

# 基于 LCoS 的 $1 \times 32$ 端口灵活栅格的波长选择开关

陈冉 陈笑\* 陈瀛 高云舒 陈根祥 王义全

中央民族大学理学院, 北京 100081

**摘要** 可重构光分插复用器(ROADM)和多维光交叉连接(OXC)作为实现下一代动态全光网络的关键设备受到了光通信领域研究机构和产业界的高度重视。 $1 \times N$  端口波长选择开关(WSS)是目前及下一代ROADM的核心器件。针对现有WSS存在的光学系统复杂、系统插损与端口串扰大,以及端口数和通道数有限等不足,提出一种具有通带调谐灵活性的基于硅基液晶处理芯片(LCoS)的 $1 \times 32$  高端口数WSS。通过软件远程控制LCoS上加载的全息相位图像,使光通信C波段密集波分复用(DWDM)信号中任意一个或一组波长灵活切换至任意输出端口输出,各波长通道切换独立可控。研究表明:系统插入损耗为5 dB~25 dB;栅格为100 GHz时波长信道的3 dB带宽均为40 GHz;带宽从50 GHz起连续可调,调谐步长1 GHz。这一研究为 $M \times N$  高端口数WSS的研制奠定了坚实的理论实验基础。

**关键词** 光通信; 波长选择开关; 硅基液晶空间光调制器; 可重构光分插复用器

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120605

## LCOS-Based Flexible Grid $1 \times 32$ Wavelength Selective Switch

Chen Ran Chen Xiao Chen Ying Gao Yunshu Chen Genxiang Wang Yiquan

School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China

**Abstract** In recent years, reconfigurable optical add drop multiplexers (ROADM) and multiple-dimensions optical cross-connection (OXC), as the essential devices of next-generation dynamic optical networks, have been attracted great interests by research institutions and relevant industry.  $1 \times N$  wavelength selective switch (WSS) is one of the key components in current and next generation ROADM. However, most WSS modules of the present have the disadvantages of complex optical system, large insertion loss and high crosstalk, as well as the imperfection of the port number and the channels number. So, a high port-count  $1 \times 32$  WSS based on liquid crystal on silicon (LCoS) technology is demonstrated, which has a flexible-tuning bandwidth. By uploading phase holograms at the corresponding locations on the LCoS device, the system allows a certain wavelength of the entire C-band DWDM channels to be switched from any input port to any output port. Experimental results demonstrate the insertion loss is around 5 dB to 25 dB. The 3 dB bandwidth of signal is 40 GHz at the grid of 100 GHz and the bandwidth is tunable from 50 GHz continuously with the step of 1 GHz. The research can provide the theory and experiment foundation for the development of  $M \times N$  WSS in the future.

**Key words** optical communications; wavelength selective switch; liquid crystal on silicon spatial light modulators; reconfigurable optical add drop multiplexer

**OCIS codes** 060.1810; 060.2330; 060.4230; 060.4510

## 1 引言

由于全光通信网具有可靠性高、功耗小、可扩展性强、组网灵活及对速率和协议透明等优点而成为当前光通信技术领域的研究热点,是对通信网进行升级改造和下一代网络建设的必然选择。可重构光分插复用器(ROADM)和多维光交叉连接(OXC)作为实现下一代动态全光网络的关键设备,近年来受到了光通信领域研究机构和产业界的高度重视,并得到了快速发展<sup>[1-3]</sup>,在2011年度已形成了32.14亿美元的市场规模。随着

收稿日期: 2015-06-20; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(11204387,61275052)、教育部科学技术研究重点项目(212205)

作者简介: 陈冉(1990—),男,硕士研究生,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: chenranzaixian@126.com

导师简介: 陈根祥(1965—),男,博士,教授,主要从事光通信和光电子器件方面的研究。E-mail: gxchen\_bjtu@163.com

\*通信联系人。E-mail: xchen4399@126.com

ROADM技术的成熟和功能的日渐多样化,其市场需求总额将在未来几年内获得高速增长。

目前的ROADM和OXC设备主要以各种形式的波长阻断器(WB)和波长选择开关(WSS)为基础进行构建。其中WB和WSS所采用的核心技术主要包括基于电控微反射镜阵列的微机电系统(MEMS)、基于硅基液晶(LCoS)的相位调制器阵列、基于阵列波导光栅(AWG)和热光开关的平面光波回路(PLC)光子集成技术<sup>[4-7]</sup>、基于电光或热光效应微环形谐振腔可调谐光学滤波器阵列的PLC技术以及PLC和MEMS相结合的技术<sup>[8-9]</sup>。2006年,Basch等<sup>[10]</sup>对WSS和ROADM在下一代DWDM光网络中的应用价值与市场前景进行了较为深刻和全面的分析与论述。2008年,Finisar公司研发出了支持LCoS的第1款频率间隔为50 GHz的WSS,可以针对10 Gb/s和40 Gb/s的电信和数据通信应用<sup>[11-12]</sup>,在更好满足流量需求的同时增加了系统的可靠性和灵活性。随后,JDSU公司宣布了一款基于MEMS的1×9型WSS产品,它能支持更加复杂的网络架构,且同时保持了信号的完整传输。2010年,胡强高等<sup>[13]</sup>采用双轴MEMS和衍射光栅研制出了国内首个1×4端口WSS实验样机,并获得了相关专利。目前国际上已达到的最好水平也仅能实现1×23端口的WSS,因此,如何通过适当的光学设计大幅度提高WSS的通道数,并研制出 $M\times N$ 端口第4代多功能ROADM和相应的多维OXC设备是当前国际光通信领域共同关注的重要研究课题<sup>[14]</sup>,也是从实质上推动全光通信网技术快速发展所必须解决的核心技术问题。考虑到以LCoS为基础的WSS和ROADM具有高通道数、良好的通带特性和大的通带调谐灵活性与兼容性,本文提出一种新型的基于LCoS的1×32端口的WSS系统,利用其独特的光学设计,实现将密集波分复用的输入信号沿任意方向灵活高速切换至任意输出端口的功能。这一工作作为后续研制 $M\times N$ 多端口WSS系统奠定了理论和实验基础<sup>[15]</sup>。

## 2 基于LCoS的1×32端口波长选择开关

### 2.1 WSS系统的设计与搭建

基于LCoS的1× $N$ 端口WSS系统的结构图和实物如图1所示。包括一维光纤耦合微透镜阵列、平凸透镜、透射体光栅、柱面镜和LCoS共5个部分。整套WSS采用精细、独特、简洁的2- $f$ 光学系统,结合专用色散元件、高精度光纤端口阵列等核心光学部件,实现了一种结构科学合理的1× $N$ 端口WSS系统。该WSS在实现波长切换过程中只需通过软件远程控制LCoS(LCoS-SLM)的工作模式,便可实时控制加载在LCoS上的全息相位图像,进而完成一个或一组波长通道的灵活切换,因此整套系统具有结构简单、易于实现、通带特性可调、支持灵活光谱、可进行远程软件控制等特点<sup>[16]</sup>。

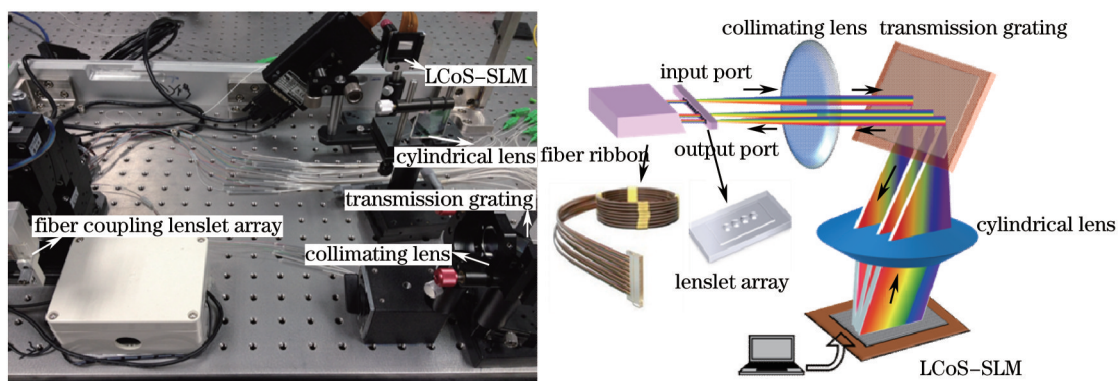


图1 基于LCoS的1×32端口WSS系统

Fig.1 Schematic diagram of the 1×32 LCoS-based WSS showing

基于LCoS的1×32端口WSS系统的输入/输出端口由一维密排的33个光纤微透镜端口阵列组成,其中1个端口作为公共端口,同时也是本地下话路输出端口;其余32个端口为光互连端口。光纤微透镜阵列周期 $\delta=250\ \mu\text{m}$ 。采用一维密排端口阵列的突出优点是易于制备且易于实现端口间的低插入损耗光互连。

采用掺铒光纤放大器(EDFA)发出C波段自发辐射谱(1530~1560 nm)作为输入信号,通过偏振控制器,由光纤微透镜阵列中心公共端口进入体光学部分。光束经过透镜(焦距300 mm)准直并入射到高密度透射体光栅色散元件(966 lp/mm,闪耀角 $49.9^\circ$ ,衍射效率大于90%)上对各不同波长通道进行色散展开,并用柱面镜(焦距150 mm)将其成像到LCoS大规模光学集成芯片上,形成覆盖整个LCoS芯片上有效像素区域的矩

形色散图谱。在 LCoS 芯片上不同波长通道所对应的像素区域上加载不同周期的相位光栅全息图,完成对该波长通道光束的方位编码,经 LCoS 芯片衍射后成为对应于不同输出端口的准直平行光,再经微透镜会聚至不同的输出端口输出,从而完成任意波长信号在输入输出端口间的低损耗光互连。

在实验中为了尽可能多地利用 LCoS 的有效工作区,提高 LCoS 的衍射效率与 WSS 的波长通道数/端口数,一方面利用采用光纤微透镜对输入信号光束进行扩束,将入射光斑扩束为直径 6 mm 的高斯光斑,这将有利于光斑覆盖更多液晶像素区,确保相位充分抽样,以获取较高衍射效率,减小系统插入损耗;另一方面,柱面镜将每一个波长通道沿光束色散方向压缩,有利于提高波长通道数和抑制通道间串扰;间距 250  $\mu\text{m}$  的光纤微透镜端口阵列的设计制备将有利于大幅增加 WSS 的端口数,提高信息交换的能力。

## 2.2 WSS 系统的控制

实验中,在 LCoS 上加载针对不同波长的特定光栅相位图,如图 2 所示。图中  $a$  是子光栅宽度,调制落在该区域的特定波长光束。 $a$  取值越大,代表信道带宽越宽,但同时也造成在有限液晶工作区域内的信道数目减少;反之, $a$  过小将导致系统损耗增加。图中  $b$  代表的是信道栅格,在满足 ITU-T 传输协议的同时,也要确保相邻信道间的串扰足够小。图中  $c$  表示液晶调制器上被光波所覆盖的光栅周期的个数。周期数越多,越有利于提高衍射效率。图中  $d$  值代表光栅常数,改变  $d$  值即可改变每个光波的 1 级衍射角,使衍射光从不同的输出端口输出。

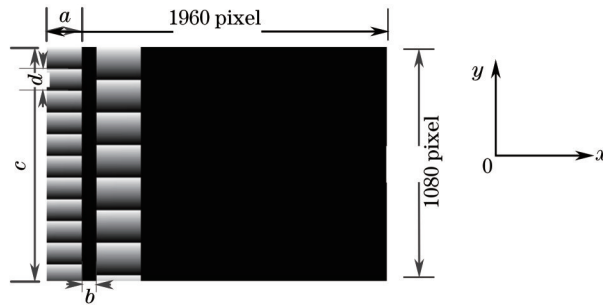


图2 液晶空间光调制器上加载的典型光栅相位图

Fig.2 Typical grating image loaded on LC-SLM

实验结果表明:单位光栅周期内应至少包含 10 pixel 时(每个像素大小 8  $\mu\text{m}$ , 相应  $b \geq 80 \mu\text{m}$ ),对应衍射损耗最小,基本稳定控制在 -5 dB 以内。因此利用光栅方程,可以计算出 1 级衍射角,考虑到 C 波段入射光 (1530~1560 nm) 垂直照射 LCoS 平面上,则

$$b \sin \theta = \lambda. \quad (1)$$

当  $b = 80 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.56 \mu\text{m}$  时,对应 1 级衍射角  $\theta = 1.1173^\circ$ ,推算得到该 1 级衍射光和入射光的偏转距离为 5.85 mm,即 C 波段内光束的最大偏转距离,意味着最远输出端距离中心输入端的距离不能超过 5.85 mm。因此若要在有限的偏转距离内排列更多的端口,则需要选用更加密集排列的光纤微透镜阵列。

## 3 WSS 系统性能测试

对 1×32 端口 WSS 系统测试指标包括系统在光通信 C 波段 1530~1560 nm 内波长信道切换功能、信道 3 dB 带宽、带宽调谐性等。图 3 为 09 号光纤端口输出的符合 ITU-T 标准的 100, 200, 400 GHz 的典型信号图。

图 4 是栅格为 100 GHz 时任意选择的光交换端口 09 号输出的某一波长信道典型图。波长信道的 3 dB 带宽测试采用超高分辨率光谱分析仪(BOSA, 分辨率最高为 0.08 pm)。图中信号 3 dB 带宽为 0.33 nm(约 41 GHz)。

图 5 为在光通信 C 波段、100 GHz 标准信道间隔下,该测试系统 32 个端口中每个波长信道的插入损耗。32 个端口各输出波长信道的 3 dB 带宽均为 40 GHz;且波长通道带宽从栅格 50 GHz 起连续可调,调谐步长 1 GHz。在扣除系统 3 dB 偏振损耗情况下,栅格为 100 GHz 时 32 个端口的插入损耗的表现:1-20 端口的插入损耗 5 dB~9 dB, 21-26 端口的插入损耗 6 dB~15 dB, 27-32 端口的插入损耗 7 dB~25 dB。当输出端口远离输入端口,结果显示系统插入损耗明显增加。这主要是因为 LCoS 在衍射角增大时,对应光栅常数减小,即单位周期内包含像素数减小,因此相位抽样不充分以及角度分辨率不够造成衍射效率下降,插入损耗增大。



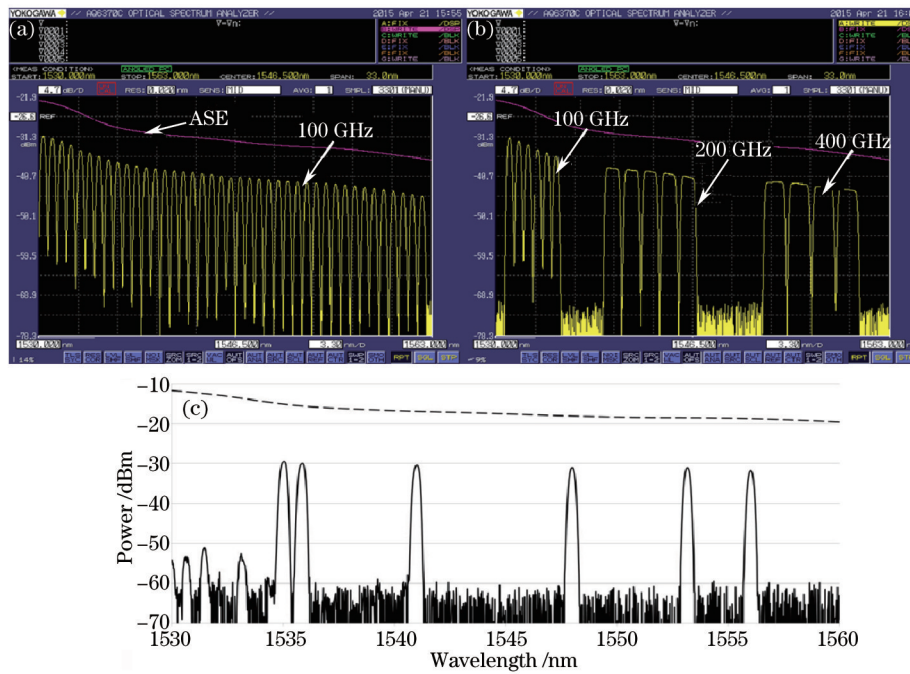


图3 9号端口输出的任意栅格结构的典型信号图。(a) 100 GHz; (b) 200 GHz; (c) 400 GHz  
Fig.3 Typical transmission spectra of different grids from 9th port. (a) 100 GHz; (b) 200 GHz; (c) 400 GHz

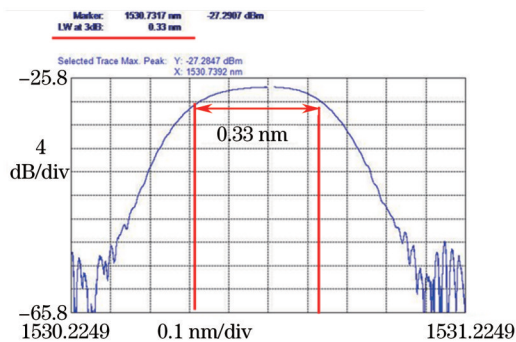


图4 9号端口输出的某一波长信道典型图  
Fig.4 Typical transmission spectrum of a single channel from 9th port

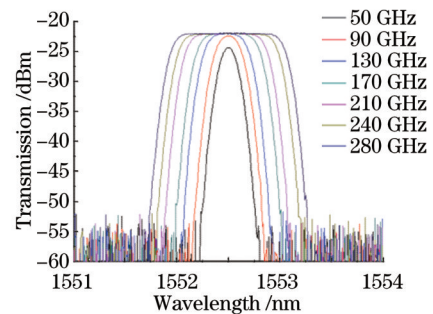


图5 9号端口输出的某一波长信道的带宽可调谐  
Fig.5 Spectral traces of 9th port with different channel widths

## 4 结 论

提出了一种新型的基于 LCoS 的  $1 \times N$  端口波长选择开关系统,实现了一种结构合理的  $1 \times 32$  端口 WSS 系统。测试研究了系统在光通信 C 波段内的波长信道切换功能、信道 3 dB 带宽、带宽调谐性、插入损耗等参数。研究表明,通过在 LCoS 芯片上不同波长通道所对应的像素区域上加载不同周期的相位光栅全息图,可以实现将密集波分信号中的一个或一组波长信道灵活地从任意输出端口交换输出;格栅为 100 GHz、32 个端口输出的波长信道 3 dB 带宽均为 40 GHz,且带宽从格栅 50 GHz 起连续可调;系统插入损耗表现为 1~20 端口的插入损耗 5 dB~9 dB,21~26 端口的插入损耗 6 dB~15 dB,27~32 端口的插入损耗 7 dB~25 dB。这一参数可通过进一步优化 LCoS,光纤微透镜阵列以及透射体光栅性能得到改善。这为第 4 代  $M \times N$  端口的波长选择开关奠定了坚实的理论与实验基础。

## 参 考 文 献

1 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.

黎 磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.

- 2 Sorin Tibuleac. ROADM network design issues[OL]. OFC/NFOEC, 2009.
- 3 I Kaminow, T Li A E Willner. Optical Fiber Telecommunication VB: Systems and Networks[M]. New York: Academic, 2008: 313-316.
- 4 C R Doerr, L W Stulz, D S Levy, *et al.*. Eight-wavelength add-drop filter with true reconfigurability[J]. Photon Technol Lett, 2003,15(1): 138-140.
- 5 K Okamoto, M Okuno, A Himeno, *et al.*. 16-channel optical add/drop multiplexer consisting of arrayed-waveguide gratings and double-gate switches[J]. Electron Lett, 1996, 32(16): 1471-1472.
- 6 Lei Zong, Xiaodong Huan, Ting Wang, *et al.*. A novel tunable DeMUX/MUX solution for WSS-based ROADM and WXC nodes[C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2007: 1-7.
- 7 B C Collings. Wavelength selectable switches and future photonic network applications[C]. 2008 International Conference on Photonics in Switching, 2008: 1-4.
- 8 Pierre Wall, Paul Colbourne, Christopher Reimer, *et al.*. WSS switching engine technologies[C]. Conference on OFC/NFOEC'08, 2008: 1-5.
- 9 Fonder B, Crafts D E, Ranalli E. Planar Lightwave Circuit Based Wavelength Selective Switch: United States Patent, 0031570S1[P]. 2008-10-21.
- 10 Basch E B, Elby S. Architectural tradeoffs for reconfigurable dense wavelength-division multiplexing systems[J]. J Sel Top Quantum Electron, 2006, 12(4): 615-626.
- 11 K Sorimoto, H Uetsuka, M Tachkura, *et al.*. Compact 5×5 wavelength-selective cross connect using integrated 2-D MEMS mirror arrays[C]. 18th Microoptics Conference(MOC'13), 2013.
- 12 T Han, J Plumridge, S Frisken, *et al.*. LCOS-based matrix switching for 2×4 WSS for fully flexible channel selection[C]. International Conference on Photonics in Switching, 2012.
- 13 Hu Qianggao, Liu Deming, Zhang Di. A new pattern wavelength selective switch based on MEMS[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1168-1172.  
胡强高, 刘德明, 张 均. 一种基于微机电系统技术的新型波长选择开关[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1168-1172.
- 14 Strasser T A, Wagener J L. Wavelength-selective switches for ROADM applications[J]. J Sel Top Quantum Electron, 2010, 16(5): 1150-1157.
- 15 Han Chao, Yue Yuanbin, Zhao Shimin, *et al.*. Design and fabrication of 650 nm arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323002.  
韩 超, 岳远斌, 赵世民, 等. 650 nm 阵列波导光栅波分复用器的设计与制备[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323002.
- 16 Xing Hongyu, Ye Wenjiang, Si Libin, *et al.*. Influence of flexoelectric effect on guided mode of hybrid-aligned nematic liquid crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0223002.  
邢红玉, 叶文江, 司立彬, 等. 混合排列向列相液晶导模中挠曲电效应的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0223002.

栏目编辑: 王晓琰