectrum curves

以往对多通道 WDM 进行快扫光谱测量时, 需要使用与通道数量相匹配的功率计。从图 8 的对比结果可知。使用此光开关, 在进行多通道 WDM 快速光谱测试时, 仅使用一台功率计就可以在短时间内快速测试 WDM 各通道的光谱曲线。

相邻通道的切换速度测试: 将光开关的通道 1 与通道 2 两路 PD 连接示波器后进行光路切换, 可以读取出入光路切换时间, 如图 9 所示。

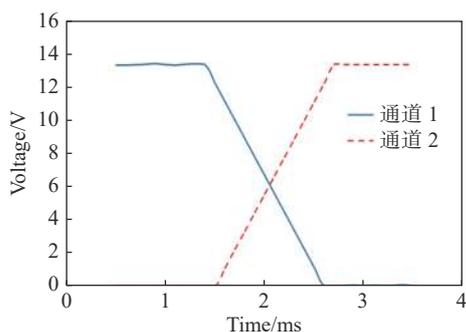


图9 光路切换时间图

Fig. 9 Optical path switching time diagram

由图9可知,通道1的能量下降,同时通道2的能量上升,说明通过反射镜的转动可将光能量从通道1切换到通道2。光开关相邻通道间的

切换时间约为1.2 ms。

4 结 论

本文设计了一种基于扫描反射镜结构的光开关,该光开关实现了13路光纤阵列的相互切换,相邻通道光开关的切换时间为1.2 ms,相邻通道的平均串扰在38.85 dB之间,耦合到单模光纤阵列的平均插入损耗为16.71 dB,耦合到多模光纤阵列的平均插入损耗为2.31 dB。可通过程序设计的UI界面对其进行校准。此光开关可以应用在阵列波导作为输入或输出的光学器件性能测试中。

参考文献:

- [1] BORELLA M S, JUE J P, BANERJEE D, *et al.*. Optical components for WDM lightwave networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(8): 1274-1307.
- [2] 李承熹, 黄翔, 周灵钧. 基于相变材料的片上多功能可控红外光开关设计[J]. *光通信技术*, 2021, 45(8): 42-46.
LI CH X, HUANG X, ZHOU L J. Design of on-chip multifunctional controllable infrared optical switch based on phase change material[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(8): 42-46. (in Chinese)
- [3] 周剑超, 张策. 1×N MEMS光开关模块的设计[J]. *轻工科技*, 2020, 36(5): 59-62.
ZHOU J CH, ZHANG C. Design of 1×N MEMS optical switch module[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2020, 36(5): 59-62. (in Chinese)
- [4] 徐宪莹, 岳殿武. 可见光通信中正交频分复用调制技术[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 516-527.
XU X Y, YUE D W. Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 516-527. (in Chinese)
- [5] 张若羽, 李培丽, 高辉. 基于光学tamm态的声光开关的研究[J]. *物理学报*, 2020, 69(16): 164204.
ZHANG R Y, LI P L, GAO H. Research on acousto-optic switch based on optical tamm state[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(16): 164204. (in Chinese)
- [6] 宋哲, 刘立人, 任海霞, 等. 单块晶体2×2光开关[J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 777-780.
SONG ZH, LIU L R, REN H X, *et al.*. Integrated optical bypass-exchange switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 777-780. (in Chinese)
- [7] 刘兰. 试论光通信网络中的光开关技术[J]. *中国新通信*, 2017, 19(8): 21.
LIU L. Optical switching technology in optical communication network[J]. *China New Telecommunications*, 2017, 19(8): 21. (in Chinese)
- [8] 吴浩辉. 光开关在配网通信系统中的应用[J]. *信息通信*, 2016(11): 220-221.
WU H H. Application of optical switch in distribution network communication system[J]. *Information & Communications*, 2016(11): 220-221. (in Chinese)
- [9] 戚伟, 肖锋, 庞文尧, 等. 2×2多模干涉光开关的设计与制作[J]. *激光杂志*, 2014, 35(9): 23-25.
QI W, XIAO D, PANG W Y, *et al.*. Design and fabrication of 2×2 multimode interference optical switch[J]. *Laser Journal*, 2014, 35(9): 23-25. (in Chinese)
- [10] 高月娟, 陈飞, 潘其坤, 等. 用于超短脉冲CO₂激光的半导体光开关理论建模与数值分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 577-585.
GAO Y J, CHEN F, PAN Q K, *et al.*. Modeling and numerical simulation of a semiconductor switching device applied in an ultra-short pulse CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 577-585. (in Chinese)
- [11] 刘斌, 钟昌锦, 付益, 等. 兼具PD功能的1×2磁光开关的设计[J]. *广东通信技术*, 2014, 41(4): 69-72.

- LIU B, ZHONG CH J, FU Y, *et al.*. Design of 1×2 magneto-optic switch with PD function[J]. *Guangdong Communication Technology*, 2014, 41(4): 69-72. (in Chinese)
- [12] 陈卓. 一种硅基波导低损耗低功耗数字式热光开关[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
CHEN ZH. A low loss and low power digital thermo optical switch based on silicon waveguide[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 曹瞰, 刘宽, 李阳, 等. 可调谐光学超构材料及其应用[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 968-985.
CAO T, LI K, LI Y, *et al.*. Tunable optical metamaterials and their applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 968-985. (in Chinese)
- [14] 曹俊忠. 机械式光开关性能分析[J]. *天津通信技术*, 2004(2): 21-24.
CAO J ZH. Analysis on performance of mechanical optical switch[J]. *Tianjin Communications Technology*, 2004(2): 21-24. (in Chinese)
- [15] Z J PHOTONICCS. $1 \times N$ micro-mechanical optic switch module[EB/OL]. [2022-01-18]. <https://zg-photonics.com/index.php?lang=cn>.
- [16] 欧亿光电. $1 \times N$ 机架式光开关[EB/OL]. [2022-01-18]. <http://www.oe-photonics.cn/productinfo/937500.html>.
OE PHOTONICS. $1 \times N$ rack type optical switch[EB/OL]. [2022-01-18]. <http://www.oe-photonics.cn/productinfo/937500.html>. (in Chinese)
- [17] FLYIN. $1 \times N$ mechanical fiber optic switch[EB/OL]. [2022-01-18]. <https://www.opticres.com/Goods/productDetails/id/55.html>.

作者简介:



肖泽华(1997—), 男, 甘肃白银人, 长春理工大学硕士研究生, 2019年于长春理工大学光电工程学院获得学士学位, 主要研究方向为微纳光学与光子学器件。E-mail: xzhcusted@163.com



李明宇(1978—), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 2006年于浙江大学光电信息工程学院获得博士学位, 2006年至2008年于浙江大学光电工程学系做师资博士后, 2009年于瑞典皇家工学院电子与应用物理工程学系做博士后, 主要研究方向为集成光学。E-mail: limingyu@cust.edu.cn