光纤中的集成光学与离散光学*

苑立波[†]
(桂林电子科技大学光电工程学院　桂林　541004)

2022－09－01收到
† email：lbyuan@vip.sina.com
DOI：10.7693/wl20230305

Integrated optics and discrete optics in optical fibers

YUAN Li-Bo[†]
(School of Optoelectronic Engineering，Guilin University of Electronic Technology，Guilin 541004，China)

摘　要　光纤集成光学和离散光学有望成为光子学集成的一个新分支。这种集成技术可以通过离散的方法方便地在一根光纤中控制和操纵光波，也为集成光学与离散光学的研究提供了一个灵活方便的平台，为微光子器件和系统集成提供了一种有效的方法和手段。文章简要总结了在光纤内实现光学器件集成和微光学系统集成的主要思想和关键技术，探讨了离散光学需要考虑的核心内容，为该方向的进一步发展提供了若干前期的研究基础。

关键词　光纤，微结构光纤，集成光学，离散光学

Abstract　Fiber integrated optics and discrete optics are expected to become a new branch of photonics integration. This technology can easily control and manipulate light waves in an optical fiber by a discrete method, and thus provides a flexible and convenient platform for research on integrated optics and discrete optics, and for the fabrication of micro-photonics devices and systems. This paper briefly summarizes the main ideas and key technologies of optical device integration and micro-optical system integration in optical fiber, discusses some vital issues of discrete optics, and provides a preliminary research basis for further developments in this direction.

Keywords　optical fiber，microstructure optical fiber，integrated optics，discrete optics

1　引言

集成技术在微纳光学和光子学领域发挥着越来越重要的作用。集成光学始于1969年贝尔实验室的米勒博士，为了将宏观上光学实验平台搭建的光路与光信号处理系统应用于实际的场景中，必须将其微缩集成在一块平板基片上，为此他提出了集成光学的概念[1]。于是人们开展了以介电材料为基片的集成光学系统的研究。1972年，Somekh和Yariv进一步提出了在同一半导体衬底[2]上同时集成光学器件和电子器件的想法。从那时起，研究人员就开始利用各种材料、不同的制造方法来制造集成光学器件和光电混合集成器件。

近年来，平面光子集成芯片技术正在成为各国发展光子产业的重要关键技术。尽管平板基底

*　国家重点研发计划(批准号：2019YFB2203903)、国家自然科学基金(批准号：61827819，61735009)、广西八桂学者专项资助项目

器件一直在光通信系统中扮演着最主要的角色，特别是近年来迅速发展起来的硅基光子集成技术，由于与CMOS技术兼容，日益成为光电子集成发展的主流方向之一。但就某些特定的功能而言，光纤波导器件具有平板基底器件难以比拟的优势，在某些应用场合甚至具有不可替代的作用，采用微结构光纤的光纤波导器件更是如此。因此，在新一代光通信系统和网络中，光纤集成光子器件必将占有一席之地，成为新一代光信息技术发展的重要方向；另一方面，随着智慧城市、5G技术的发展，物联网、云计算的应用，特别是未来6G技术和元宇宙的发展新趋势，信息的获得与传输需求剧增，特别是数据中心的信息交换与短距离的信息传输呈现出指数式的增长。如何满足这些多样化的传输与感测的需求，也为新一代光纤光子集成器件的发展提出了新的挑战。

为此，本文概述了以折射率导引型(以高折射率介质作为光波传输区域，低折射率介质作为光波传输包敷区)特种微结构波导光纤作为基础，在光纤上进行光子器件集成的方法。其核心概念就是以光纤作为圆形衬底材料，构造三维立体光器件集成体系，将较复杂的光路和各种光学元器件微缩到一根光纤内部。目标是将传统的光学元器件和系统微型化，并按照新的物理观点将这些元器件或系统“集成”在一根光纤中，以形成具有多种功能的光纤集成光子学器件。这种集成技术，一方面为微光学器件提供了一种新型光路集成方式和解决途径，可获得具有不同功能、不同集成度的纤维集成微缩光纤器件，从而实现光子学信息处理系统的集成化和微型化；另一方面，集成在一根直径仅为125 μm的光纤中的紧邻器件之间也构成了一个相互影响的光学系统。而离散光学就是研究分立的光路和器件及其相互关系与相互影响的光学分支。离散光学系统是指由有限个不同的光路与分立的光学元件构成的光学系统。因此，纤维集成离散光学系统就是研究如何在一根光纤中构建这些彼此分立的光学器件；如何通过各个光学单元之间的空间结构的变化实现彼此的影响；通过什么方法改变和调控这些离散光学器件及其光场相互作用的关系；从这些相互影响的结果中能够获得哪些可资利用的功能与效应。这些构成了本文进行探讨的另一部分内容。作为光纤集成光学系统的典型应用，本文给出了一个可实现三维形状传感的案例来加以说明，该应用是借助于集成在一根多芯光纤的多光路与多光纤光栅的微光学系统实现的。

2 光纤中的集成光学

2.1 光纤中进行光学集成的基本思路

我们知道集成光学概念的发展是在光电子学和微电子学基础上，采用集成方法，研究和发展起来的光学器件集成系统。1978年K. O. Hill提出了光纤光栅的概念，首次将反射镜或滤波器写入光纤[3]，开拓了将光学无源器件集成到光纤中的先河。借助于光纤光栅，人们发展了集成在光纤内的F—P干涉仪。另一方面，为了提高光通信传输信道密度，1979年提出了在同一根光纤中放入多个光信息通道的多芯光纤的概念[4]。多芯光纤技术在早期光通信实际应用过程中遇到了两个主要的问题与难点：一是多芯光纤互连与接续十分困难；二是多芯光纤各个纤芯之间的长程串扰严重。随着波分复用和密集波分复用技术的发展与日趋成熟，多芯光纤解决密集信道通信的方案越来越失去了其优势。近年来，随着信道容量扩展的需求迫近，在一根光纤中的空分复用的多芯光纤技术又被重提，发展了多芯光纤芯间隔离技术[5, 6]和多芯光纤分路连接技术[7, 8]，新的光纤制造技术的发展为多芯光纤通信注入了新的活力，已经成为未来解决光通信扩容的主要途径之一。

事实上，为了尝试并探索是否能够以光纤为基体衬底材料，将若干光学器件与光路微缩集成在同一根光纤中，需要尝试的就是把直径为125 μm的石英材料作为基础材料，将具有不同功能、不同集成度的光学器件微缩安排在同一根石英纤维的内部，这就是所谓纤维集成光学器件与系统的构想。目的是尝试采用石英光纤预制棒的

灵活多变的组合技术和石英光纤的拉制办法，形成一种将较为复杂的光路与器件在光纤内的集成新方法，以实现光学信息处理系统的集成化和微型化。通过这一新颖的集成技术，可以将多种单一功能的光器件微缩集成在一根光纤中，也可以进一步将单元功能器件再次集成，构成功能复杂的微系统。通过与外部的标准光纤连接，构成新一代特种微型纤维集成器件。它可使微型化和集成化光学元件进入一个紧密功能的系统中，使新一代微型纤维集成光学器件的性能大大提高。

与远程光纤通信不同，纤维集成光学器件多数情况下关注的不是远传，而是集成在光纤中短距离波导自身及其与周围的波导之间的相互作用，同时也关注光纤内部波导与光纤外部周围物质之间的相互作用。这些相互作用常常是来自光纤端或者是光纤侧面光场与其他物质的相互作用。在某些特殊情况下，纤维集成光学也关心长程传输特性及其与周围环境之间的相互作用，例如：基于多芯光纤的空分复用光通信、远程多光路分布式干涉测量等应用就属于这样的特殊情况。

近几年来，围绕单根纤维集成光学技术的思路，人们对该技术进行了初步探索。设计并实验拉制了多种特殊的微结构波导芯光纤，以微结构波导芯光纤为基体核心单元，开展了光纤内光路构造的研究工作。报道了将迈克耳孙干涉仪嵌入单根光纤内部等研究工作[9，10]。为了使光纤集成元件与现行标准光纤系统相兼容，采用独特的焊接后在焊点处进行熔融拉锥技术，实现了多芯光纤及其器件与标准单模光纤的连接与耦合[11]，可方便地将基于多芯光纤的光学器件和光路接入到标准单芯光纤链路中[12]。近几年来，围绕微结构波导光纤的系列前期探索性工作的结果[13—16]，人们又进一步开展了系列研究的深化工作，如多芯光纤光栅集成与写入方法的有关研究[17，18]，基于双芯光纤的集成式电光调制器的研究[19]等。

2.2 无源器件集成

2.2.1 多种波导在单根光纤中的集成

折射率导引型微结构波导光纤与传统的光纤相比，其结构有很大不同，因此表现出许多奇异的特性。这些特性，除了可以用于新一代光信息处理与光通信器件之外，还可以用于微操作光镊、高精度微光学计量、光与物质相互作用特殊环境构建、各种微量生物化学成分的传感与测量等研究领域，应用前景广阔。多芯光纤(multi-core fiber，MCF)是折射率导引型微结构波导光纤的典型代表，一般相对于单芯光纤而言，它的结构是在公共的包层内含有多根(两芯以上)独立纤芯的光波导，光纤中每个芯都是一条独立的光通道，因此多芯光纤被看作是一种多光学通道或多光路集成的光纤，如图1(a)所示。此外，还设计研制了各种结构的多波导光纤，如图1(b)所示，给出了用于构建纤维集成光器件与微系统的若干种多芯光纤。由于不需要进行远传，因此每个纤芯并没有低折射率隔离层，其目的是在集成光路与器件开发方面，能够更加方便地实现光波控制、光波信号交换、光纤信息处理以及光纤与周围环境

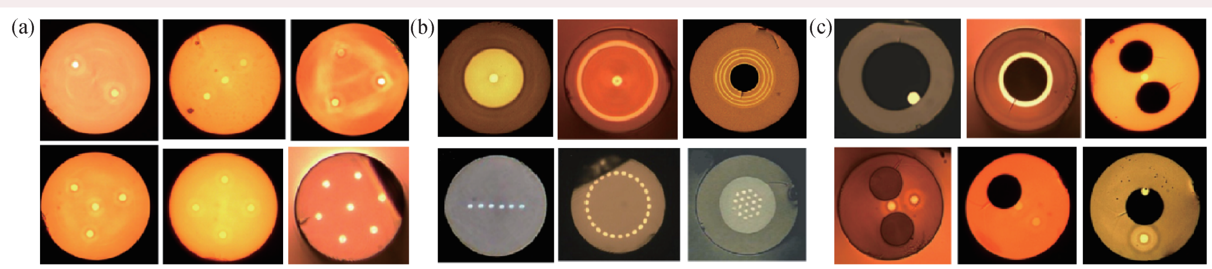

图1 多种波导集成在一根光纤中的特种光纤 (a)几种典型的多芯光纤横截面图，有多芯线性阵列、多芯环形阵列、中心孔周围的多环形波导；(b)典型的波导集成光纤横截面图，包含同轴双波导互相嵌套、多环形阵列波导、密集分布多芯波导；(c)具有微流通道的微流光纤横截面图，包含波导悬挂在毛细管内壁、中空环形芯波导、纤芯紧邻微流孔

相互作用的信息提取等任务。除了多波导的光路集成光纤外，将微流物质通道与光通道进行混合集成的光纤能够把微流物质，例如，气体或液体，或者是对光波电场进行调控的电极材料引入光纤中，不仅增强了光与引入的物质相互作用的能力，为光纤中波导传输的光场与外界各种物质在微纳尺度之间的长程相互作用提供了理想的场所，更是为在光纤上进行新功能器件的集成打开了方便之门，有助于在光纤上开展有源调控器件和微流感测器件的混合集成，如图1(c)所示。

2.2.2　结构重构式功能器件在单根光纤上的集成

光纤微加工与处理技术是在光纤上制造并集成光学器件的主要方法和手段。通过对前述各种特殊结构和功能的光纤进行二次加工，才能在光纤内制造出所需要的各种功能器件。图2给出了几种典型的通过对光纤进行微加工来改变光纤形状与结构的方法与技术，通过这些改变来实现对光纤内光场的调控，形成各种功能器件的集成。

采用光纤焊接机，通过光纤的焊接与熔融拉锥来获得不同的结构是实现光纤上构造各种微结构器件的常用方法。例如，采用普通光纤和一段同样直径的石英毛细管进行焊接时可以得到如图2(a)最左侧图所示的结构；调整合适的放电电流，借助于光纤焊接机也可以实现双锥和单侧陡变锥体，参见图2(a)中间和右侧的图。机械抛磨是实现光纤端和光纤侧面微加工的另一种常用方法，图2(b)给出的多棱锥、楔形和圆锥体光纤端就是采用纤端研磨的方法制备出来的[20—22]。经过机械研磨的光纤端或侧面，常常会有微观上的划痕，这时可采用局部高温加热的办法(俗称火抛光)，通过热熔后石英玻璃材料的表面张力来消除研磨表面的微观粗糙不平的部分，起到使表面进一步光滑的作用。CO_2激光加工技术是实现光纤热熔的另一种重要方法，可以用于制备各种光纤透镜，在纤端烧制微球，如图2(c)的左图所示，也可以通过加热施加内部压力的石英微管的局部，在内部压力作用下使得软化部分得以膨胀后就形成了微腔或微泡，参见图2(c)中间的图片。若是希望在光纤侧面雕刻如图2(c)右侧所示的微槽，则需要采用飞秒激光器微加工系统完成这样的制备工

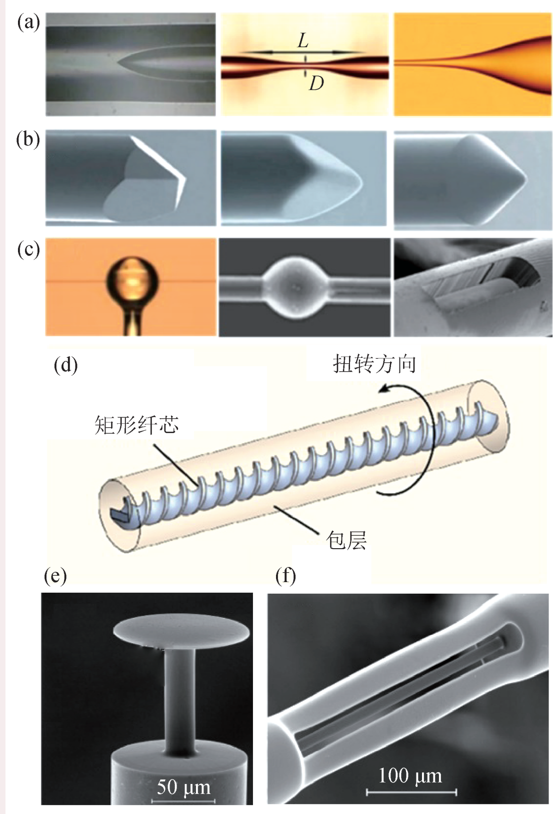

图2　采用不同的微加工技术获得的各种光纤集成器件　(a)光纤焊接机构造的各种微结构器件；(b)纤端研磨机制备的各种纤端形状；(c)熔融吹泡与深紫外激光加工的球形器件和微槽器件；(d)热熔扭转制备的特种光纤；(e)，(f)化学刻蚀制造的光子器件

作。通过热熔扭转光纤也能够实现一些特殊的功能，如图2(d)所示，特别是与一些具有不对称结构的特种功能光纤相结合，能够制备出光纤涡旋光生成器件、光纤滤波器、长周期光纤光栅等器件[23]。化学蚀刻也是对光纤进行微加工的常用方法，可以将光纤的某一截面改造或重塑为复杂的三维微结构光器件。这种微加工工艺是基于蚀刻速率控制来完成的，要想实现这种微加工技术，需要在标准的光纤制造过程中，将五氧化二磷引入硅玻璃中。当这种掺杂光纤暴露于氢氟酸时，掺有五氧化二磷的光纤截面内区域的蚀刻速度比纯二氧化硅快约100倍[24，25]。因此，就可以通过设计和制备特殊掺杂的光纤，在标准单模光纤的尖端或将掺杂光纤与标准光纤之间进行拼接组合，然后蚀刻成最终结构，就可以有效地制造出各种

新的光子器件了，如图2(e)和2(f)所示。

2.3 有源器件集成

2.3.1 多芯光纤激光器

采用高精度的多芯光纤(FBG)制造方法，能够在多芯光纤的所有芯中制造并行激光器阵列，这不仅使激光器的制造效率得到极大的提高，也为密集空分复用光通信和光传感系统中并行阵列激光器光源器件的发展提供了新的途径。为此，Westbrook等[26]给出了在七芯光纤并行制造分布式反馈(DFB)激光器的报道。在这项工作中，六边形排列的七芯光纤的所有七个纤芯都并行刻写了光纤光栅(图3(a)，(b))，其中所制造的并行光纤DFB激光器中，7个纤芯中的6个具有足够的输出光功率，第7个纤芯激光器输出功率低于其他纤芯的100倍。这是由于在光栅刻写过程中曝光条件不够理想造成的。所采用的光纤是芯间距为40 μm的六边形阵列掺铒多芯光纤，利用单次紫外曝光制作了8 cm长、工作在1545 nm附近的DFB光栅腔，如图3(c)所示。

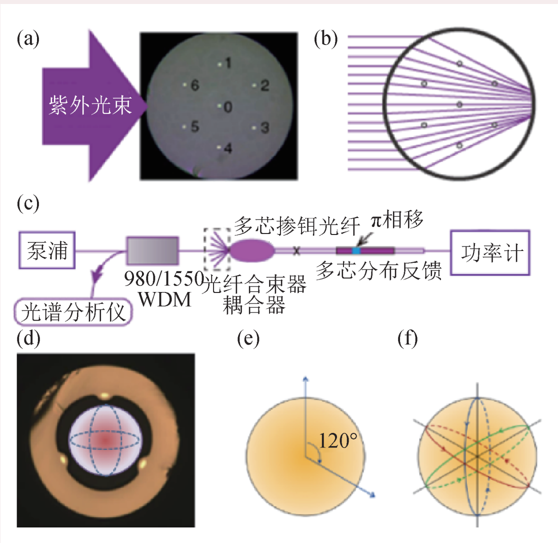

图3 七芯光纤多激光器及中空多芯光纤微球谐振腔激光器示意图 (a)七芯光纤图像，显示纤芯数和紫外刻写光束的方向；(b)紫外刻写光束的射线轨迹；(c)测量多芯光纤DFB激光器的实验装置：其中泵浦光波长为980 nm，经过980/1550波分复用器(WDM)注入锥体光纤扇入扇出器中，多芯掺铒光纤进行泵浦放大，经过π相移多芯光纤光栅后，形成7路DFB激光；(d)中空三芯光纤微球谐振腔激光器的横截面；(e)光纤内部悬挂纤芯之间的内夹角；(f)微球上回音壁模式的传播方式

采用中空的熔嵌椭圆形多芯光纤也可以在单根光纤内实现多激光器的集成，图3(d)—(f)给出了一种借助于中空熔嵌椭圆形多芯光纤，嵌入具有增益介质的微球谐振腔的集成式多激光器工作原理示意图[27]。这种具有特殊结构的中空多芯光纤中，当输入光进入光纤后，由于中空多芯光纤的光纤芯是悬挂在光纤内壁上的，其外界石英包层只有几个微米，所以其倏逝场比较大。微球谐振器与嵌在光纤内壁上的光纤芯进行相位匹配、能量耦合，将种子光源的倏逝场的能量耦合到稀土材料微球表面，形成回音壁模式谐振，光波在光纤内置的稀土玻璃微球内表面上不断进行全反射，从而被约束在球体内沿微球表面的大圆绕行并进行信号增益、放大，最终通过光纤内壁上的纤芯将谐振波耦合出来，实现增益放大的谐振光输出。

这种特殊的基于中空光纤的微球谐振腔有源器件继承和改善了传统微谐振腔光学器件的4个特性，即极高的光学品质因子(Q-factor)所导致的4个光学特性：高能量密度、超窄的谐振波长线宽、极小的模式体积和超长的光腔衰荡周期，加上该器件可以实现两个或两个以上的光纤芯同单个微球谐振腔器件的空间三维耦合，从而可以实现在一个微球腔上面多条路径的回音壁模式传播，这为在一个微球谐振腔上制备多个波长复用的微腔激光器提供了可能。

2.3.2 光纤集成光电探测器

全光纤光通信网络的前景很吸引人，在这种网络中，光可以在光纤内部产生、调制和检测，而不需要离散的光电子设备。然而，要想成为现实，这种方法需要将光电材料及其功能集成到光纤中，以创建一种用于执行各种任务的新型半导体—光纤混合器件。

光纤与光电子材料的集成是一项有意义的工作。在微结构光纤中加入半导体结可以有效地改善光纤内器件或全光纤器件的性能，使光纤本

身能够实现光信号的探测。J. V. John小组在2012年报道了通过精确掺杂半导体材料和高质量整流半导体结集成到微结构光纤中，实现了高速、全光纤功能通信波长的光检测[28]。该半导体—光纤混合器件的带宽高达3 GHz，可与标准单模光纤无缝耦合连接，具有亚纳秒的响应速度，如图4所示。

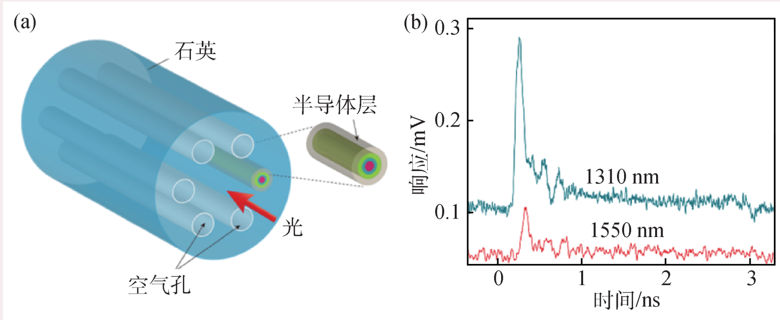

图4 具有半导体结的光电探测光纤 (a)半导体结由几层硅和锗构成，位于靠近纤芯的微孔中；(b)对波长分别为1310 nm和1550 nm的约10 ps的光信号响应，表明该光电探测器具有亚纳秒的快速响应速度

3 光纤中的“离散光学”

3.1 光纤中的离散光学系统

光纤集成光学系统为离散光学的研究提供了理想的实验室。在离散光学系统中，可以通过多种光场之间的关联来实现对系统中光波电场的调控。例如，集成在一根光纤中的波导阵列可以通过各个离散波导的模式耦合机制实现模场的调控，从而获得所需的光场特性。事实上，这可以通过设计制造特殊的波导阵列结构的方法，构造出所需的离散结构光学器件。在所设计的光纤波导阵列中，通过相邻纤芯之间的耦合，输入光可以扩大空间分布[29—31]，就像连续介质中的衍射一样。为此，图1(a)给出了几种特殊设计的多芯排列光纤。

如何实现各个离散模场之间的转换也是光纤离散光学所关注的内容之一。典型的问题是光纤波导中模场几何尺寸的扩展和压缩，少模光纤中模场分离等问题。离散光学的主要内容，就是通过搞清楚上述各种光波电场关联的内在机制，从而获得其相互作用规律，进而找到能够操控其变换的方法，为在单根光纤中将分立器件集成后获得新的光学特性或新的功能提供有效的手段。

3.2 光纤离散光学的调控方法

3.2.1 离散波导耦合调控

所谓的调控，是指通过波导模场之间彼此的关联与相互关系加以变化和调整。具体而言，就是指在波导模场之间的强度耦合转化，或者相位变化过程中加入可控的变化。而在离散光学系统中，正是由于在紧凑的空间中，各个分立的波导之间的相互影响和关联较强，例如波导之间耦合系数数值较大，才会使得彼此之间的相互影响效应较为显著。离散光学关注的内容，恰好是如何通过对这种关联的深入系统的认识，借助于其规律与特性，实现特种功能并达成需求的目标。

在同一个包层中置入多个波导，是单根光纤中进行多光路集成的典型器件，通过不同的折射率剖面进行结构设计，这种器件可用于解决光通信容量问题，用于构建长距离通信的空分复用多芯光纤[32—34]；也可以通过增加掺杂面积从而提高激光功率的潜力，构建成锁相MCF激光阵列[35, 36]。对于这类分离波导集成器件的分析，可借鉴较为严格的耦合模理论[37—39]，例如，以典型的线性分布多波导为例，如图5所示，通过简化的耦合波模型，给出各个分立的离散波导之间的超模耦合分析方法，以建立这类离散波导系统之间简明的关联[40]。

3.2.2 渐变波导模场调控

渐变波导指的是器件折射率剖面由一种结构缓慢变化至另一种异形结构的波导，基于这种结构可以实现光纤波导中模场的压缩、扩展、变形、平移等操作，也能将多模波导中不同模式进行分离和组合。运用渐变波导的设计理念，相关研究者设计了模场变换器和模分复用器等实用的光子器件，广泛应用于光纤通信与激光器领域。渐变

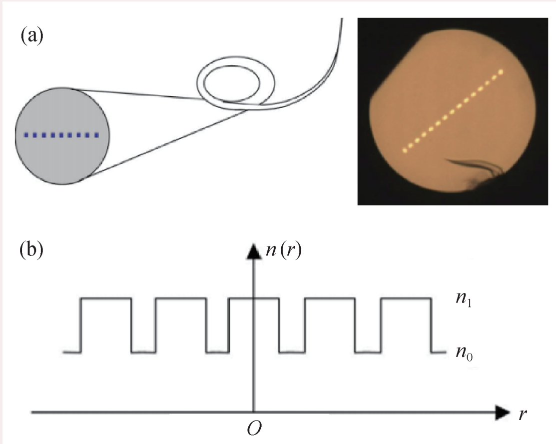

图5 多个离散波导按线性分布在一个包层中的光纤 (a)线性阵列多芯光纤的横截面结构示意图(左)和实物图(右)；(b)线性阵列多芯光纤的折射率剖面

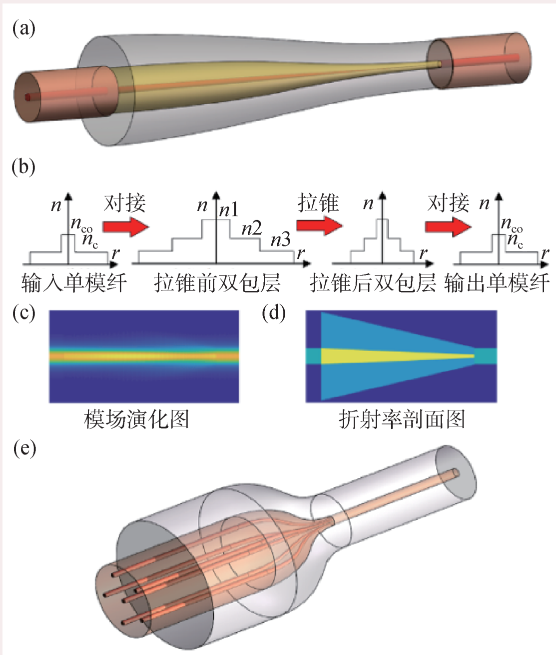

图6 (a)模场变换器结构示意图；(b)对应于(a)中4个位置的折射率截面图，其中左边小图为输入单模纤的折射率，对应于与锥体大端对接的单模光纤，中间两个小图对应于锥体被拉细前后的折射率分布情况，右侧的小图对应于输出的单模光纤折射率分布；(c)双包层过渡光纤中模式演化过程图；(d)仿真得到的折射率剖面图；(e)光子灯笼结构简图

波导具有两个主要特点：(1)渐变波导输入端的结构与输出端的结构不同，输入模式与输出模式的电磁场分布也有较大差异；(2)渐变波导一般呈现锥形或条形，其整体结构变换呈缓变趋势，基本不会激发导模与辐射模间的耦合，器件插入损耗较低。

渐变波导中最重要的一类器件是拉锥波导，典型的模场变换器[41—43]和模分复用器[44—46]都属于此类器件。该器件通常由一根或多根光纤外加石英毛细套管拉锥制成，在拉锥过程中器件的横向剖面随套管外径的缩小等比例缩小，在此过程中一般不发生热扩散效应，不同锥区横截面均可视为初始截面缩小后的结果。未收缩的器件初始端一般连接单模光纤，另一端连接多芯光纤或少模光纤。单模光纤的入射光波经过拉锥波导进行模场变化后，可形成多芯光纤中某一芯的基模或少模光纤中支持的某个模式(图6(a)，(b))。这种器件具有多种应用场景，例如多芯光纤扇入扇出器(MCF-FIFO)、半导体激光器的输出模式变换等，是光纤通信领域中必不可少的器件。模场变换器的核心要点是消逝芯的形成，消逝芯指光纤拉锥过程中原本的纤芯收缩至一定大小后，无法起到束缚导模作用，模式能量逐步由纤芯内部扩散至外部，直至纤芯本身对模场的影响可忽略不计，此时我们称该纤芯为消逝芯。模场变换器通常由拉锥双包层过渡光纤构成，在未拉锥的一端，消逝芯和双包层过渡光纤内包层构成了光纤单模结构，限制纤芯中的模式数量。而在另一端，由于拉锥后的双包层过渡光纤纤芯收缩成为消逝芯，无法将基模限制在纤芯内部，拉锥后的内包层与外包层构成了新的双层折射率结构，当收缩率达到一定程度，内包层与外包层同样能形成新的单模结构，如图6(c)，(d)所示。

光纤模分复用器(或称之为光子灯笼，photon lantern，PL)也是一类渐变波导，它通常由多根单模光纤、低折射率多孔毛细管、少模光纤熔接拉锥制成，能将单模光纤中传导的基模转换为锥区末端少模光纤中的各阶模式。渐变波导的绝热判据也能用来衡量光子灯笼的模式数量、器件长度、拉锥形状等参数之间的关系。与普通拉锥波导不同，光子灯笼一般含有多个局域超模，设计光子灯笼首先要确保这些局域模式的有效折射率差足够大，并且不产生交叉。一个典型的六模光子灯笼的结构简图如图6(e)所示。

4 光纤中的集成系统应用：多芯光纤三维形变传感器

基于多芯光纤构建的三维形状传感系统是光纤集成光学系统的一个典型应用案例，它利用光纤局部应变产生的后向散射信号来探测光纤的弯曲和扭转等信息，然后对这些信息进行处理以重构光纤的空间形变，能够实时持续跟踪动态物体(未知运动)的形状和位置[47]。该技术提供了一种有效的替代现有形状传感的方法，其优点是安装方便、本质安全、尺寸小巧紧凑、具有柔软的灵活性、抗恶劣环境和腐蚀、不需要接近，仅靠感测数值及重构模型即可重建形状。这些优势使得其在医疗、能源、国防、航空航天、结构安全监测以及其他智能结构等领域具有广泛的应用价值。

基于多芯光纤实现三维形状传感的方法有多种[48]，本节仅以分布式四芯光纤三维形状传感系统为例，来展示如何能够通过在一根多芯光纤上的多个光纤光栅器件的集成，再通过多组FBG阵列的集成，借助于4根纤芯在同一根光纤中的空间分布关系，形成一个规模化的光器件微集成系统，从而给出位于不同空间位置的FBG的形变差异来实现该多芯光纤三维形状重构的。

对于采用多芯光纤光栅如何重构空间三维形状的问题，2012年，美国航天管理局兰利研究中心Moore等人[49]提出了一种分析分布式光纤弯曲传感测量数据的新方法。他把弯曲传感光纤看成基尔霍夫 (Kirchhoff)弹性杆，因此基于基尔霍夫弹性杆理论，就可以把传感光纤的空间弯曲特征用Frenet—Serret方程表示出来，该方程采用一系列微分方程来描述空间三维弯曲。通过求解该方程就可得到光纤应变的具体位移和方向。

图7(a)，(b)所示的是四芯光纤光栅弯曲传感器，该传感器主要通过在四芯光纤上刻写布拉格光栅阵列而成，该光栅阵列一般可以采用相位掩模法来制备。从图7(b)可看出，四芯光纤主要由一个位于包层中心的中央纤芯和三个以正三角形的形式排列的纤芯组成。

在实际光栅弯曲传感系统中，根据光纤局部的弯曲半径和弯曲方向就可以得到光纤局部形态变化数据，借助于这些形态变化数据就可以重构光纤整体的三维形变。因此，如果沿着光纤布置若干个FBG传感阵列，我们就可以重构整个光纤的三维形态变化。在多芯光纤的每个测量剖面中，通过同时测量不同纤芯的应变确定该位置的三维曲率。随后将各位置的曲率使用插值或曲线拟合的方法得到整根光纤的曲率函数，最后通过重构算法实现三维形状还原。图7(b)，(c)给出了可全部国产化的四芯光纤三维形状传感系统的关键部件。

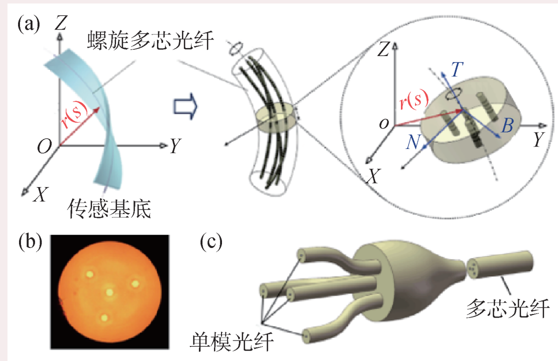

图7 四芯光纤光栅弯曲传感工作原理 (a)光纤传感三维形状重构原理示意图；(b)四芯光纤横截面图；(c)四芯光纤扇入扇出关键部件

5 讨论和展望

光纤集成光学就是利用石英光纤作为基体材料，将各种光路或光学元件微缩集成到一根光纤中，构建一个多功能的光学器件或元件，或通过若干个功能光学器件的集成，在光纤上构建成完整的微光学系统。而离散光学则是指由有限个不同的光路与分立的光学元件构成的光学系统，光纤中的离散光学是指集成在光纤上的离散光学系统，对于在如此狭小空间中构建这些彼此分立的光学器件所形成的光学系统来说，各个光场彼此会发生耦合与关联。如何通过各个光学单元之间的空间结构或折射率的变化加强有益的耦合或减弱有害的关联，采用何种方法改变和调控这些离散光学器件及其光场的相互作用，就构成了离散光学需要研究的内容。

纤维集成光学技术为微光子器件、微光子系统的集成提供了有别于硅基单片光子集成、混合光电集成之外的一种新型光子集成方式和解决途径。纤维集成光学带来微型化、高精度、高稳定、多功能、可批量化制造等优点，为满足社会与工业信息化、国防和武器装备智能化等需求提供了一种有效的技术支撑。

平面光子集成芯片技术正在成为各国发展光子产业的重要关键技术。如何突破平面光子集成关键技术的壁垒，是困扰集成光学发展的一个瓶颈问题。多功能化、小型化、集成化器件已成为未来发展的重要趋势。尽管平板基底器件一直在光通信系统中扮演着最主要的角色，但就某些特定的功能而言，光纤波导器件具有平板基底器件难以比拟的优势，在某些应用场合甚至具有不可替代的作用——采用微结构光纤的光纤波导器件将更是如此。因此，在新一代光通信系统和网络中，光纤集成光子器件必将占有一席之地，“光纤集成光子器件”将是新一代信息技术发展的重要方向。随着智慧城市、数据中心、云计算的高速发展，信息的获得与传输需求剧增，如何满足这些多样化的传感需求，也为新一代光纤光子集成器件的发展提出了新的挑战。

因此，本文所倡导的在特种微结构光纤内进行光子集成的方法，是探索如何开拓三维光子集成技术的一种尝试。其核心是以光纤为基体，构造三维空间光器件集成体系，将较复杂的光路和各种光学元器件微缩集成到一根光纤内部。光纤集成光学的目的是实现基于光纤的光学器件的小型化，使光学信息传输、传感、交换和处理器件更加紧凑。

期望这一新兴的技术能在光通信领域、光感测领域、人工智能、生物医学等领域的应用中发挥其应有的作用。借助于特种光纤和先进的微加工技术，按照新的物理观点将各种功能器件重新进行安排，通过将这些元器件或系统“集成”在一根光纤中，以形成具有多种功能的光纤集成光子学器件，开辟一种有别于硅基单片光子集成、混合光电集成之外的新型光子集成方式和解决途径。

参考文献

[1] Miller S E. The Bell System Technical Journal，1969，48(7)：2059

[2] Somekh S，Yariv A. Fiber Optic Communications. In：International Telemetering Conference Proceedings. Los Angeles，1972. pp.407—418

[3] Hill K O，Fujii Y，Johnson D C *et al*. Applied Physics Letters，1978，32(10)：647

[4] Inao S. High Density Multi-core-fiber Cable. In：Proceedings of the 28th International Wire & Cable Symposium. Cherry Hill，1979. pp.370—384

[5] Hayashi T，Taru T，Shimakawa O *et al*. Optics Express，2011，19(17)：16576

[6] Matsuo S，Takenag K，Arakawa Y *et al*. Optics Letters，2011，36(23)：4626

[7] Tottori Y，Kobayashi T，Watanabe M. Low Loss Optical Connection Module for 7-core Multi-Core Fiber and Seven Single Mode Fibers. In：2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. Seattle，2012. pp.232—233

[8] Klaus W，Sakaguchi J，Puttnam B J *et al*. IEEE Photonics Technology Letters，2012，24(21)：1902

[9] Yuan L B，Yang J，Liu Z H *et al*. Optics Letters，2006，31(18)：2692

[10] 苑立波，杨军，刘志海. 集成为单根光纤的迈克尔逊干涉仪. 专利号：ZL200610010422.2

[11] Yuan L，Liu Z，Yang J. Optics Letters，2006，31(22)：3237

[12] 苑立波，刘志海，杨军. 单芯光纤与多芯光纤耦合器及其融接拉锥耦合方法. 专利号：ZL200610151033.1

[13] 苑立波，刘志海，杨军. 纤维集成式马赫曾德干涉仪及其制造方法. 专利号：ZL200710072625.9

[14] 苑立波，杨军，朱晓亮. 毛细管光纤与标准光纤的连接方法. 专利号：ZL200810136913.0

[15] Yuan L，Yang J，Guan C *et al*. Optics Letters，2008，33(6)：578

[16] Yuan L，Dai Q，Tian F *et al*. Optics Letters，2009，34(10)：1531

[17] 汪杰君，胡挺，苑立波. 基于120度夹角反射曝光叠加的异形芯光纤光栅制备技术. 专利号：ZL202010233353.1

[18] 汪杰君，胡挺，苑立波. 基于半圆相位补偿板的异形芯光纤光栅制备技术. 专利号：ZL202010233211.5

[19] Liu Z，Bo F，Wang L *et al*. Optics Letters，2011，36(13)：2435

[20] Liu Z，Wei Y，Zhang Y *et al*. Optics Letters，2015，40(19)：4452

[21] Liu Z，Wei Y，Zhang Y *et al*. Optics Letters，2015，40(12)：2826

[22] Liu Z，Zhu Z，Liu L *et al*. Optics Letters，2016，41(18)：4320

[23] Ma C，Wang J，Yuan L. Photonics，2021，8(6)：193

[24] Pevec S，Cibula E，Lenardic B *et al*. IEEE Photonics Journal，2011，3(4)：627

[25] Pevec S，Donlagic D. Optics Express，2012，20(25)：27874

[26] Westbrook P，Abedin K，Taunay T *et al*. Optics Letters，2012，37(19)：4014

[27] Zhang M，Yang W，Tian K *et al*. Optics Letters，2018，43(16)：3961

[28] He R, Sazio P J, Peacock A C *et al*. Nature Photonics, 2012, 6 (3): 174
[29] Yuan L, Dai Q, Tian F *et al*. Optics Letters, 2009, 34(10): 1531
[30] 苑立波，戴强，田凤军 等. 一种环形分布多芯光纤及其制备方法. 专利号:ZL201010138977.1
[31] Deng H, Yuan Y, Yuan L. Optics Letters, 2016, 41(4): 824
[32] Imamura K, Mukasa K, Sugizaki R. Trench Assisted Multi-Core Fiber with Large Aeff over 100 μm2 and Low Attenuation Loss. In: 37th European Conference and Exposition on Optical Communications. Geneva, 2011. Mo.1.LeCervin.1
[33] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O *et al*. Optics Express, 2011, 19 (17): 16576
[34] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O *et al*. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 583
[35] Wrage M, Glas P, Fischer D *et al*. Optics Communications, 2002, 205(4): 367
[36] Huo Y, Cheo P K, King G G. Optics Express, 2004, 12(25): 6230
[37] Chuang S L. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(1): 5
[38] Haus H, Huang W, Kawakami S *et al*. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(1): 16
[39] Huang W P. Journal of the Optical Society of America, 1994, 11 (3): 963
[40] Guan C, Yuan L, Dai Q *et al*. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1741
[41] Uemura H, Takenaga K, Ori T *et al*. Fused Taper Type fan-in/fan-out Device for Multicore EDF. In: 8th OptoElectronics and Communications Conference Held Jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS). Kyoto, 2013. pp.1—2
[42] Uemura H, Omichi K, Takenaga K *et al*. Fused Taper Type fan-in/fan-out Device for 12 Core Multi-Core Fiber. In: 2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology. Melbourne, 2014. pp.49—50
[43] Kopp V I, Park J, Wlodawski M *et al*. Pitch Reducing Optical Fiber Array and Multicore Fiber for Space-Division Multiplexing. In: 2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. Waikoloa, 2013. pp.99—100
[44] Birks T A, Gris-Sanchez I, Yerolatsitis S *et al*. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(2): 107
[45] Leon-Saval S G, Argyros A, Bland-Hawthorn J. Optics Express, 2010, 18(8): 8430
[46] Noordegraaf D, Skovgaard P M, Nielsen M D *et al*. Optics Express, 2009, 17(3): 1988
[47] 夏启，王洪业，杨世泰 等. 激光与光电子学进展，2021，58(13): 173
[48] 苑立波，童维军，江山 等. 光学学报，2022，42(01): 9
[49] Moore J P, Rogge M D. Optics Express, 2012, 20(3): 2967