

激光与光电子学进展

少模光纤强耦合通信系统中的关键器件综述

徐思聪, 周雯, 余建军*

复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 基于少模光纤的空分复用(SDM)技术是一种能将现有单模光纤通信系统的容量提高数十倍的关键技术,作为一种克服传统单模光纤通信系统容量瓶颈的有效手段,值得深入研究。本综述介绍了基于强耦合的少模光纤模分复用中的复用/解复用器、光纤放大器、少模光纤、光传输系统集成器件的关键技术及研究进展,介绍了部分较为经典的或是最新的强耦合少模光纤复用光传输系统的实验,并探讨了模分复用光传输系统的未来研究方向。

关键词 空分复用; 强耦合; 少模光纤; 模分复用器; 少模光纤放大器; 集成器件

中图分类号 TN913

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223112

Overview of Key Devices in Strong Coupling Communication Systems with Few-Mode Fibers

Xu Sicong, Zhou Wen, Yu Jianjun*

Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Ministry of Education,
Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Space division multiplexing (SDM) is a critical technology that can increase the capacity of existing single-mode fiber optic communication systems by tens of times. It is worth studying as an effective means to overcome the capacity bottleneck of traditional single-mode fiber optic communication systems. This overview introduces the key technologies and research progress of the multiplexer/demultiplexer, fiber amplifier, few-mode fiber, and optical transmission system integrated device in strong coupling communication systems with few-mode fibers. This overview also introduces some of the more classic or latest experiments in strong coupling communication systems with few-mode fibers, and discusses the future research directions of few-mode optical transmission system.

Key words space division multiplexing; strong coupling; few-mode fiber; mode division multiplexer; few-mode fiber amplifier; integrated device

1 引言

伴随着互联网流量的急剧增长,互联网技术日益发展,其承担大部分互联网流量传输,随着物联网、大数据与云存计算的发展,人们对通信网络的传输容量需求持续增加,这一需求持续推动着单模光纤通信技术的进步。自 1980 年以来,先后出现了时分复用(TDM)、波分复用(WDM)、偏分复用(PDM)等单模光纤通信技术,推动着传输网络容量以每年约 45% 的速度增长。

但是,传统的单模光纤的传输容量已经逼近理论非线性香农极限(100 Tbit/s)^[1],而随着下一代 6G 移

动通信业务的发展,人们进一步对通信网络的容量和速度提出了更高的要求。因此,人们急需发展新的大容量光传输技术,突破传输容量的限制^[2]。在信号的时间维度发展完备后,人们着手于拓展信号的空间维度。目前,作为下一代光纤通信系统的主要实现形式,空分复用(SDM)^[3]技术能够将光纤的传输容量提高至一个数量级以上,引起了全世界学者的广泛研究。

其中,基于多模光纤(MMF)或少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)系统^[4],将不同的信号以不同的模式传输,从而能够支持信号相对独立地在不同信道中传输,信号之间互不干扰,进而提升传输容量。然而,在多模光纤中,大量模式的存在导致模间色散现象,限

收稿日期: 2022-11-21; 修回日期: 2022-12-31; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1800905)、国家自然科学基金(62127802)

通信作者: *jianjun@fudan.edu.cn

制了多模光纤通信的长距离传输^[5]。相比于多模光纤,少模光纤中不同信号的模式具备正交性的特性,不同模式在少模光纤中能够相互独立传输,而互不影响,避免了模间色散对光纤传输的限制。同时,相比于传统的单模光纤,少模光纤的模分复用具有更大的非线性容量^[6]。综上,少模光纤通信系统具有插入损耗低、模间串扰小、传输效率高等特点,国内外学者们视其为当前发展长距离通信的最为可行的手段之一。根据输出端是否需要大规模多进多出(MIMO)均衡处理,少模光纤系统分为弱耦合与强耦合两种类型。弱耦合系统将每个线偏振(LP)模式独立传输,接收端仅需 2×2 或 4×4 MIMO DSP 均衡。而强耦合系统同时传输所有的 LP 系统,当模式数为 N 时,需要的 MIMO DSP 规模达到 $2N \times 2N$ 。然而,弱耦合系统存在较强的模间串扰现象^[7],对少模光纤的折射率提出较高要求,限制了模式复用极限,不适用于远距离通信传输^[8]。所以,本综述重点关注强耦合少模光纤系统。

本综述将介绍以下内容。第 2 章回顾并对比多种少模光纤中基于强耦合技术复用和解复用模式的模分复用器。第 3 章介绍强耦合技术下的光纤放大器。第 4 章介绍了强耦合技术中使用的少模光纤。第 5 章介绍了硅基电光调制和模分复用相结合的集成器件。第 6 章总结了近年来具有代表性的强耦合通信实验并介绍了我们团队在该领域的工作。第 7 章探讨了强耦合少模光纤的未来研究方向。

2 基于强耦合技术的模分复用/解复用器

1982 年 Berdagué 等^[9]最先提出了借助模式复用技术,在少模光纤中进行光纤的复用传输概念。为了研究利用少模光纤的不同空间模式传输多路信息,并在接收端分离信息的精准控制的关键技术,国内外学者致力于发展模分复用器。当前,根据工作原理,模分复用/解复用技术主要可分为 4 种类型,其中包括基于自由空间型模式复用/解复用技术^[10]、基于光子灯笼型模式复用/解复用技术^[11]、基于光波导型模式复用/解复用技术^[8]以及基于长周期光纤光栅型模式复用/解复用技术^[12]。在片上波导型的结构中,又包括多模干涉器、非对称定向耦合器、非对称 Y 分支、微环、光栅等用于模分复用的结构。在长距离模分复用系统中,由于系统存在的模式耦合损耗和模式相关损耗(MDL)会导致码间干扰,当模式相关损耗累计较大时,会对系统传输矩阵的正交性造成严重损伤,使得接收端均衡算法的性能急剧下降^[13]。因此,我们把模分复用/解复用器的插入损耗和模式相关损耗的大小作为衡量其优劣的重要参数。此外,能够支持的传输模式数、模分复用/解复用器的集成性能、系统的复杂程度等因素也是衡量一个模分复用/解复用器的重要参数。下面对几种不同类型的模分复用/解复用器进行介绍,在本章最

后对其性能进行总结。

2.1 基于自由空间型模分复用/解复用器

基于自由空间型模式复用/解复用器的设计基于傅里叶光学成像和模式的正交理论,一般主要由透镜、分光棱镜、相位片或空间光调制器等空间光学器件构成。多个模式通过正交叠加,最终实现模式复用的功能。基于自由空间型的模式复用器可分为两种结构,一种是采用相位盘作为模式转换的结构^[14],而另一种是基于硅基液晶技术的空间光调制器的模分复用器^[15]。

采用相位盘作为模式转换的经典结构如图 1 所示,2011 年,Ryf 团队^[16]用一根 2 m 长的少模光纤连接了如图 1 所示的自由空间型模分复用器和解复用器,在 LP_{01} 、 LP_{11a} 和 LP_{11b} 三种模式下,分别测量出了 8.3 dB、10.6 dB 和 9.0 dB 的耦合损耗。对于这三种空间模式,该实验理论最小耦合损耗为 5.5 dB。对于两种 LP_{11} 模式,复用/解复用器引起的串扰都低于 -28 dB。结果证明了该模分复用器具有高模式选择性。

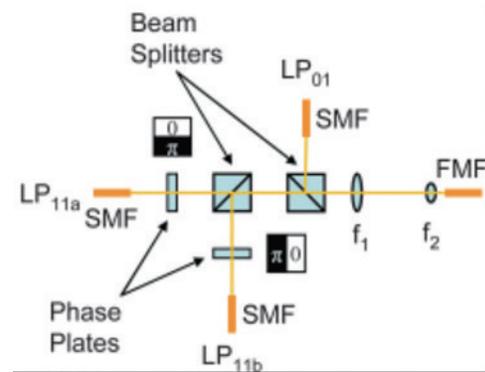


图 1 自由空间光学法实现模式复用/解复用器^[16]

Fig. 1 Free-space optics method for mode multiplexers/demultiplexers^[16]

自由空间耦合优点是波长不相关、容易实现,但其耦合损耗较大,且集成度低、成本较高。

在基于自由空间型模分复用器研究方面,2016 年,华中科技大学研究组提出了一种基于硅基液晶(LCOS)空间光调制器的具有强鲁棒性的模分复用器^[8],其物理实现如图 2 所示。少模光纤中的 LP 模式作为模分复用的传输信道,其特性使得单模光纤的光束空间中原本等相位面分布的光场改变至匹配光纤中对应的高阶模式,因此,在耦合进少模光纤时,就可以选择激励对应的高阶模式。利用该硅基液晶的模分复用器结构激励少模光纤中 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的光场,可以获得超 25 dB 的模式隔离度。除此之外,鲁棒性作为该设计的另一显著优势,使得该模分复用器结构对入射端的单模光纤、LCOS 和接收端少模光纤在纵向的位置偏差有着更高的容忍度,从而降低了其调节和维护的难度。

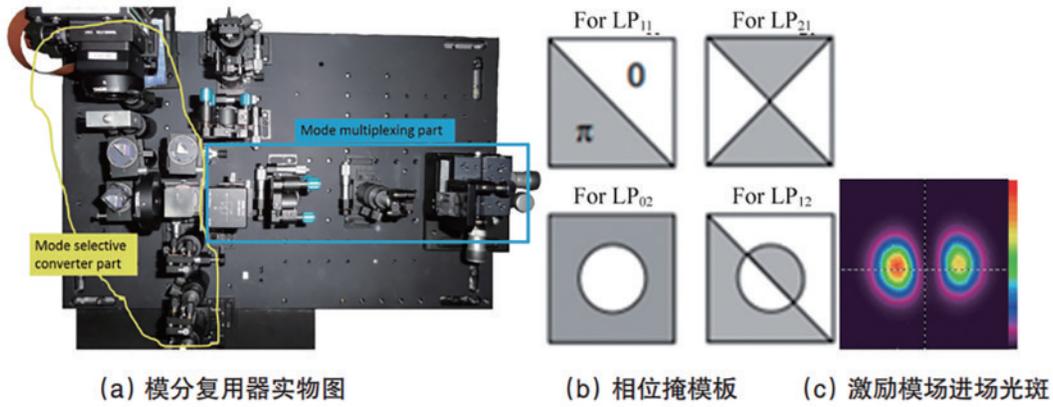


图 2 基于硅基液晶的模式复用器^[8]

Fig. 2 LCOS-based mode multiplexers/demultiplexers^[8]

在空间光学法中,空间光耦合器通过多组如图 1 所示的相位片和透镜组合,将单模光纤中的多个模式耦合进少模光纤,目前已有支持 6-LP 模式的商用器件^[17]。空间光学法能够实现选择性的高维度模式复用,但分立器件结构复杂、集成度较低。

2.2 基于光子灯笼型模式复用/解复用器

基于光纤绝热拉锥的光子灯笼是新发展起来的模式复用器,通过光波导法中相位匹配以实现模式耦合来进行模式的选择性激励,可以通过光纤融锥结构将若干个单模纤芯融合成一个超模纤芯实现模式复用,外面低折射率的毛细管变成新的多模光纤包层^[11]。在这个过程中,光子灯笼将 N 个单模光纤的模式耦合到一根能支持 N 个模式的少模光纤中。如图 3 所示,其中单模纤芯与空间模式之间的对应关系满足正交酉矩阵要求,可采用 MIMO 均衡处理方法求逆变换还原^[19],目前已有能够支持 2~4 组 LP 模式复用/解复用的商用光子灯笼器件^[20]。

2015 年,贝尔实验室的 Chen 等^[21]提出了一种利用激光刻蚀三维波导制作光子灯笼型模式耦合器的设计,其设计的光子灯笼模式耦合器耦合区域的折射率分布可以根据需求实现精准控制,具有很高的可重复性和稳定性。但与此同时,其有限的折射率变化范围

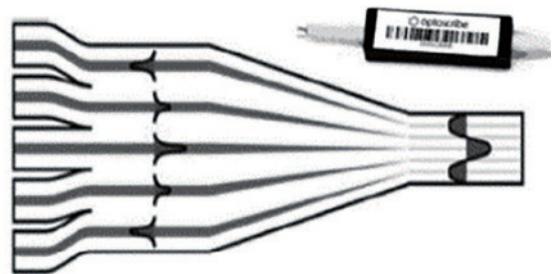


图 3 光子灯笼复用/解复用^[18]

Fig. 3 Photonic lantern multiplexers/demultiplexer^[18]

和难以增加的复用模式数目也成为了该耦合器当前发展的主要限制因素。基于光子灯笼的模式复用器和单模光纤器件具有良好兼容性,它们的耦合损耗低至 2 dB,模式相关损耗(MDL)低(最佳结果为 1 dB),有希望大量投入模式复用光传输系统使用。

2017 年,埃因霍温理工大学的 van Weerdenburg 等^[22]在支持 12 个模式的 650 km 少模光纤上(图 4),成功传输了 6 模式×2 偏振态的 138 Tbit/s 16-QAM 信号,其中采用具有低插入和模式相关损耗的光子灯笼来激发少模光纤中的 6 个空间模。这是通过加载 120 个波长信道,以 120 Gbit/s 的速度映射到 16 个正

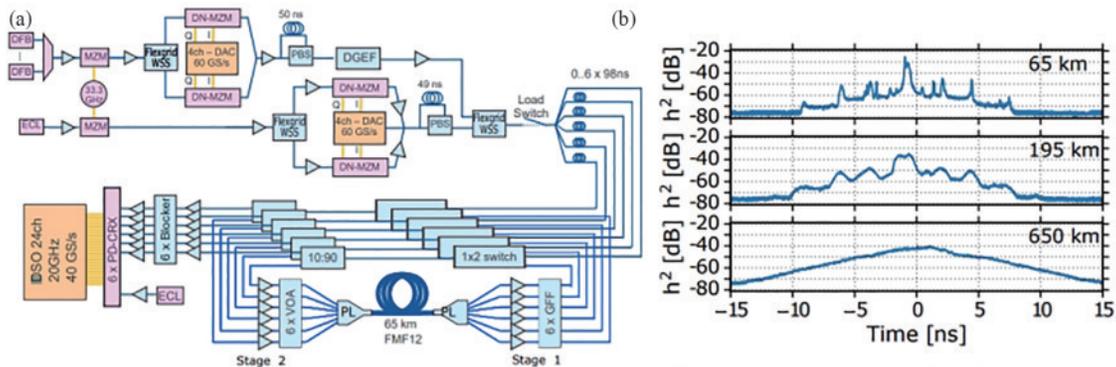


图 4 实验装置与冲击响应图^[22]。(a)相干 12×12 MIMO 传输实验装置图;(b)传输 65 km、195 km 和 650 km 冲击响应图

Fig. 4 Diagrams of the experimental setup and the impulse response^[22]. (a) Experimental setup for coherent 12×12 MIMO transmission; (b) impulse response after 65 km, 195 km, and 650 km transmission

交振幅调制(QAM)信号,在 2 个极化和 6 个空间模式上复用而实现的。

基于光子灯笼型模式复用/解复用器具有插入损耗低、模式隔离度高等优点,并且能够与波分复用等复用系统进行高效结合。但是其无法随意更改模式的种类和数目的缺点,导致它并不适用于需要随时更换模式的种类和数目的应用场合。

2.3 基于光波导型模式复用/解复用器

基于光波导型模式复用/解复用器利用不同的波导结构之间的相互作用,将其组合,使每个模式之间产生匹配的折射率,以此来完成模式的转换及复用的功能。光波导型主要分为多模干涉、绝热耦合、非对称 Y 结、非对称定向耦合和反向耦合光栅几种结构^[10]。光波导型模式复用解复用器优点是集成度高、插入损耗低、体积小、结构紧凑等,并且能与其他光电芯片集成互联,最终实现片上的模分复用系统。其缺点在于波导宽度远小于光纤的芯径,导致从光波导型模式复用器传输的光信号进入光纤链路时有较大的光功率损耗,目前的制造工艺也限制了可复用的模式数量。

在基于光波导型模式复用器中,定向耦合器是一类通过多个单模光纤与少模光纤的并行结构设计,以包层模式定向耦合的方法实现一芯对应一模式的模式复用/解复用的耦合器^[23]。目前采用较多的结构是非对称定向耦合(ADC)型结构,它能通过相位匹配来转换不同波导的模式,相位匹配即单模波导中基模的有效折射率与多模波导中高阶模的有效折射率相等,此时基模能变成高阶模。2015 年,Wang 等^[24]针对已有的锥状渐变 ADC 型结构,进一步提出了逆向双锥渐变 ADC 型模式复用/解复用器,如图 5 所示。该 ADC 复用器牺牲了器件尺寸换来了极大的应用带宽,其在 1.46~1.64 μm 之间的信道串扰小于 -10 dB。与此同时,该结构具有大于 120 μm 的耦合长度以满足较大应用带宽的需求。

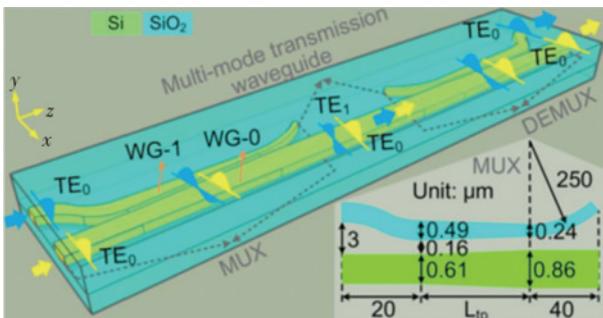


图 5 逆向双锥渐变 ADC 型模式复用/解复用器^[24]

Fig. 5 Mode multiplexers/ demultiplexers based on mode-evolution counter-tapered couplers^[24]

2.4 基于长周期光纤光栅型模式复用/解复用器

基于长周期光纤光栅型模式复用/解复用技术利用了长周期光纤布拉格光栅(LPFBG)和光纤耦合器,

分别实现模式转换和模式复用的功能。其基本结构如图 6 所示。该模式复用/解复用器为全光纤结构,能够直接嵌入到少模光纤链路中,从而大大降低了整个通信传输链路的复杂程度。该复用/解复用器的另一优势是具有较高的模式选择性和较低的插入损耗。

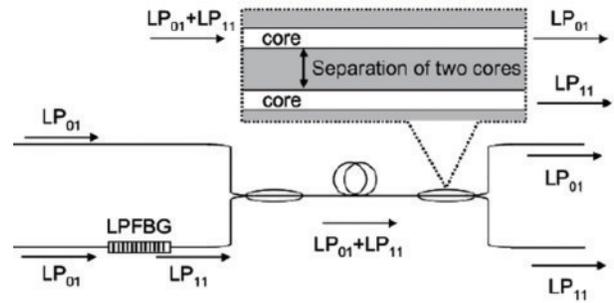


图 6 长周期光纤光栅型模式复用器

Fig. 6 Mode multiplexers/ demultiplexers based on LPFBG

2015 年贝尔实验室的 Chang 等^[25]设计了一种全光纤型的模式复用器,利用 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的 2 个简并模式,实现了 3 路 32 WDM×120 Gbit/s 脉冲宽度调制-正交相移键控(PDM-QPSK)信号的复用传输。

2021 年,Kuo 等^[26]通过图 7 的二维(2D)子波光栅耦合器实现了硅片对芯片的少模光纤高速传输。该光栅耦合器由 40×40 个浅蚀孔组成,覆盖 22 μm×22 μm 的面积,孔径为 0.322 μm。考虑到 68 个 LP₀₁ 通道(34 个波长×2 个偏振)和 30 个 LP₁₁ 通道(15 个波长×2 个偏振),总少模光纤链路传输能力达到了 4.36 Tbit/s。LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式支持的最大波长通道数分别为 34 和 15。2 个 LP₀₁ 模式支持更多的波长通道是由于二维光栅耦合器有更宽的波长操作带宽。通过发射一个放大的自发辐射(ASE)并通过光学频谱分析仪(OSA)测量,LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的 3 dB 带宽分别为 23.2 dB 和 21.6 dB。对于两个极化中的 68 个 LP₀₁ 和 30 个 LP₁₁ 通道,实现了 4.36 Tbit/s 的总 FMF 容量。

文献[27]提出采用模式选择耦合器作为全光纤复用器,在接收端使用 6×6MIMO 数字信号处理,实现了三种空间模式的 120 Gbit/s PDM-QPSK 信号在 4 模光纤模分复用传输 15 km。图 8(a)所示为由单个连续的模式选择耦合器组成的模式复用器。每个模式选择耦合器分别将单模光纤的 LP₀₁ 模式耦合到少模光纤的 LP₁₁、LP₂₁ 或者 LP₀₂ 模式。在图 8(b)所示的模式解复用器中,模式选择耦合器的顺序与模式复用器相反。虽然模式选择耦合器的耦合效率依赖于非对称模的空间波瓣取向,如 LP₁₁ 和 LP₂₁,但波瓣取向并不沿光纤保持。为了调节光纤的波瓣方向,在实验中使用了典型的多匝光纤偏振控制器作为波瓣方向控制器。波瓣方向控制器改变了一些瓣的方向,但它不能完全控制模式的状态。通过对接收信号进行监测,发现调整波瓣方向控制器可以使误码率最小化。

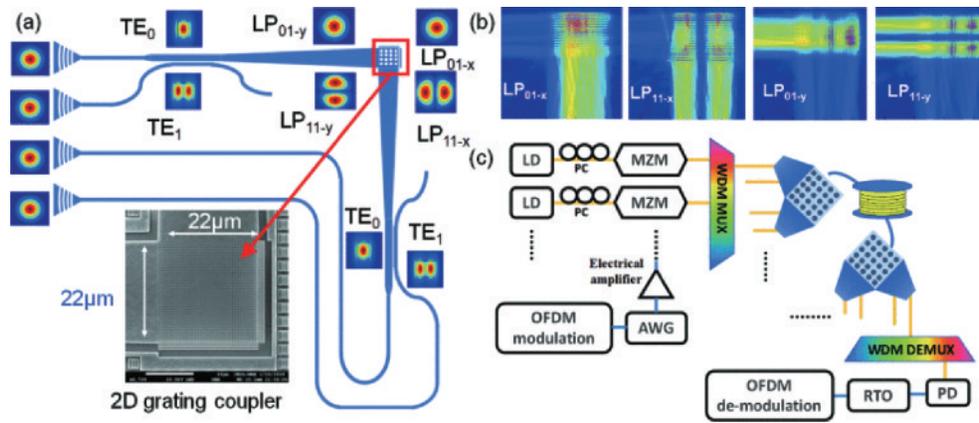


图7 二维子波光栅耦合器^[26]。(a) 二维子波光栅耦合器的设计(插图:二维光栅的SEM图像);(b) 使用FDTD对4种不同的FMF模式到SOI波导模式进行光传播的模拟结果;(c) 高速片对片FMF传输的结构
 Fig. 7 Two-dimensional wavelet grating coupler^[26]. (a) Design of the 2D sub-wavelength grating coupler (inset: SEM image of the 2D grating); (b) simulation results of light propagations using FDTD for the 4 different FMF modes to SOI waveguide modes; (c) architecture of high-speed chip-to-chip FMF transmission

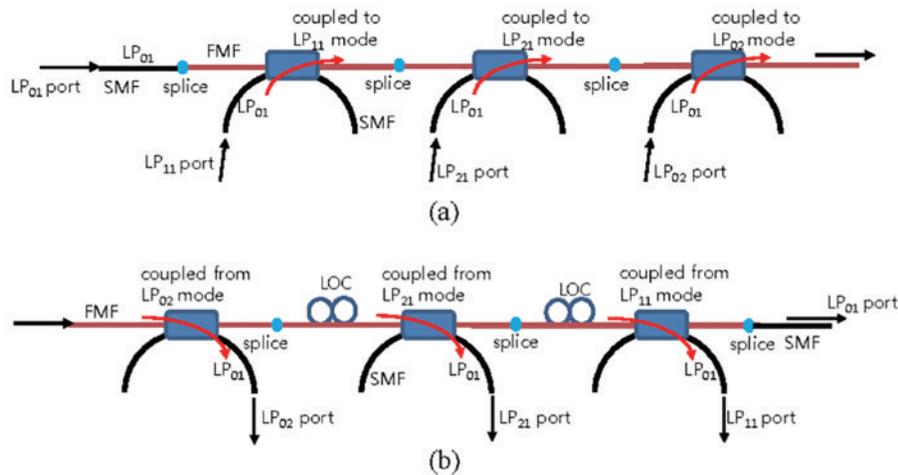


图8 全光纤模式复用器/解复用器^[27]。(a)全光纤模式复用器;(b)全光纤模式解复用器
 Fig. 8 All-fiber mode multiplexer/ demultiplexer^[27]. (a) All-fiber mode multiplexer; (b) all-fiber mode demultiplexer

2.5 模分复用/解复用器总结

综上所述,每种模式复用/解复用器各自都存在一

定的优势和缺点。表1是以上4种模式复用/解复用器的性能总结。

表1 4种模式复用/解复用的性能对比

Table 1 Performance comparison of four mode division multiplexers/demultiplexers

Types of mode division multiplexers/ demultiplexers	Free-space optics	Photonic lanterns	Optical waveguide	Long-period fiber grating
Insertion loss	High	Low	Low	Low
Integrability	Low	Low	High	Depending on the numbers of channels
Complexity	High	High	High	Low
Advantage	Highly reconfigurable, high design freedom, wavelength-independent, and easy to implement	Low loss, versatile broadband mode selectivity, and high mode isolation	High controllability, high integration, low insertion loss, small size, and compact structure	Low complexity, high mode selectivity, low insertion loss
Disadvantage	Complex discrete devices, poorly integrated, and high insertion loss	High complexity and unable to change the type and number of modes	High optical power penalty, and number of multiplexable modes limited by current processes	Integration limited by the number of channels

3 基于强耦合技术的光放大器

不仅能够打破传输容量的限制,MDM 系统也有望通过光放大技术缓解长距离传输所带来的功率消耗,尤其是在海底和光纤链路中。为了降低 MDM 系统中的功率损耗,需要引入能同时放大多个空间通道的少模掺铒光纤放大器(FM-EDFAs)^[28]。因此,少模光纤放大器也是实现长距离传输的少模光纤链路系统中的关键技术之一。少模光纤放大技术关键参数——模间增益差(DMG),会显著影响传输距离和容量。DMG 主要由离子的掺杂浓度、泵浦光的模场分布及信号光的模场分布 3 个方面决定^[8],而泵浦光与信号光之间模场分布的匹配程度的高低则决定该信号模式增益的高低。因此,可以通过调节多模泵浦的模式分布来实现信号的模式增益均衡。根据光纤放大的物理原理,可将光纤放大器分为分布式放大和集总式放大两大类,其中,分布式放大又包括 Raman 放大和参量放大,集总式放大主要为掺铒光纤放大。本章主要调研了目前几种基于强耦合技术的少模光纤放大器的关键技术,通过合理设计空分复用光纤的结构参数及折射率掺杂剖面并选择恰当的泵浦方式,可以达到不同信道间的功率补偿与均衡^[29],有效降低 DMG。

3.1 基于长周期光栅的少模光纤放大器

2020 年,天津大学的 Liu 等^[30]通过分布式长周期光栅实现了基于强耦合的少模光纤放大器,此 EDFA 通过选择耦合强度(CS)和耦合点数(NCPs)来减少模式增益差。其结构如图 9 所示。在均匀掺杂的 6 模

式 EDFA 中,DMG 降低了 7.5 dB,而通过优化的分层掺杂,可以实现 0.5 dB 的超低模间增益差。

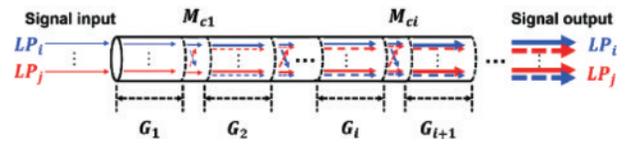


图 9 基于强耦合的少模光纤放大器^[30]
Fig. 9 Strong coupling FM-EDFA^[30]

3.2 基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器

2022 年,北京交通大学的阮江冉等^[31]提出了一种基于包层泵浦和铒离子环芯双层掺杂的 4 模掺铒光纤放大器,其中环芯光纤结构如图 10(a)所示,环芯光纤纤芯由两层折射率不同的区域组成,其中心位置和包层的折射率相同,制作材料也相同,均为二氧化硅。纤芯边缘区折射率较高。高折射率的环形区域中通过对模场的限制实现模场调控。为将光纤模场更好地限制在纤芯区域内,在纤芯外部设置折射率较低的沟槽。信号 4 模式组光沿光纤截面的二维模场分布如图 10(b)所示。该光纤放大器采用包层泵浦和铒离子环芯双层掺杂的方式,通过不断优化掺杂光纤的离子分布来减少模间增益差,实现了支持 4 模式组 FM-EDFA 中 4 模式同时放大和 LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ 和 LP₃₁ 4 个模式模间增益均衡。该 FM-EDFA 在全 C 波段(1530~1565 nm)具有超过 22 dB 的模式增益,小于 0.45 dB 的 DMG,低于 5.3 dB 的噪声系数,并且全 C 波段的增益平坦度低于 1 dB。

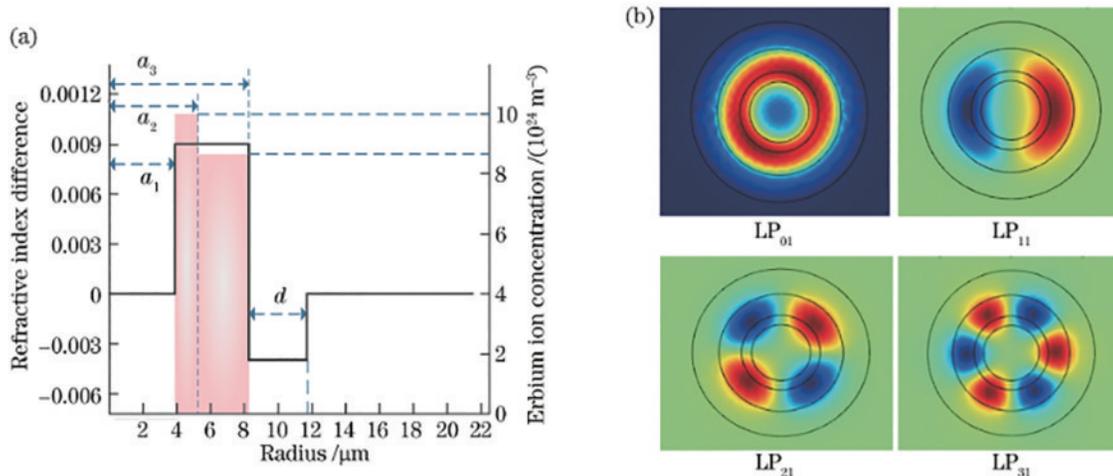


图 10 基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器^[31]。(a)环芯光纤的折射率分布;(b)铒离子掺杂分布以及模场分布
Fig. 10 4-mode erbium-doped fiber amplifier based on cladding pump^[31]. (a) Refractive index distribution of ring core fiber; (b) erbium ion doping distribution and mode field distribution

3.3 基于遗传算法的少模光纤放大器

文献[32]提出一种使用遗传算法优化的三层掺铒的 4 模式群组少模光纤放大器和四层掺铒的五模式群组少模光纤放大器。该结构通过二进制编码的遗传算法,更新光纤掺杂结构增益性能的评估函数,定义为

$F = G/\Delta G$,其中, G 为信号各模式的平均增益, ΔG 为模间增益差值,最终选取模式平均增益大、模间增益插值小的最优光纤掺杂结构。在 C 波段,结构最优的 4 模式群组少模光纤放大器(4M-EDFA)能获得大于 24 dB 的平均增益,其 DMG 小于 0.5 dB,且在光波长

为 1550 nm 时,DMG 最小为 0.103 dB。结构最优的 5 模式群组少模放大器(5M-EDFA)能获得大于 23 dB 的平均增益,DMG 小于 0.4 dB,且在光波长为 1550 nm 时,DMG 最小为 0.016 dB。该实验证明,随着光纤的掺铒层数增加,DMG 逐渐减少,系统得到优化。

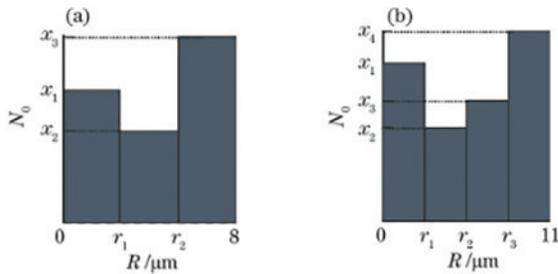


图 11 光纤径向掺铒半径和各层粒子数浓度^[32]。(a)三层掺铒结构;(b)四层掺铒结构

Fig. 11 Fiber radial erbium-doped radius and particle number concentration of each layer^[32]. (a) Three-layer erbium-doped structure; (b) four-layer erbium-doped structure

3.4 大面积掺铒的包层泵浦 6 模光纤放大器

在 2016 年的 ECOC 会议上,来自日本 KDDI 研发实验室的 Wakayama 等^[33]提出了一种大面积掺铒的包层泵浦 6 模光纤放大器。其原理在于纤芯范围的大面积掺杂能够覆盖所有传输模式,从而均衡由于不同模式的模场半径不同,高阶模模斑较大,超出铒掺杂范围的模式相关增益。该 6 模放大器的结构如图 12 所示。在实验中测试了不同泵浦功率下 6 种模式的放大器增益以及 6 种模式相关性增益。该放大器在 C 波段(1535~1563 nm),平均增益超过 20 dB,DMG 小于 3.3 dB。

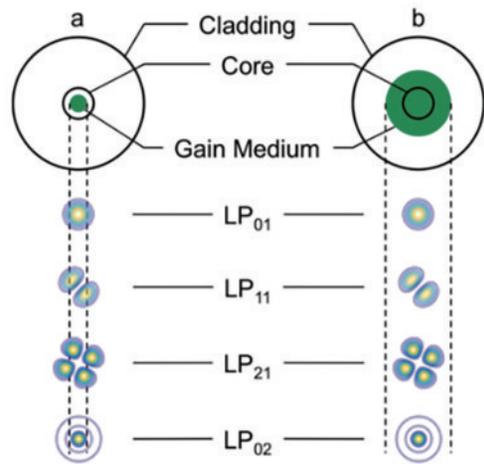


图 12 模式场和增益介质在不同区域中的重叠^[33]。(a)小掺杂区域;(b)大掺杂区域

Fig. 12 Overlap of mode field and gain medium in different regions^[33]. (a) Small doped area; (b) large doped area

3.5 多芯少模光纤放大器

2018 年法国学者 Bigot 等^[34]设计了一种多芯少模光纤放大器,该放大器使用多根预制棒组合再拉制。通过对多根不同折射率和铒掺杂分布的预制棒进行组合,可以实现复杂的铒掺杂和折射率结构。该放大器使用了 19 根掺铒光纤进行组合再进行拉制,结构如图 13(a)所示。其对应的实验基于泵浦波长上存在的 20 个模式,通过梯度下降优化算法进行了泵浦整形的优化,最终选择了四种泵浦模式(LP₃₁、LP₁₂、LP₁₂和 LP₂₂),其特定的泵功率分数能够提供一个均衡的增益。如图 13(b)所示,该放大器在 C 波段的平均增益为 19.2 dB,增益波动为 2.4 dB,DMG 小于 1.1 dB。

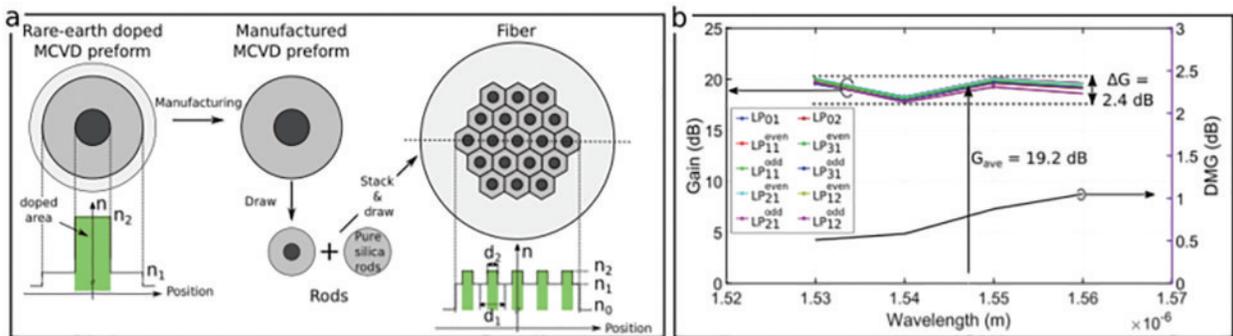


图 13 多芯少模光纤放大器^[34]。(a)光纤放大器的微组合结构示意图;(b)使用梯度下降优化算法的 4 种泵浦模式的少模光纤放大器的预测光谱、模式增益和 DMG

Fig. 13 Multi-core and low-mode fiber amplifier^[34]. (a) Schematic diagram of microcombination structure of optical fiber amplifier; (b) predicted spectral, modal gain, and DMG provided by the FM-EDFA using the 4 pump modes defined by gradient descent optimization

3.6 光纤放大器总结

综上所述,不同类型光放大器的实现增益均衡的方式有所不同。对于上文提到的长周期光栅的少模光纤放大器^[30],依靠选择耦合强度、耦合点数和优化的分层掺杂的方式来减少 DMG。通过优化分层掺杂来优

化信号光、泵浦光和铒离子分布的交叠程度从而控制不同信号模式间的增益情况,这是大部分经典的单芯少模光纤放大器实现增益均衡的方式^[29]。对于上文列举的基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器^[31],通过采用包层泵浦,并且优化分层掺杂和优化的光纤结构参数

来降低 DMG。文献[32]提出的使用遗传算法优化的 3 层掺铒的 4 模式群组少模光纤放大器和 4 层掺铒的 5 模式群组少模光纤放大器的均衡原理同样是利用优化的分层掺杂结构来实现模式均衡,其创新在于利用遗传算法来更新光纤掺杂结构增益性能函数。文献[33]中的大面积掺铒的包层泵浦 6 模光纤放大器利用纤芯范围的大面积掺杂覆盖所有传输模式,从而均衡模式

增益。文献[34]涉及的光纤放大器是一种典型的多芯少模光纤放大器,该类放大器通常结合了特殊光纤结构与包层泵浦。一方面,通过优化纤芯折射率分布、铒离子掺杂浓度等参数来降低纤芯内部各传输模式之间的 DMG。另一方面,采用包层泵浦方式有助于泵浦光均匀耦合到各个纤芯中,进而减小各信道间的 DMG。表 2 是以上 5 种光放大器的性能总结。

表 2 5 种光放大器性能对比

Table 2 Performance comparison of five optical amplifiers

Types of few-mode fiber amplifiers	Applicable optical band	DMG /dB	Average gain /dB	Reference
FM-EDFA based on long-period gratings	—	0.5(lowest)	—	Ref. [30]
4-mode EDFA based on cladding pump	C	<0.45	>22	Ref. [31]
Amplifier based on genetic algorithm	C	<0.5(4-mode) <0.4(5-mode)	>24(4-mode) >23(5-mode)	Ref. [32]
Cladding-pumped 6-mode fiber amplifier with a large erbium-doped area	C	<3.3	>20	Ref. [33]
Amplifier based on multicore fiber	C	<1.1	19.2	Ref. [34]

4 基于强耦合技术的光纤

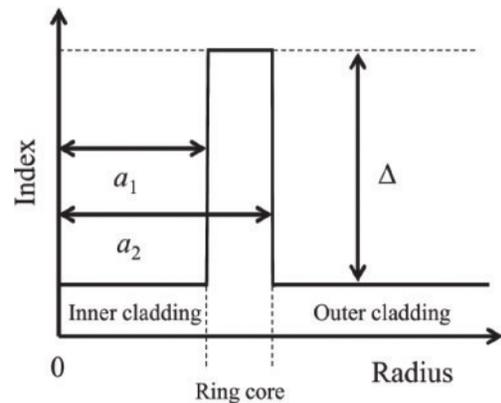
2011 年, Bell 实验室 Ryf 等^[35]首次提出利用少模光纤加 MIMO 均衡处理实现了 3 个空间模式 6 个通道的复用传输,自此引发了全世界研究少模光纤模分复用技术的热潮。将是否需要大规模 MIMO 均衡处理作为 FMF 分为强耦合和弱耦合两类的分类标准^[36]。强耦合 FMF 在接收端需要大规模的 MIMO 处理补偿 LP 模式的耦合串扰。差分模式群时延(DMGDs)是评判 FMF 性能的一项重要指标,代表了不同的空间模式在光纤中传输速度的差异。少模链路中较大的 DMGD 会损伤长距离模分复用光传输系统的性能。因此,最大限度地减少 DMGD,使 FMF 中所有 LP 模式实现同时传输和检测接收是优化少模光纤传输链路的关键。少模光纤主要分为以下几类:基于折射率阶跃分布的少模光纤、基于折射率渐变分布的少模光纤、椭圆芯少模光纤、环形芯少模光纤、超模光纤^[37]。根据文献[38-44],本综述中主要调研了环芯少模光纤、多芯少模光纤、包层沟道辅助的渐变折射率光纤等几种适用于强耦合模分复用系统的光纤。

少模光纤的空分复用由于存在多个传输通道,可提高传感器灵敏度并有效排除交叉敏感问题,已在温度、应力、曲率、形状以及分布式测量等光纤传感技术方面有了重要应用^[40]。

4.1 强耦合环芯少模光纤

2017 年,来自日本 NTT 电信电话公司的 Mori 等^[41]提出了一种强耦合的环芯光纤,该强耦合 FMF 支持 C 波段的两个 LP 模式。实验表明,该环芯光纤的模式耦合效率可以通过优化基于 S 型弯曲模型的光纤结构参数而得到提高。该环芯光纤的有效折射指数差 $\Delta n_{\text{eff}}=0.3 \times 10^{-3}$, LP_{01} 和 LP_{11} 模式的有效面积为

$290 \mu\text{m}^2$,模式间的耦合系数被成功控制。该强耦合环芯少模光纤适用于 MIMO-DSP 的 MDM 传输,并通过在制造的 15.4 km 的光纤中采用模式耦合,成功地减少了信号质量差异。

图 14 环芯光纤的折射率分布^[41]Fig. 14 Refractive index profile of ring core fiber^[41]

4.2 强耦合的多芯少模光纤

对于强耦合的多芯光纤(MCFs),光芯互相间很接近(通常小于 $30 \mu\text{m}$)以提高芯密度。由于相邻芯是强耦合的,它们可以一起支持超模模式。由于芯间的结构参数发生偏差、弯曲,当模式之间的 $\Delta n_{\text{eff}} < 10^{-5}$ 时,会发生强烈的模式混合。因此,强耦合的 MCF 中的信号需要 MIMO DSP 来恢复。强烈的模式混合可以减少强耦合 MCF 中的 DMGD^[42]。

2014 年,贝尔实验室的 Ryf 等^[43]提出了一种新型的 6 芯耦合芯光纤,该 6 芯光纤的设计包括 6 个直径为 $11.1 \mu\text{m}$ 、相对折射率为 $\Delta=0.32\%$ 的均质芯,包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 。纤芯等距排列,从光纤中心开始呈圆形。芯与芯的距离和芯到光纤中心的距离都是

28 μm 。图 15 所示为 31 km 长的光纤的横截面。每个芯的有效面积被设计为 106 μm^2 。光纤在 1550 nm 的衰减为 0.236 dB/km。截止波长为 1450 nm 左右,色散

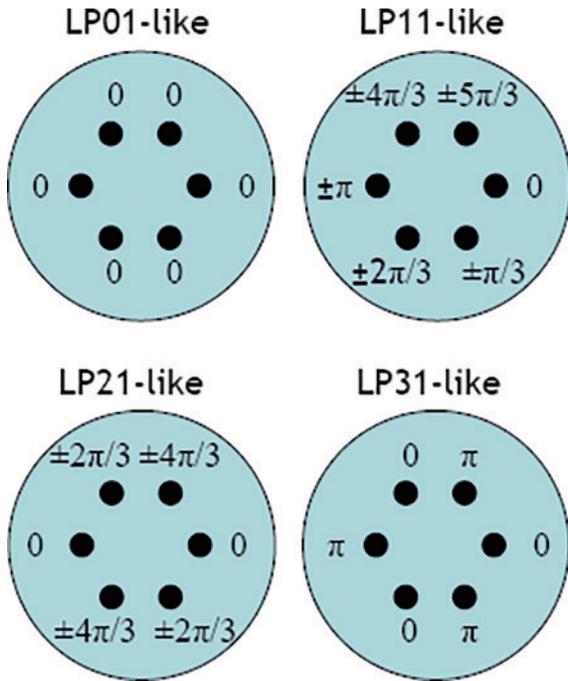


图 15 6 芯耦合芯光纤的超模模式^[43]

Fig. 15 Super-mode of the 6 core coupled-core fiber^[43]

和色散梯度在 1550 nm 时分别为 20.6 ps/(nm·km)和 0.059 ps/(nm²·km)。该光纤有 6 个空间模式,每个都有两个偏振态。这些模式包括类 LP₀₁模式、类 LP₁₁和 LP₂₁模式,以及类 LP₃₁模式。利用该光纤成功实现了 1705 km 的强耦合链路传输,光谱效率与距离乘积为 30690 bit/(s·Hz)·km。

4.3 FMF 在少模复用中的应用

在少模复用的频谱效率方面,2016 年,美国 Bell 实验室^[44]提出了一种利用 87 km 包层沟道辅助渐变折射率强耦合 FMF,实现 6-LP 模式(10 组传输模)复用的方案,该实验系统采用 10 端口光子灯笼实现模式复用,选择 30 Gbit/s 波特率 16QAM 调制信号,结合 30 波长 WDM,在接收端采用 20×20 规模的离线 MIMO 均衡处理,实现 FMF 传输容量 67.5 Tbit/s,频谱效率达到 58 bit/(s·Hz)。对于 FMF,需要进行 DMG 控制,目前实验报道仅支持(4~6)-LP 模式增益。FMF 虽然能够提升单纤芯的传输容量,但由于强耦合模式需要在接收端通过 MIMO-DSP 来补偿长距离传输过程中累积的模式间串扰,对于 DSP 技术的集成度和处理能力提出了很高要求。

4.4 少模光纤总结

综上所述,每种少模光纤的性能均不相同。表 3 是以上 3 种少模光纤的性能总结。

表 3 3 种少模光纤性能对比

Table 3 Performance comparison of three few-mode fiber

Types of FMF	Numbers of mode	Fiber optic attenuation (dB/km)	The complexity of DSP	Reference
Strong coupling ring core few-mode fiber	2	—	Relatively reduced	Ref. [41]
Strong coupling 6-core fiber	4	0.26	—	Ref. [43]
10- and 15-mode graded-index FMF	4-6	—	Relatively complex	Ref. [44]

5 硅基电光调制和模分复用相结合的集成器件

在光通信系统集成研究方面,2016 年,日本早稻田大学的 Kodama 等^[45]设计了一款用于模分复用的铌酸锂集成光调制器,将 2 个马赫-曾德尔型调制器和模分复用器组成的双模式多路复用调制器集成在了单个铌酸锂芯片上,虽然实现了小于-20 dB 的模式串扰,但消光比高于 20 dB,且器件整体尺寸长度较长,达到了 1500 μm 。

2018 年,上海交通大学的 Du 等^[46]提出了一种用于空分复用的带有阵列光栅耦合器的四通道硅微环调制器,该光电调制器能对分束后的输入光分别实现调制及复用,硅芯片组件由于其简化的调制解决方案(NRZ-OOK)具有高容量(100 Gbit/s)、小尺寸(0.45 mm²)和长距离(1 km)的特点,但消光比为 16 dB,插入损耗达到了 22 dB。

2021 年,南京邮电大学的项彤等^[47]设计了一种硅基电光调制模分复用集成器件,如图 16 所示。该集成

器件的电光调制模块由硅基光子晶体波导和宽度调制(WM)型谐振腔组成,模分复用模块由硅基非对称平行纳米线波导组成。光子晶体波导和纳米线波导的连接处采用的锥形结构可以减少两种波导之间的级联损耗。利用该集成器件能实现波长为 1553.91 nm 的 TE₀模和 TE₁模的窄带通断调制和复用功能,插入损耗为 0.46 dB,消光比为 19.73 dB,可以实现低于-14.66 dB 的信道串扰,该集成器件适用于高速大容量光通信系统,但美中不足的是,消光比和信道串扰仍未达到较为理想的要求。

2022 年,南京邮电大学的李琦等^[48]提出了一种采用纳米线波导将电光调制模块和模分复用模块进行耦合的集成器件,如图 17 所示。可以实现在 1550 nm 波长下 TE₀模和 TE₁模的调制与复用功能。该集成器件的电光调制器模块由光子晶体波导和 WM 型谐振腔组成,可以实现对 TE₀模的调制。模分复用器模块由采用非对称平行纳米线波导组成,将 TE₀模向 TE₁模转换然后实现复用。实验数据表明,该集成器件在工作波长 1550 nm 时可以先进行电光调制,再对 TE₀模

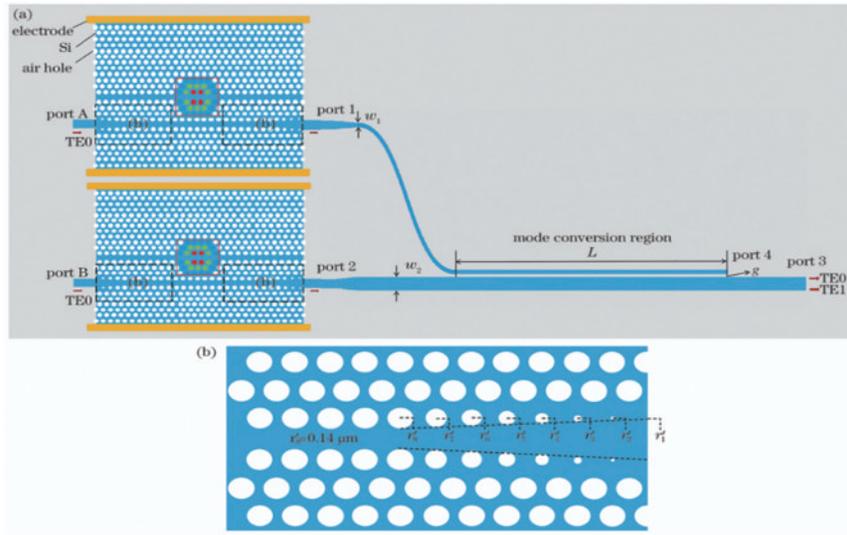


图 16 硅基电光调制与模分复用集成器件^[47]。(a)整体结构图;(b)锥形结构示意图

Fig. 16 Silicon-based electro-optical modulation and mode-division multiplexing^[47]. (a) Overall structure diagram; (b) tapered structure diagram

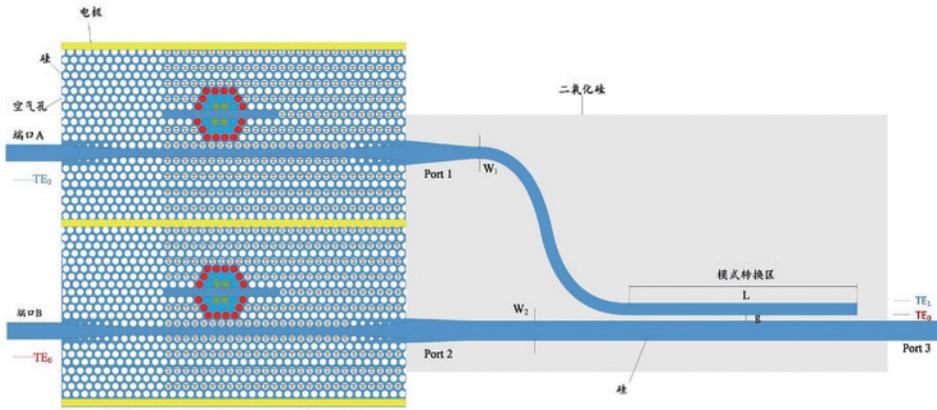


图 17 电光调制与模分复用集成器件结构图^[48]

Fig. 17 Diagram of an integrated device based on electro-optical modulation and mode-division multiplexing^[48]

和 TE₁ 模 2 个通道进行复用,插入损耗分别为 0.19 dB 和 0.18 dB,消光比分别为 29.6 dB 和 24.5 dB,调制深度均为 0.999,信道串扰分别为 -49.57 dB 和 -49.12 dB。该集成器件功能丰富、插入损耗低、消光比大、调制深度高、信道串扰小、易于集成,可应用于高

速大容量光通信系统中。

为了比较几种光子晶体电光调制器和两模式硅基模分复用器的性能,在表 4 中对一些调研文献进行对比,发现集成芯片不仅做到了电光调制与模分复用模块的一体集成,而且相比于分立器件来说,集成器件的

表 4 光子晶体电光调制器及 2 模式模分复用器与上述的集成器件性能对比

Table 4 Performance comparison of photonic crystal electro-optical modulators and two-mode mode-division multiplexers with the above integrated devices

Reference	Extinction ratio /dB	Insertion loss /dB	Crosstalk /dB	Size of the device
Ref. [49]	11.43	1.65	—	34 μm
Ref. [50]	28	2	—	7 μm × 5 μm
Ref. [51]	4	1	—	200 μm
Ref. [52]	—	0.8	—	—
Ref. [53]	10.7	25.6	—	110 μm ²
Ref. [54]	6.37	—	—	90 μm × 58.9 μm
Ref. [55]	—	0.8	-23.4	12.3 μm
Ref. [56]	—	2.74	-8.53	—
Ref. [57]	—	0.87	-10	11.67 μm
Ref. [58]	—	0.49	-32.7	—
Ref. [47]	19.73	0.05	-34.33	54 μm × 22 μm

调制与模分复用性能良好。

6 强耦合通信实验

2012年,美国贝尔实验室的Ryf等^[59]实现了单波长六通道空间和偏振模式多路复用 6×40 Gbit/s QPSK信号在96 km FMF上的传输。次年,该团队^[60]又实现了 1×3 MIMO均衡下的三个传输模式在少模强耦合通信系统下的1200 km长距离传输。此后SDM系统的传输距离不断增长,MIMO规模不断增大,不难发现随着传输距离的增长,MIMO的均衡器长度也不断增加,从最初传输几十公里所需的几十个抽头发展到近期几千公里的几百甚至接近一千个抽头。表5是针对SDM系统MIMO均衡器算法本身的一些研究成果,旨在为MIMO均衡器性能的提升提供指导帮助。

早在2014年,复旦大学通信科学与工程系专用集成电路与系统国家重点实验室团队便利用空分复用技术,实现了可见光通信的多维复用。2014年,Wang

等^[61]利用空分复用技术实现了1.5 Gbit/s的成像MIMO系统和500 Mbit/s的非成像MIMO系统。2022年,我们团队联合使用模式复用、波分复用与偏振复用技术,搭建了基于少模光纤的多维复用千公里级相干传输系统,实现了波特率为32 Gbaud的偏振复用16QAM信号长达1000 km的传输。系统采用低损耗、低色散的六模渐变型光纤,在80个波长通道上实现了 LP_{11a} 、 LP_{11b} 、 LP_{21a} 、 LP_{21b} 四个模式,连同每个模式的两个偏振态的8个通道的独立传输,并在接收端创新性地使用了时频域联合数据辅助 8×8 MIMO-LMS均衡算法进行动态均衡处理。相较于纯时域LMS均衡算法与纯频域LMS均衡算法,时频域联合数据辅助 8×8 MIMO-LMS均衡算法在相同数据集提升了57.1%的收敛速度与25.1%的收敛误差精度。经过1000 km少模光纤传输后,每个波长通道上每个模式及偏振态的误码率均低于开销为20%的软判决前向纠错(SD-FEC)编码阈值,为 2.4×10^{-2} ,总净速率达68.2 Tbit/s。

表5 近几年在少模光纤强耦合系统中进行传输实验的主要研究成果

Table 5 Main research results of using MIMO in FMF, strong coupling transmission system in recent years

Year	Reference	Research institute	Core \times mode	Distance / km	Span length / km	Data rate / (Gbit/s/)	MIMO taps and types
2011	Ref. [59]	Bell Labs	1×3	96	96	80	120 TDE
2012	Ref. [62]	Bell Labs	1×6	130	65	80	400-600 TDE
2013	Ref. [63]	Bell Labs	1×6	177	59	160	800 FDE
2014	Ref. [64]	NEC Labs	1×3	500	50	76	511 TDE
2015	Ref. [65]	Technical University of Munich	1×6	74.17	74.17	27.18	NA
2016	Ref. [66]	NTT Network Innovation Laboratories	12×3	527	52.7	80	128 FDE
2017	Ref. [67]	Photonic Network System Laboratory	1×3	3500	70	240	600 FDE
2018	Ref. [68]	Eindhoven University of Technology	1×6	590	59	240	NA FDE
2018	Ref. [69]	NTT Network Innovation Laboratories	1×3	1020	51	60	400 FDE
2019	Ref. [70]	NTT Network Innovation Laboratories	12×3	>3000	52.7	24	600 FDE
2019	Ref. [71]	NTT Network Innovation Laboratories	1×3	6316.8	75.2	96	NA
2020	Ref. [72]	NTT Network Innovation Laboratories	1×3	3060	51	192	896 FDE

7 结束语

传统单模光纤的传输容量已经逼近理论香农极限,发展少模光纤的模分复用技术是当务之急。目前,基于强耦合的少模光纤复用传输的关键硬件器件的研究已经成为了行业内的热点并取得了重要进展,先进的强耦合模分复用技术实现了光纤传输容量的数十倍提升。本综述分析了少模光纤模分复用关键器件研究过程中,部分相对突出、较新的研究工作和进展。在未来研究中,我们期待在以下关键领域的技术方面取得进一步的突破:

1) 研制插入损耗低、集成度高、传输模式多的模分复用器和解复用器来进一步提升模分复用光传输系统的容量。

2) 在少模光纤放大器性能方面,通过优化铒离子掺杂来降低差分模式增益,通过控制泵浦光模场分布来调整模式增益,实现多种模式的均匀放大,是国内外学者将持续研究来确保强耦合少模光纤可持续发展的关键技术。

3) 对于强耦合少模光纤,最大限度地减少差分模式群时延,使FMF中所有LP模式实现同时传输和检测接收是优化少模光纤传输链路的关键。

4) 在光通信系统集成研究方面,提高硅基电光调制模分复用集成器件的系统集成度、提升光通信网络容量将是未来持续探索的方向。

参 考 文 献

- [1] Du J B, Shen W H, Liu J C, et al. Mode division

- multiplexing: from photonic integration to optical fiber transmission[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 091301.
- [2] 李超, 赵健, 王伟, 等. 4×100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0206001.
Li C, Zhao J, Wang W, et al. 4×100 Gbit/s long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission with few-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0206001.
- [3] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(14): 2468-2479.
- [4] Anisimov P S, Tsyplakov E D, Zemlyakov V V, et al. Speckle backpropagation for compensation of nonlinear effects in few-mode optical fibers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(3): 030601.
- [5] Sillard P, Bigot-Astruc M, Molin D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [6] Chen H, Zhuang Y. Research progress on key technologies in mode division multiplexing system[J]. *Journal of Nanjing University of Posts & Telecommunications*, 2018, 38(1): 37-44.
- [7] Ge D, Zuo M, Zhu J, et al. Analysis and measurement of intra-LP-mode dispersion for weakly-coupled FMF[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(22): 7238-7245.
- [8] 付松年, 于大伟. 基于少模光纤的模式复用光传输技术[J]. *科技导报*, 2016, 34(16): 62-68.
Fu S N, Yu D W. Mode division multiplexing transmission over few-mode fiber[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(16): 62-68.
- [9] Berdagué S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [10] 陈鹤鸣, 庄煜阳. 模式复用系统关键技术研究进展[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(1): 37-44.
Chen H M, Zhuang Y Y. Research progress on key technologies in mode division multiplexing system[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2018, 38(1): 37-44.
- [11] 杨欢, 陈子伦, 刘文广, 等. 光子灯笼研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120002.
Yang H, Chen Z L, Liu W G, et al. Recent progress in photonic lantern[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120002.
- [12] Al Amin A, Li A, Chen S M, et al. Dual-LP₁₁ mode 4×4 MIMO-OFDM transmission over a two-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16672-16679.
- [13] 张天, 李莉, 胡贵军. 基于串行干扰消除的模式复用系统解复用[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0306001.
Zhang T, Li L, Hu G J. Demultiplexing of mode-division multiplexing system based on successive interference cancellation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0306001.
- [14] Koebele C, Salsi M, Milord L, et al. 40 km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100 Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2011: Th.13.C.3.
- [15] Koebele C, Salsi M, Sperti D, et al. Two mode transmission at 2×100 Gb/s, over 40 km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based programmable mode multiplexer and demultiplexer[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16593-16600.
- [16] Randel S, Ryf R, Sierra A, et al. 6×56 -Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16697-16707.
- [17] Labroille G, Jian P, Barré N, et al. Mode selective 10-mode multiplexer based on multi-plane light conversion [C]//Optical Fiber Communication Conference 2016, March 20-22, 2016, Anaheim, CA, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2017: Th3E.5
- [18] 赖俊森, 汤瑞, 吴冰冰, 等. 光纤通信空分复用技术研究进展分析[J]. *电信科学*, 2017, 33(9): 118-135.
Lai J S, Tang R, Wu B B, et al. Analysis on the research progress of space division multiplexing in optical fiber communication[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(9): 118-135.
- [19] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. The photonic lantern[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 107-167.
- [20] OPTOSCRIBE. Photonic lantern[EB/OL]. [2017-06-14]. <http://www.optoscribe.com>.
- [21] Chen H S, Fontaine N K, Ryf R, et al. Design constraints of photonic-lantern spatial multiplexer based on laser-inscribed 3-D waveguide technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1147-1154.
- [22] van Weerdenburg J, Ryf R, Alvarado-Zacarias J C, et al. 138 Tbit/s transmission over 650 km graded-index 6-mode fiber[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2018.
- [23] Huang B, Xia C, Matz G, et al. Structured directional coupler pair for multiplexing of degenerate modes[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, Anaheim, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: JW2A.25.
- [24] Wang J, Xuan Y, Qi M H, et al. Broadband and fabrication-tolerant on-chip scalable mode-division multiplexing based on mode-evolution counter-tapered couplers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1956-1959.
- [25] Chang S H, Chung H S, Ryf R, et al. Mode- and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7164-7172.
- [26] Kuo P C, Tong Y Y, Chow C W, et al. 4.36 Tbit/s silicon chip-to-chip transmission via few-mode fiber (FMF) using 2D sub-wavelength grating couplers[C]//

- 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [27] Chang S H, Chung H S, Fontaine N K, et al. Mode division multiplexed optical transmission enabled by all-fiber mode multiplexer[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14229-14236.
- [28] Xu T, Gao T Y, Wang Y Z, et al. High-gain integrated in-line few-mode amplifier enabling 3840-km long-haul transmission[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(12): 2794-2801.
- [29] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106001. Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106001.
- [30] Liu Y P, Wang X T, Yang Z Q, et al. Strongly coupled few-mode erbium-doped fiber amplifiers with ultralow differential modal gain[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [31] 阮江冉, 裴丽, 郑晶晶, 等. 基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器的增益均衡[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0406001. Ruan J R, Pei L, Zheng J J, et al. Gain equalization of 4-mode erbium-doped fiber amplifier based on cladding pump[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0406001.
- [32] 王文笙, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0906001. Wang W S, Ning T G, Pei L, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0906001.
- [33] Wakayama Y, Igarashi K, Soma D, et al. Novel 6-mode fibre amplifier with large erbium-doped area for differential modal gain minimization[C]//ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. London: VDE, 2016.
- [34] Bigot L, Trinel J B, Bouwmans G, et al. Few-mode and multicore fiber amplifiers technology for SDM[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [35] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, Los Angeles, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2011: PDPB10.
- [36] Sillard P. Next-generation fibers for space-division-multiplexed transmissions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 1092-1099.
- [37] 王潇, 郑宏军, 黎昕, 等. 模分复用系统中的少模光纤研究新进展[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(2): 69-79. Wang X, Zheng H J, Li X, et al. Recent progresses on few mode fibers for mode-division multiplexing system[J]. *Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)*, 2019, 32(2): 69-79.
- [38] Sillard P, Bigot-Astruc M, Molin D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [39] Sillard P, Molin D. A review of few-mode fibers for space-division multiplexed transmissions[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London. London: IET, 2013.
- [40] 裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1002001. Pei L, Wang J S, Zheng J J, et al. Research on specialty and application of space-division-multiplexing fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1002001.
- [41] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Strongly coupled two-LP mode ring core fiber with low effective index difference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 1936-1944.
- [42] Wang Z. Design and fabrication of few-mode fibers for space-division multiplexing in optical communications[J]. 2022. <https://theses.lib.polyu.edu.hk/handle/200/11826>.
- [43] Ryf R, Fontaine N K, Guan B, et al. 1705-km transmission over coupled-core fibre supporting 6 spatial modes[C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), September 21-25, 2014, Cannes, France. New York: IEEE Press, 2014.
- [44] Chen H, Ryf R, Fontaine N K, et al. High spectral efficiency mode-multiplexed transmission over 87-km 10-mode fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference 2016, March 20-22, 2016, Anaheim, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2016: Th4C.2.
- [45] Kodama Y, Yamaguchi Y, Kanno A, et al. Mode-division multiplexing LiNbO₃ modulator using directional coupler [EB/OL]. [2022-02-22]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7718305>.
- [46] Du J B, Zheng L F, Xu K, et al. High speed and small footprint silicon micro-ring modulator assembly for space-division-multiplexed 100-Gbps optical interconnection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13721-13729.
- [47] 项彤, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 硅基电光调制与模分复用集成器件[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1106001. Xiang T, Chen H M, Hu Y C. Silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode-division multiplexing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1106001.
- [48] 李琦, 陈鹤鸣. 基于光子晶体 WM 腔和纳米线波导的电光调制与模分复用集成器件[J]. *光通信技术*, 2022, 46(6): 10-17. Li Q, Chen H M. Electro-optic modulation and mode division multiplexing integrated device based on photonic crystal WM cavity and nanowire waveguide[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(6): 10-17.
- [49] Li M X, Ling J W, He Y, et al. LiNbO₃ photonic crystal optical modulator[C]//Conference on Lasers and Electro-

- Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: STu4J. 3.
- [50] Abdelatty M Y, Badr M M, Swillam M A. Compact silicon electro-optical modulator using hybrid ITO tri-coupled waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 4198-4204.
- [51] Terada Y, Tatebe T, Hinakura Y, et al. Si photonic crystal slow-light modulators with periodic p-n junctions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1684-1692.
- [52] Ooka Y, Tetsumoto T, Fushimi A, et al. CMOS compatible high-Q photonic crystal nanocavity fabricated with photolithography on silicon photonic platform[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-9.
- [53] Ooka Y, Tetsumoto T, Daud N A B, et al. Ultrasmall in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1521-1528.
- [54] Daud N A B, Ooka Y, Tabata T, et al. Electro-optic modulator based on photolithography fabricated p-i-n integrated photonic crystal nanocavity[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2017, E100.C(8): 670-674.
- [55] Chen W W, Wang P J, Yang T J, et al. Silicon three-mode (de)multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2851-2854.
- [56] Qiu H Y, Yu H, Hu T, et al. Silicon mode multi/demultiplexer based on multimode grating-assisted couplers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17904-17911.
- [57] Garcia-Rodriguez D, Corral J L, Griol A, et al. Dimensional variation tolerant mode converter/multiplexer fabricated in SOI technology for two-mode transmission at 1550 nm[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1221-1224.
- [58] Minz M, Mishra D, Sonkar R K. Design of a hybrid mode and polarization division multiplexer[C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [59] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [60] Randel S, Ryf R, Gnauck A H, et al. Mode-multiplexed 6×20 -GBd QPSK transmission over 1200-km DGD-compensated few-mode fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference (2012), paper PDP5C.5. Optica Publishing Group, 2012: PDP5C.5.
- [61] Wang Y Q, Chi N. Demonstration of high-speed 2×2 non-imaging MIMO Nyquist single carrier visible light communication with frequency domain equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(11): 2087-2093.
- [62] Ryf R, Fontaine N K, Mestre M A, et al. 12×12 MIMO transmission over 130-km few-mode fiber[C]//Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII, October 14-18, 2012, Rochester, New York. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2012: FW6C.4.
- [63] Ryf R, Randel S, Fontaine N K, et al. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2013: PDP5A.1.
- [64] Ip E, Li M J, Bennett K, et al. $146\lambda \times 6 \times 19$ -Gbaud wavelength and mode division multiplexed transmission over 10×50 km spans of few mode fiber with a gain equalized few mode EDFA[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 790-797.
- [65] Chen Y, Lobato A, Jung Y, et al. 41.6 Tbit/s C-band SDM OFDM transmission through 12 spatial and polarization modes over 74.17 km few mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(7): 1440-1444.
- [66] Shibahara K, Lee D, Kobayashi T, et al. Dense SDM (12-core - 3-mode) transmission over 527 km with 33.2-ns mode-dispersion employing low-complexity parallel MIMO frequency-domain equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 34(1): 196-204.
- [67] Rademacher G, Ryf R, Fontaine N K, et al. 3500-km mode-multiplexed transmission through a three-mode graded-index few-mode fiber link[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2018.
- [68] van Weerdenburg J, Ryf R, Alvarado-Zacarias J C, et al. 138-Tb/s mode- and wavelength-multiplexed transmission over six-mode graded-index fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1369-1374.
- [69] Mizuno T, Shibahara K, Ono H, et al. Long-distance PDM-32QAM 3-mode fibre transmission over 1000 km using hybrid multicore EDFA/Raman repeated amplification with cyclic mode permutation[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [70] Shibahara K, Mizuno T, Lee D, et al. Iterative unreplicated parallel interference canceler for MDL-tolerant dense SDM (12-core \times 3-mode) transmission over 3000 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(6): 1560-1569.
- [71] Shibahara K, Mizuno T, Lee D, et al. DMD-unmanaged long-haul SDM transmission over 2500-km 12-core \times 3-mode MC-FMF and 6300-km 3-mode FMF employing intermodal interference canceling technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 138-147.
- [72] Shibahara K, Mizuno T, Kawakami H, et al. Full C-band 3060-km DMD-unmanaged 3-mode transmission with 40.2-Tb/s capacity using cyclic mode permutation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 514-521.