



专题：未来光通信技术

短距离弱耦合空分复用实时光传输技术

高宇洋¹, 李巨浩^{1,2}, 何永琪¹, 陈章渊^{1,2}

(1. 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871;
2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

摘要：短距离光纤传输系统的容量扩展受到越来越广泛的关注。空分复用光传输技术提供了纤芯和模式两个新维度，可以大大提升单根光纤的传输容量。然而空间信道间的串扰严重限制了空分复用技术的实用化。首先研究了弱耦合空分复用光纤，通过在纤芯引入环形折射率微扰的方法实现了模式之间的有效分离；其次，提出了一种可以处理非圆对称简并模式的全光纤复用/解复用器件以及低插损、低串扰扇入扇出器；在此基础上，使用低成本商用强度调制直接检测光模块，实现了短距离弱耦合模分复用及多芯少模复用实时光传输；最后对空分复用实时光传输技术进行了展望。

关键词：少模光纤；空分复用；实时光传输

中图分类号：TP393

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022165

Weakly-coupled real-time SDM technology for short-reach optical transmission

GAO Yuyang¹, LI Juhao^{1,2}, HE Yongqi¹, CHEN Zhangyuan^{1,2}

1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China
2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

Abstract: The capacity upgrade of short-reach optical fiber transmission has received more and more attention. Spatial division multiplexing provides two new dimensions of fiber core and mode, which can greatly increase the transmission capacity of a single fiber. However, the crosstalk between spatial channels severely limits the practical application of space division multiplexing technology. To address the problem, a weakly-coupled space-division multiplexing fiber was firstly designed, in which perturbed rings were introduced in the core to increase the effective refractive index difference between LP modes. Secondly, an all-fiber mode multiplexer/demultiplexer that could handle non-circularly symmetric degenerate LP modes was proposed, as well as a low insertion loss and low crosstalk fan-in and fan-out devices. Based on the proposed fiber and devices, the low-cost intensity modulation and direct detection were used to implement the short-reach weakly-coupled mode-division-multiplexing and multi-core and few-mode real-time transmission. Finally, the prospective of space-division multiplexing real-time optical transmission technology was discussed.

Key words: few-mode fiber, space-division multiplexing, real-time optical transmission

收稿日期：2022-06-10；修回日期：2022-07-08

通信作者：陈章渊, chenzhy@pku.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (No. 62101009)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 62101009)



0 引言

随着 5G 移动承载光网络、数据中心光互连和光纤接入网等技术不断地发展,短距离光纤传输技术受到越来越广泛的关注^[1-2]。在技术方案的选择上受成本和复杂度限制,短距离光传输一般只能使用强度调制/直接检测(intensity modulation and direct detection, IM/DD)方案,无法使用电域高速数字信号处理(digital signal processing, DSP)技术来提高性能,传输速率严重受光电器件限制;在复用维度上,目前仅有波长维度可以使用,而多波长激光器和波分复用器等的高昂成本使得波分复用在短距离场景难以大规模应用。因此,大量诸如数据中心等短距离应用场景不得不使用最简单的方式提升容量,即采用多路光纤低速率并行传输。然而,随着传输容量需求的进一步提升,多路光纤并行传输方案在系统体积、功耗与成本等方面的弊端日益凸显,采用新的扩容方式势在必行。

近年来,光纤中的空分复用(space-division multiplexing, SDM)技术被广泛研究并发展迅速,有望成为光纤通信的下一场“革命”^[3-6]。根据使用传输光纤的不同,SDM 包括使用少模光纤(few-mode fiber, FMF)的模分复用(mode division multiplexing, MDM)方案^[7-8],使用单模多芯光纤(multicore fiber, MCF)的芯分复用方案^[9-10],以及同时使用纤芯和模式两个维度,即多芯少模光纤(few-mode multicore fiber, FM-MCF)的复用方案^[11-12]。而纤芯和模式同时复用的方案可以迅速将单纤容量提升几十倍甚至上百倍,一旦实现商用将大大缓解当前短距离光传输扩容遇到的“瓶颈”。一个典型的 SDM 光链路主要由多芯少模光纤和空分复用/解复用器组成。多路单模信号首先通过模式复用器(mode multiplexer, mode MUX)复用成为模分复用信号,然后若干路模分复用信号通过一个扇入器(fan in, FI)注入多芯少模光纤相应的纤芯。经过传输之后,解复用端

首先通过扇出器(fan out, FO)将若干路模分复用信号分开,之后每一路模分复用信号再通过模式解复用器(mode demultiplexer, mode DEMUX)解复用至每个输出端。需要指出的是,根据使用的少模光纤的不同,模分复用可以使用线性偏振(linear polarized, LP)模式,也可以使用轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)模式等,本文的研究集中于 LP 模式。

尽管 SDM 技术在扩容上有巨大优势,但是其经过了多年的研究却一直无法实际应用于短距离光传输,核心问题就是传统的 SDM 光链路和当前商用 IM/DD 光模块不兼容。由于 SDM 链路中纤芯与纤芯之间存在芯间串扰,模式相互之间存在模间串扰,当串扰值达到一定程度时,整个系统必须使用相干检测联合多入多出(multiple-input multiple-output, MIMO)数字信号处理才能将每个通道的信息恢复,也就是所谓的强耦合 SDM 系统^[8]。强耦合 SDM 只适用于对成本容忍度较高的长距离超大容量高速传输场景。这是因为 MIMO DSP 的计算复杂度会随着模式数的增加而急剧增加,短距离场景使用的低成本商用 IM/DD 光模块无法通过简单升级解决。对于芯间串扰来说,纤芯数不超过 10 的多芯光纤的纤芯间距一般大于 40 μm ,串扰能抑制在 -45 dB/km 以内。因此在几千米的短距离传输场景下,芯间串扰可以忽略,即认为芯间满足弱耦合条件,不需要 MIMO DSP 进行处理。尽管单模多芯光纤不涉及模式维度,更容易兼容当前的单模商用系统,但是也很难快速商用化。首先,由于多芯光纤的预制棒需要打孔,因此制备成本远高于少模光纤。此外,单模多芯光纤的熔接损耗相比于单芯光纤要大得多,损耗一方面来自预制棒打孔位置的误差,另一方面将多个纤芯的位置同时完全对准也无法用普通熔接机实现。少模光纤中模式在空间上是重叠的,空间复用的密度更高。少模光纤的熔接损和商用单模光纤熔接损耗的差异很小。少模光纤可以使用成熟的等离子化学气相沉积(plasma

chemical vapor deposition, PCVD) 工艺制备, 成本介于商用单模光纤和多模光纤之间, 远低于多芯光纤。但是由于少模光纤中模式之间的串扰在空间上是重叠的, 因此模式之间的串扰远大于多芯光纤纤芯之间的串扰, 需要有效的手段抑制才能实现弱耦合的传输。多芯少模同时复用的方案可以实现很高的空间密度, 同时成本和技术难度都是很高的。

1 弱耦合模分复用实时传输

普通阶跃型少模光纤中的模式串扰分为两种, 一种是 LP 模式之间的分布式模式串扰, 另一种是简并模式两个分量之间的串扰。两个 LP 模式间的有效折射率差越大则经过长距离传输之后积累的分布式模式串扰越小。根据“木桶效应”, 衡量一款少模光纤分布式模式串扰大小的量就是任意模式间最小有效折射率差($\min|\Delta n_{\text{eff}}|$)。多环形纤芯弱耦合少模光纤示意图如图 1 所示。传统阶跃折射率少模光纤中相邻模式之间的有效折射率差并不相等, 如图 1 左侧所示。在光纤的纤芯包层折射率差不变的情况下, 通过光纤设计实现 $\min|\Delta n_{\text{eff}}|$ 最大化最有利于减小分布式模式串扰。本文通过在阶跃折射率少模光纤纤芯引入环形折射率微扰的方式调节每个 LP 模式的有效折射率, 最终实现模式间有效折射率差接近等间隔分布, 从而降低模式串扰。由于不同 LP 模式的能量分布不同, 本文通过引入多环微扰实现对每个 LP 模式的精细调节, 如图 1 右侧所示。

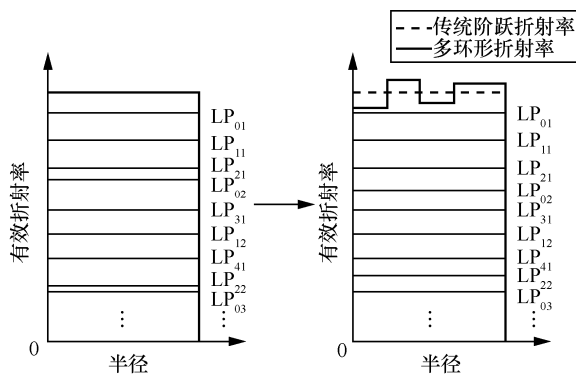


图 1 多环形纤芯弱耦合少模光纤示意图

在圆形纤芯的弱耦合少模光纤中, LP 模式可以分为两类: 一类是圆对称的模式, 记为 LP_{0m} 模式; 另一类是非圆对称模式, 记为 $LP_{lm}(l>0)$ 模式, 非圆对称模式有且仅有二重简并, 记为 LP_{lma} 和 LP_{lmb} 。之前提到过, 通过对纤芯折射率剖面做一些特殊设计, 可以增大不同 LP 模式之间的模式有效折射率差。然而简并模式的模式有效折射率总是相同。在光纤中传输时, 由于光纤实际加工导致的几何结构不完美, 以及外界各种扰动等因素, 非圆对称模式的空间分布会发生旋转, 在接收端会有一个随机的旋转。传统的非圆对称模式解复用器, 例如模式选择耦合器, 只能将某一种空间分布的简并模式解复用, 因此会造成接收端功率的不稳定。如果使用两个正交的模式解复用器将两个空间方向的简并模式分别解复用再将功率相加则需要使用复杂的数字信号处理技术实现分集接收, 否则会有光的干涉问题。因此, 如何简便高效地实现圆形纤芯弱耦合少模光纤中的非圆对称简并模式的接收是一个亟待解决的问题。

学术界上常用的方式是通过使用椭圆纤芯少模光纤, 将两个简并模式的有效折射率分开, 从而实现模式的分离^[13]。但是这种方式有两方面限制: 一是椭圆纤芯光纤拉制工艺难度极大, 无法一次拉制 10 km 以上; 二是椭圆纤芯将两个简并模式分开的程度很弱。本文依旧从模式复用/解复用器的维度出发解决此问题, 本文使用级联型模式选择耦合器实现模式复用/解复用。具有简并模式接收功能的模式复用/解复用器示意图如图 2 所示。首先将两个简并分量视为一个 LP 模式, 只承载一路信息, 在发送端进行 LP 模式的复用, 如图 2 左侧所示, 若干普通模式选择耦合器级联实现模式复用结构。在接收端, 对于非简并的模式, 直接使用普通模式选择耦合器进行模式解复用, 对于简并模式, 使用简并模式选择耦合器进行信号的下路。简并模式选择耦合器在满足一定条件的情况下,

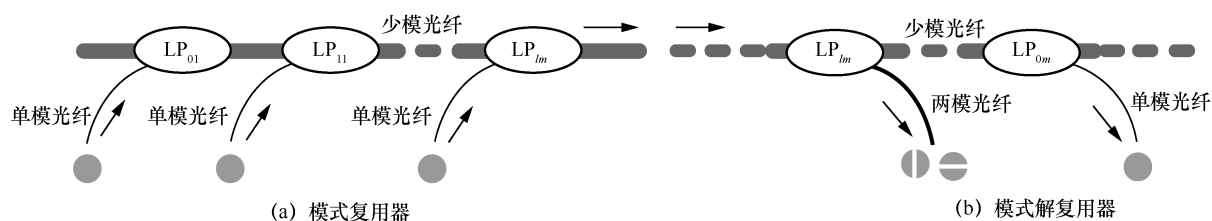


图2 具有简并模式接收功能的模式复用/解复用器示意图

可以将两个简并分量同时解复用至一根两模光纤中，等效于对旋转角度不敏感。解复用器的结构如图2右侧所示。

基于上述多环形弱耦合少模光纤和具有简并模式接收能力的模式复用/解复用器。本文搭建了一套4K视频模分复用实时传输演示平台。模分复用4路4K视频实时传输演示平台示意图如图3所示。首先，4个4K视频源（小米盒子4）产生4路不同的4K视频信号，通过HDMI连接线分别连接至4个4K视频光发射机。每个发射机中均插入了一个1550 nm的10 Gbit/s的SFP+光发射模块，4K视频电信号调制光模块产生4路单模4K视频光信号，经过4LP模式复用器，少模光纤以及模式4LP模式解复用器之后，被4个4K视频光接收机接收，每个接收机中同样插入一个SFP+光接收模块，最后产生的电信号经过HDMI线连接至4个4K显示器进行实时显示。由于接收端光模块中没有使用FEC编码，因此整个系统工作在无误码的状态下。同时系统中不需要使用光放大器和可变光衰减器。经过测试，整个模分复用实时光传输系统可以连续正常工作超过24 h，说明该系统具有非常好的稳定性。



图3 模分复用4路4K视频实时传输演示平台示意图

2 弱耦合多芯少模实时传输

基于多芯少模光纤的空分复用光纤传输系统比传统单模光纤传输系统增加了模式和纤芯两个维度，因此可以极大地增加通信系统的容量，有效解决当前光通信系统容量达到瓶颈的问题。本文采用光纤型的多芯少模空分复用解复用器，该器件通过将光纤束型扇入扇出器件和模式选择耦合器、简并模式选择耦合器级联实现。多芯少模光纤链路示意图如图4所示。基于该器件和多芯少模光纤的低串扰特性，本文首次实现了弱耦合的七芯两模1 km实时传输，传输系统使用商用的标准10 Gbit/s SFP+模块，不需要任何软硬件修改，因此和当前商用强度调制直接检测模块兼容。

本文首先设计并制备了7芯2模光纤。为了保证中间纤芯的同心度以及一致的纤芯距离，本文采用了打孔法制备了该光纤，通过增大纤芯距离至80 μm以及在每个纤芯外围增加沟道的方式有效地将纤芯之间的串扰抑制在-65 dB/km以下，同时低折射率沟道能够有效增加光纤的抗弯曲性能。本文使用光纤束工艺制备了7芯2模扇入扇出器。不同于之前的方案，本文直接拉制了直径80 μm的细径光纤，从而避免了使用氢氟酸刻蚀的步骤，提高了成品率，同时降低了对工艺的要求。图5是7芯2模光纤端面和扇入扇出器端面显微图。本文使用级联熔融拉锥型模式选择耦合器的方式制备了两模模式复用/解复用器。同时对于非圆对称的LP₁₁模式，继续使用简并模式选择耦合器实现其稳定的解复用。本文将7芯2模光纤、扇入扇出器以及模式复用/解复用器搭建成弱

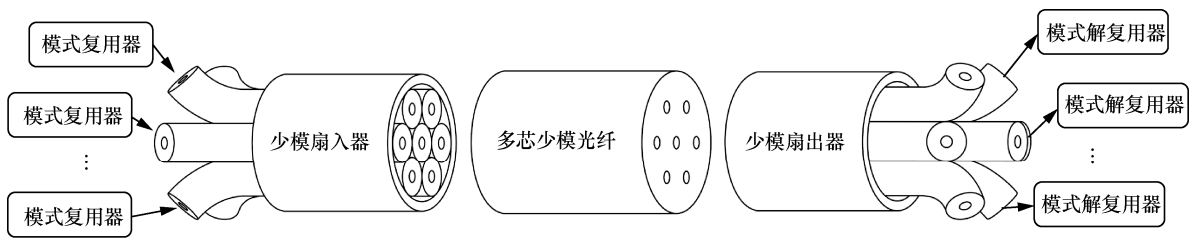


图4 多芯少模光纤链路示意图

耦合 7 芯 2 模光链路，并对其光学性能进行测试。本文测试了复用端激发模场以及链路最核心的串扰矩阵，测试结果表明弱耦合 7 芯 2 模光链路具有较低串扰，不需要数字信号处理的补偿即可满足实时传输的要求。

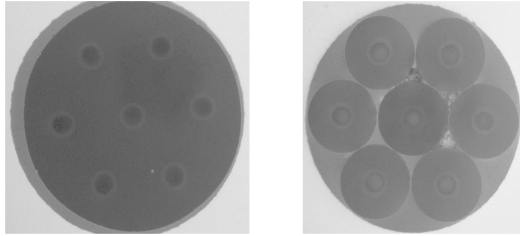


图5 7芯2模光纤端面图和扇入扇出器端面显微图

基于该弱耦合 7 芯 2 模光链路，本文使用标准商用光模块完成了弱耦合实时多芯少模传输测

试。7 芯 2 模光纤实时传输实验结构如图 6 所示。本文使用具有 4 组射频信号输出/输入的高速误码仪，10 Gbit/s 强度调制/直接检测 SFP+光模块，以及 SFP+ 驱动板对光链路进行了测试。测试结果表明该系统可以在 C 波段以低于 3.3 dB 的传输代价满足弱耦合多芯少模实时传输。

3 空分复用实时传输未来展望

与更高速率、更长距离的空分复用实时传输技术相关的研究已经开展，本文认为模式或者模式组之间的分布式模式串扰需要从弱耦合少模光纤的维度解决，例如采用更好的折射率剖面设计、更优良的加工工艺。此外，为了有效地实现长距离模分传输，可以考虑使用包层掺氟的方式实现

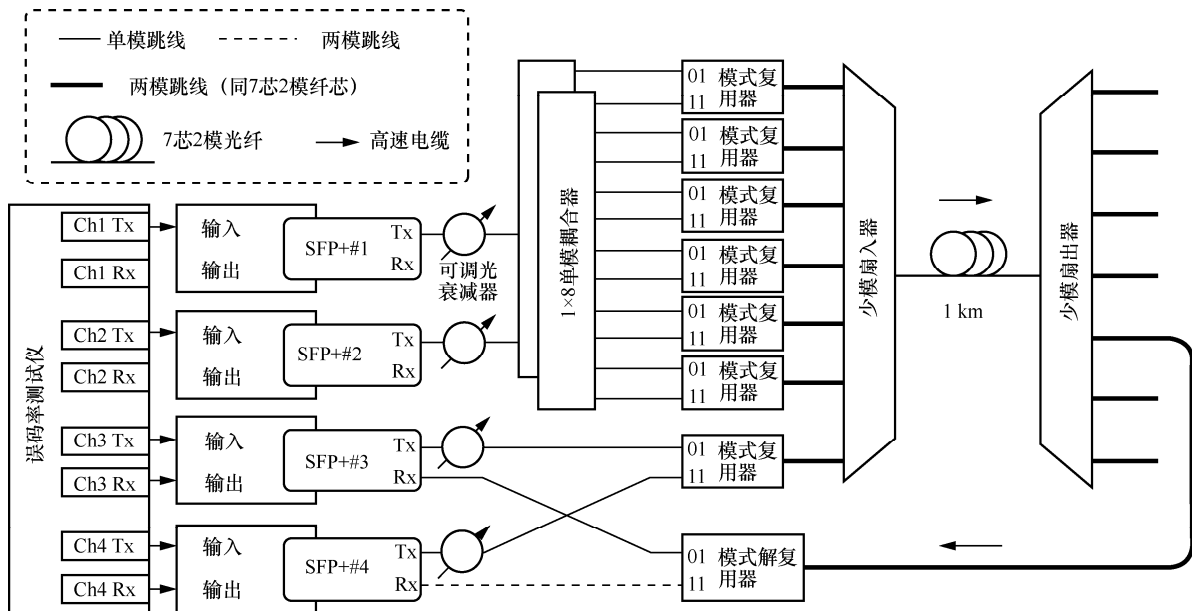


图6 7芯2模光纤实时传输实验结构



超低损耗模光纤。

而对于简并模式的问题，目前已经有研究机构开展了具有 4×4 MIMO DSP 实时硬件能力的相干接收机，但波特率较低，需要进一步研发。另一种思路是在现阶段设计支持多个非简并模式的少模光纤，且只使用这些模式进行传输。这样的模分复用系统可以直接兼容当前超高速单模收发设备。当然，少模光纤支持的非简并模式数比简并模式少很多，但是设计并实现支持 4 个甚至 5 个非简并模式的弱耦合少模光纤还是非常希望的。最后，目前高速光传输领域单边带直接检测技术是研究热点，该技术可以和本文所提出的简并模式接收方案相结合，研发出相应的硬件接收机后可以在不需要 4×4 MIMO DSP 的情况下实现大容量模分复用实时传输。

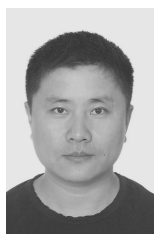
参考文献：

- [1] CHAGNON M. Optical communications for short reach[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(8):1779-1797.
- [2] 林银, 覃晓霞, 王国栋, 等. 聚焦场景的 10G PON 精准部署方案[J]. 电信科学, 2021, 37(12): 133-143.
LIN Y, QIN X X, WANG G D, et al. Precise deployment scheme of 10G PON based on different scenarios[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(12): 133-143.
- [3] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [4] VELÁZQUEZ-BENÍTEZ A M, ALVARADO-ZACARIAS J C, LOPEZ-GALMICHE G, et al. Six spatial modes photonic lanterns[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C.: OSA, 2015.
- [5] GROSS S, RIESEN N, LOVE J D, et al. Three-dimensional ultra-broadband integrated tapered mode multiplexers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(5): L81-L85.
- [6] BENYAHYA K, SIMONNEAU C, GHAZISAEIDI A, et al. Multiterabit transmission over OM2 multimode fiber with wavelength and mode group multiplexing and direct detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 355-360.
- [7] LIU H, WEN H, ALVARADO-ZACARIAS J C, et al. Demonstration of stable 3×10 Gb/s mode group-multiplexed transmission over a 20 km few-mode fiber[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C.: OSA, 2018.
- [8] 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.
- [9] HAYASHI T, TARU T, SHIMAKAWA O, et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16576-16592.
- [10] MATSUO S, SASAKI Y, AKAMATSU T, et al. 12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28398.
- [11] SOMA D, WAKAYAMA Y, BEPPU S, et al. 10.16-peta-B/s dense SDM/WDM transmission over 6-mode 19-core fiber across the C L band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1362-1368.
- [12] SAKAGUCHI J, KLAUS W, DELGADO MENDINUETA J M, et al. Large spatial channel ($36\text{-core} \times 3\text{ mode}$) heterogeneous few-mode multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 93-103.
- [13] IP E, MILIONE G, LI M J, et al. SDM transmission of real-time 10GbE traffic using commercial SFP + transceivers over 0.5km elliptical-core few-mode fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17120-17126.

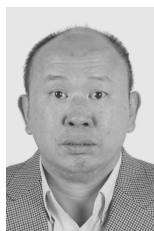
作者简介



高宇洋（1989—），男，北京大学在站博士后，主要研究方向为空分复用光器件与光传输。



李巨浩（1978—），男，北京大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为光纤设计与制备、空分复用技术、超高速光传输。



何永琪（1962—），男，北京大学正高级工程师、博士生导师，主要研究方向为高速光传输与光网络。



陈章渊（1968—），男，北京大学教授、博士生导师，区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室主任，主要研究方向为光传输、微波光子学和光子器件。