

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-19

## 硅基液晶技术与可重构全光通信网络

杨海宁<sup>1\*</sup>, 李 昆<sup>2\*</sup>, 初大平<sup>3\*</sup>

(1. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 剑芯光电科技有限公司, 江苏 南京 210000;

3. 剑桥大学 工程系光电器件及传感器中心, 英国 剑桥 CB3 0FA)

**摘要:**现代光纤通信网络使用波分复用技术极大地提升了网络传输容量。基于硅基液晶技术的波长选择开关使光纤网络运营商在网络节点处可以灵活地调度各个波长信道,让光纤通信网络在波长级具有可重构性,大幅地降低了网络的传输和运营成本。因此,波长选择开关已经成为了现代光纤通信网络的核心组件。本文回顾了波长选择开关的发展历程,重点介绍了其在光纤通信网络中扮演的角色,阐述了硅基液晶器件各项特性对波长选择开关关键技术指标的影响和改进方法。本文从器件、系统和网络等方面对硅基液晶技术在通信系统中的应用进行了系统的综述,旨在让广大读者对硅基液晶器件和可重构光纤通信网络有比较全面的了解,并从一定程度上对该领域的研究发展有所促进。

**关键词:**硅基液晶;波长选择开关;全光通信;可重构全光分插复用器

**中图分类号:**TN913.7;TN26 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2-cjled2021-0014 杨海宁 E(彩)

## Liquid crystal on silicon technology and reconfigurable all-optical networks

YANG Hai-ning<sup>1\*</sup>, LI Kun<sup>2\*</sup>, CHU Da-ping<sup>3\*</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. CamOptics Ltd., Nanjing 210000, China;

3. Centre for Photonic Devices and Sensors, Department of Engineering, Cambridge CB3 0FA, UK)

**Abstract:** Modern telecommunication networks use wavelength division multiplexing (WDM) technology to increase the transmission capacity of the fibres. Wavelength selective switches (WSSs) based on the liquid crystal on silicon (LCOS) technology enable network operators to route the signals on the wavelength basis, which significantly reduce the operational expenses (OpEx). This paper reviews the development of LCOS-based WSSs and its role in reconfigurable all-optical telecommunication networks. The key performance parameters for the WSSs and LCOS devices are explained in great details, with an aim to promote the research and development of this field.

**收稿日期:**2021-01-12;**修订日期:**2021-02-14.

**基金项目:**江苏省自然科学基金(No. BK20200351);江苏省特聘教授(2018);中央高校基本科研业务费(No. 2242019k1G002)

Supported by Supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No. BK20200351); Jiangsu Special Professorship(2018); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2242019k1G002)

\*通讯联系人, E-mail: h.yang@seu.edu.cn, kun.li@camoptics.co.uk, dpc31@cam.ac.uk

**Key words:** liquid crystal on silicon; wavelength selective switch; all-optical networks; ROADM

## 1 引言

经过近 20 年的发展,可重构全光分插复用器系统(Reconfigurable Optical Add/drop Multiplexer, ROADM)<sup>[1-3]</sup>已经成为现代光纤通信网络<sup>[4-5]</sup>的核心组件。ROADM 可以使光纤通信网络运营商在网络结点处实现波长级的路径调度和恢复<sup>[6]</sup>,极大地提升了网络的可重构性和鲁棒性。同时,ROADM 系统中的波长路径切换完全在光层完成,不需要传统的光-电-光转换过程。因此,ROADM 技术对波长信道的速率和调制模式不敏感,一旦部署一般可以持续服务 10 年以上。另外,相比于依赖高速集成电路芯片的光-电-光转换信道调度,ROADM 的全光交换特性还可以大幅降低网络的功耗。由于以上优点,ROADM 技术不仅可以大幅降低光纤通信网络的投资成本(Capital Expenses, CapEx)<sup>[7-8]</sup>,还可以大量节省其运营成本(Operational Expenses, OpEx)<sup>[9]</sup>,在世界各地得到了广泛的部署。

波长选择开关(Wavelength Selective Switch, WSS)<sup>[10-12]</sup>是 ROADM 系统的核心组成部分。WSS 通常具有一个输入端口和 N 个输出端口。WSS 可以将输入端口接收到的任意波长信道切换至任意输出端口。一个 ROADM 系统通常由多个 WSS 配对级联组成。早期 WSS 可以基于硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)技术<sup>[13-14]</sup>、液晶技术(Liquid Crystal, LC)<sup>[15]</sup>或者 Micro Electromechanical System (MEMS)技术<sup>[12,16]</sup>。基于 LCOS 技术的 WSS 具有高端口数目,且支持灵活栅格(Flex-grid)标准<sup>[17]</sup>,可大幅提升全光通信网络的传输容量。因此,近年来基于 LCOS 技术的 WSS 器件成为业界的主流选择。

LCOS 器件是由 CMOS 硅基电路背板和液晶光学元件组成的混合光电芯片,可以实现空间光调制的作用。根据液晶设置不同,LCOS 器件可以分为振幅型<sup>[18-19]</sup>和相位型<sup>[20-21]</sup>。振幅型 LCOS 器件对入射光的空间振幅进行调制,通常应用在信息显示系统<sup>[22-24]</sup>中。而相位型 LCOS 器件只对入射光的空间相位进行调制,而不影响

其振幅,因此光束能量理论上不受损失,具有较高的光学能量效率。但是,纯相位型 LCOS 器件对制备工艺<sup>[25]</sup>的要求相对较高。由于 ROADM 系统对光路切换的效率有较高的要求,因此 WSS 通常采用纯相位型 LCOS 器件,实现较低的插入损耗。

本文将首先介绍 WSS 和 ROADM 的基本功能以及其在可重构全光通信网络中的作用;在此基础上进一步详细介绍 WSS 的光学构架和关键性能参数;最后本文将从器件层面详细介绍面向通信应用的 LCOS 器件中的关键参数和指标。

## 2 WSS 和 ROADM 基本功能

### 2.1 WSS 基本功能

图 1 为 WSS 的基本功能图。WSS 通常具有 1 个单模光纤输入端口和 N 个单模光纤输出端口。输入光纤端口可接收通信 C 波段(1 528~1 568 nm)波段内的波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)信号。WSS 可以将任意的输入 WDM 信道分配至任意输出光纤端口,分配过程完全在光层完成,不需要依赖光-电-光转换。由于光路可逆原理,1×N WSS 也可以作为 N×1 WSS 使用,即图 1 中右侧的 N 个端口可作为输入端口使用,左侧端口可作为输出端口使用。

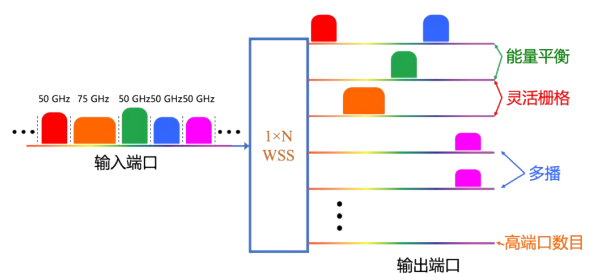


图 1 1×N WSS 的基本功能图

Fig. 1 Functional diagram of a 1×N WSS

除了基本的波长信道切换,WSS 还应该支持以下高阶功能:

- **能量平衡:** 由于光纤通信传输网络中光纤的衰减特性和光纤放大器(Erbium Doped Fibre Amplifier - EDFA)的增益特性都具有一定的波

长相关性,因此进入一个网络结点的各个 WDM 波长信道之间的能量存在一定差异。这会降低通信网络的信噪比<sup>[26]</sup>,影响传输距离和传输速率。因此,光纤通信网络运营商通常使用 WSS 对 WDM 信道进行能量平衡,以达到优化传输质量的目的。由于 WSS 是一个无源器件,能量平衡一般通过对能量较高的输入 WDM 信道进行衰减<sup>[27]</sup>实现。

·**高端口数**:随着现代光纤通信网络的发展,网络的网格密度越来越高。一个网络结点通常需要支持 8 个、16 个或者更高的维度。这对 WSS 的端口数目提出了更高的要求。早期 WSS 仅可以支持  $1 \times 9$  端口<sup>[28]</sup>。近些年来  $1 \times 20$  WSS 和  $1 \times 32$  WSS<sup>[29-30]</sup> 成为业界主流选择。高端口数目的 WSS 通常基于 LCOS 技术或 MEMS 技术。

·**集成度**:网络结点处对 WSS 的需求量随着网络维度的提升而线性增长,因此将多个  $1 \times N$  WSS 共同封装在一个模块中也成为近些年来业界发展的趋势。目前,将 2 个 WSS<sup>[29-30]</sup> 封装在一个 WSS 模块中已经成为业界主流选择。近些年来,也有将 4 个 WSS<sup>[31]</sup>,甚至 24 个 WSS<sup>[32-33]</sup> 封装在一个模块中的技术方案。

·**宽频谱覆盖**:随着现代光纤通信网络对传输带宽的需求的增加,C 波段逐渐无法满足网络对传输容量的需求。近些年来,光纤通信网络运营商开始尝试使用 L 波进行传输。于此对应,WSS 开始支持更宽的频谱范围。早期 WSS<sup>[10]</sup> 支持 C 波段中 4 THz 频谱范围;近些年来,覆盖 4.8~6 THz 频谱范围的 WSS 成为业界的主流。最新技术的 WSS 则可以同时支持 C 波段和 L 波段<sup>[31]</sup>,覆盖频谱范围接近 10 THz。

·**灵活栅格**<sup>[34-35]</sup>:传统基于 WDM 技术的光纤通信网络采用固定网络栅格间距,即各 WDM 信道的频谱带宽都为 50 GHz。但随着传输速率的提升,很难将  $>200$  Gbit/s 的信道频谱带宽压缩至 50 GHz 之内,并保证全光传输距离。因此,WDM 光纤通信网络需要采用更大的网络栅格间距。但是如果采用 100 GHz 的栅格间距传输  $<100$  Gbit/s 的信道又将造成频谱浪费。因此,现代 WSS 需要支持灵活栅格,匹配 WDM 信道的频谱宽度。有研究证明,支持灵活栅格标准的 WSS 的可以将光纤通信网络的传输容量提升

30% 左右<sup>[36-38]</sup>。由于传统基于 MEMS 技术的 WSS,栅格间距与 MEMS 反射镜物理尺寸相关,无法支持灵活栅格标准,近些年来已经被淘汰。LCOS 技术和 LC 技术可以使 WSS 支持灵活栅格标准。但如上文所提,基于 LCOS 技术的 WSS 具有更高的端口数目,因此已经成为业界主流技术选择。

·**多播**:基于 LCOS 技术的 WSS 还可以通过全息光场控制的方式将一个输入 WDM 信道同时分配至两个输出端口<sup>[28,39]</sup>,且能量分配比例可调。这一功能在某些特定应用场景下(如信道质量检测<sup>[40]</sup>)能发挥相应的作用。

## 2.2 ROADM 基本功能

图 2 给出了 ROADM 系统的基本构架。ROADM 系统可以分为传输端<sup>[41]</sup>和上下行端<sup>[42]</sup>两个部分。传输端主要负责 WDM 信道在不同维度之间的全光路径分配切换;而上下行端则可以将各维度的一部分输入 WDM 信道从网络中移除(drop)至本地,供本地处理和用,或者将本地新的 WDM 信道添加(add)至不同维度的输出端口,供进一步传输。

由图 2 可见,ROADM 传输端由一系列  $1 \times N$  WSS 配对级联组成。从一个维度输入的 WDM 信道被该维度对应的输入 WSS 分配至目标输出维度的 WSS 或本地上下行端。若该 WDM 信道需要继续传输,目标输出端的 WSS 则负责将该 WDM 信道分差复用(multiplex)至对应的输出端口。该 ROADM 传输端构架被称为“分配-选择”(route and select)<sup>[43-44]</sup>构架。在此构架中由于各个 WDM 信道会经过 2 个 WSS,进而经历两次滤波,因此信道频谱范围之外的噪音被很好的抑制,可以提升网络传输质量和距离。目前该构架已经成为高纬度 ROADM 传输端的主流构架。理论上,输入端的  $1 \times N$  WSS 可以被  $1 \times N$  分光器(splitter)替代,起到降低 ROADM 成本的作用。该构架称为“广播-选择”(broadcast and select)<sup>[41]</sup>但是由于分光器的插入损耗随着端口数目的提升而提升,因此往往只能被应用在维度较低的 ROADM 系统之中。同时由于分光器不具备滤波功能,该构架也会降低传输信噪比。

在如图 2 所示的这个基于“分配-选择”构架的 4 维 ROADM 系统中,需要使用 8 个  $1 \times N$

WSS 模块。以此类推,具有 16 个维度的 ROADM 系统则需要 32 个  $1 \times N$  WSS。同时,在高维度 ROADM 系统中,传输端的 WSS 需要与更多的 WSS 配对连接,因此也需要 WSS 具有更高的端口数目。这也是 ROADM 系统需要更高端口数目和更高集成度的 WSS 模块的主要原因。

ROADM 系统上下行端是 ROADM 系统的一个主要技术难点。为了满足网络运营维护可重构性和灵活性的要求,ROADM 系统上下行端需要具备以下 3 个属性。

- **波长无关(Colourless)**<sup>[45]</sup>:是指任意上下行端口都可以接收任意波长的 WDM 信道。ROADM 系统运营商可以通过软件控制的方式改变任意端口的波长分配,而不需要对上下行端口的模块进行物理调整。

- **方向无关(Directionless)**<sup>[46]</sup>:是指任意上行端口可被分配至任意维度的输出端口;或者任意维度的输入 WDM 信道可以被分配至任意下行端口。

- **竞争无关(Contentionless)**<sup>[47]</sup>:是指来自不同维度两个具有相同波长的信道可以同时被分配至两个下行端口,两者之间不存在冲突;或者两个具有相同波长的上行信道可以被同时分配至各自对应的目标输出维度端口。

同时满足以上 3 个属性的 ROADM 系统通常被称为 CDC ROADM。有时也会出现 CDCF 或 CDCG 的描述。在此 F 和 G 都代表灵活栅格 (flex-grid 或 gridless)。CDC ROADM 给光纤通信网络运营商带来了最大的网络资源配置灵活度,使得绝大多数的网络资源调配可以通过软件控制完成,而不需要工程师物理改变光纤连接。但是支持 CDC 功能的 ROADM 上下行端构架相对复杂,成本较高。在有的应用场景下,运营商仅配置 CD 功能<sup>[48]</sup>。

具有 CDC 功能 ROADM 上下行端一般可以由多播开关 (multicasting switch, MCS)<sup>[49]</sup> 或者波长交叉连接器 (wavelength crossconnect, WXC)<sup>[50-52]</sup> 实现。

图 3(a)给出了 MCS 的基本构架。一个  $M \times N$  MCS 由  $M$  个  $1 \times N$  分光器和  $N$  个  $1 \times M$  空间光开关 (space switch, SS) 配对级联组成。其中  $M$

对应

ROADM 传输端的维度,  $N$  对应这个 MCS 支持的上下行端口数目。由于  $1 \times N$  分光器的插入损耗与端口数目成正比,因此当 MCS 需要支持较大上下行端口数目时会引入较大的插入损耗。MCS 过高的插入损耗需要通过在其输入端口处部署 EDFA 阵列进行补偿。但这会带来更高的成本和系统功耗。因此,目前 MCS 支持的上下行端口数目一般小于 8 个。

图 3(b)给出了 WXC 的基本构架。与图 3(a)中 MCS 的基本构架相比,图 3(b)所示的 WXC 中使用 WSS 阵列替代了分光器阵列。WSS 可以将需要任意波长信道高效的分配至目标上下行端口对应的空间光开关。WSS 的插损不会像分光器那样随着端口数目的提升而增加,因此解决了 MCS 构架中由插损带来的扩展性的问题。因此,此类 WXC 也亦被称为  $M \times N$  WSS。目前业界领先的 WXC<sup>[53]</sup>

可以支持 8 个 ROADM 传输维度和 24 个上下行端口。另外,在光学设计过程中,WXC 中的空间光开关可以被集成至 WSS 的光路中<sup>[53]</sup>,进一步提升系统集成度。需要指出的是此类 WXC 构架相对比较复杂,目前系统体积和成本仍然相对较高。

### 3 WSS 光学构架

#### 3.1 LCOS 全息光开关光学构架

图 4 给出了基于 LCOS 技术的全光开关的基本构架。在这个光学构架中,光纤准直阵列与 LCOS 器件分别置于傅里叶透镜的前后焦平面上,构成了一个典型的  $2f$  光学系统。入射光束经过傅里叶透镜进一步准直后抵达 LCOS 器件表面。纯相位型 LCOS 器件的主要构成如图 5 所示。其中液晶层通常使用向列性液晶材料,导向方式可以垂直型 (vertically aligned, VA) 也可以是水平型 (parallelly aligned, PA)。通过在像素电极上施加不同的电压值,液晶分子会随着电场分布而转动。由于液晶材料具有双折射特性,在不同液晶倾角下,某特定偏振态的入射光经过液晶后会经历不同的相位延迟,而且振幅理论上不受影响。根据傅里叶光学理论<sup>[54]</sup>,若在 LCOS 器件上显示如图 5 中红色虚线所示的闪耀光栅全息

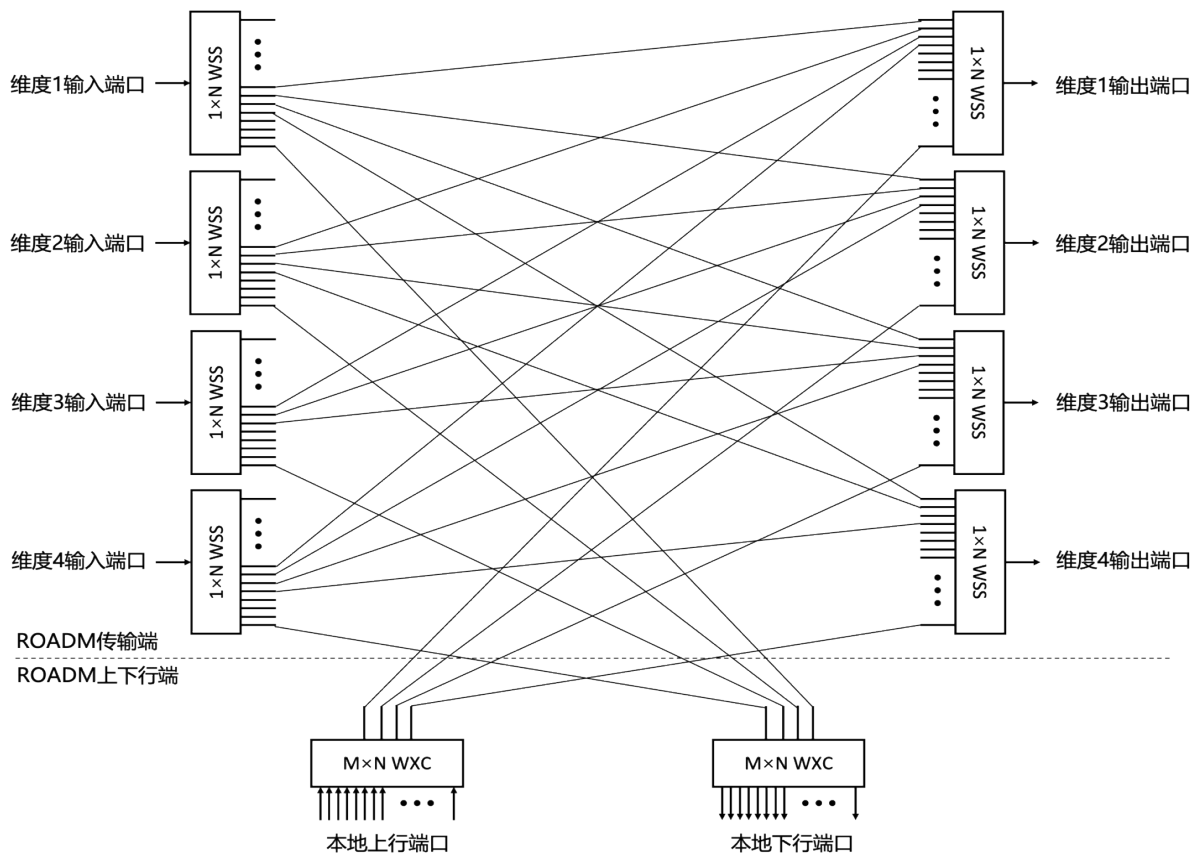


图2 CDC ROADM 构架

Fig. 2 Block diagram a CDC ROADM

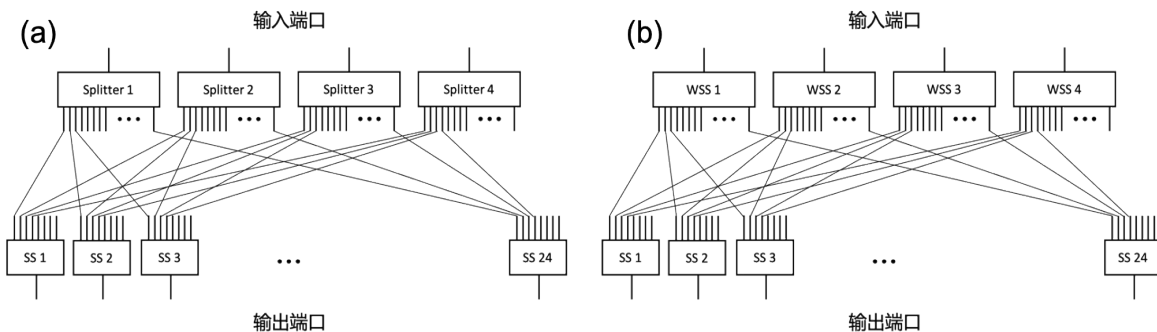


图3 (a) MCS 基本构架; (b)WXC 基本构架

Fig. 3 (a) Architecture of an MCS; (b) Architecture of a WXC.

图,且该光栅峰-谷相位差为  $2\pi$ , 则该闪耀光栅可以把入射光束接近 100% 的能量分配至其 +1 衍射级次。如图 5 所示,出射的 +1 衍射级次的波阵面相对于入射波阵面存在一个偏转角度  $\theta_m$ 。当垂直入射时,该偏转角度与闪耀光栅周期 ( $T$ ) 之间的关系为

$$\tan \theta_m = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为入射光束波长。由于 LCOS 器件为反射型器件,被调制过的光束将再次经过傅里叶透镜。傅里叶透镜将把由 LCOS 器件引入的波阵面偏转角转换成光束沿端口方向的位移,进而保证光束可以垂直入射至输出端口,并保证了光纤耦合效率。通过调整 LCOS 器件上显示的闪耀光栅周期,可以将光束分配至任意目标端口。

需要指出的是,受限于 LCOS 器件中像素阵

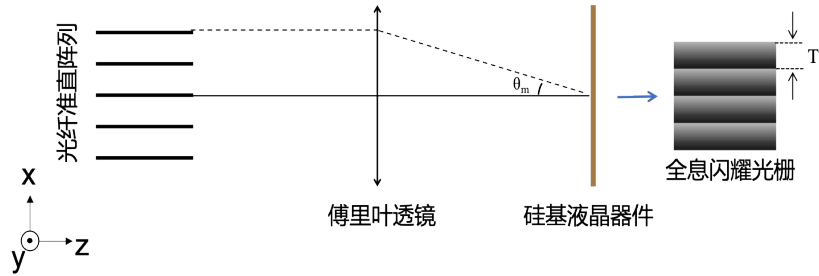


图4 基于LCOS技术的全光开关光学构架

Fig. 4 General architecture of an optical switch based on the LCOS technology.

列的空间采样特性,LCOS器件的+1衍射级次衍射效率会随着闪耀光栅的周期减小而降低。

理论上,当光栅周期为8个像素时,衍射效率会降低至95%。

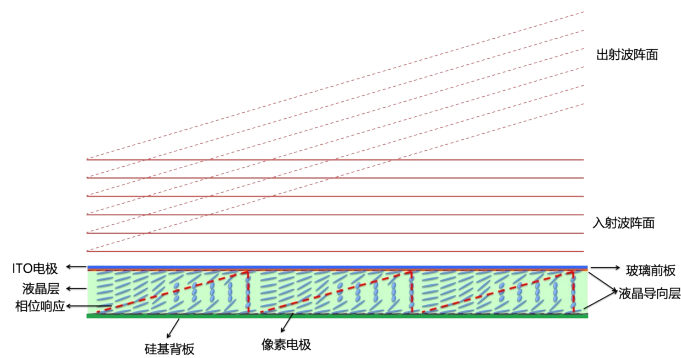


图5 LCOS器件光束偏转工作原理

Fig. 5 Principle of beam steering by the LCOS device.

但是,由于LCOS器件中还存在边缘场效应<sup>[55-57]</sup>,即相邻两个像素相位响应存在突变时,LCOS器件无法正确显示加载的全息图。因此,此时的实际衍射效率会进一步降低。

### 3.2 WSS光学构架

WSS的光学系统设计一般基于“色散-偏转”构架,即在光纤阵列端口沿着一个维度排布;在与之正交的维度上通过使用具有色散特性的光学元件,将不同波长信道对应的光斑分配至LCOS器件的不同区域,供LCOS器件在端口维度上进行光束控制。因此,图6也分别从端口方向和色散方向上给出了WSS系统的基本光学构架。

在图6(a)中所示的端口方向(x轴)上,光纤准直阵列与P<sub>1</sub>平面分别在傅里叶透镜的前后焦平面上,构成了一个与图4一致的2f傅里叶光学系统。而P<sub>1</sub>平面又位于由成像透镜1和成像透镜2构成4f成像系统的物平面。色散单元在端

口方向上不起作用。LCOS器件位于这个4f成像系统的成像面上。因此,该4f系统将P<sub>1</sub>平面投影至了LCOS器件平面。与图4中原理一致,LCOS器件对入射光束进行空间相位调制,引入一个波阵面倾角。该波阵面倾角经过4f系统再次被投影至P<sub>0</sub>平面。傅里叶透镜将波阵面倾角转换为光束较光轴的位移,并保证出射光斑具有较高的耦合效率。

在图6(b)中所示的色散方向(y轴)上,色散单元位于4f成像系统中间,起到了将不同波长的光斑分配至LCOS器件不同区域的作用(如图6(c)所示)。由于色散单元与LCOS器件分别置于成像透镜2的前后焦平面上,因此可以使各个波长的光束垂直入射至LCOS器件表面,进而保证出射光束在色散方向上可以原路返回。该系统中的色散单元可以是衍射光栅(diffraction grating),也可以是棱镜(prism),也可以是衍射光栅棱镜(grism)。现有系统中一般采用Grism,一

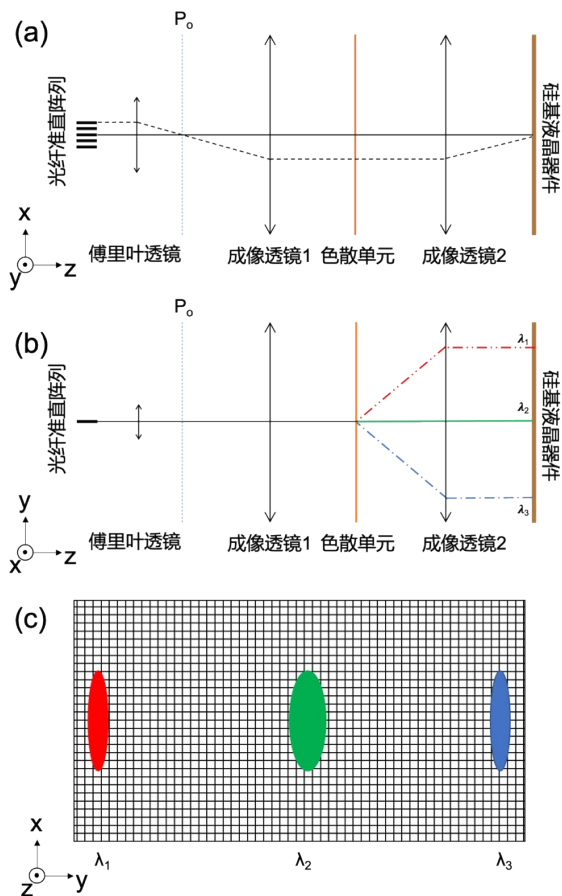


图6 1×N WSS光学构架:(a)端口方向;(b)色散方向;(c)LCOS器件上光斑分布。

Fig.6 Optical architecture of a 1×N WSS: (a) along the switching axis; (b) along the dispersion axis; (c) optical beams on the LCOS device.

方面增加了其色散能力,达到减小光学系统尺寸的目的;同时 Grism 从一定程度上还可以降低锥形衍射对 WSS 光学性能的影响。

由图 6(c)可见,当 WDM 信道具有不同频谱带宽的时候,LCOS 器件表面与该信道对应的光斑尺寸在色散方向上的尺寸也不尽相同。WSS 系统需要能高效切换各种不同频谱宽度的信道以满足灵活栅格标准的要求。在基于 LCOS 器件的 WSS 中,只需通过软件设置改变与该信道对应的全息光栅在色散方向上的尺寸即可实现灵活栅格切换。目前,基于 LCOS 器件的 WSS 能够以 6.125 GHz 甚至更小的精度调节其滤波通带宽度,极大的提升了基于网络的频谱利用效率和传输带宽。与之相比,使用 MEMS 技术的 WSS 中, MEMS 器件中反射镜在色散方向上宽

度是固定的而色散方向上相邻两个反射镜之间的间距又远大于 LCOS 器件上的像素间距,因此无法实现灵活栅格波长信道切换。

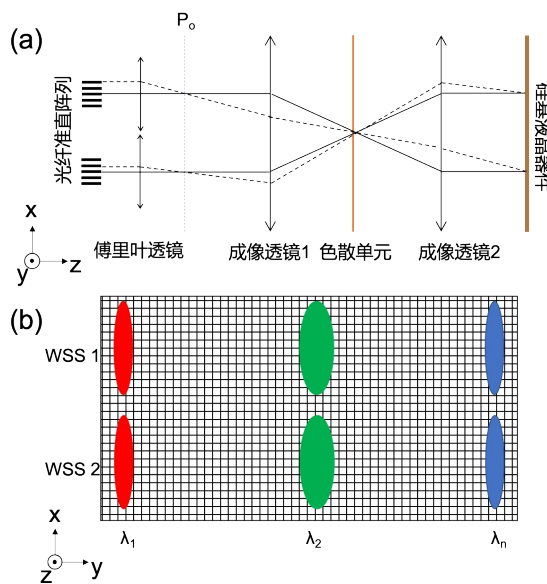


图7 Twin 1×N WSS 光学构架:(a)端口方向;(b)LCOS 器件上光斑分布。

Fig.7 Optical architecture of a twin 1×N WSS: (a) along the switching axis; (b) optical beams on the LCOS device.

随着 ROADM 系统对 WSS 集成度要求的日益提升,可以将两个甚至更多的 WSS 集成至单个光学系统中。在图 7(a)所示的光学系统中,4f 成像光学系统保持不变,2f 傅里叶光学系统由两个独立的 2f 系统构成。这样两个 WSS 的入射信道光斑被分配至 LCOS 器件的不同区域(如图 7(b)所示)。通过控制 LCOS 器件对应区域的设置,可以实现两个独立运行的 WSS。除此之外,用集成波导器件<sup>[58-59]</sup>代替传统的光纤阵列也可以进一步提升 WSS 的集成度。但是由于波导器件往往会带来额外的插入损耗,因此目前该方案还未被广泛推广。

另外,WSS 中的波束偏转可以不局限与端口方向,也可以利用 LCOS 器件在波长方向上进行波束偏转<sup>[60]</sup>。与之对应,光纤出入射端口也为二维分布。在这种设计下,可以在端口方向上使用更少的像素数目实现相同的端口数目。但是,为了保证频谱覆盖宽度和滤波通带性能,需要使

用分辨率更高的 LCOS 器件作为其核心光束偏转器件。

## 4 WSS 关键光学性能

随着光纤通信网络的传输速率和频谱效率越来越高,其对 WSS 光学性能的要求也日益提升,以保证通信质量和传输距离。WSS 模块的主要光学性能参数包括:

### 4.1 插入损耗

插入损耗(Insertion loss, IL)是指 WSS 模块对输入 WDM 信道产生的能量损失,是 WSS 模块的重要技术指标。在一个 ROADM 系统中,输入端-输出端,或输入端-下行端,或上行端-输入端的插入损耗需要控制在 16 dB 以内,以减小 EDFA 的放大系数,达到保证信道质量的目的。由于上下行端的模块通常具有较高的插入损耗(8 dB - 10 dB),因此 WSS 的插入损耗一般也需要控制在 8 dB 甚至 6 dB 之内。WSS 光学系统中的主要插入损耗来源于色散单元、LCOS 器件和光纤耦合以及系统装配误差。其中由 LCOS 器件产生的损耗最为突出。特别是当 WSS 系统需要支持大端口数目的时候,LCOS 器件需要对入射光束施加较大的偏转角度,LCOS 器件的衍射效率也会随之降低,增加系统插损。目前,业界领先的 WSS 模块已经可以将插损控制在 5 dB 以内。

### 4.2 偏振相关损耗 (Polarisation-dependent loss, PDL)

现代高速光纤通信网络采用偏振复用<sup>[61]</sup>方式对激光器进行调制,即两个正交偏振态上分别加载了两路不同的信道。该技术将光纤通信网络的频谱利用效率提升了 1 倍。因此,WSS 模块需要对入射光束的偏振态不敏感,保证不同偏振态的光束在光学系统中经历相同的插入损耗。受限于液晶的双折射特性,绝大多数 LCOS 器件只能对某个特定偏振态的光束进行空间相位调制。因此在 WSS 光学设计过程中,需要将两个正交偏振态的入射光束在空间上分离,并扭转其中一个偏振态的偏振方向,使两束入射光的偏振方向与 LCOS 器件的工作偏振方向一致。这一偏振分离的过程可能引起 PDL。在某些 WSS 设计中,这两束入射光束分别被分配至 LCOS 器件

不同的像素区域进行独立处理。通过控制不同区域波束偏转全息图的衍射效率,可以实现 PDL 补偿,但这也降低了对 LCOS 器件上像素的使用效率,进而限制了 WSS 可以支持的端口数目。在像素使用效率较高的 WSS 设计中,这两个人入射光共用同一个全息图<sup>[62]</sup>,这也给 PDL 的补偿带来了挑战。目前,业界领先的 WSS 模块可以将 PDL 控制在 0.5 dB 以内<sup>[63]</sup>,以保证信道传输质量。

### 4.3 消光比/串扰

消光比(extinction ratio)<sup>[64]</sup>是任何一种全光开关的重要技术指标。当 WSS 将一个 WDM 信道分配至某个目标端口的时候,该信道的一部分能量会出现在非目标端口,造成串扰(crosstalk),进而影响光纤通信网络的传输质量。基于 WDM 技术的全光通信网络对消光比具有极高的要求。目前业界领先 WSS 可以实现 25 dB、甚至 35 dB 的消光比<sup>[65]</sup>。由于 LCOS 器件中的边缘场效应,入射光束经过全息衍射之后会出现高阶衍射级次,进而在 WSS 中产生串扰。为了满足系统对消光比的要求,WSS 需要从光学系统设计、全息图优化、以及两者相结合的方式综合降低高阶衍射级次对消光比的影响。下文中会较为详细的介绍一些降低串扰的方法。

### 4.4 滤波通带特性

从本质上讲,WSS 属于一种可调滤波器。滤波通带特性(Passband)<sup>[66-68]</sup>是任何滤波器的重要技术指标。通常情况下,在 WSS 中使用其滤波通带-0.5 dB 和-3.0 dB 衰减处对应的频谱宽度定义其滤波通带宽度。在基于 WDM 技术的光纤通信网络中,一个 WDM 信号通常需要经过 15 个 ROADM 系统(即 30 个 WSS)才可以抵达目的地。因此,即使是细微的 WSS 滤波通带特性差异也会在网络层引起巨大的信道质量差异<sup>[68-69]</sup>。图 8 给出了 3 个具有不同滤波通带特性的 WSS 的通带曲线。虽然它们之间的差异非常微小,但是经过 30 次级联后,滤波通带宽度发生了明显的收窄,传输信道的一部分频谱会被过滤掉,影响该波长通信质量。虽然可以通过调节 LCOS 器件上全息图在色散方向上的宽度来提升该通道的滤波通带宽度,但是这将牺牲相邻波长通道的滤波通带宽度。因此,从某种意义上来说



说, WSS 的滤波通带性能决定了 ROADM 传输网络的频谱使用效率和传输容量<sup>[67,70]</sup>。

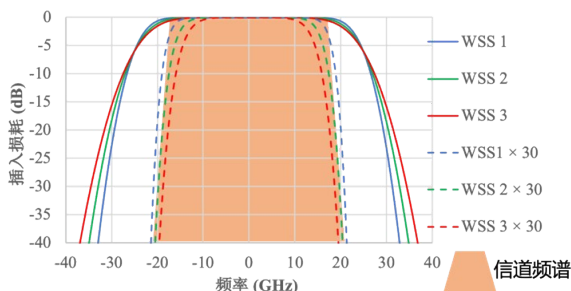


图8 WSS滤波通带特性

Fig. 8 Passband characteristics of WSSs

通过合理光学系统设计可以提升 WSS 模块的滤波通带性能。在 LCOS 器件尺寸和 WSS 频谱覆盖范围给定的情况下,在 LCOS 器件色散方向上分配给每个 WDM 信道的像素数目也随着被限定。如图 9 所示,这进而决定了单个 WDM 信道对应的波偏转全息图沿色散方向上的尺寸 ( $W_H$ )。为了提升 WSS 滤波通带宽度,在光学系统设计的过程中需要尽量减小未经调制的光斑在 LCOS 器件表面沿色散方向上的尺寸 ( $W_S$ )。

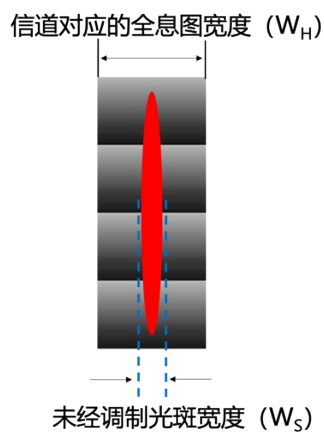


图9 LCOS 表面光斑与对应 WDM 信道的全息图

Fig. 9 Beam shape on the LCOS device and the corresponding beam steering hologram.

#### 4.5 切换速度

WSS 以及 ROADM 在光纤通信网络中一般用于高速信道切换 (circuit switch)<sup>[71]</sup>, 其被重新配置的频率相对较低。因此,不同于信息包交换

(packet switch)<sup>[72]</sup>, 网络系统对 WSS 的切换速率要求相对较低。目前秒级的切换速率即可满足绝大多数应用场景的需求。

## 5 面向通信系统应用的 LCOS 技术

传统 LCOS 技术主要面向信息显示等相关应用而开发,对器件的分辨率、尺寸和刷新率都有着相关的要求。而通信系统则更加关注 LCOS 器件的光学性能,且要求更为苛刻。因此,传统 LCOS 器件需要从以下几个方面进行优化,以满足通信系统的要求。

### 5.1 反射率

从图 5 中可以看出, LCOS 器件具有三明治结构,光束从入射到出射会分别经过玻璃前板、ITO 电极、液晶导向层等各两次。这些光学层以及硅基背板本身对光的吸收系数随波长而变化。传统面向显示应用的 LCOS 器件需要在可见光谱范围内具有较高的反射效率。而通信系统通常使用 C 波段和 L 波段的近红外波长,频谱覆盖范围相对较窄,但是对器件反射率的要求更高。一般来说,面向可见光应用设计的 LCOS 器件,即使在玻璃前板上进行了相关的增透镀膜,总体反射率也很难在 C 波段和 L 波段超过 75%。目前,应用于通信系统的 LCOS 器件在该波段的反射率一般都需要在 85% 以上。为了使 LCOS 器件在这两个波段的具有较高的反射率,需要对以上提及的各层光学结构材料上进行相应的优化。

在 LCOS 背板上添加具有高反射率的多层介质膜<sup>[73]</sup>或者具有亚波长结构<sup>[74]</sup>的高反射率层可以进一步提升 LCOS 器件的反射率。但是这一工艺流程会进一步加大像素电极和 ITO 共电极之间的间距,造成较为严重的边缘场效应,进而影响 LCOS 器件的衍射效率。因此,在器件设计过程中,需要在反射率和衍射效率之间进行平衡。

### 5.2 频谱响应

由于 WSS 本省是一个可调滤波器,因此需要 LCOS 器件在 C 波段和 L 波段内的频谱响应具有较好的一致性。然而,从图 5 的 LCOS 器件三明治结构中可以看出,其各个光学层由具有不同折射率的材料组成。若各光学层之间的折射率匹配处理不当,极易形成谐振腔,致使 LCOS

器件反射率随入射光的波长而变化。图 10 给出了两个不同 LCOS 器件反射率随波长变化的曲线。可以看出虽然 LCOS 1 的峰值反射率较高,但是在其频谱范围内具有较大的抖动。因此,该 LCOS 器件中存在较为明显的谐振腔。在 WSS 应用中,这样的谐振腔会致使 WSS 滤波通带中央处的频谱响应存在抖动,进而影响信道传输质量。相比之下,LCOS 2 的反射率随波长变化 < 1.5%,更为适合 WSS 应用。

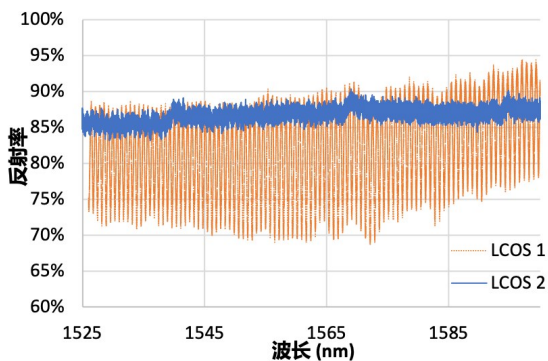


图 10 LCOS 器件频谱响应特性

Fig. 10 Spectral response of the LCOS device

LCOS 器件中光学层之间的折射率匹配处理不当不仅会引起图 10 中所示的谐振腔现象,还会给 WSS 带来串扰。在图 11 所示的 LCOS 器件中,玻璃前板表面的增透镀膜存在的问题,一部分入射光在空气-玻璃前板表面发生反射,未能进入液晶层,降低了 LCOS 器件的有效反射率。但是这对 WSS 插损的影响相对有限。+1 级衍射级次在前板玻璃-空气界面会再次发生一定的反射,这部分反射光会进入液晶层,被二次相位调制,进而如图所示产生串扰。由于 WSS 对消光比的要求极为苛刻,此类由二次调制造成串扰对 WSS 的性能有着较为严重的影响。

### 5.3 衍射效率

LCOS 器件的衍射效率也是影响基于该技术的 WSS 插入损耗的主要因素之一。由于 C 波段和 L 波段的波长是可见光波长的 3 倍左右,且一般液晶材料在通信波段的双折率相比可见光波段更低,因此面向通信应用的 LCOS 器件一般需要更厚的液晶层实现

2 的相位响应。通常情况下,面向通信应用的 LCOS 器件中液晶层的厚度与硅基背板上

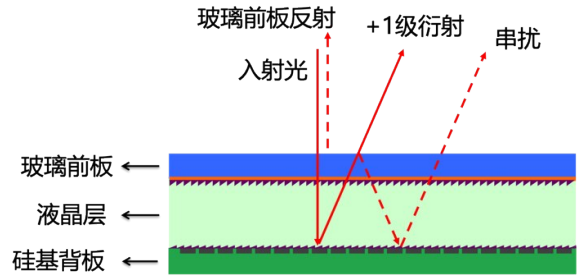


图 11 由于 LCOS 光学结构引起的 WSS 串扰

Fig. 11 Crosstalk in WSS caused by imperfect coating in the LCOS device.

的像素尺寸相当。在这种情况下,相邻像素电极之间的电场会发生串扰,即出现严重的边缘场效应<sup>[55]</sup>。

如图 12 所示,当相邻像素区域之间所需要的相位响应差别较大时,对应的像素电极之间存在一个较大的电场强度变化。但是由于像素电极尺寸与它们和 ITO 共电极之间的间距相当,电场分布在空间上存在一个渐变的过程,无法实现陡峭的相位变化。同时,液晶材料的粘滞特性<sup>[75]</sup>,也阻碍了液晶材料在小范围内实现相位突变。以上这些原因综合作用使得 LCOS 器件上实际的空间相位响应与加载的全息图之间存在差异,降低了器件的衍射效率。特别是当 LCOS 器件显示周期较小的闪耀光栅时,空间相位渐变区域占比较大,对衍射效率的影响尤为突出<sup>[76-77]</sup>。同时需要指出的是,当衍射效率较低的时候,入射能量被分配至高阶衍射级次,会给 WSS 带来串扰。如何保证 LCOS 在显示小周期闪耀光栅的情况下具有较高的衍射效率和串扰抑制也是实现大端口 WSS 技术挑战之一。

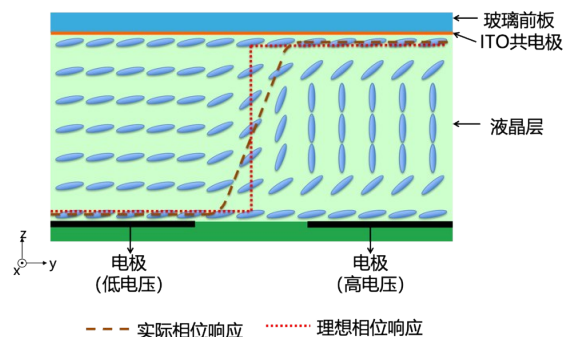


图 12 LCOS 器件中的边缘场效应

Fig. 12 Fringing field effect in the LCOS device

虽然采用双折率更高的液晶材料<sup>[78-80]</sup>可以从一定程度上降低液晶层的厚度,减小边缘场效应的影响,达到提升衍射效率的目的。但是,高折射率的液晶材料稳定性和寿命尚未在通信系统中得到验证。

#### 5.4 瞬时相位稳定性

LCOS 器件随时间的相位相依稳定性<sup>[81]</sup>是面向通信应用的 LCOS 器件的另一个重要光学参数。LCOS 器件的瞬时相位抖动会使 LCOS 器件上显示的全息图失真。虽然这一现象对 WSS 插损的影响相对较小,但可能会提升串扰。一般情况下,液晶器件的瞬时相位稳定性随着工作温度的提升而恶化。而 WSS 中的 LCOS 器件工作温度一般在 45 度以上,因此其瞬时相位抖动更为明显<sup>[82]</sup>。图 13 给出了两个 LCOS 器件在 1.7 附近的瞬时相位响应。可以看出 LCOS 2 具有更好的瞬时相位稳定性。

LCOS 器件中的瞬时相位抖动主要源自于其驱动电场极性的周期性反转。由于 LCOS 器件中的液晶材料中不可避免的存在离子杂质,而离子杂质在电极上的聚集会严重影响 LCOS 器件的寿命。为了避免这种情况的出现,LCOS 器件驱动过程中需要使用极性周期性反转的电场信号。在模拟型 LCOS 器件中,该电场极性的反转是诱发相位响应瞬时抖动的主要因素。通过提升驱动电场极性反转的频率可以有效降低 LCOS 器件的瞬时相位抖动。

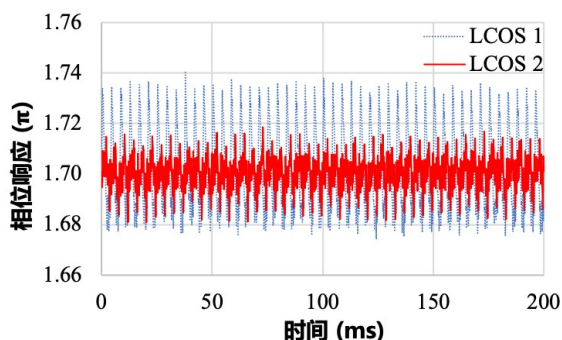


图 13 LCOS 器件中的瞬时相位抖动

Fig. 13 Phase flicker in LCOS devices

数字型 LCOS 器件<sup>[83]</sup>的像素电极只支持两个电压值,因此需要使用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)驱动方式实现多阶相位调

制。脉冲波形在时间上的离散性是引发相位瞬时抖动的另一个主要因素。一般情况下,数字型 LCOS 器件中的相位抖动相对模拟型 LCOS 器件要大。近些年来,不同研究团队对数字型 LCOS 器件中的相位抖动展开了深入的研究工作<sup>[84-88]</sup>,通过优化脉冲分布的方式有效地降低了数字型 LCOS 器件中的相位抖动。

#### 5.5 像素数目

LCOS 器件上的像素数目直接决定了 WSS 模组中可以支持的总端口数(集成 WSS 个数 $\times$ 单个 WSS 端口数)。虽然 WSS 模组可以采用多片 LCOS 器件,但这对光学系统的设计提出了挑战,同时也将增大 WSS 模组体积。目前,高端口 WSS 模组中普遍采用 2k 分辨率<sup>[89-90]</sup>的 LCOS 器件,实现接近 80 个总端口数。随着信息显示系统向 4k 分辨率演进,预期 4k 分辨率的 LCOS 器件<sup>[91-92]</sup>也将 WSS 中推广应用。JD2124 LCOS 器件<sup>[92-93]</sup>具有 3 840 $\times$ 2 400 分辨率,是目前公开报道中唯一一款成功在 WSS 系统中实现应用的 4k LCOS 器件,它成功集成了 24 个 1 $\times$ 12 WSS<sup>[32-33]</sup>。

#### 5.6 可靠性

在 WSS 系统中的 LCOS 器件往往会被加热至 45 摄氏度甚至更高的工作温度,以此降低 WSS 模组中温控系统的功耗。而 WSS 系统一旦被部署至光纤通信主干网中,其使用寿命一般要求在 10 年以上。同时,WSS 部署环境的湿度、气压等差别相对较大。因此,通信应用对 LCOS 器件的可靠性提出了更高的要求。面向通信应用的 LCOS 器件需要从器件结构、材料选型等多方面进行优化,满足通信系统对可靠性的苛刻要求。

#### 5.7 全息光场调控

与全息显示应用相同,基于 LCOS 技术的 WSS 系统也可以运用全息相位图优化技术提升性能,主要表现在衍射效率的提升(即插入损耗的降低)和串扰的抑制,以及 WSS 能量平衡(即衰减)功能的实现。

但是,LCOS 光开关系统对全息图及其重建光场质量的评价侧重点与传统信息显示系统中较大的区别。传统信息显示系统中的全息相位图需要将一束入射激光衍射至空间中多个

方向,形成一幅二维或者三维的图像;LCOS光开关中的全息相位图则需要将入射光束的能量集中衍射至某一个目标方向,并尽可能降低衍射至非目标方向上的能量,以此实现低插损和高消光比。面向传统信息显示应用的全息图优化算法一般基于Gerchberg-Saxton(GS)迭代<sup>[94]</sup>,在LCOS光开关中进行应用需要对迭代流程进行优化。虽然经过GS优化的全息图可以从一定程度上有效降低WSS中的串扰<sup>[95-96]</sup>,但是该迭代过程存在一定随机性,在WSS中应用存在一定的局限性。

目前,仅有少量面向WSS应用的全息相位图优化算法被公开。干涉相消<sup>[97-98]</sup>是其中一种方法。由于LCOS器件中的边缘场效应,器件实际显示的全息相位图与理论设计的理想全息光栅之间存在一定的差异,致使一部分入射能量被衍射至 $m \neq 1$ 的衍射级次,进而在WSS中引起串扰。如图14(a)所示,在一个理想闪耀光栅全息图上添加一个正弦函数全息图分量,并调整该正弦函数分量的周期、振幅以及其和理想闪耀光栅之间在空间上的相对相位位移,可以使由该正弦函数引发的衍射级次与闪耀光栅的高阶衍射级次之间形成相消干涉,进而达到降低串扰的目的。如图14(a)所示,添加过正弦函数的实际加载全息图在空间形貌上与理想的闪耀光栅仅存在非常细微的差别。但是在图14(b)中所示远场光场分布中可以看出,闪耀光栅的+2衍射级次能量被降低 $>10$  dB,达到了抑制串扰的目的。在此基础上,进一步添加不同周期的正弦函数分量可以抑制其他衍射级次的能量。

除了光栅类的全息相位图,LCOS器件还可以显示更加复杂的全息相位图,实现复杂光场调控。在基于波阵面编码(wavefront encoding)原理<sup>[39,99-101]</sup>的LCOS光开关中,光学系统设计和全息光场调控相结合,实现了对串扰的抑制。在该类LCOS光开关系统中,光学系统设计中故意引入了一定的已知像差,LCOS器件上显示的全息相位图除了实现波束偏转外,还具有像差补偿功能。因此,只有目标衍射级次可以高效地耦合进目标端口,而 $m \neq 1$ 高阶衍射级次在光纤端口平面均存在不同程度的相差,光纤耦合效率较低,进而达到了串扰抑制的目的。

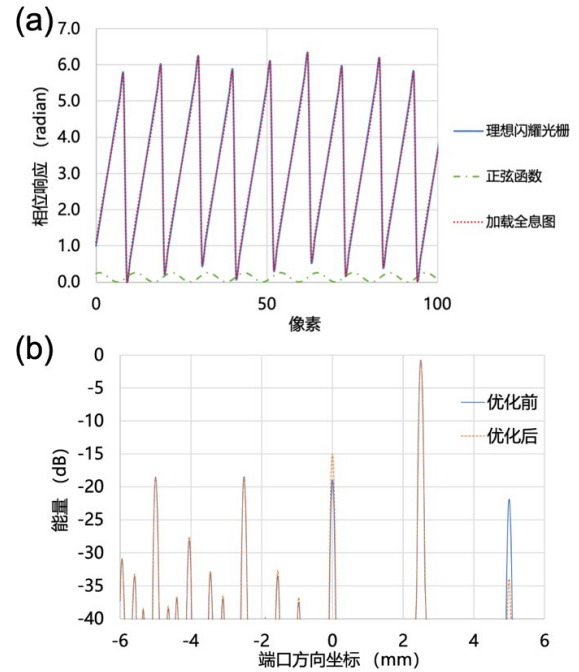


图14 (a)干涉相消全息图优化方法;(b)对应的光场分布

Fig. 14 (a) Phase hologram optimisation based on destructive interference; (b) Light field distribution at fibre port plane.

另外,由于高阶衍射级次的出现位置存在一定规律,通过改变光纤阵列的空间分布可以从一定程度上降低高阶衍射带来的串扰。

当WSS需要将一个WDM波长信道从一个端口切换至另一个端口时,LCOS器件上显示的全息相位图需要被更新。在这个全息相位图更新过程中,用户没有能力控制LCOS器件上显示的瞬时全息位图。而这些瞬时相位图会引发WSS瞬态串扰,影响网络传输质量。对瞬态串扰的抑制也是LCOS WSS中特有的技术难点。有研究表明,通过添加中间态全息相位图可以从一定程度上抑制WSS中的瞬态串扰<sup>[102-103]</sup>。另外,上文提及的波阵面编码方案也可以从一定程度上抑制瞬态串扰<sup>[104]</sup>。

## 6 结论

LCOS技术作为WSS/ROADM系统的主要元器件已经成为了全光通信网络的核心技术。目前,WSS也是纯相位型LCOS器件的主要应用

场景。但是,全光通信网络对 LCOS 器件性能、可靠性和全系空间光场调控质量都提出了苛刻的要求。这给 WSS 系统的设计,LCOS 器件的开发和使用都提出了一系列特殊的技术挑战。随着全光通信网络向更多维度、更高传输速率发展,对 WSS 端口数目、光学性能的要求也将越来越

越高。面向未来全光网络发展需求,本文中介绍的 WSS 和 LCOS 的各个关键技术环节上都迫切需要技术突破。本文期望通过对这些关键技术环节的介绍,加深广大读者对该领域的认知,达到推动该领域进一步发展的目的。

#### 参考文献:

- [1] FRISKEN S, POOLE S B, BAXTER G W. Wavelength-selective reconfiguration in transparent agile optical networks [J]. *Proc. IEEE*, 2012, 100(5): 1056-1064.
- [2] COLBOURNE P D, COLLINGS B. ROADM switching technologies [C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2011: 1-3.
- [3] GRINGERI S, BASCH B, SHUKLA V, *et al.* Flexible architectures for optical transport nodes and networks [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2010, 48(7): 40-50.
- [4] FEUER M D, KILPER D C, WOODWARD S L. ROADMs and their system applications [M]//KAMINOW I P, LI T Y, WILLNER A E. *Optical Fiber Telecommunications V B*. Amsterdam: Elsevier, 2008: 293-343.
- [5] YOO S J B, YIN Y W, WEN K. Intra and inter datacenter networking: the role of optical packet switching and flexible bandwidth optical networking [C]//2012 16th International Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM). Colchester, UK: IEEE, 2012: 1-6.
- [6] ZHANG C L, LI J J, WANG H Q, *et al.* Evaluation of dynamic optical service restoration on a large-scale ROADM mesh network [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2019, 57(4): 138-143.
- [7] SHE Q Y, ZHANG Q, RUNDBERGET K. CAPEX benefits of colorless directionless ROADM in WDM transport networks [C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2013: 1-3.
- [8] KISHORE BSAI, GANESAN P, SANDESHA K, *et al.* CAPEX minimization through node degree reduction in a Colorless and Directionless ROADM architecture for flexible optical networks [J]. *Opt. Switch. Netw.*, 2010, 7(4): 141-152.
- [9] BERNHEY R S, KANAAN M. ROADM deployment, challenges, and applications [C]//2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2007: 1-3.
- [10] BAXTER G, FRISKEN S, ABAKOUMOV D, *et al.* Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements [C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2006: 3.
- [11] STRASSER T A, WAGENER J L. Wavelength-selective switches for ROADM applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2010, 16(5), 1150-1157.
- [12] MAROM D M, NEILSON D T, GREYWALL D S, *et al.* Wavelength-selective  $1 \times K$  switches using free-space optics and MEMS micromirrors: theory, design, and implementation [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2005, 23(4): 1620-1630.
- [13] LAZAREV G, CHEN P J, STRAUSS J, *et al.* Beyond the display: phase-only liquid crystal on Silicon devices and their applications in photonics [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(11): 16206-16249.
- [14] ZHANG Z X, YOU Z, CHU D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light Sci. Appl.*, 2014, 3(10): e213.
- [15] KELLY J. Application of liquid crystal technology to telecommunication devices [C]//2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2007: 1-7.

- [16] MAROM D M, NEILSON D T, GREYWALL D S, *et al.* Wavelength-selective  $1 \times 4$  switch for 128 WDM channels at 50 GHz spacing [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2002: FB7.
- [17] International Telecommunication Union. ITU. G. 694.1: spectral grids for wdm applications: DWDM frequency grid [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>.
- [18] LI Y, GRABE T, LACHMAYER R. Investigation on RGB laser LCoS high-resolution headlamps [C]//Proceedings of DGaO-Proceedings 2019. Bremen, Germany: DGaO, 2019: 1-2.
- [19] 姜丽, 范伟, 代永平, 等. 混合扭曲向列相模式的液晶盒参数对硅基液晶显示器的影响[J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 311-314.  
JIANG L, FAN W, DAI Y P, *et al.* Influence of MTN-LCD parameters to liquid crystal on silicon display device [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2011, 26(3): 311-314. (in Chinese)
- [20] CHEN H M P, YANG J P, YEN H T, *et al.* Pursuing high quality phase-only liquid crystal on silicon (LCoS) devices [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(11): 2323.
- [21] WANG M, ZONG L J, MAO L, *et al.* LCoS SLM study and its application in wavelength selective switch [J]. *Photonics*, 2017, 4(2): 22.
- [22] BUCKLEY E. Holographic laser projection [J]. *J. Disp. Technol.*, 2011, 7(3): 135-140.
- [23] HUANG Y G, HE Z Q, WU S T. Fast-response liquid crystal phase modulators for augmented reality displays [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(26): 32757-32766.
- [24] SHIMIZU J A. 40. 1: *Invited paper*: scrolling color LCOS for HDTV rear projection [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2001, 32(1): 1072-1075.
- [25] ZHANG Z C, JEZIORSKA-CHAPMAN A M, COLLINGS N, *et al.* High quality assembly of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *J. Disp. Technol.*, 2011, 7(3): 120-126.
- [26] ROBINSON S D. How ROADM technology is simplifying network management [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, California, United States: OSA, 2005.
- [27] MAGALHÃES E, OLIVEIRA J, CARVALHO H, *et al.* Global ROADM-based spectrum equalizer in SDN architecture for QoT optimization at DWDM networks [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2014: 1-3.
- [28] ROBERTSON B, YANG H N, REDMOND M M, *et al.* Demonstration of multi-casting in a  $1 \times 9$  LCOS wavelength selective switch [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2014, 32(3): 402-410.
- [29] Lumentum Operations LLC. TrueFlex Twin high port count wavelength selective switch (Twin WSS) [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. <https://www.lumentum.com/en/products/trueflex-twin-high-port-count-wavelength-selective-switch-twin-wss>.
- [30] FINISAR. Dual Wavelength Selective Switch (WSS) [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. [https://finisarwss.com/wp-content/uploads/2020/07/FinisarWSS\\_Dual\\_Wavelength\\_Selective\\_Switch\\_ProductBrief\\_Jul2020.pdf](https://finisarwss.com/wp-content/uploads/2020/07/FinisarWSS_Dual_Wavelength_Selective_Switch_ProductBrief_Jul2020.pdf).
- [31] AustraliaFinisar. Finisar australia releases world's first quad  $4 \times 1 \times 9$  wavelength selective switch with flexgrid® technology at OFC 2020 [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/03/11/1998670/0/en/Finisar-Australia-Releases-World-s-First-Quad-4x1x9-Wavelength-Selective-Switch-with-Flexgrid-Technology-at-OFC-2020.html>.
- [32] YANG H N, WILKINSON P, ROBERTSON B, *et al.* 24  $[1 \times 12]$  wavelength selective switches integrated on a single 4k LCoS device [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2021, 39(4): 1033-1039.
- [33] WILKINSON P, ROBERTSON B, GILTRAP S, *et al.* 24  $1 \times 12$  wavelength-selective switches using a 312-Port 3D waveguide and a single 4k LCoS [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2020: 1-3.
- [34] FRISKEN S, BAXTER G, ABAKOUMOV D, *et al.* Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS technology [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2011: 1-3.

- [35] LORD A, ZHOU Y R, JENSEN R, *et al.* Evolution from wavelength-switched to flex-grid optical networks [M]//LÓPEZ V, VELASCO L. Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control. Cham: Springer, 2016: 7-30.
- [36] WRIGHT P, LORD A, VELASCO L. The network capacity benefits of Flexgrid [C]//17th International Conference on Optical Networking Design and Modeling (ONDM). Brest, France: IEEE, 2013: 7-12.
- [37] LORD A, WRIGHT P, MITRA A. Core networks in the flexgrid era [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2015, 33(5): 1126-1135.
- [38] MOREA A, RENAUDIER J, ZAMI T, *et al.* Throughput comparison between 50-GHz and 37.5-GHz grid transparent networks [J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2015, 7(2): A293-A300.
- [39] ROBERTSON B, ZHANG Z C, YANG H N, *et al.* Reduction of crosstalk in a colourless multicasting LCOS-based wavelength selective switch by the application of wavefront encoding [C]//Proceedings Volume 8284, Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems. San Francisco, California, United States: SPIE, 2012: 82840S.
- [40] EVANS P, BAXTER G, ZHOU H, *et al.* LCOS-based WSS with true integrated channel monitor for signal quality monitoring applications in ROADMs [C]//2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 1-3.
- [41] FILER M, TIBULEAC S. N-degree ROADM architecture comparison: broadcast-and-select versus route-and-select in 120 Gb/s DP-QPSK transmission systems [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2014: 1-3.
- [42] ZONG L J, ZHAO H, FENG Z Y, *et al.* 8×8 Flexible wavelength cross-connect for CDC ROADM application [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(24): 2603-2606.
- [43] FEUER M D, WOODWARD S L. Advanced ROADM networks [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2012: 1-3.
- [44] COLLINGS B C. Advanced ROADM technologies and architectures [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015: 1-3.
- [45] LI Y C, GAO L, SHEN G X, *et al.* Impact of ROADM colorless, directionless, and contentionless (CDC) features on optical network performance [J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2012, 4(11): B58-B67.
- [46] WAY W I. Next generation ROADM architectures [C]//Asia Communications and Photonics Conference. Guangzhou, China: OSA, 2012: ASIG. 3.
- [47] ZONG L J, ZHAO H, FENG Z Y, *et al.* Demonstration of ultra-compact contentionless-ROADM based on flexible wavelength router [C]//the European Conference on Optical Communication (ECOC). Cannes, France: IEEE, 2014: 1-3.
- [48] ROORDA P, COLLINGS B. Evolution to colorless and directionless ROADM architectures [C]//2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 1-3.
- [49] HU W S, ZENG Q J. Multicasting optical cross connects employing splitter-and-delivery switch [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1998, 10(7): 970-972.
- [50] YANG H N, ROBERTSON B, WILKINSON P, *et al.* Low-cost CDC ROADM architecture based on stacked wavelength selective switches [J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2017, 9(5): 375-384.
- [51] YANG H N, ROBERTSON B, WILKINSON P, *et al.* Stacked wavelength selective switch design for low-cost CDC ROADMs [C]//21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS). Niigata, Japan: IEEE, 2016: 1-3.
- [52] PASCAR L, KARUBI R, FRENKEL B, *et al.* Port-reconfigurable, wavelength-selective switch array for colorless/directionless/contentionless optical add/drop multiplexing [C]//International Conference on Photonics in Switching (PS). Florence, Italy: IEEE, 2015: 16-18.
- [53] COLBOURNE P D, MCLAUGHLIN S, MURLEY C, *et al.* Contentionless twin 8×24 WSS with low insertion loss [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California, United States: OSA, 2018:

- Th4A. 1.
- [54] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 3rd ed. Englewood: Roberts & Company Publishers, 2005.
- [55] FAN CHIANG K H, WU S T, CHEN S H. Fringing field effect of the liquid-crystal-on-silicon devices [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, 41(7R): 4577-4585.
- [56] HÄLLSTIG E, STIGWALL J, MARTIN T, *et al.* Fringing fields in a liquid crystal spatial light modulator for beam steering [J]. *J. Mod. Opt.*, 2004, 51(8): 1233-1247.
- [57] 侯文义, 储繁, 田莉兰, 等. 一种采用介电突起消除边缘场效应的 LCoS [J]. *液晶与显示*, 2020, 35(1): 12-18.  
HOU W Y, CHU F, TIAN L L, *et al.* Eliminating fringe field effect using dielectric protrusions in LCoS [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2020, 35(1): 12-18. (in Chinese)
- [58] SUZUKI K, SENO K, IKUMA Y. Application of waveguide/free-space optics hybrid to ROADM device [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2017, 35(4): 596-606.
- [59] SUZUKI K, IKUMA Y, HASHIMOTO E, *et al.* Ultra-high port count wavelength selective switch employing waveguide-based I/O frontend [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015: 1-3.
- [60] YANG H N, ROBERTSON B, WILKINSON P, *et al.* Small phase pattern 2D beam steering and a single LCOS design of  $40 \times 12$  stacked wavelength selective switches [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(11): 12240-12253.
- [61] YANGZHANG X H, AREF V, LE S T, *et al.* 400 Gbps dual-polarisation non-linear frequency-division multiplexed transmission with b-modulation [C]//Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication. Rome, Italy: IEEE, 2018: 1-3.
- [62] FRISKEN S J. Polarization diverse wavelength selective switch: US, 9654848 [P]. 2017-05-16.
- [63] STEWART L, BAXTER G W. Systems and methods for reducing off-axis optical aberrations in wavelength dispersed devices: US, 9046657 [P]. 2015-06-02.
- [64] ZAMI T, LAVIGNE B, BALMEFREZOL E. Crosstalk analysis applied to wavelength selective switches [C]//Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2006: 3.
- [65] YANG H N, DOLAN P, ROBERTSON B, *et al.* Crosstalk spectrum optimisation for stacked wavelength selective switches based on 2D beam steering [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California, United States: OSA, 2018: Th1J. 2.
- [66] PULIKKASERIL C, STEWART L A, ROELEN S M A F, *et al.* Spectral modeling of channel band shapes in wavelength selective switches [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(9): 8458-8470.
- [67] YANG H N, WANG R, WRIGHT P, *et al.* Impact of WSS passband narrowing effect on the capacity of the flexible-spectrum networks [C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California United States: OSA, 2017: W11. 5.
- [68] TIBULEAC S, FILER M. Transmission impairments in DWDM networks with reconfigurable optical add-drop multiplexers [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2010, 28(4): 557-568.
- [69] RAHMAN T, NAPOLI A, RAFIQUE D, *et al.* On the mitigation of optical filtering penalties originating from ROADM cascade [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2014, 26(2): 154-157.
- [70] YANG H N, WRIGHT P, ROBERTSON B, *et al.* Impact of WSS filtering penalty on the capacity of elastic WDM ring optical networks [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Diego, California United States: OSA, 2018: Th2A. 43.
- [71] PAPADIMITRIOU G I, PAPA ZOGLOU C, POMPORTSIS A S. Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2003, 21(2): 384-405.
- [72] YAO S, MUKHERJEE B, DIXIT S. Advances in photonic packet switching: an overview [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2000, 38(2): 84-94.
- [73] YANG H, CHU D P. Digital phase-only liquid crystal on silicon device with enhanced optical efficiency [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(8): 2445-2459.



- [74] FRISKEN S J, WU Q H. High reflectivity LCOS device: USA, 10302995 [P]. 2019-05-28.
- [75] BENICEWICZ B C, JOHNSON J F, SHAW M T. Viscosity behavior of liquid crystals [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1981, 65(1/2): 111-131.
- [76] LINGEL C, HAIST T, OSTEN W. Optimizing the diffraction efficiency of SLM-based holography with respect to the fringing field effect [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(28): 6877-6883.
- [77] APTER B, EFRON U, BAHAT-TREIDEL E. On the fringing-field effect in liquid-crystal beam-steering devices [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(1): 11-19.
- [78] GAUZA S, LI J, WU S T, *et al.* High birefringence and high resistivity isothiocyanate-based nematic liquid crystal mixtures [J]. *Liq. Cryst.*, 2005, 32(8): 1077-1085.
- [79] NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E, KĘDZIERSKI J, RASZEWSKI Z, *et al.* High birefringence liquid crystal mixtures for electro-optical devices [J]. *Opt. Appl.*, 2012, 42(1): 167-180.
- [80] DĄBROWSKI R, KULA P, HERMAN J. High birefringence liquid crystals [J]. *Crystals*, 2013, 3(3): 443-482.
- [81] YANG H N, CHU D P. Phase flicker in liquid crystal on silicon devices [J]. *J. Phys. Photonics*, 2020, 2(3): 032001.
- [82] ZHANG Z C, XU H, YANG H N, *et al.* Temperature-dependent optical response of phase-only nematic liquid crystal on silicon devices [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2016, 14(11): 111601.
- [83] MARTÍNEZ F J, MÁRQUEZ A, GALLEGO S, *et al.* Averaged Stokes polarimetry applied to evaluate retardance and flicker in PA-LCoS devices [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(12): 15064-15074.
- [84] YANG H, CHU D P. Phase flicker optimisation in digital liquid crystal on silicon devices [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(17): 24556-24567.
- [85] TONG Y, PIVNENKO M, CHU D P. Improvements of phase linearity and phase flicker of phase-only LCoS devices for holographic applications [J]. *Appl. Opt.*, 2019, 58(34): G248-G255.
- [86] TONG Y, PIVNENKO M, CHU D P. Implementation of 10-bit phase modulation for phase-only LCOS devices using deep learning [J]. *Adv. Devices Instrum.*, 2020, 2020: 9515747.
- [87] YANG J P, WU F Y, WANG P S, *et al.* Characterization of the spatially anamorphic phenomenon and temporal fluctuations in high-speed, ultra-high pixels-per-inch liquid crystal on silicon phase modulator [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(22): 32168-32183.
- [88] 代永平,李铭,李志刚. 位权重于电压参数灰度法在 LCOS 显示中的应用设计 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(7): 548-552.
- DAI Y P, LI M, LI Z G. Design for application of LCOS display with scaling method binary weighted by voltage-parameters [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(7): 548-552. (in Chinese)
- [89] Jasper Display Corp. Production Specification of JD2552 (SP55 Microdisplay Die in Wafer Form) [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. [https://www.jasperdisplay.com/portfolio-items/products\\_wafer-2k\\_jd2552\\_sp55/](https://www.jasperdisplay.com/portfolio-items/products_wafer-2k_jd2552_sp55/).
- [90] HOLOEYE Photonics AG. LETO phase only spatial light modulator (Reflective) [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. <https://holoeYE.com/spatial-light-modulators/leto-phase-only-spatial-light-modulator/>.
- [91] YANG J P, CHEN H M P, HUANG Y G, *et al.* 66-3: Submillisecond-response 10-megapixel 4K2K LCoS for microdisplay and spatial light modulator [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2019, 50(1): 933-936.
- [92] Jasper Display Corp. Product Specification of JD2704 (Q4K70 Microdisplay Die in Wafer Form) [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. [https://www.jasperdisplay.com/portfolio-items/products\\_wafer-4k\\_jd2704-q4k70/](https://www.jasperdisplay.com/portfolio-items/products_wafer-4k_jd2704-q4k70/).
- [93] LtdCamOptics. LCOS Assembly [EB/OL]. (2021-03-15)[2021-03-15]. <https://www.camoptics.co.uk>.
- [94] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237-246.
- [95] GAO Y S, TAN Z W, CHEN X, *et al.* A hybrid algorithm for multi-beam steering of LCOS-based wavelength selective switch [J]. *IEEE Photonics J.*, 2020, 12(3): 7903011.
- [96] YANG H N, ROBERTSON B, CHU D P. Crosstalk reduction in holographic wavelength selective switches based on phase-only LCOS devices [C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, California United States: OSA, 2014: Th2A. 23.

- [97] NAKAJIMA M, NEMOTO N, YAMAGUCHI K, *et al.* Analysis and suppression of high-order diffractions in liquid-crystal-based spatial light modulator for photonic switch application [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, 56(9S): 09NC01.
- [98] FRISKEN S J, BAXTER G W, ZHOU H, *et al.* Optical calibration system and method: US, 7457547 [P]. 2008-11-25.
- [99] ROBERTSON B, YANG H N, REDMOND M M, *et al.* The use of wavefront encoding to reduce crosstalk in a multicasting fiber telecom switch [C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California, United States: OSA, 2012: OM2J. 6.
- [100] ROBERTSON B, ZHANG Z C, REDMOND M M, *et al.* Use of wavefront encoding in optical interconnects and fiber switches for cross talk mitigation [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(5): 659-668.
- [101] ROBERTSON B, ZHANG Z C, YANG H N, *et al.* Application of the fractional fourier transform to the design of LCOS based optical interconnects and fiber switches [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(12): 2212-2222.
- [102] YANG H, ROBERTSON B, YU D, *et al.* Origin of transient crosstalk and its reduction in phase-only LCOS wavelength selective switches [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2013, 31(23): 3822-3829.
- [103] YANG H, ROBERTSON B, CHU D P. Transient crosstalk in LCOS based WSS and a method to suppress the crosstalk levels [C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, California. United States: OSA, 2013: OW1C. 3.
- [104] YANG H N, CHU D P. Transient crosstalk in holographic optical switching based on wavefront encoding [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2020, 38(7): 1618-1624.



李昆(1983-),男,宁夏银川人,2012年于英国剑桥大学获得博士学位,多年

从事光电器件的研发和产业化工作。现为剑芯光电科技有限公司总经理,公司主要从事高分辨率 LCOS 器件的研发。E-mail: [kun.li@camoptics.co.uk](mailto:kun.li@camoptics.co.uk)



初大平(1961-),男,江苏南京人,教授,现任剑桥大学终身讲席教授、剑桥大学

先进光电子研究中心(CAPE)主任和光电器件与传感器研究中心主任,研究领域涵盖硅基液晶技术、全

光通信、全息三维信息显示等。E-mail: [dpc31@cam.ac.uk](mailto:dpc31@cam.ac.uk)

