

多芯光纤特性及其传感应用

苑立波*

桂林电子科技大学电子工程与自动化学院光子学研究中心, 广西 桂林 541004

摘要 作为空分复用的多芯光纤成为进一步增大光纤通信容量的最后一块处女地, 近几年来格外引人注目, 已经有了大量的关于解决扩容增速的报道。本研究围绕多芯光纤的基本性能, 特别是在非光纤通信及其传感应用方面, 给出了较为全面的综述。讨论了多芯光纤有关的问题, 包括芯间耦合与串扰问题、多芯光纤的传输特性与弯曲特性、多芯光纤的分束与连接技术, 以及多芯光纤的锥体耦合技术等多芯光纤在光通信技术领域涉猎的核心问题, 同时也讨论了新型中空椭圆形多芯保偏光纤, 并给出多芯光纤在大功率光纤激光器、光纤干涉方面的若干应用实例, 重点介绍了多芯光纤在传感领域的若干应用。

关键词 光纤光学; 光纤通信; 多芯光纤; 光纤器件; 光纤传感

中图分类号 TN811

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170612

Multi-Core Fiber Characteristics and Its Sensing Applications

Yuan Libo*

Photonics Research Center, School of Electronic Engineering and Automation,
Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract As the remaining frontier for increasing the communication capacity of optical fibers, multi-core fibers with space division multiplexing have attracted much attention in recent years, with many solutions proposed for expanding the capacity and improving the transmission speed. This paper comprehensively reviews the basic properties of multi-core optical fibers, especially in non-optical-fiber communications and sensing applications. We focus on the main issues related to multi-core fibers, namely, inter-core coupling and crosstalk problems, the transmission and bending characteristics of the fibers, fan-in/fan-out and connection technologies, the taped fiber coupling technique for multicores, and other dominant problems in optical fiber communication technology. A new hollow elliptic multi-core polarization-maintaining fiber is discussed as well. In a series of examples, we finally show how multi-core fibers are applied in high-power fiber lasers and fiber interference, emphasizing their applications in various sensing fields.

Key words fiber optics; optical fiber communication; multi-core fibers; optical fiber components; optical fiber sensing

OCIS codes 060.2330; 060.2340; 060.2370

1 引言

1.1 多芯光纤的起因

多芯光纤技术的不断发展越来越引起人们的重视^[1-4]。近来,人们通过时分复用、波分复用、偏振极化复用以及多级调制系统,将单芯光纤传输系统的

信道容量提升至 $100 \text{ TB} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4-7]。然而,单芯光纤的传输容量已经接近其物理极限,其传输容量每五年增长 10 倍,因而在不久的将来,系统通信容量的扩增将会达到举步维艰的境况^[8-9]。在这种情况下,作为空分复用的多芯光纤成为进一步增大光纤通信容量的最后一块处女地而引人注目^[9-10]。

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-06-23; 录用日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61535004, 61735009, 61827819)、广西科技专项 (AD17195074, AA18242043)、国防基金 (6140414030102)

* E-mail: lbyuan@vip.sina.com

空分复用的概念并不是最近提出的^[11-13],将多芯光纤用于高密度光通信的方案早在20世纪70年代末就由 Iano 等^[11-12]提出了。这种多芯光纤是由同一个包层内含多个纤芯的光纤预制棒拉制而成的,其包层外形是圆柱体。在光纤通信的早期,采用所提出的多芯光纤实现远程光通信时存在两个主要的困难,一是横向芯间串扰问题,二是光纤之间的连接问题。为此,在光纤通信的早期,为了解决芯间串扰和圆形多芯光纤对准、熔接方面的困难,人们也提出了一些解决办法,如:开发了所谓的束状光纤^[14-18]。这种束状光纤是将多个各自独立的光纤预制棒组合成一根合成预制棒并拉制而成的,合成预制棒中的每个预制棒只有一个纤芯,因而这种多芯光纤的包层不是圆形的。这种束状光纤被用作用户专用线^[15-18]。由于无源光网络(PON)^[19]可为用户提供成本低廉、节省空间的光网络,仅有少量的束状光纤被用于光网络系统中,而这种作为提高信道密度的空分复用圆形多芯光纤在早期也没有被商业化。

1.2 多芯光纤发展的现状

21世纪初,一方面,由于未来扩增容量的瓶颈即将成为现实,多芯光纤又重新引起人们的关注^[20-22]。目前已经提出了几种不同类型的多芯光纤,并集中地进行了研究。这些研究不仅是针对大容量、长距离的应用^[23-26],而且也关注大容量、短距离业务^[20,27-28]和大数据无源光网络系统^[29]。

另一方面,集成光学与纤维光学的融合为多芯光纤技术的发展和深入研究注入了新的活力^[30-37],借助于同一光纤内的多波导,构造了集成在一根光纤内的 Michelson 与 Mach-Zehnder 干涉仪^[30-32],实现了单根光纤内的多路分光与合光^[33-35],研究了集成在一根光纤中的光调制器^[36],发展了不同结构的纤维集成光器件^[37-38],实现了将各种光路与光器件微缩集成在一根光纤中^[39-41]。

上述两个方面的需求都进一步促进了多芯光纤的发展,为新型多芯光纤的设计和应用提供了各种可能,为其在微光学器件与微系统集成中的应用提供了广阔的空间。

1.3 多芯光纤的制备方法

多芯光纤的制备过程与传统的通信光纤类似,只是在预制棒的制备方法上有些差别。多芯光纤预制棒的制造方法主要有两种,一种是在石英棒上进行高精度打孔,然后再嵌入多根芯棒;另一种是在石英基管内部采用堆栈的方法,按照设计好的多根纤芯位置进行堆栈,缝隙采用合适的纯石英棒进行填

充。这两种方法中,打孔法的精度较高,污染少,工艺路线成熟,适合批量生产;而堆栈法对设备的要求较低,组棒方法灵活,可进行多种几何参数设计,方便构造成各种多芯微结构光纤。

堆栈法制备多芯光纤预制棒的过程如下。首先基于设计参数选择一个合适的石英外套管,准备芯棒,测试纤芯直径、外径、折射率剖面,然后进行拉伸,直到外径延伸至合适的尺寸,再采用纯石英棒进行拉伸,制备出直径合适的匹配填充小棒;然后,按照几何结构要求将多种小棒和套管一起进行清洗,即在超声条件下进行酸洗、水洗(目的是去油、去离子污染),然后干燥、封装待用;接着,将小棒和填充小棒按照设计在套管内堆叠,并进行固定,防止拉丝时小棒掉出;之后,将做好的预制棒放在通入高纯氮气的烘干箱内进行干燥,充分去除水分,加热温度最高到350℃;最后,将预制棒安装在拉丝塔上进行拉丝,在顶部进行抽真空作业,确保所有玻璃融合不夹气泡,完成多芯光纤的拉制。

2 芯间耦合与串扰

将多芯光纤用于通信系统中时,为了扩大多芯光纤的空间容量,在保持每个纤芯光传输特性的前提下增大纤芯密度(光纤每单位横截面积的纤芯数)就变得十分重要。缩短芯间距离是增大纤芯密度的有效途径,当缩小芯间距时,要使多芯光纤中每个纤芯独立传输信号,就必须抑制芯间串扰。为了抑制小间距多芯光纤的芯间串扰,每个纤芯中的模场应强制限制在各自的纤芯内,以减少模场之间的交叠。因此,要权衡芯间串扰、芯间距离、有效面积以及截止波长这些参数之间的关系。根据有效面积、截止波长以及纤芯结构可确定模式限制条件,这种折中可以通过简单的耦合模理论来理解。然而,耦合模理论揭示了多芯光纤的串扰不能简单地采用未被扰动的耦合模方程来解释,而适当调整扰动能够抑制串扰,这就放宽了上述参数之间的均衡关系。

在纤维集成光器件系统中,所采用的多芯光纤则是围绕着如何在有效的空间中构建功能更强、性能更好的微光学器件和组件来进行设计的。有时减小每个光学通道(纤芯)之间的耦合与加强某两个光波之间的相互作用的需求同时存在。例如:在光纤内部构建 Mach-Zehnder 干涉仪时,干涉仪的两臂需要高度隔离,而在干涉仪的两端则需要有限的空间中实现分束与合束。这种多样化的需求为多样化的多芯光纤技术的发展提供了动力。

2.1 多芯光纤的传输方程

对于具有 N 个纤芯的多芯光纤,每个纤芯的光波电场 E_n 都是满足各自边界条件的一个解, N 个解所描写的总的光波场的模式称为超模(supermode),于是多芯光纤内纤芯波导传输的超模方程可以表示为

$$\frac{d}{dz}\mathbf{E} = -j(\boldsymbol{\beta}_{\text{eq}} + \boldsymbol{\kappa})\mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\beta}_{\text{eq}} = \boldsymbol{\beta}_{\text{c}} + \boldsymbol{\beta}_{\text{b}} + \boldsymbol{\beta}_{\text{s}}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E} = [E_1, E_2, \dots, E_N]^T$ 为每个纤芯电场 E_n 的向量, n 为纤芯序号, $n = 1, 2, \dots, N$; z 为光场传输方向; $\boldsymbol{\beta}_{\text{eq}}$ 为等效传输常数; $\boldsymbol{\beta}_{\text{c}} = \text{diag}(\beta_{\text{c},1}, \beta_{\text{c},2}, \dots, \beta_{\text{c},N})$, 包括未被扰动的传输常数 $\beta_{\text{c},n}$, $\beta_{\text{c},n} = kn_{\text{eff},n}$, k 为真空中的波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为真空中的波长, $n_{\text{eff},n}$ 为有效折射率; $\boldsymbol{\beta}_{\text{b}} = \text{diag}(\beta_{\text{b},1}, \beta_{\text{b},2}, \dots, \beta_{\text{b},N})$ 包括弯曲导致的传输常数扰动项 $\beta_{\text{b},n}$; $\boldsymbol{\beta}_{\text{s}} = \text{diag}(\beta_{\text{s},1}, \beta_{\text{s},2}, \dots, \beta_{\text{s},N})$ 包括光纤由于结构不均匀引起的传输常数的扰动项 $\beta_{\text{s},n}$; $\boldsymbol{\kappa}$ 为 $N \times N$ 矩阵, 包括每个芯间模式耦合系数 κ_{mn} , 角标 m, n 分别表示不同的纤芯序号。

例如, 对于一个具有中心对称分布的多芯光纤而言, 弯曲均会使每个纤芯的折射率发生一定的变化, 光纤折射率剖面 $n(r, \theta)$ 可写为^[42]

$$n_{\text{eq}}(r, \theta) \approx n(r, \theta) \left(1 + \sigma \frac{r \cos \theta}{R} \right), \quad (3)$$

式中: (r, θ) 为光纤横断面的本地极坐标, r 为光纤横断面径向, θ 为角向, 在弯曲光纤端面的径向 $\theta = 0$; R 为多芯光纤弯曲半径; σ 为应力校正因子, 可取为 1。如图 1 所示, 第 n 个芯的等效折射率 $n_{\text{eqeff},n}$ 可表示为

$$n_{\text{eqeff},n} \approx n_{\text{eqeff}} \left(1 + \gamma \frac{r_n \cos \theta_n}{R} \right). \quad (4)$$

式中: n_{eqeff} 为每个纤芯的等效折射率。

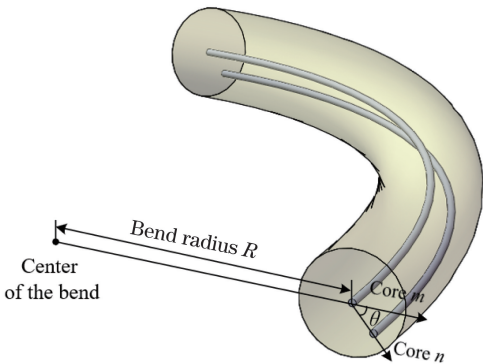


图 1 弯曲引起的多芯光纤各纤芯折射率变化的示意图
Fig. 1 Schematic of refractive index change of each core of multi-core fiber caused by bending

而 $\beta_{\text{b},n}$ 可表示为

$$\beta_{\text{b},n} \approx \beta_{\text{c},n} \gamma \frac{r_n \cos \theta_n}{R_{\text{b}}}, \quad (5)$$

则耦合模方程可表示为

$$\frac{d}{dz}A_i = \sum_{m \neq i} \{-j\kappa_{im} \exp[-j(\beta_{\text{eq},m} - \beta_{\text{eq},i})z]A_m\}, \quad (6)$$

式中正交耦合模理论(CMT)给出的耦合系数 κ_{im} 为^[43]

$$\kappa_{im} \equiv \frac{\omega \epsilon_0 \iint (n_0^2 - n_m^2) \mathbf{e}_i^* \cdot \mathbf{e}_m \, dx \, dy}{\iint \mathbf{z} \cdot (\mathbf{e}_i^* \times \mathbf{h}_i + \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i^*) \, dx \, dy}, \quad (7)$$

式中: A_m 为在第 m 个纤芯中传输模式的复振幅; $\beta_{\text{eq},m}$ 为第 m 个纤芯中传输模式的等效传输常数; ϵ_0 为真空中的介电常数; 在直角坐标系 (x, y, z) 中, \mathbf{z} 为 z 轴方向的单位矢量; ω 为角频率, $\omega = 2\pi c/\lambda$, c 为光波在真空中的速度; n_0 为实际的折射率; n_m 是其他芯都不存在情况下芯 m 的折射率; \mathbf{e}_i 和 \mathbf{h}_i 为纤芯模的归一化矢量电场和磁场, 星号 * 表示复共轭。对于功率转换无损耗系统而言, 尽管模式耦合系数应该是对称的, 即 $\kappa_{im} = \kappa_{mi}^*$, 但芯的非对称性不满足自洽的正交耦合模理论^[44]。为了处理这个问题, 人们发展了非正交模式耦合理论^[45-47], 其功率交换项系数可表示为

$$C_{im} \equiv \frac{\iint \mathbf{z} \cdot (\mathbf{e}_i^* \times \mathbf{h}_m + \mathbf{e}_m \times \mathbf{h}_i^*) \, dx \, dy}{\iint \mathbf{z} \cdot (\mathbf{e}_i^* \times \mathbf{h}_i + \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i^*) \, dx \, dy}. \quad (8)$$

然而, 当纤芯之间模场彼此交叠足够小时, 其功率交换项是可以忽略的, 于是非正交模式耦合理论被还原为自洽的正交耦合模理论^[48-49]。

2.2 纤内芯间串扰抑制方法

用于光纤通信的多芯光纤中信道容量的大小取决于纤芯的数量, 增加纤芯数量的方法一是缩小纤芯尺寸, 二是缩小纤芯距离。前者在截止波长确定的前提下受限于模场直径, 而后者受限于纤芯间距。因此, 在确保低损耗的前提下, 如何减小芯间距离并有效抑制芯间串扰是长距离通信多芯光纤设计过程中需要面对的主要问题之一。目前, 已经达到的典型的多芯光纤的技术指标如下^[50]: 在工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 有效面积为 $100 \mu\text{m}^2$, 损耗低于 $0.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, 串扰低于 $-50 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

抑制芯间串扰的有效方法主要有以下几种, 一种是采用沟槽折射率剖面的方法^[50-53], 另一种是借助于密集的空气小孔对纤芯进行围裹也可以达到降

低串扰的目的^[54-55]。此外,采用折射率不同的异质纤芯使形成纤芯中的传输常数存在差异^[56-59],也能有效抑制芯间串扰。

采用沟槽折射率剖面抑制芯间串扰的机制如图2所示,其主要特点是在纤芯周围采用较低折射率材料形成折射率沟槽对纤芯进行围裹,如图2(a)、(b)所示,这就提高了纤芯的相对数值孔

径,改善了光功率约束的局域化程度,有效减小模场直径,从而缩小纤芯之间模场的交叠区域,实现芯间耦合的阻挡和抑制。空间结构上,采用低折射率沟槽墙的阻挡隔离方式也可以抑制芯间耦合,如图2(c)所示,只是在实际光纤预制棒的制备工艺上较为复杂。图2(d)为采用上述串扰抑制方法拉制的超低串扰7芯光纤^[53]。

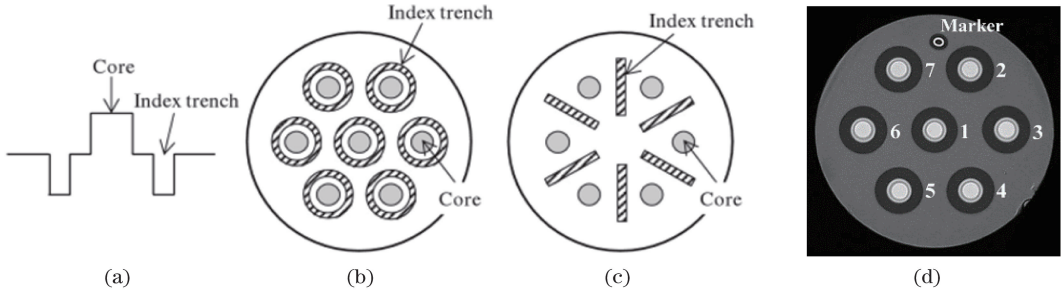


图2 采用沟槽折射率剖面抑制芯间串扰制备的光纤示意图^[50-53]。(a)低折射率围裹纤芯型多芯光纤的单个纤芯的折射率分布;(b)图(a)对应的7芯光纤的端面结构示意图;(c)低折射率沟槽墙隔离的6芯光纤端面结构示意图;(d)对应于图(b)的超低串扰7芯光纤端面显微图

Fig. 2 Schematic of fiber prepared by suppressing inter-core crosstalk using groove refractive index profile^[50-53]. (a) Refractive index distribution of single core of multi-core fiber encircled by low refractive index; (b) schematic of cross-section structure of 7-core fiber with core refractive index showed in Fig. 2(a); (c) schematic of cross-section structure of 6-core fiber isolated by groove wall with low refractive index; (d) micrograph of cross section of ultra-low crosstalk 7-core fiber corresponding to Fig. 2(b)

降低邻近纤芯串扰的另一种有效方法是借助于密集的空气小孔对纤芯进行围裹,如图3所示。每一个掺掺杂纤芯的周围被6个空气小孔包围,如图3(a)、(b)所示,纤芯的截止波长和模场直径可以通过6个空气孔的尺寸和空间位置进行调节。由于每个纤芯被一圈小孔围裹,故而形成了平均折射率

低于周围介质折射率的等效沟槽效应。因此,其串扰抑制机制与前述折射率剖面沟槽阻挡层的机理相同。这种方式也可以构造出如图3(c)所示的空气孔串扰阻挡墙来隔离邻近纤芯之间的耦合和串扰。图3(d)为采用空气孔阻挡墙的隔离法制备的6芯光纤横截面图^[54]。

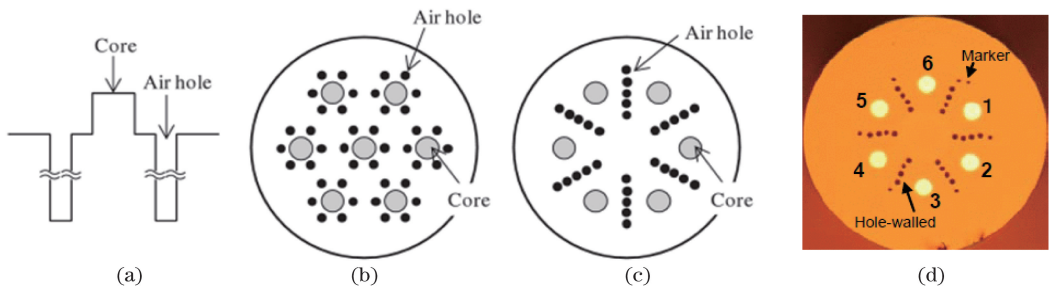


图3 采用围孔串扰辅助隔离阻挡方法制备的光纤示意图^[54-55]。(a)空气孔围裹纤芯型多芯光纤的单个纤芯的折射率分布;(b)图(a)对应的7芯光纤的端面结构示意图;(c)具有空气孔阻挡墙的6芯光纤端面结构示意图;(d)对应于图(c)的超低串扰6芯光纤端面显微图

Fig. 3 Fiber prepared by circumferential assisted crosstalk suppression method^[54-55]. (a) Refractive index distribution of single core of multi-core fiber encircled by air holes; (b) schematic of cross-section structure of 7-core fiber corresponding to Fig. 3(a); (c) schematic of cross-section structure of 6-core fiber isolated by air holes wall; (d) micrograph of cross section of ultra-low crosstalk 6-core fiber corresponding to Fig. 3(c)

除了上述抑制芯间串扰的方法外,为了有效地减小多芯光纤的芯间串扰,Kumar等^[56]在2003年

提出了采用调控每个纤芯折射率差的方法,使得多芯光纤中每个纤芯的折射率都不相同,因而每个纤

芯的光波电场都具有各不相同的传输常数 β_m ($m = 1, 2, \dots, N$), 从而可以极大地减小芯间串扰。事实上, 次近邻纤芯之间的间距较大, 其串扰较小可以忽略, 因此仅需要考虑近邻纤芯之间的串扰。因而无需使每个纤芯的折射率都各不相同, 使用三种折射率各不相同的纤芯就能达到抑制串扰的目的, 如图 4 所示, 在三角形密堆积排布的情况下, 三种

折射率不同的纤芯可确保紧邻纤芯的折射率不同。这种方法制备的多芯光纤可以实现 100 km 传输, 芯间串扰低于 -30 dB^[23]。近几年来, 由于工艺的不断完善, 多芯光纤的纤芯容量逐渐增加并且已经能够用于实现远程光通信传输^[57-58], 图 5 为具有 19 个纤芯的多芯光纤, 图 6 为具有 32 个纤芯的多芯光纤。

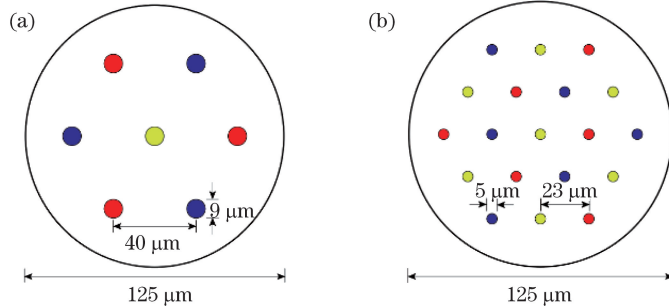


图 4 采用异质纤芯传输常数失配的串扰抑制法制备的光纤示意图^[23]。(a) 7 芯光纤; (b) 19 芯光纤

Fig. 4 Fiber prepared by crosstalk suppression method with mismatched transfer constant of heterogeneous fiber core^[23].

(a) 7-core fiber; (b) 19-core fiber

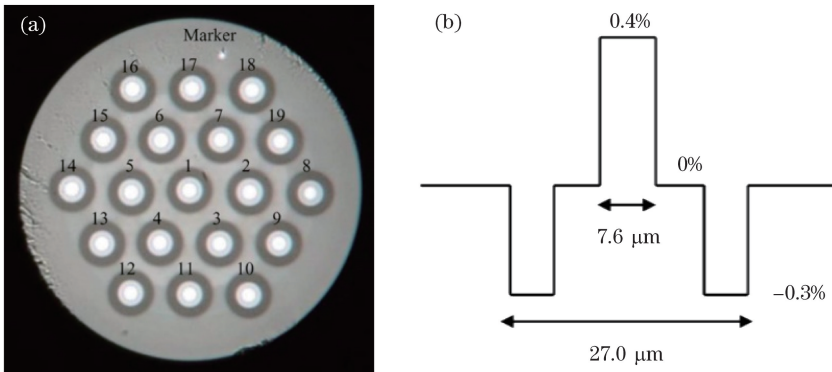


图 5 具有 19 个纤芯的多芯光纤^[57]。(a) 横截面; (b) 沟槽折射率剖面

Fig. 5 Multi-core fiber with 19 cores^[57]. (a) Cross section; (b) groove refractive index profile

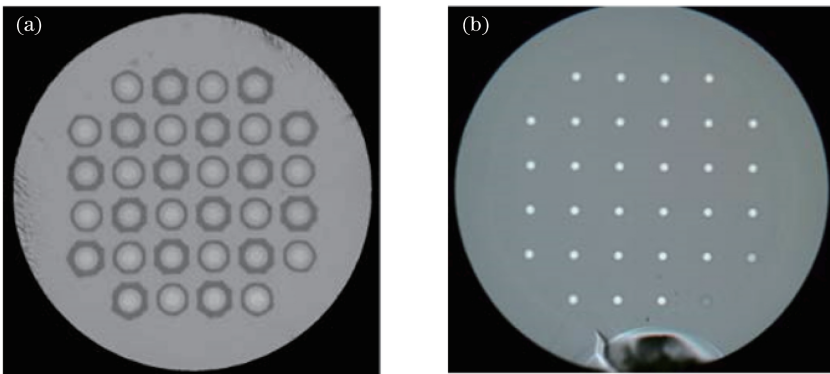


图 6 具有 32 个纤芯的多芯光纤^[58]。(a) 32 芯信号传输光纤; (b) 32 芯铒钇共掺光纤

Fig. 6 Multi-core fiber with 32 cores^[58]. (a) 32-core signal transmission fiber; (b) 32-core Er/Yb-doped fiber

2.3 多芯光纤弯曲特性

光纤弯曲将会导致损耗增大, 早在 1976 年 Marcuse^[59]就推导了弯曲光纤损耗公式, 对光纤弯

曲导致的辐射损耗进行了系统分析。对于超低损耗多芯光纤而言, 一方面为了降低串扰, 常采用低折射率沟槽围裹纤芯的办法来抑制芯间串扰, 这就使得

每个纤芯附近的折射率剖面发生了改变;另一方面,弯曲对位于中轴线周围的每个纤芯的影响都不同,因而光纤弯曲对每个纤芯折射率的影响不仅与弯曲的曲率有关,而且与每个纤芯的方位角有关。事实上,多芯光纤的弯曲将导致每个纤芯的折射率发生不同的变化,导致弯曲损耗发生改变,进而导致芯间串扰水平上升。

2.3.1 弯曲导致纤芯折射率的变化

首先,对于沿着 x 轴方向弯曲的标准单模光纤而言,可以采取保角变换的方法将弯曲光纤纤芯的折射率分布写成^[60]

$$n' = n_{\text{material}} \exp\left(\frac{x}{R}\right) \approx n_{\text{material}} \left(1 + \frac{x}{R}\right), \quad (9)$$

式中: n_{material} 为弯曲光纤的折射率。在弯曲状态下由光弹效应导致的折射率变化包括两部分:一是弯曲使折射率分布沿着弯曲半径方向整体倾斜,如图7所示,可用等效的平均折射率 n_{eff} 来表示;二是考

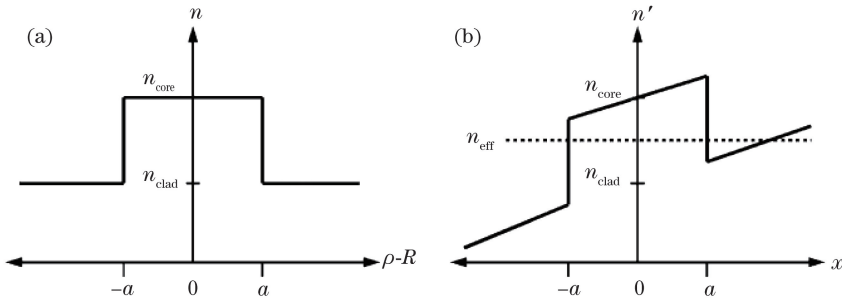


图7 弯曲光纤的折射率变化。(a)直的石英光纤折射率剖面分布; (b)弯曲石英光纤等效折射率剖面分布
Fig. 7 Change of refractive index caused by bending of multi-core fiber. (a) Refractive index distribution of straight silica optical fiber; (b) effective refractive index distribution of bent silica optical fiber

2.3.2 弯曲导致的损耗

光纤弯曲导致损耗的机制是纤芯弯曲使得传输模与辐射模耦合加强,从而增强了光功率辐射损耗。为此 Marcuse^[59]将弯曲损耗系数定义为

$$2\alpha = \Delta P / P. \quad (13)$$

式中: α 为场振幅的损耗系数,所以 α 前加了因子2; ΔP 为弯曲光纤每单位长度损失的光功率; P 为光纤中传输的光功率。

于是,考虑到光纤应变有效弯曲半径修正的弯曲损耗公式为^[60]

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} \kappa^2 \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R_{\text{eff}}}{3\beta_z^2}\right)}{2\sqrt{R_{\text{eff}}} \gamma^{3/2} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)}, \quad (14)$$

式中: κ 和 γ 分别为纤芯和包层的光衰减率; β_z 为传输常数; V 为归一化频率; K_{m-1} , K_{m+1} 分别为修正的贝塞尔函数; a 为纤芯半径。

虑了光弹效应的影响,即

$$n_{\text{material}} = n_{\text{eff}} \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2 x}{2R} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\}, \quad (10)$$

式中: ν 为泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为光弹性张量元。

可以定义等效弯曲半径 R_{eff} 来对(9)式加以修正:

$$R_{\text{eff}} = \frac{R}{1 - (n_{\text{eff}}^2/2)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]}, \quad (11)$$

将(10)式和(11)式代入到(9)式,简化到一阶近似,弯曲导致的折射率变化 n' 可近似地表示为

$$n' = n_{\text{eff}} \left(1 + \frac{x}{R_{\text{eff}}}\right). \quad (12)$$

(12)式与(9)式虽然形式上相似,但对于石英光纤而言,式中的弯曲几何半径与等效半径之比可进一步修正为 $R_{\text{eff}}/R \approx 1.28$ ^[61], 所以,应变效应在某种程度上抵消了部分纯几何弯曲带来的影响^[60]。

对于图8所示的低损耗、低串扰多芯光纤,一方面,由于每个纤芯都采用了低折射率沟槽包层围裹的降低损耗与串扰技术,针对这种双包层折射率分布的光纤弯曲损耗, Marcuse^[42]给出了一种修正的公式表达。

另一方面,可以看到由于弯曲对位于中轴线周围的每个纤芯的影响都不同,因而光纤弯曲对每个纤芯折射率的影响不仅与弯曲的曲率有关,而且与每个纤芯的方位角有关,如图9所示。如果定义中心的纤芯为 m , 并作为本地极化坐标的原点,围绕中心芯的每个纤芯的折射率可由下式给出^[54]:

$$n_i(r, \theta, R) = n_i(r, \theta) \left(1 + \frac{D_{im} \cos \theta_{im}}{R_{\text{eff}}}\right), \quad (15)$$

式中: D_{im} 为中心纤芯至周边纤芯的间距; θ_{im} 为第 i 个纤芯与中心纤芯之间连线与水平轴之间的交角。

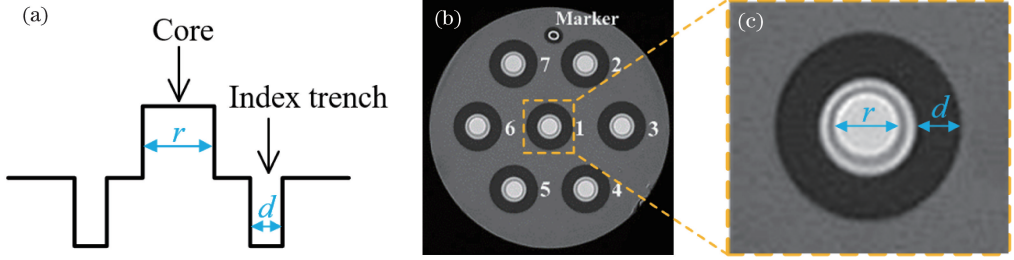


图 8 低折射率沟槽包层围裹技术。(a)多芯光纤的每个纤芯的折射率剖面;(b)带有沟槽结构的七芯光纤端面显微图;(c)单个纤芯放大图

Fig. 8 Low refractive index groove cladding technology. (a) Refractive index profile for each core of multi-core fiber; (b) micrograph of cross section of 7-core fiber with groove refractive index; (c) enlarged micrograph of single core

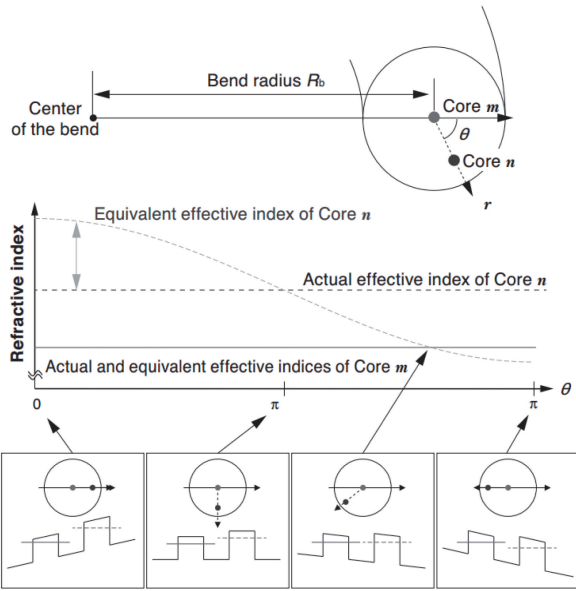


图 9 多芯光纤位于不同方位纤芯的剖面折射率 $n(r, \theta)$ ^[54]
Fig. 9 Refractive index profiles $n(r, \theta)$ of cores located at different positions in multi-core fiber^[54]

若没有弯曲时每个纤芯的本征折射率都相同,与纤芯所处的方位角无关,则(15)式可简化为

$$n_i(r, \theta, R) = n_{\text{eff}} \left(1 + \frac{D_{im} \cos \theta_{im}}{R_{\text{eff}}} \right), \quad (16)$$

$$D_{im} \cos \theta_{im} \ll R_{\text{eff}}.$$

于是,由于弯曲或扭转,多芯光纤中的每个纤芯的折射率都各不相同。

2.3.3 弯曲对芯间串扰的影响

为了考虑多芯光纤弯曲导致的芯间串扰的变化,仍然采用(16)式给出的弯曲光纤等效折射率模型。对于任意两个纤芯,光纤弯曲前后,其等效折射率差为

$$\delta n_{\text{eq}} = n_{\text{eff},m} - n_{\text{eff},n} \left(1 + \frac{D_{in} \cos \theta_{in}}{R} \right). \quad (17)$$

式中 n_{eff} 表示纤芯的有效折射率。定义 R_{nm} 为弯曲半径阈值^[62],当(17)式所给出的折射率差值为零

时,可以求得

$$R_{nm} = \frac{n_{\text{eff},m}}{|n_{\text{eff},n} - n_{\text{eff},m}|} D_{nm}, \quad (18)$$

式中 D_{nm} 为第 n 个芯和第 m 个芯的间距。于是多芯光纤在弯曲半径小于或等于 R_{nm} 时,芯间发生串扰的可能性将会下降。采用耦合模理论,可使串扰测量与串扰估计进一步量化^[62-64]。

图 10 给出了弯曲半径和串扰之间的关系曲线。实验中采用了一个 2 m 长异质多芯光纤^[61],多芯光纤的芯-包层折射率差为 0.38%,两种纤芯的直径分别为 $8.1 \mu\text{m}$ 和 $8.9 \mu\text{m}$,芯间距为 $30 \mu\text{m}$ 。理论仿真模拟和实验测量结果吻合得非常好,串扰在 R_{nm} 附近有极大值,弯曲半径小于 R_{nm} 后串扰急剧下降。

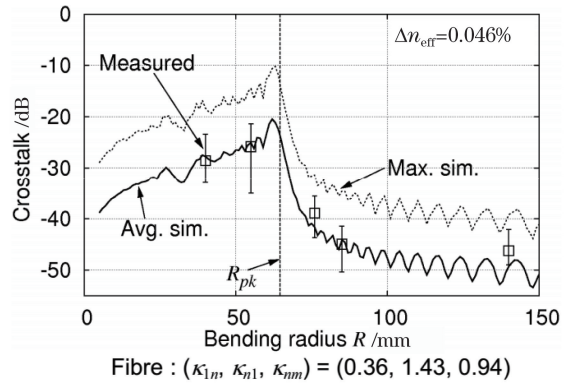


图 10 多芯光纤芯间串扰与弯曲半径的关系曲线
Fig. 10 Crosstalk between fiber cores as a function of bending radius in multi-core fiber

这个结果表明:当 $R > R_{nm}$ 时,沿着多芯光纤传输的光波没有相位匹配点;而当 $R < R_{nm}$ 且 R 趋于零时,串扰也逐渐下降。这可理解为每个纤芯在相位匹配区发生相位匹配, δn_{eq} 近似等于零,而随着 R 不断减小,相位匹配作用区的长度也随之缩短。

芯间串扰对于通信和传感应用的影响是多方面的,对于光通信而言,各个纤芯之间通过耦合带来的串扰将会导致传输信号的信噪比下降;对于光纤传

感器而言,串扰将会导致传感器测量灵敏度和分辨率的劣化。对于多芯光纤而言,其芯间传输串扰取决于芯间距,当传输距离较短且芯间距大于 $4 \mu\text{m}$ 时,串扰的影响通常较小。

3 多芯光纤通道分束连接技术

3.1 多芯光纤通道分束器

采用多芯光纤进行光通道的分束或合束,并与标准的单模光纤分别连接,是实现多芯光纤空分复用达到传输扩容的关键之一。多芯光纤通道分束器也是纤维集成光器件与纤维集成微系统中需要解决的一个重要的功能器件。为此,已经发展了多种方法,如图 11 所示。

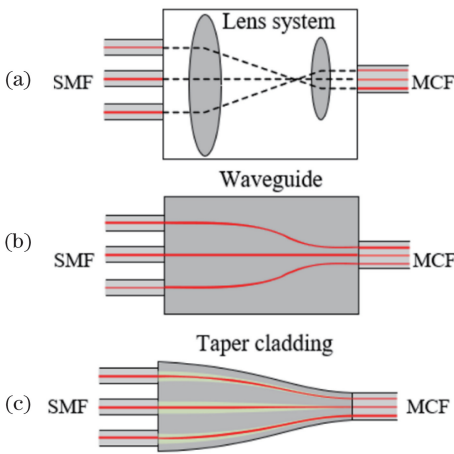


图 11 几种主要的多芯光纤通道分束器。(a)空间透镜组合型多芯光纤分束器;(b)3D波导型多芯光纤分束器;(c)消逝芯拉锥型多芯光纤分束器

Fig. 11 Several splitters with multi-core fiber. (a) Space-lens-composite multi-core fiber splitter; (b) 3D waveguide multi-core fiber splitter; (c) fused tapered multi-core fiber splitter

采用空间光学透镜分束技术的优点是每个光学通道都可以独立调整,调节方便灵活,耦合损耗小,缺点是这种多芯光纤通道分束连接器的体积较大,使用不便^[65-66],如图 11(a)所示。借助于超快激光波导刻写技术,可以在玻璃或晶体上制备出高质量 3D 波导阵列,不仅能够实现多芯光纤通道之间光束的分离,而且可以将二维纤芯空间分布转换为一维阵列,能够简化多芯光通道之间的分束和连接^[67],但目前采用该方法所制备的波导损耗较大,图 11(b)所示为这种多芯光纤通道分束器。为了更有效地解决多芯光纤的分束与连接问题,提出一种被称为“消逝芯”的三种折射率构造的锥体波导模场空间变换技术,可用于实现多芯光纤和标准单模光

纤之间的分束和连接^[68-70],能够实现多芯光纤-分束连接器-单模光纤之间的直接熔接。这种直接耦合的方法可使器件结构紧凑,无需透镜调节,有利于实现器件的小型化,如图 11(c)所示。

对于具有工业标准的空分复用多芯通信光纤,例如,7 芯空分复用多芯通信光纤,基于上述消逝芯工作原理,可以依照空分复用多芯光纤的设计标准,设计相应的信道分束器标准构件,实现工业化制造与装配。图 12 所示为一种 7 芯空分复用通信光纤多信道光纤传输系统^[71],该系统采用两个 7 芯光纤分束器作为扇入和扇出(Fan-in/Fan-out)器件,利用该技术可制备一种低损耗、低回损和低串扰多芯光纤分束器件。

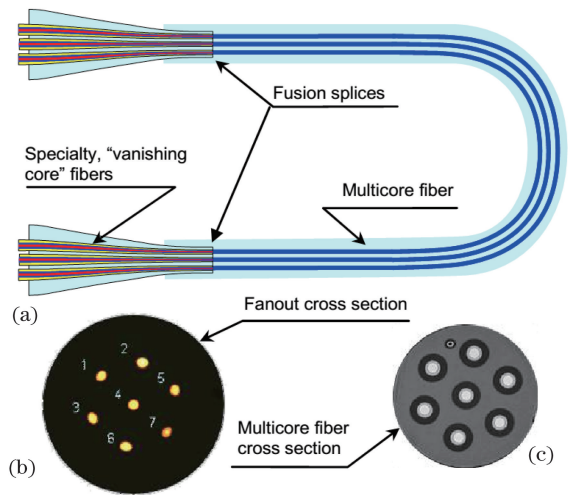


图 12 7 芯光纤多通道分束的扇入/扇出系统。

(a)系统示意图;(b)分束器端面图;(c)多芯光纤的端面图
Fig. 12 Fan-in/fan-out system for 7-core fiber based multichannel beam splitting. (a) Schematic of system; (b) cross section of splitter; (c) cross section of multi-core fiber

3.2 组合式多芯光纤分束器

采用套管密集堆栈填充的方法,可以制造灵活多样的多芯光纤分束器。首先按照几何结构,将单模光纤蚀刻到合适的尺寸,将上述多根蚀刻过的单芯光纤堆积在合适的石英毛细管中,经过适当的熔融拉锥后,与相应的多芯光纤进行熔接,就可以构造出各种多芯光纤分束器。图 13 所示为一种 7 芯的堆栈组合式光纤分束器。

4 多芯光纤的锥体耦合特性

用于光通信的超低损耗和超低串扰多芯光纤纤芯之间的串扰很小,因此要使多芯光纤的纤芯在极短的距离内完成较大的功率转移,有效的办法就是

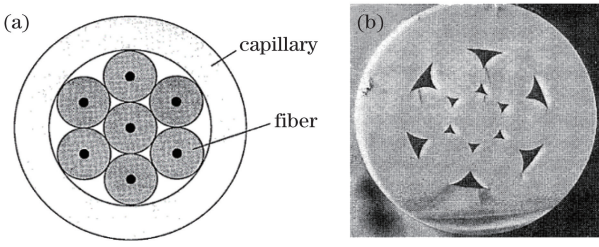


图 13 基于石英毛细管密集堆栈的多芯光纤分束方案。
(a) 含有蚀刻过的单芯光纤的石英毛细管；(b) 堆栈式 7 芯光纤分束器横截面图

Fig. 13 Multi-core fiber splitting scheme based on quartz capillary stack. (a) Quartz capillary with etched single-core fibers; (b) cross-sectional view of stacked 7-core fibers

对多芯光纤实施熔融拉锥,如图 14 所示。拉锥一方面使得纤芯逐渐变细,倏逝场所占的功率比例逐渐变大;另一方面使得纤芯彼此的间距逐渐变小,越来越

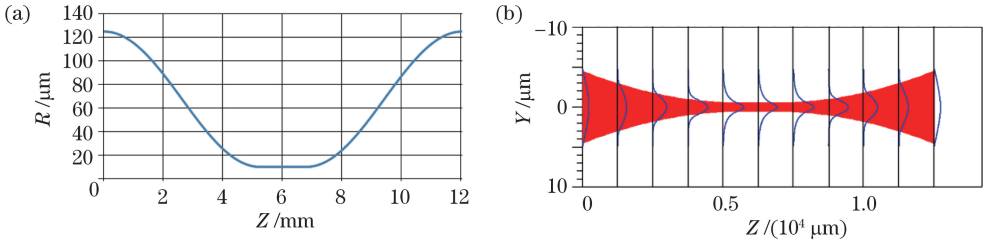


图 14 典型的锥体光纤的形变及纤芯光场的功率分布示意图。(a) 光纤形变与拉锥长度的关系曲线；
(b) 锥体纤芯光场的功率分布示意图

Fig. 14 Schematics of deformation of typical tapered fiber and light-field power distribution of core. (a) Relationship between fiber deformation and taper length; (b) schematic of light-field power distribution of tapered fiber core

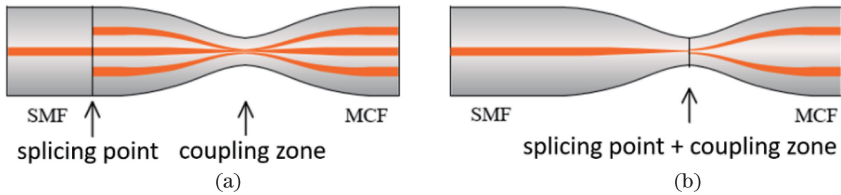


图 15 两种典型的多芯光纤锥体耦合分光/合光机制示意图。(a) 具有中间芯的多芯光纤拉锥耦合；
(b) 中心纤芯缺失的多芯光纤拉锥耦合

Fig. 15 Schematics of two typical light splitting/coupling mechanisms based on multi-core fiber tapered coupling. (a) Multi-core fiber tapered coupling with central core; (b) multi-core fiber tapered coupling without central core

4.1 具有中心芯的多芯光纤锥体“模式”耦合与分光特性

典型的具有中心纤芯的多芯光纤有多种,图 16 所示为双芯、3 芯、4 芯、7 芯光纤。这类多芯光纤具有一个中心纤芯,因此可以十分方便地与标准单模光纤进行同轴连接或熔接,然后通过对接后的多芯光纤进行熔融拉锥,就能将注入到中心芯的光功率分配到周围每个纤芯中。

对于这种被拉制成锥体的多芯光纤,通过模式耦

合,光功率由中心芯转移到周围纤芯的耦合方程为^[43]

$$\frac{dA_k}{dz} + i\beta A_k = i \sum_{s \neq k} A_s C_{ks}, \quad (19)$$

式中: A_s 和 A_k 分别是纤芯 s 和 k 的基模振幅; β 为被拉成直径近似相同的每个多芯锥体纤芯的传输常数; C_{ks} 为锥体纤芯 k 与纤芯 s 之间的耦合系数,可近似地表示为^[72]

$$C_{ks} = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2}{\rho V^3} \cdot \frac{k(Wd_{ks}/\rho)}{K_1^2(W)}, \quad (20)$$

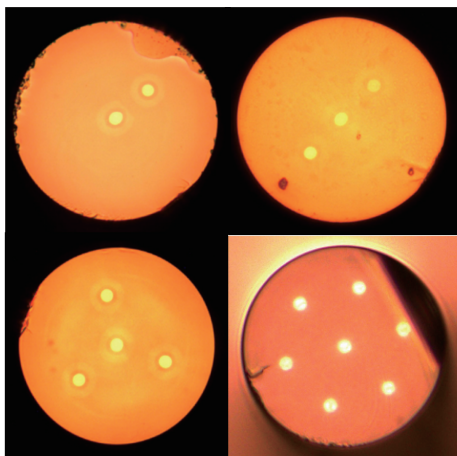


图 16 典型的具有中心纤芯的双芯、3 芯、4 芯、7 芯光纤

Fig. 16 Typical two-core, three-core, 4-core, and 7-core fibers with central core

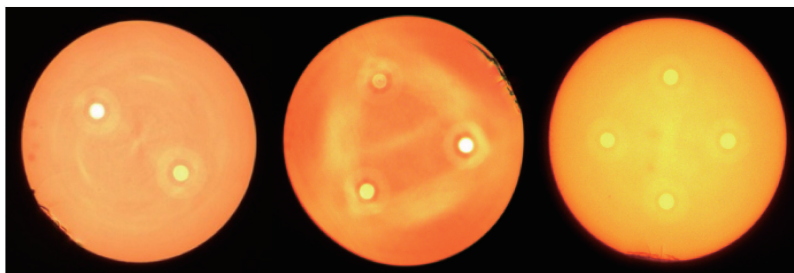


图 17 典型的无中心纤芯的双芯、3 芯、4 芯光纤

Fig. 17 Typical two-core, three-core, and 4-core fibers without center core

由于这种多芯光纤中心纤芯的缺失,所以与标准单模光纤进行熔接时,光功率无法直接转移到分布在同轴圆上的多个纤芯中,只有在熔接点处对单模光纤与多芯光纤进行加热并实施拉锥。随着单模光纤纤芯的收缩,纤芯中的光功率不能被芯径不断减小的波导束缚住,于是光波模场半径逐渐扩展,使得倏逝场所占的光功率比例逐渐增大,直到输入光场的模场完全与锥腰处多芯光纤的多个模场交叠时,光功率就通过锥体多芯光纤端的“激发”,在多个纤芯中激发出多个独立的导模,这些导模在通过锥腰时,多个锥体纤芯之间比较靠近,因此模场彼此交叠,光功率会在各个纤芯的模式之间来回往复耦合,直到每个纤芯彼此逐渐分离,光功率分配的过渡与转移完成,这时进入每个纤芯中的光功率相对稳定,多个光束的光功率分配完成。

上述光功率激发耦合的物理过程如图 18 所示,图 18(a)~(c)以双芯光纤为例,描写了无中心纤芯的多芯光纤与单模光纤直接熔接后在熔接点处进行熔融拉锥的物理过程;利用 BPM 软件对光场由单模锥体光纤芯经过激发耦合到另一段锥体光纤的双

式中: $U = \rho \sqrt{k^2 n_{co}^2 - \beta^2}$, $W = \rho \sqrt{\beta^2 - k^2 n_{cl}^2}$, $V^2 = U^2 + W^2$, k 为真空中的波数; $\Delta = (n_{co}^2 - n_{cl}^2) / (2n_{co}^2)$, 这里 n_{co} 为纤芯折射率, n_{cl} 为光纤包层折射率; d_{ks} 为被拉成锥体的多芯光纤中纤芯 k 和纤芯 s 之间的距离; ρ 为多芯锥体光纤中每个纤芯的半径。

4.2 无中心芯的对称多芯光纤与单模光纤的“激发”耦合连接特性

图 17 为几种典型的无中心芯的多芯光纤,常用的有双芯、3 芯和 4 芯光纤,对于这种没有中心纤芯的多芯光纤可采用图 15(b)所示的耦合连接方法,通过直接与单模光纤进行熔接,然后在熔点处进行熔融拉锥,使得从单模光纤一端输入的光场在焊点另一侧多芯光纤纤芯实现“激发”耦合^[33-34]。

芯中去的这一光功率分配转移物理过程进行仿真模拟,如图 18(d)所示。图 18(e)所示为计算过程中每个纤芯内的光场强度随着拉锥而不断发生变换的监测曲线。可以看出:在单模光纤被拉成锥体的过程中,输入到单模光纤的光场幅值由最初的最大逐渐下降,直到接近零;而被拉成锥体的双芯光纤一端,两个纤芯内的光场的幅值等比例上升,直到两者之和接近单模光纤输入的总和。该曲线定量地描写了光功率在锥体光纤中从单芯向双芯的激发耦合转移过程。

5 中空椭圆形多芯保偏光纤

中空椭圆型多芯保偏光纤是多芯光纤家族中的新成员^[73-75]。对于基模而言,这种光纤具有非零截止频率,具有量级仅为 10^{-4} 的偏振双折射特性,这种弱双折射特性对中心空气孔的大小和纤芯与空气孔之间薄包层厚度具有较大的依赖性。该光纤具有较强的倏逝场,因此这种特殊的多芯光纤在生物传感、化学测量、偏振干涉器件等方面具有广阔的应用前景。

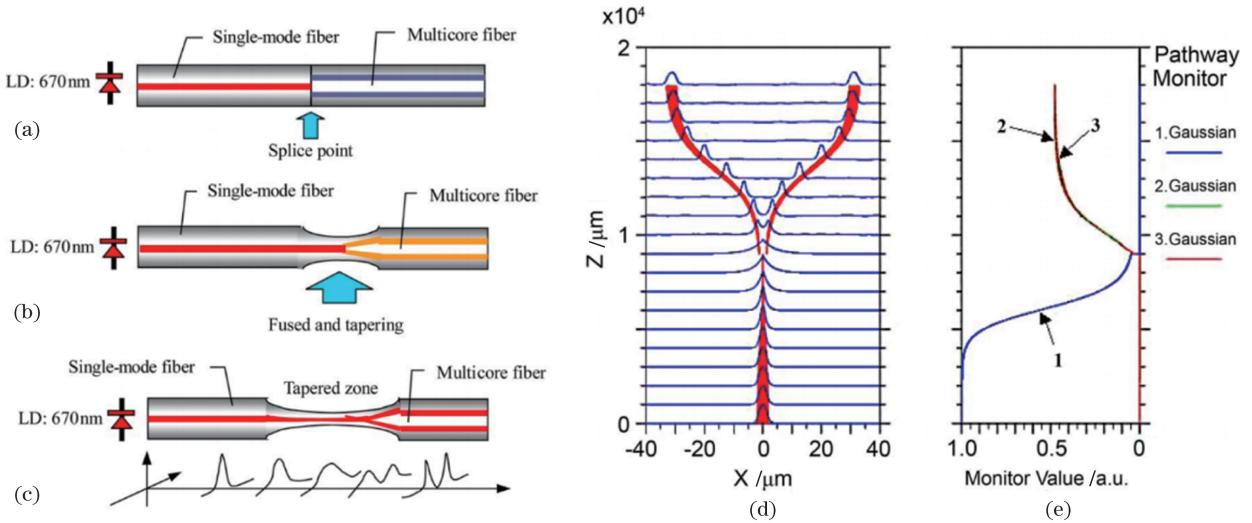


图 18 双芯光纤与单模光纤的激发耦合特性。(a)~(c)在熔点处进行熔融拉锥的光场耦合物理过程;(d)光场经过锥区从单模光纤中耦合分配到双芯光纤的两个纤芯中的过程;(e)各个纤芯内的能量与锥形直径的关系曲线

Fig. 18 Excitation coupling characteristics of two-core fiber and single-mode fiber. (a)-(c) Physical processes of optical field coupling in fusing taper at melting point; (d) process of light-field coupling from single-mode fiber into two cores of two-core fiber through taper region; (e) energy in each core as a function of taper diameter

5.1 中空椭圆形多芯保偏光纤的结构特性

图 19 所示为中空椭圆形双芯光纤的结构示意图。该光纤包括一个 $65 \mu\text{m}$ 直径的中心大空气孔、两个长轴和短轴分别为 $2a = 7.2 \mu\text{m}$ 和 $2b = 3.0 \mu\text{m}$ 的椭圆形纤芯,椭圆度 $e = 2b / (2a) = 0.42$, 光纤外包层的直径为 $125 \mu\text{m}$ 。光纤的包层、纤芯和空气孔的折射率分别用 n_{cl}, n_{co}, n_a 来表示,并且 $n_{co} > n_{cl} > n_a = 1$ 。在光纤芯层与空气孔之间有一个 $d = 3 \mu\text{m}$ 厚的薄石英内包层。该光纤的高阶模截止波长为 $0.934 \mu\text{m}$ 。由于这个薄包层的存在,包层中倏逝波场能够部分泄漏到空气孔中,当空气孔中填充有液体或固体材料时,这些被填充的物质能够改变纤芯附近区域的有效折射率。因此,这种光纤可以用来制作基于光纤倏逝场的生化传感器^[76-79]。此外,这

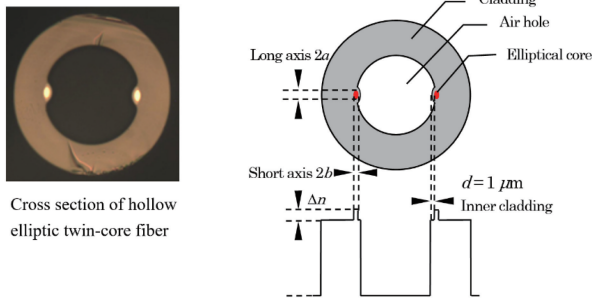


图 19 中空椭圆形双芯保偏光纤及其结构示意图
Fig. 19 Hollow elliptical two-core polarization-maintaining fiber and its structure

种光纤具有椭圆芯光纤的特点,因此会具有几何双折射,从而具有一定的保偏作用。其独特的多芯结构还可以被用来制造各种纤内干涉仪^[30,36]。

5.2 中空椭圆形多芯保偏光纤的制备方法

中空椭圆形多芯保偏光纤制备过程主要有三个步骤,如图 20 所示。首先,根据所设定的光纤尺寸结构参数,选择合适尺寸的石英基管作为光纤预制棒的包层材料(例如, Heraeus 石英管,内径 9.4 mm ,外径 13 mm);采用标准的 MCVD 制备工艺,进行具有锗掺杂的芯层的沉积,直到沉积厚度达到预定值,进行缩棒,完成芯棒构件的制备(例如,芯棒直径为 1.2 mm ,芯包比为 $1:2$)。

其次,完成预制棒的制备。中空椭圆形多芯保偏光纤预制棒由芯棒和石英管构成,如图 20(a) 所示。具体制备方法如下:将石英管水平放置,并将芯棒构件插入到管中,由于自身重力芯棒会与石英管轴向自然平行;然后通过氢氧焰局部加热芯棒构件与石英管相互接触的部分并作水平往复移动,芯棒构件和石英管被局部加热并彼此熔接在一起,这样就将芯棒构件熔接固定在石英管的内壁上。由于预制棒是中空结构,为了避免在拉丝过程中引入其他杂质,需要将预制棒一端烧结成实心,另一端进行密封备用。

最后,将上述制备好的光纤预制棒装卡到光纤拉丝塔上,如图 20(b) 所示。将装卡尾管进行密封

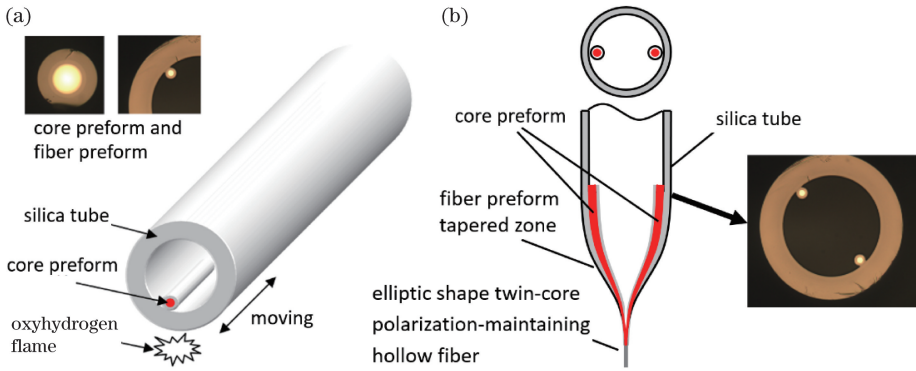


图 20 中空椭圆形多芯保偏光纤的制备方法示意图。(a) 光纤预制棒的制备；(b) 光纤拉丝制备

Fig. 20 Schematics of preparation method of hollow elliptic multi-core polarization-maintaining fiber.

(a) Preparation of fiber preform; (b) preparation of fiber drawing

并加微压,使得在光纤拉丝过程中间的空气孔保持适当的尺度不闭合。为了使椭圆形纤芯的长短轴之比保持在所设定的范围内,并保持形状不变,需要通过选择合适的炉温和空气孔内压力(例如,孔内压力 100 Pa,炉温 2000 °C),在光纤拉制过程中应当调节这两个参数,以达到最佳的拉丝状态。

基于上面光纤制备技术,类似地,制备了中空椭圆形 3 芯、4 芯保偏光纤,如图 21 所示。

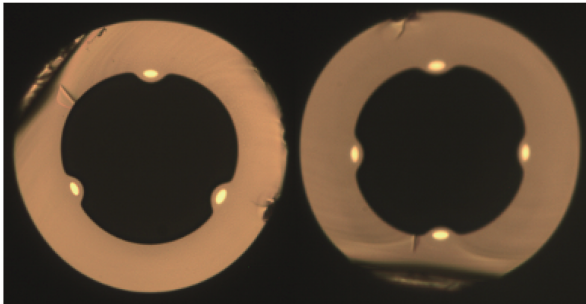


图 21 3 芯和 4 芯中空椭圆形多芯保偏光纤的横截面图

Fig. 21 Cross sections of three-core and four-core hollow elliptic multi-core polarization-maintaining fibers

5.3 传输模式特性

采用有限元方法分析了上述中空椭圆形双芯保偏光纤的传输模式特性。包层为纯石英材料,纤芯掺掺杂浓度为 4% (质量分数),其折射率随波长的变化情况可参照 Sellmeier 色散方程得到^[80]。定义归一化参数 $V = 2\pi\sqrt{ab(n_{co}^2 - n_{cl}^2)}/\lambda$ 。作为对照,在具有圆形芯($e=1$)特征的模型中,沿着慢轴方向的偏振基模 HE_{11} 有效折射率和最低高阶模 TE_{01} 的有效折射率特性曲线如图 22(a) 所示,其中纤芯折射率为 $n_{co} = 1.4520$,包层折射率 $n_{cl} = 1.4468$,空气的折射率取 $n_a = 1$,工作波长 $\lambda = 1.31 \mu m$ 。计算结果表明该光纤具有非零基模截止频率,且最低高阶模的截止频率较 2.405 略大一些;当椭圆纤芯内包层 d 增大时,基模截止频率 V_{FMC} 降低并逐渐趋于零,最低高阶模截止频率 V_{HMC} 降至 2.405;当 d 逐渐增加时,空气孔对模式有效折射率的影响越来越弱,在同一 V 处,有效折射率随着 d 的增加而增加,且最终趋于某一定值。图 22(b) 给出了具有椭圆形纤芯的中空多芯保偏光纤的 HE_{11} 模和 TE_{01} 模的特性曲

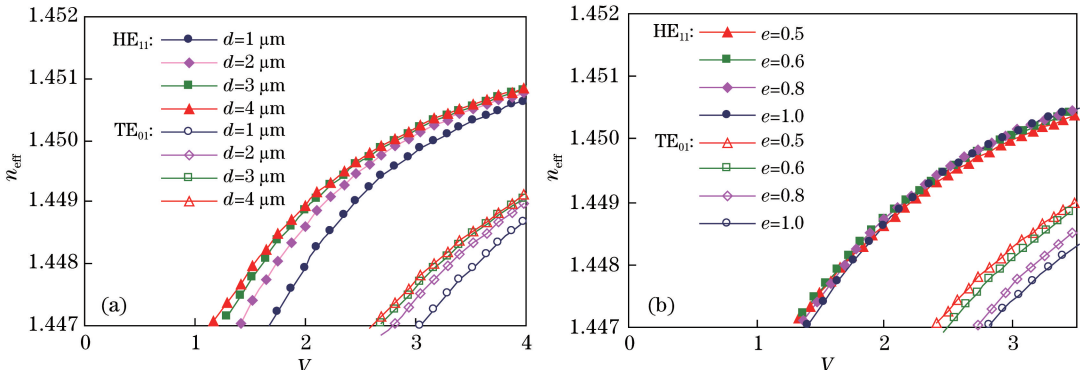


图 22 中空椭圆形多芯光纤模式特性曲线。(a) $e=1$, 圆形芯; (b) $d=2 \mu m$, 椭圆形芯

Fig. 22 Mode characteristic curves of hollow elliptic multi-core fibers. (a) $e=1$, circular core; (b) $d=2 \mu m$, elliptical core

线,其中 $d = 2 \mu\text{m}$,且纤芯椭圆度 e 变化范围为 $0.5 \sim 1.0$ 。结果表明高阶模截止频率随着纤芯椭圆度的减小而减小,在同一 V 处的基模的有效折射率基本不变,与椭圆度基本无关。

5.4 偏振特性

中空椭圆形双芯保偏光纤的双折射,一方面来自纤芯和包层材料热胀系数差异导致的热应力的贡献,另一方面来自纤芯几何形状的贡献^[75,81]。图 23 所示为放大的椭圆形纤芯的形状结构示意图。

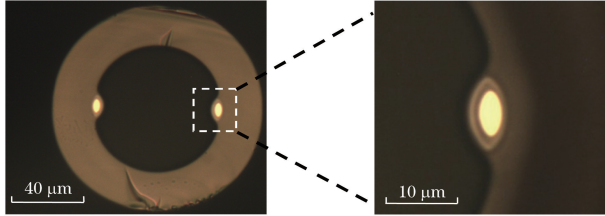


图 23 椭圆形纤芯的形状结构示意图

Fig. 23 Shape and structure of elliptic fiber core

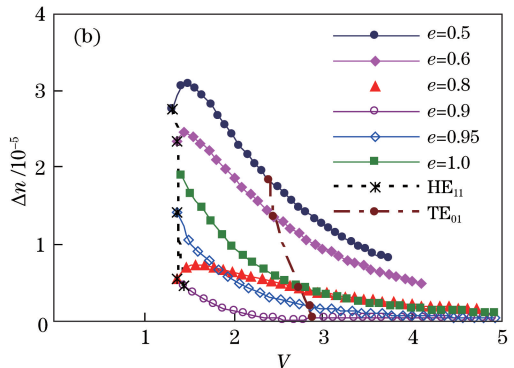
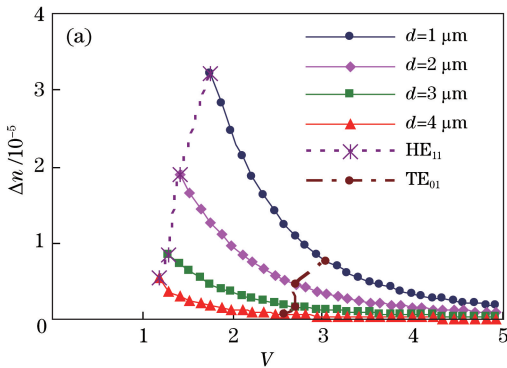


图 24 椭圆形纤芯的双折射特性曲线。(a)圆形纤芯;(b) $d = 2 \mu\text{m}$,椭圆形纤芯

Fig. 24 Birefringence characteristic curves of elliptic fiber core. (a) Circular core; (b) $d = 2 \mu\text{m}$, elliptic core

6 线性与环形阵列多芯光纤

6.1 线性阵列多芯光纤的特性

光纤激光器是目前激光技术发展的重要方向之一,而大功率光纤激光器在激光加工、医疗手术、国防武器以及其他领域具有重要的应用。然而,在大功率光纤激光器的发展过程中,单芯光纤的模场面积、拉曼自激散射和布里渊散射非线性效应等因素,都制约了激光功率的提高,为此人们发展了多种线性分布和环形分布的多芯光纤。

图 25(a)和 25(b)分别为典型的线性阵列多芯光纤的结构和折射率剖面示意图^[38,82-83],图 25(c)所示为 6 芯、23 芯和 14 芯线性阵列多芯光纤的横截面图。

制备线性阵列芯光纤采用的是堆栈光纤预制棒制备工艺。首先按照设计尺寸,采用 MCVD 方法对

借助于有限元分析方法,给出了双折射(长轴与短轴之间等效折射率差)与归一化常数 V 、纤芯内包层厚度 d 的关系曲线。为了进行对比,给出了纤芯为圆形的分析结果,如图 24(a)所示,同时对纤芯内包层厚度 $d = 2 \mu\text{m}$ 下,对应纤芯椭圆度从 0.5 变化到 1.0 的多种情况进行了分析,如图 24(b)所示。

图 24 中虚线分别是 TE_{01} 模和 HE_{11} 模的截止频率曲线,由图 24 也可以看到,双折射随着纤芯内包层厚度 d 的减小而增加,直到 $d = 1 \mu\text{m}$ 时达到约 3.3×10^{-5} ,而当纤芯内包层厚度一定,例如取 $d = 2 \mu\text{m}$ 时,双折射随着 V 的增加而减小,在基模归一化截止频率附近达到最大,随着椭圆度的增加,双折射先是减小后增大。由此可以看出,这种中空椭圆形多芯保偏光纤具有偏振保持特性,但其双折射值则是相对较低的。

纤芯进行锗掺杂,形成高折射率波导芯区,通过收缩沉积层形成所需尺寸的纤芯,这个纤芯具有高纯石英外包层,对这样的光纤芯预制棒再进行拉伸和切割,制备出纤芯预制构件备用;然后选择合适的高纯石英套管和圆柱形棒材,将高纯石英棒切割成 D 形,按照纤芯预制构件的尺寸抛磨 D 形构件的平面,直到两个 D 形构件的间隙恰好可以插入一排纤芯构件;最后,将两个 D 形高纯石英构件和若干个纤芯预制构件堆栈填充到高纯石英套管内,如图 26(a)所示。两侧缝隙处可选择直径较细的高纯石英丝进行填充,以保证最后纤芯的形状不发生较大的变化。在拉制光纤前,对光纤预制棒的一端进行烧结,使其形成一个锥体,将另一端与负压系统相连接,以避免光纤在拉制过程中由于填充构件内部间隙而产生气泡。拉制后光纤的线性阵列芯局部放大图如图 26(b)所示。

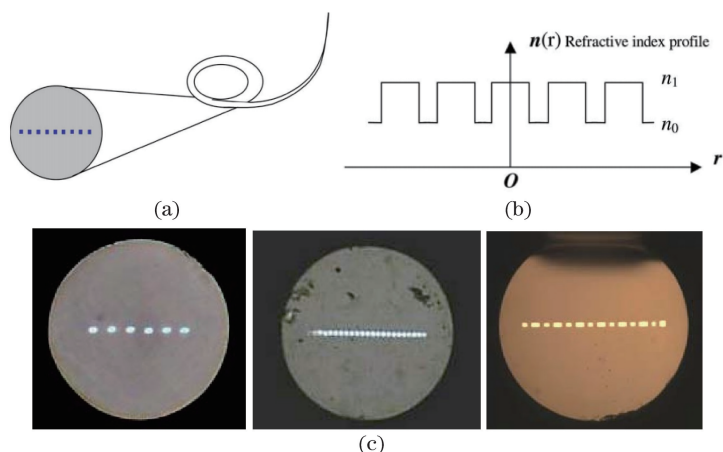


图 25 典型的线性阵列多芯光纤。(a)横截面结构;(b)折射率剖面示意图;(c)6 芯、23 芯和双结构 14 芯的光纤横截面
Fig. 25 Typical linear-array multi-core fibers. (a) Cross-sectional structure; (b) schematic of refractive index profile; (c) cross sections of 6-core, 23-core, and dual-structure 14-core fibers

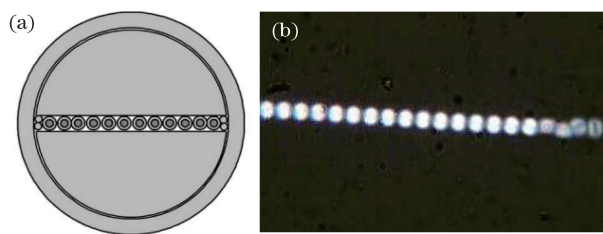


图 26 线性阵列多芯光纤制备方法。(a)预制棒结构图;
(b)纤芯局部放大图
Fig. 26 Preparation method for linear-array multi-core fiber. (a) Structure of fiber perform; (b) locally enlarged photograph of core

6.2 大功率光纤激光器与光束整形

线性阵列多芯光纤的重要应用之一就是大功率光纤激光器,采用线性阵列反导引波导结构,Beach 等^[84]报道了用于锁相激光的矩形阵列多芯光纤,如图 27(a)所示,纤芯采用了 4% (质量分数)的钕掺杂作为纤芯的增益部分,近邻间隔尺寸相同的为没有掺杂的纤芯,从而实现对所确定模式的选择性锁相放大。采用空气包层钽掺杂线性阵列多芯光纤,Drachenberg 等^[85]报道了一种多模输出功率超过 40 W 的光纤激光器,泵浦效率高达 70%,如图 27(b)所示。

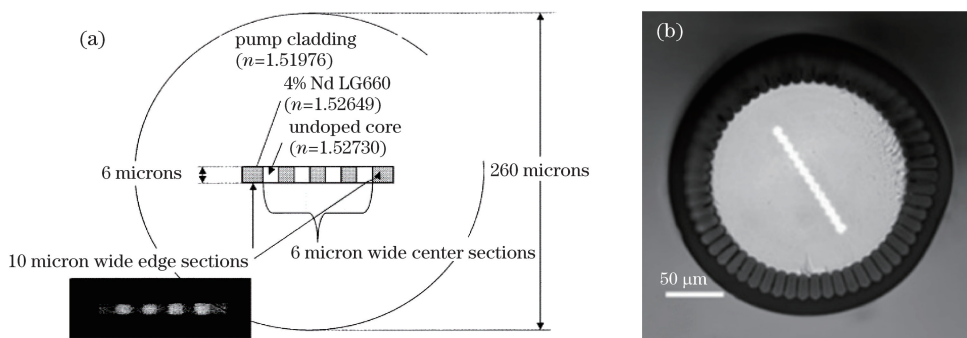


图 27 用于大功率光纤激光器的线性阵列多芯光纤。(a)矩形阵列多芯光纤;(b)空气包层阵列多芯光纤
Fig. 27 Linear-array multi-core fiber for high-power fiber lasers. (a) Rectangular-array multi-core fiber; (b) air-cladding linear-array multi-core fiber

线性阵列芯光纤也可用于激光光束的输出整形,采用 23 个线性阵列多芯光纤,纤芯与包层折射率分别为 1.463 和 1.452,纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$,纤芯间距为 $3.7 \mu\text{m}$,激光波长为 980 nm。由于线性阵列多芯光纤有 23 个纤芯,第 12 个纤芯位于该光纤的中心,因而这种光纤可与单模光纤直接熔接,光波通过熔点后,借助于波导之间的耦合,传输功率就分布

在线性阵列纤芯中。图 28 所示为线性阵列 23 芯光纤直接与单模光纤熔接后,经过该阵列多芯光纤分别传输 2 mm 和 55 mm 两种情况下的纤端输出远场功率空间分布情况。

6.3 环形阵列多芯光纤

与线性阵列多芯光纤类似,环形阵列多芯光纤预制棒也是通过堆栈的方法制备的^[86]。采用在同

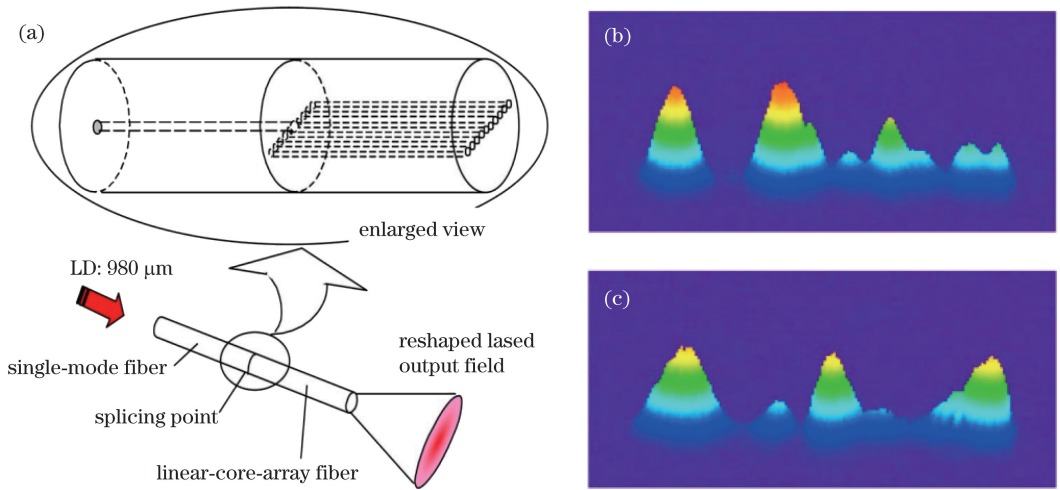


图 28 用于激光输出整形的线性阵列多芯光纤。(a) 阵列多芯光纤与单模光纤熔接结构图；(b) 经过熔点传输 2 mm 时输出光束的情况；(c) 经过熔点传输 55 mm 时输出光束的情况

Fig. 28 Linear-array multi-core fiber for laser output reshaping. (a) Splicing of linear-array multi-core fiber to single-mode fiber; (b) output beam after propagating 2 mm from splicing point; (c) output beam after propagating 55 mm from splicing point

轴的外层石英玻璃管与内层石英玻璃棒中规则填满一组大芯径单模光纤芯,并将这组光纤芯排列为圆环形,烧结石英玻璃管与石英玻璃棒组合的一侧端头后,经光纤拉丝塔拉丝,在光纤预制棒的另一端施加负压,将这组光纤芯周围间隙空气

抽出,在高温条件下使光纤芯与石英材料融合在一起,从而拉出纤芯环形分布的多芯微结构光纤,如图 29(a)所示。环形阵列多芯光纤的折射率分布可借助于三维分布函数来表达^[87],如图 29(b)所示。

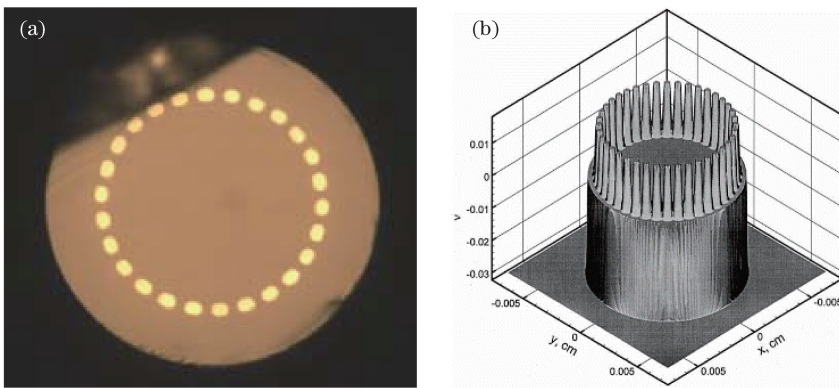


图 29 环形阵列多芯光纤。(a)横截面图;(b)折射率分布

Fig. 29 Ring-array multi-core fiber. (a) Cross section; (b) refractive index distribution

环形阵列多芯光纤主要用于发展大功率光纤激光器, W_{rage} 等^[88-89] 给出了一个光纤直径 131 μm, 具有环形 18 个纤芯的 Nd 掺杂光纤激光器的例子。通过扩增多芯光纤激光阵列的掺杂面积可以使激光的总功率得到提升,通过锁相也能改善激光光束的质量。

7 多芯光纤传感应用

除了与其他光纤传感技术具有共性优势外,多芯光纤传感器还具有下述几个特殊的优势:空

间结构优势、温度补偿优势和信道集成优势。例如,多芯光纤的多个纤芯具有空间结构优势,因而借助于多个纤芯在一根光纤中的相对几何位置与结构差异,根据空间几何结构的弯曲应变和扭转应变,能够反演出光纤的曲率与扭率信息,从而通过重构就能够实现空间弯曲与扭转的三维形状传感;再比如,多芯光纤的多个纤芯被集成在一根数百微米的包层中,各点的环境温度可视为近似相同,因此多个光纤芯子所构成的光路的变化也近似相同,即自动实现了多光路的温度补偿。下面

给出了几个典型的多芯光纤在传感领域的应用案例。

7.1 多芯光纤几何与力学参量传感器

多芯光纤可以用于弯曲、应变、扭转、拉力、液体流速、加速度等多种几何参量和物理参量的测量,其中研究最为广泛的是将多芯光纤用于弯曲传感。

1997年,英国 Heriot-Watt University 大学的

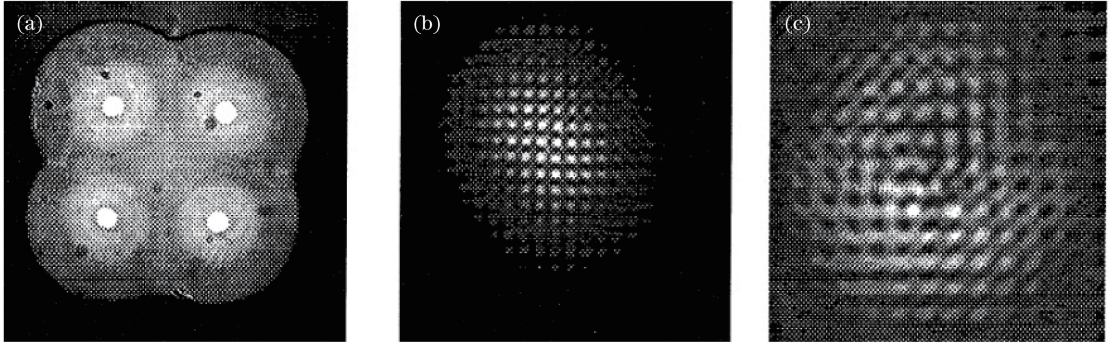


图 30 4 芯光纤弯曲传感器远场干涉图样。(a) 4 芯光纤端面;(b) 820 μm 时的远场图案;(c) 远场图案的放大图
Fig. 30 Far-field interference patterns of bending sensor based on 4-core fiber. (a) Cross section of 4-core fiber; (b) far-field pattern at 820 μm ; (c) enlarged photograph of far-field pattern

2006年,苑立波研究团队^[30]提出了一种基于对称双芯光纤的 Michelson 干涉仪,如图 31 所示,从光源发出的光经过单模光纤和双芯光纤熔接点的拉锥区后分成两束,分别耦合到双芯光纤的两个纤芯中,在双芯光纤尾端被端面反射膜反射回

Gander 等^[90]提出基于梅花形 4 芯光纤远场干涉的光纤弯曲传感器,如图 30 所示。当弯曲作用在 4 芯光纤上时,不同的纤芯折射率变化不同,各个纤芯模的相位差将发生变化,从而导致 4 芯光纤的远场干涉图样发生变化。通过傅里叶分析二维远场干涉图样,将不同纤芯中的相位差信息解调出来,从而实现弯曲传感。

双芯光纤中,从而构成了 Michelson 干涉仪。研究团队对该干涉仪的弯曲特性进行了理论分析和实验验证,结果表明该传感器具有弯曲敏感特性,可以用于弯曲、液体流速^[91]、加速度、位移等参量的测量。

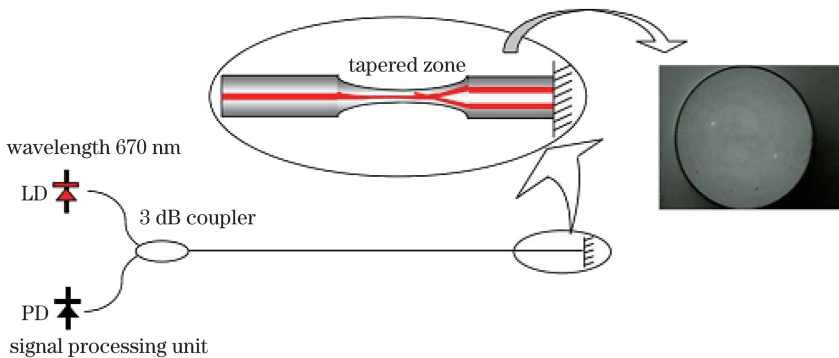


图 31 基于对称双芯光纤的 Michelson 干涉仪^[30]

Fig. 31 Michelson interferometer based on symmetric two-core fiber^[30]

2008年以来,苑立波研究团队^[37,92]提出了基于 3 芯的远场干涉仪,利用远场干涉图样的变化来实现传感。对正三角分布、直角三角分布的两种 3 芯光纤干涉仪进行了研究,如图 32 所示。2015年,Salceda-Delgado 等^[93]提出了基于 7 芯光纤超模干涉的光纤弯曲传感器,如图 33 所示。采用了关于中央纤芯呈正六边形分布的 7 芯光纤,纤芯直径为 9 μm ,纤芯之间距离为 11 μm ,当向中央纤芯中输入光时,紧邻纤芯中的光场会发生强耦合产生超模,干涉发生

在其中两个中心对称结构的超模之间。当曲率在 0.0025~0.005 mm^{-1} 范围内时,该传感器的弯曲灵敏度为 $-2943 \text{ nm} \cdot (\text{mm}^{-1})^{-1}$,当曲率小于 0.0022 mm^{-1} 时,弯曲灵敏度为 $-1653.7 \text{ nm} \cdot (\text{mm}^{-1})^{-1}$ 。

7.2 多芯光纤温度传感器

多芯光纤在温度传感方面也有非常重要的应用。2002年,波兰 Romaniuk 等^[94]提出了基于双芯光纤的光纤温度传感器。传感器使用包层直径为 125 μm ,纤芯直径为 10 μm ,芯间距为 4 μm 的多模

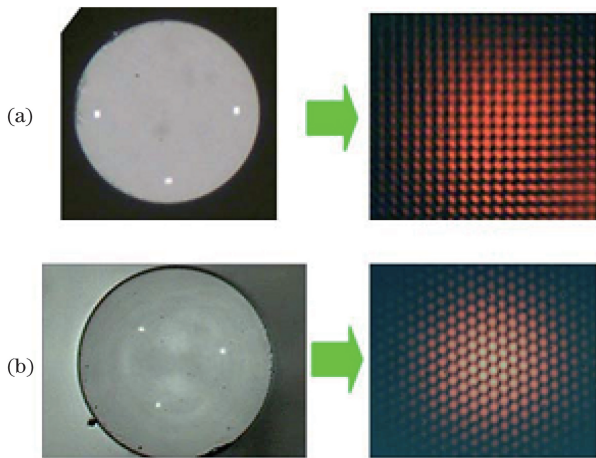


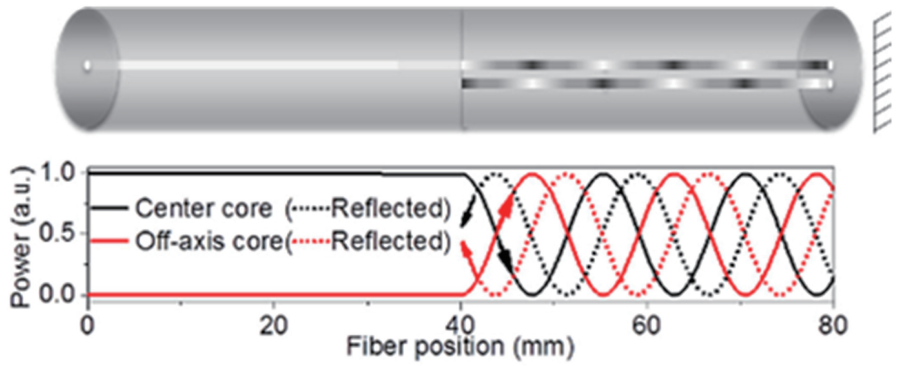
图 32 3 芯光纤干涉仪远场干涉图样^[92]。(a)直角三角分布的 3 芯光纤及其远场干涉图样；(b)正三角分布的 3 芯光纤及其远场干涉图样

Fig. 32 Far-field interference patterns of three-core fiber interferometer^[92]. (a) Three-core fiber distributed in right triangle and its interference pattern; (b) three-core fiber distributed in regular triangle and its interference pattern

双芯光纤。温度变化会导致双芯光纤两个纤芯之间的耦合系数改变,从而通过探测输出光信号的变化



(a)



(b)

图 34 双芯光纤高温传感器^[95]。(a)双芯光纤截面显微图；(b)高温传感器原理图

Fig. 34 High-temperature sensor based on two-core fiber^[95]. (a) Micrograph of cross section of two-core fiber; (b) principle of high-temperature sensing

2014 年,美国的 Antonio-Lopez 等^[96]和 van Newkirk^[97]给出一种基于 7 芯光纤的干涉仪结构用于实现高温传感,如图 35 所示。将一段 7 芯光纤两端分别与两段单模光纤熔接,就可以构成两个超模干涉的光纤 M-Z(Mach-Zehnder)干涉仪。该温度传感器可以用于 1000 °C 的高温测量,在 100 ~ 1000 °C 之间的温度灵敏度达到约 52 pm/°C,测量误差小于 2%。该小组还提出了相似结构的 19 芯 M-Z 干涉仪,由于 19 芯光纤可以激发 4 个中心对称的超模,所以 19 芯干涉仪会产生更为复杂的多模干涉。

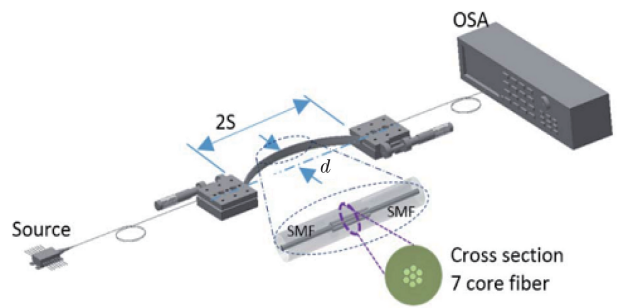


图 33 7 芯光纤干涉仪弯曲传感器^[93]
Fig. 33 Bending sensor based on 7-core fiber interferometer^[93]

化来实现温度传感。该温度传感器的测量精度为 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2012 年,瑞士的 Rugeland 等^[95]提出利用如图 34 所示的双芯光纤构成的 Michelson 干涉仪来实现温度传感。该双芯光纤的两个纤芯距离为 $15.5\text{ }\mu\text{m}$,当向一个纤芯中输入光时,两个纤芯距离较近,导致两个纤芯之间的光场发生耦合,再与端面反射镜相结合构成 Michelson 干涉仪。该传感器可用于高温测量,最高测量温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$,温度灵敏度为 $43.6\text{ pm}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

7.3 多芯光纤折射率传感器

2011 年,Zhou 等^[98]给出了基于包层腐蚀的不对称双芯光纤 Michelson 干涉仪,用于实现折射率传感。腐蚀后的包层与边芯的距离为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$,当外界环境折射率发生变化时,边芯中传输的纤芯模的有效折射率也会相应变化,导致干涉仪输出光谱发生相应的变化,从而实现折射率传感,该传感器的折射率灵敏度约为 $270\text{ nm}\cdot\text{RIU}^{-1}$ 。该传感器具有造价低、重复性好、线性度好、测量范围大等特点。

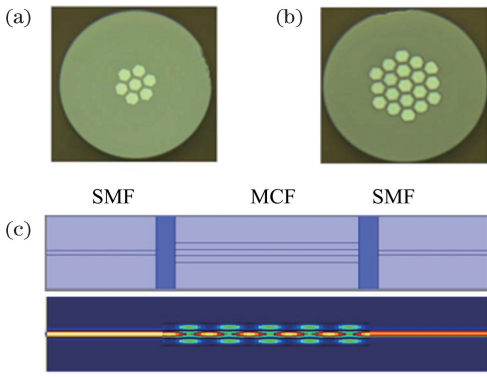


图 35 基于 7 芯光纤和 19 芯光纤干涉仪的高温传感器^[96]。(a) 7 芯光纤；(b) 19 芯光纤；(c) 基于多芯光纤干涉仪的高温传感器结构及原理图

Fig. 35 High-temperature sensors based on 7-core and 19-core fiber interferometers^[96]. (a) 7-core fiber; (b) 19-core fiber; (c) structure and principle of high-temperature sensing based on multi-core fiber interferometer

2015 年, Liu 等^[99]提出了基于双芯光纤的 SPR (Surface plasmon resonance) 传感器, 其结构如图 36

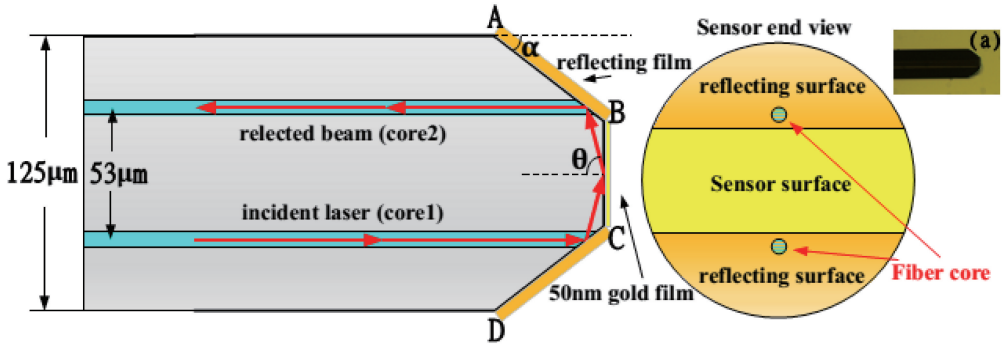


图 36 双芯光纤 SPR 传感器^[99]

Fig. 36 SPR sensor based on two-core fiber^[99]

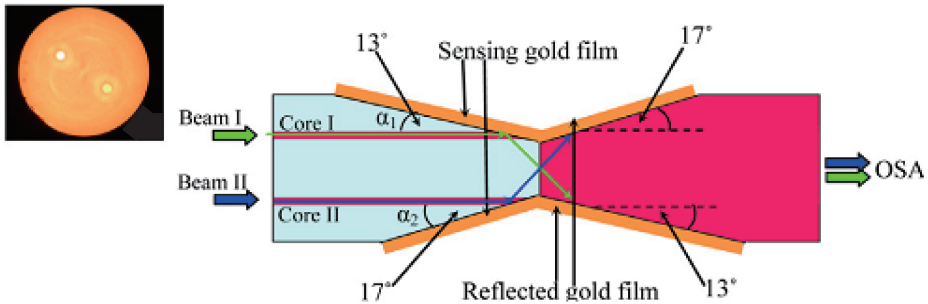


图 37 基于双芯光纤的多通道 SPR 传感器^[100]

Fig. 37 Multi-channel SPR sensor based on two-core fiber^[100]

7.4 多芯光纤光栅弯曲形变传感技术

光纤形变传感是一种分布式传感技术, 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

所示, 这种 SPR 传感器解决了常用的多模光纤 SPR 中共振角度不容易匹配, 以及灵敏度很难提高等问题, 通过改变抛磨角度来实现共振角的改变。该传感器的入射光和反射光在光纤同一端, 同时将传感器光纤的另一端作为传感探头。这种结构具有可用于狭小空间的传感、测量稀少珍贵的样品、提高样品利用率、降低造价等特点。该传感器折射率在 1.333~1.3706 范围内, 折射率灵敏度可达到 $5213 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。

2016 年, Liu 等^[100]利用双芯光纤构造了一种双通道分布式 SPR 传感器, 传感器结构如图 37 所示。该传感器通过将双芯光纤的两个侧面抛磨成不同的角度, 在两个纤芯中产生不同的 SPR 共振峰, 从而实现双通道的折射率传感, 该传感器的折射率灵敏度高达 $6142 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 是目前最高的基于 SPR 原理的折射率传感器。将多个传感器进行级联, 就可以得到双通道分布式 SPR 传感器。其特点是可以实现多种待测分析物的测量, 并且可以补偿温度以及物理吸收等因素对传感结果的影响。

光纤的空间形变。这种技术在医疗、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重要的应用价值。

Clements^[101]提出了一种利用 FBG (Fiber Bragg

grating)传感器实现精确三维定位和形状测量的系统,通过布置在一个由多芯光纤构成的细小智能电缆的FBG传感器测量电缆上各个测点的弯曲曲率和挠率,推导获得电缆上各个点的相对位置和方位,从而重整条智能电缆的形态;Luna 创新公司的Duncan 等^[102]提出可以利用波分复用FBG传感器阵列构建光纤全局定位系统,并将其用于搜救机器人的形状定位。在大约1 m长的三芯纤维构成的形态感知电缆上嵌入300个FBG传感器(每芯布置100个FBG传感器),然后分别进行悬臂梁弯曲、三点弯曲和动态激振情况下的实验研究,实验结果表明,利用FBG传感器阵列构建的光纤定位系统可以准确地重构结构的二维和三维形状,误差值为1.2%,该技术在可展开空间结构的定位与形态监测上获得了应用^[103];Klute 等^[104]将Luna 开发的高密度分布式FBG形状感知系统应用于波音公司的VGC 研究计划,对发动机尾喷口后缘部分的V型结构在不同飞行状态下的结构形态进行监控;Arritt 等^[105]利用集成的FBG传感器对大型可展开空间的结构形态感知与重构进行了研究,结果表明利用阵列化的FBG传感器可以实现如空间望远镜的结构变形与形态测量,揭示了其在空间大型结构中的应用优势与潜力;Jutte 等^[106]提出利用FBG传感器阵列,在机翼地面载荷试验中进行全尺度的机翼弯曲和扭曲形态实时测量研究;德莱顿(Dryden)飞行研究中心的工程师将所开发的光纤形状传感器阵列粘贴在无人机Ikhana 机翼表面,准确测量了机翼在飞行中的变形,并将其实时显示在计算机屏幕上,从而可通过操控飞机操纵面来补偿由机翼的应力负荷而产生的变形,实现机翼的自适应控制功能,被誉为飞行控制的重大突破,该技术也可应用于机身等大型结构在扰动、硬着陆等受高负载情况下的变形实时监测,实现机翼和稳定器的颤振控制^[107];此外,德莱顿飞行研究中心提出可将光纤光栅机翼形态感知传感(FOWSS)技术应用于美国空军新型大展弦比机翼无人验证机X-56A的测试,以实时感知机翼形状和负载信息^[108]。

OFS 实验室(原贝尔实验室光纤研究部)的Kremp 等^[109]通过在扭转7芯光纤写入连续的布拉格弱光栅阵列实现了超长距离的分布式应变传感,如图38所示。为了可以连续写入光栅,该光纤采用了透明的紫外涂覆层。该光纤由6个偏芯和一个中央纤芯组成,根据6个偏芯上的布拉格光栅的响应能确定光纤弯曲的大小和方向,而中央纤芯对弯曲

不敏感,只对光纤的热应力和纵向应力敏感,通过边芯与中间芯光纤光栅FBG反射峰值之间的差分,就能消除温度对弯曲测量的影响。为了检测光纤的扭转方向,他们还采用了扭转的7芯光纤,光纤发生外部扭转会额外增大或减小光纤的扭矩长度,从而可从反射信号中检测外部扭转的大小和方向。此外,他们采用光频域反射技术(OFDR)来监测反射信号,对反射信号数据进行重构。这种结构探测的空间分辨率受限于光栅的长度,一般小于1 mm。

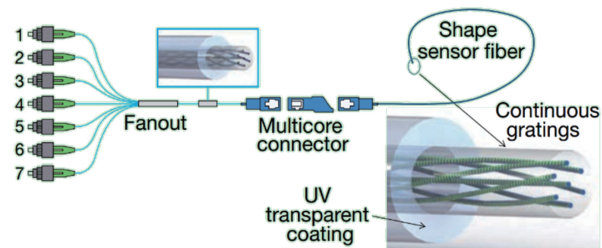


图38 扭转7芯光纤光栅阵列分布式测量系统
Fig. 38 Distributed measurement system of torsional 7-core fiber Bragg grating array

Luna Innovations 公司的Froggatt 等^[110]于2014年提出扭转4芯FBG的三维形变和位移传感模型,如图39(a)~(c)所示。他们所研制的传感器可实现大于30 m的分布式形变和位置测量,均方根位置误差小于7.7 cm,如图39(d)所示。在对柔性表面测量的实际应用中,该传感器采用了9.8 m长的扭转4芯光纤,其均方根误差小于10.9 cm^[111],刷新率为10 Hz,如图39(e)所示。

8 结束语

多芯光纤原本是为增加和扩展光通信容量而发展起来的。然而,对于集成光学和光纤传感技术而言,其所涉及的是多个波导集成在同一光纤中,关注的是各个波导光路之间的分束、合束,干涉与耦合等光学特性,以及短距离光场的传输及其变换特性。这是同一种功能光纤的两个主要应用场景。此外,光纤光源关注的是特殊阵列芯光纤,例如:线性阵列芯光纤、环形阵列芯光纤,以用于合束和相位调控等。

近期,有关多芯光纤的研究揭示了其作为空分复用通信光纤、纤维集成光学器件与光纤传感器的各种光学特性。例如:多芯光纤中的芯间串扰、外部纤芯的损耗退化、周围光纤芯导致的截止波长变化,以及光场耦合导致的相位调制效应等。对于多芯光纤而言,这些研究更好地阐释了上述特殊光学性质的机理。因此,多芯光纤可以按照人们的需要来重

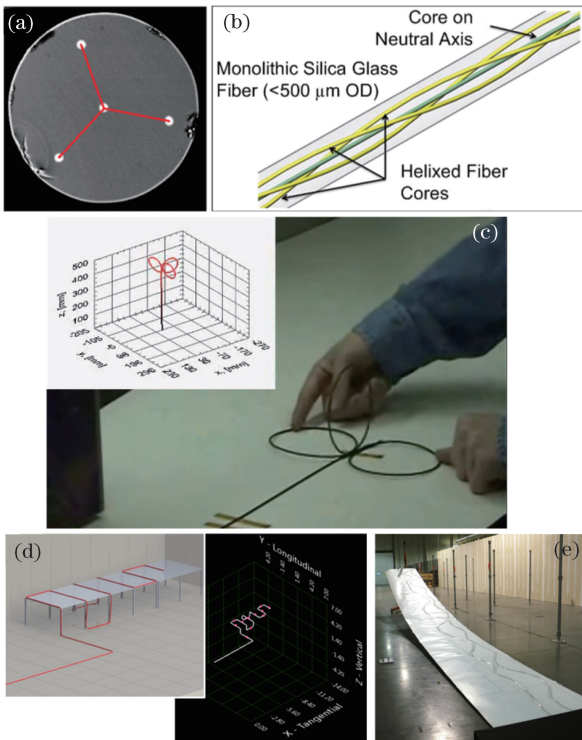


图 39 扭转多芯光纤弯曲传感器。(a)传感 4 芯光纤；(b)光纤扭转示意图；(c)光纤弯曲传感；(d)实验室中弯曲和位置传感监测；(e)实际应用中弯曲柔性平面传感监测

Fig. 39 Bending sensor based on torsional multi-core fiber. (a) 4-core sensing fiber; (b) schematic of fiber torsion; (c) fiber bending sensing; (d) monitoring of bending and position sensing in laboratory; (e) monitoring of flexible plane sensing in practical applications

新加以设计。许多研究小组都尝试进一步发展和改进多芯光纤的特性,例如,通过横向串扰、芯间距离、有效面积、截止波长等来优化和均衡彼此相互矛盾的光通信系统参数需求,以满足和实现各种特殊的传感与检测需要。

尽管对多芯光纤的许多基本问题都已经有了较为清楚的认识,但是,无论是对于长程光纤通信,还是对于纤维集成光器件以及特种传感需求来说,还有很多重要的问题没有得到很好的解决。例如:多芯光纤光放大问题、功率合束器、熔接与连接方便可靠的低损耗耦合技术等。这些关键器件性能的提升和成本的降低,必将推动多芯光纤及其应用技术的进一步发展。

参 考 文 献

[1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-

division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.

- [2] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fibers for large capacity transmission[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 441-454.
- [3] Matsuo S, Sasaki Y, Ishida I, *et al.* Recent progress in multi core and few mode fiber[C] // *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*, March 17-21, 2013, Anaheim, CA, USA. Washington, D. C.: OSA, 2013: OM3I.3.
- [4] Hayashi T. Chapter 9: multi-core optical fibers[M] // *Kaminow I, Li T Y, Willner A E. Optical Fiber Telecommunications Volume VIA: Components and Subsystems*. New York: Academic Press, 2013: 321-352.
- [5] Sano A, Kobayashi T, Yamanaka S, *et al.* 102.3-Tb/s (224×548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone[C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2012: PDP5C.3.
- [6] Zhang S L, Huang M F, Yaman F, *et al.* 40 × 117.6 Gb/s PDM-16QAM OFDM transmission over 10, 181 km with soft-decision LDPC coding and nonlinearity compensation[C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2012: PDP5C.4.
- [7] Cai J X, Cai Y, Davidson C, *et al.* 20 Tbit/s capacity transmission over 6860 km[C] // *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011*, March 6-10, 2011, Los Angeles, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2011: PDPB4.
- [8] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, *et al.* Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [9] Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [10] Morioka T. New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond[C] // *2009 14th OptoElectronics and Communications Conference*, July 13-17, 2009, Vienna, Austria. New York: IEEE, 2009: 10846198.
- [11] Iano S, Sato T, Sentsui S, *et al.* Multicore optical

- fiber[C] // Optical Fiber Communication, March 6, 1979, Washington, D. C., USA. Washington, D. C.: OSA, 1979: WB1.
- [12] Inao S, Sato T, Hondo H, *et al.* High density multicore-fiber cable[C] // International Wire & Cable Symp(IWCS). [S. l.: s. n.], 1979: 370-384.
- [13] Berdagué S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. Applied Optics, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [14] Kashima N, Maekawa E, Nihei F. New type of multicore fiber[C] // Optical Fiber Communication, April 13, 1982, Phoenix, Arizona, USA. Washington, D. C.: OSA, 1982: ThAA5.
- [15] Sumida S, Maekawa E, Murata H. Design of bunched optical-fiber parameters for 1.3- μm wavelength subscriber line use[J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1010-1015.
- [16] Nihei F, Yamamoto Y, Kojima N. Optical subscriber cable technologies in Japan[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(6): 809-821.
- [17] Sumida S, Maekawa E, Murata H. Fundamental studies on flat bunched optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(1): 159-164.
- [18] Le N G. Ultra high density cables using a new concept of bunched multicore monomode fibers: a key for the future FTTH networks[C] // Proceedings of the 43rd International Wire & Cable Symposium (IWCS), October 14-17, 1994, Atlanta, GA. New York: NASA, 1994: 203-210.
- [19] Stern J R, Ballance J W, Faulkner D W, *et al.* Passive optical local networks for telephony applications and beyond[J]. Electronics Letters, 1987, 23(24): 1255-1257.
- [20] Taylor D M, Bennett C R, Shepherd T J, *et al.* Demonstration of multi-core photonic crystal fibre in an optical interconnect[J]. Electronics Letters, 2006, 42(6): 331-332.
- [21] Imamura K, Mukasa K, Sugizaki R, *et al.* Multi-core holey fibers for ultra large capacity wide-band transmission[C] // 2008 34th European Conference on Optical Communication, September 21-25, 2008, Brussels, Belgium. New York: IEEE, 2008: 10426525.
- [22] Imamura K, Mukasa K, Mimura Y, *et al.* Multi-core holey fibers for the long-distance (> 100 km) ultra large capacity transmission[C] // Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, March 22-26, 2009, San Diego, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2009: OTuC3.
- [23] Koshiba M, Saitoh K, Kokubun Y. Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle[J]. IEICE Electronics Express, 2009, 6(2): 98-103.
- [24] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, *et al.* 19-core fiber transmission of $19 \times 100 \times 172$ -Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s[C] // Optical Fiber Communication Conference, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2012: PDP5C.1.
- [25] Ryf R, Essiambre R, Gnauck A, *et al.* Space-division multiplexed transmission over 4200 km 3-core microstructured fiber[C] // Optical Fiber Communication Conference, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2012: PDP5C.2.
- [26] Liu X, Chandrasekhar S, Chen X, *et al.* 1.12-Tb/s 32-QAM-OFDM superchannel with 86-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and space-division multiplexed transmission with 60-b/s/Hz aggregate spectral efficiency[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B958-B964.
- [27] Lee B G, Kuchta D M, Doany F E, *et al.* 120-Gb/s 100-m transmission in a single multicore multimode fiber containing six cores interfaced with a matching VCSEL array[C] // IEEE Photonics Society Summer Topicals 2010, July 19-21, 2010, Playa del Carmen, Mexico. New York: IEEE, 2010: 223-224.
- [28] Zhu B Y, Taunay T F, Yan M F, *et al.* 7×10 -Gb/s multicore multimode fiber transmissions for parallel optical data links[C] // 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Torino, Italy. New York: IEEE, 2010: 11637154.
- [29] Zhu B, Taunay T F, Yan M F, *et al.* Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network[J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11117-11122.
- [30] Yuan L B, Yang J, Liu Z H, *et al.* In-fiber integrated Michelson interferometer[J]. Optics Letters, 2006, 31(18): 2692-2694.
- [31] Yuan L B, Yang J, Liu Z H. In-fiber integrated Michelson interferometer: 200610010422.2[P]. 2007-02-07.
苑立波, 杨军, 刘志海. 集成为单根光纤的迈克尔逊干涉仪: 200610010422.2[P]. 2007-02-07.
- [32] Yuan L B, Yang J, Liu Z H. In-fiber integrated M-Z interferometer and the fabrication methods:

- 200710072625.9[P]. 2008-01-16.
- 苑立波, 杨军, 刘志海. 纤维集成式马赫曾德干涉仪及其制造方法: 200710072625.9[P]. 2008-01-16.
- [33] Yuan L B, Liu Z H, Yang J. Coupling characteristics between single-core fiber and multicore fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3237-3239.
- [34] Yuan L B, Liu Z H, Yang J. A coupler and its fabrication methods for multicore fibers by welding and tapering with a single core optical fiber: 200610151033.1[P]. 2006-11-17.
- 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: 200610151033.1[P]. 2006-11-17.
- [35] Yuan L B, Liu Z H, Yang J, *et al.* Bitapered fiber coupling characteristics between single-mode single-core fiber and single-mode multicore fiber[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(18): 3307-3312.
- [36] Liu Z H, Bo F S, Wang L, *et al.* Integrated fiber Michelson interferometer based on poled hollow twin-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2435-2437.
- [37] Yuan L B, Yang J, Guan C Y, *et al.* Three-core fiber-based shape-sensing application[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 578-580.
- [38] Yuan L B, Dai Q, Tian F J, *et al.* Linear-core-array microstructured fiber[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(10): 1531-1533.
- [39] Yuan L B. Recent progress of in-fiber integrated interferometers[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 1-5.
- [40] Yuan L B. In-fiber integrated optic devices for sensing applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 84211D.
- [41] Yuan L B. In-fiber integrated optic devices and its applications[C]//The 5th International Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO2013), May 23-25, 2013, Beijing, China. [S.l.: s.n.], 2013.
- [42] Marcuse D. Influence of curvature on the losses of doubly clad fibers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(23): 4208-4213.
- [43] Snyder A W. Coupled-mode theory for optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(11): 1267-1277.
- [44] Hardy A, Streifer W. Coupled mode theory of parallel waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 1135-1146.
- [45] Streifer W, Osinski M, Hardy A. Reformulation of the coupled-mode theory of multiwaveguide systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(1): 1-4.
- [46] Chuang S L. A coupled mode formulation by reciprocity and a variational principle[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(1): 5-15.
- [47] Haus H, Huang W, Kawakami S, *et al.* Coupled-mode theory of optical waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(1): 16-23.
- [48] Huang W P. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(3): 963-983.
- [49] Koshiba M, Saitoh K, Takenaga K, *et al.* Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory[J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B102-B111.
- [50] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, *et al.* Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, March 6-10, 2011, Los Angeles, California, USA. Washington, D. C.: OSA, 2011: OWJ4.
- [51] Imamura K, Mukasa K, Sugizaki R. Trench assisted multi-core fiber with large Aeff over 100 μm^2 and low attenuation loss[C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. Washington, D. C.: OSA, 2011: Mo. 1.LeCervin.1.
- [52] 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.
- [53] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, *et al.* Characterization of crosstalk in ultra-low-crosstalk multi-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 583-589.
- [54] Hayashi T, Taru T, Nagashima T, *et al.* Multi-core fiber for high-capacity long-haul spatially-multiplexed transmission[J]. *SEI Technical Review*, 2013, 7(77): 14-22.
- [55] Saitoh K, Matsui T, Sakamoto T, *et al.* Multi-core hole-assisted fibers for high core density space division multiplexing[C]//Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), July 5-9, 2010, Sapporo, Japan. New York: IEEE, 2010: 11570089.
- [56] Kumar S, Manyam U H, Srikant V. Optical fibers having cores with different propagation constants, and methods of manufacturing same: US6611648 [P/OL]. 2003-08-26[2019-05-05]. <https://patents.glgoo.top/patent/US6611648B2/en>.

- [57] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, *et al.* 305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 554-562.
- [58] Jain S, Castro C, Jung Y M, *et al.* 32-core erbium/ytterbium-doped multicore fiber amplifier for next generation space-division multiplexed transmission system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32887-32896.
- [59] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 216-220.
- [60] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(10): 899-909.
- [61] Sharma A B, Al-Ani A H, Halme S J. Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(19): 3297-3301.
- [62] Nagano K, Kawakami S, Nishida S. Change of the refractive index in an optical fiber due to external forces[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(13): 2080-2085.
- [63] Hayashi T, Nagashima T, Shimakawa O, *et al.* Crosstalk variation of multi-core fibre due to fibre bend[C] // 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Torino, Italy. New York: IEEE, 2010: 11636875.
- [64] Nakazawa M, Yoshida M, Hirooka T. Nondestructive measurement of mode couplings along a multi-core fiber using a synchronous multi-channel OTDR [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12530-12540.
- [65] Klaus W, Sakaguchi J, Puttnam B J, *et al.* Free-space coupling optics for multicore fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1902-1905.
- [66] Tottori Y, Kobayashi T, Watanabe M. Low loss optical connection module for 7-core multi-core fiber and seven single mode fibers[C] // 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 9-11, 2012, Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 2012: 232-233.
- [67] Thomson R R, Bookey H T, Psaila N D, *et al.* Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications [J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11691-11697.
- [68] Neugroschl D, Kopp V I, Singer J, *et al.* "Vanishing-core" tapered coupler for interconnect applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7221: 72210G.
- [69] Kopp V I, Park J, Wlodawski M, *et al.* Pitch reducing optical fiber array and multicore fiber for space-division multiplexing [C] // 2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 8-10, 2013, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2013: 99-100.
- [70] Kopp V I, Park J, Wlodawski M, *et al.* Chiral fibers: microformed optical waveguides for polarization control, sensing, coupling, amplification, and switching [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 605-613.
- [71] Kopp V I, Park J, Wlodawski M S, *et al.* Vanishing core optical waveguides for coupling, amplification, sensing, and polarization control [C] // *Advanced Photonics*, July 27-31, 2014, Barcelona, Spain. Washington, D. C.: OSA, 2014: SoW1B.3.
- [72] Snyder A W, Love J D. *Bends* [M] // *Optical waveguide theory*. Boston, MA: Springer, 1983: 179-188.
- [73] Tian F J, Yuan L B, Dai Q, *et al.* Design and fabrication of embedded two elliptical cores hollow fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8199: 819911.
- [74] Tian F J, Yuan L B, Dai Q, *et al.* Embedded multicore hollow fiber with high birefringence [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(33): 6162-6167.
- [75] Guan C Y, Tian F J, Dai Q, *et al.* Characteristics of embedded-core hollow optical fiber [J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20069-20078.
- [76] Jin W, Stewart G, Wilkinson M, *et al.* Compensation for surface contamination in a D-fiber evanescent wave methane sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(6): 1177-1183.
- [77] Chen X, Zhou K, Zhang L, *et al.* Optical chemo-sensors utilizing long-period fiber gratings UV-inscribed in D-fiber with enhanced sensitivity through cladding etching [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(5): 1352-1354.
- [78] Chandani S M, Jaeger N A F. Fiber-optic temperature sensor using evanescent fields in D fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(12): 2706-2708.
- [79] Chiu M H, Wang S F, Chang R S. D-type fiber biosensor based on surface-plasmon resonance technology and heterodyne interferometry [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(3): 233-235.
- [80] Fleming J W. Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(24): 4486-4493.
- [81] Tian F J, Yuan L B, Dai Q, *et al.* Birefringence

- analysis of a two elliptical cores hollow fiber based on finite element method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8351: 83510O.
- [82] Yuan L B, Dai Q, Yang J, *et al.* A parallel array multi-core optical fiber and the fabrication method: 200910071521.5[P]. 2009-09-16.
苑立波, 戴强, 杨军, 等. 一种平行阵列多芯光纤及其制备方法: 200910071521.5[P]. 2009-09-16.
- [83] Guan C Y, Yuan L B, Dai Q, *et al.* Supermodes analysis for linear-core-array microstructured fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(11): 1741-1745.
- [84] Beach R J, Feit M D, Mitchell S C, *et al.* Phase-locked antiguided multiple-core ribbon fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(5): 670-672.
- [85] Drachenberg D, Messerly M, Pax P, *et al.* First multi-watt ribbon fiber oscillator in a high order mode [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18089-18096.
- [86] Yuan L B, Dai Q, Tian F J, *et al.* Multicore optical fiber with annular distributed cores and its fabrication method: 201010138977.1[P]. 2010-09-22.
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: 201010138977.1[P]. 2010-09-22.
- [87] Elkin N N, Napartovich A P, Sukharev A G, *et al.* Direct numerical simulation of radiation propagation in a multicore fiber [J]. *Optics Communications*, 2000, 177: 207-217.
- [88] Wrage M, Glas P, Fischer D, *et al.* Phase-locking of a multicore fiber laser by wave propagation through an annular waveguide[J]. *Optics Communications*, 2002, 205(4/5/6): 367-375.
- [89] Wrage M, Glas P, Leitner M, *et al.* Experimental and numerical determination of coupling constant in a multicore fiber [J]. *Optics Communications*, 2000, 175(1/2/3): 97-102.
- [90] Gander M J, Galliot E A C, McBride R, *et al.* Bend measurement using multicore optical fiber[C]//12th International Conference on Optical Fiber Sensors, October 28, 1997, Williamsburg, Virginia, USA. Washington, D. C.: OSA, 1997: OWC6.
- [91] Yuan L B, Yang J, Liu Z H. A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber Michelson interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1114-1117.
- [92] Yuan L B. Recent progress of in-fiber integrated interferometers[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 1-5.
- [93] Salceda-Delgado G, van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, *et al.* Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1468-1471.
- [94] Romaniuk R S, Dorosz J. Temperature sensor based on double-core optical fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4887: 55-66.
- [95] Rugeland P, Margulis W. Revisiting twin-core fiber sensors for high-temperature measurements[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6227-6232.
- [96] Antonio-Lopez J E, Eznavneh Z S, LiKamWa P, *et al.* Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000 °C [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4309-4312.
- [97] van Newkirk A, Antonio-Lopez E, Salceda-Delgado G, *et al.* Optimization of multicore fiber for high-temperature sensing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4812-4815.
- [98] Zhou A, Li G P, Zhang Y H, *et al.* Asymmetrical twin-core fiber based Michelson interferometer for refractive index sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(19): 2985-2991.
- [99] Liu Z H, Wei Y, Zhang Y, *et al.* Twin-core fiber SPR sensor[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2826-2829.
- [100] Liu Z H, Wei Y, Zhang Y, *et al.* A multi-channel fiber SPR sensor based on TDM technology[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 226: 326-331.
- [101] Clements G M. Fiber optic sensor for precision 3-D position measurement: US6888623 [P/OL]. 2005-05-03[2019-05-05]. <https://patents.google.com/patent/US6888623B2/en>.
- [102] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, *et al.* High-accuracy fiber-optic shape sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6530: 65301S.
- [103] Duncan R G, Raum M T, Cadogan D P, *et al.* Use of high spatial resolution fiber-optic shape sensors to monitor the shape of deployable space structures [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, 746(1): 880-886.
- [104] Klute S, Duncan R, Fielder R, *et al.* Fiber-optic shape sensing and distributed strain measurements on a morphing chevron[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 9-12, 2006, Reno, Nevada. New York: AIAA, 2006: 624.
- [105] Arritt B, Murphey T, Dumm H P, *et al.* Demonstration of the use of fiber-optics, with integrated fiber-Bragg gratings, for shape determination of large deployable structures[C]//48th AIAA/

- ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 23-26, 2007, Honolulu, Hawaii. New York: AIAA, 2007: 2006.
- [106] Jutte C V, Ko W L, Stephens C A, *et al.* Deformed shape calculation of a full-scale wing using fiber optic strain data from a ground loads test[M]. New York: National Aeronautics and Space Administration, 2011.
- [107] Richards L, Parker A R, Ko W L, *et al.* Real-time in-flight strain and deflection monitoring with fiber optic sensors[M]. New York: National Aeronautics and Space Administration, 2008.
- [108] Ginn S. Flexible wing designs with sensor control feedback for demonstration on the X-56A (MUTT) [M]. New York: National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- [109] Kremp T, Feder K S, Ko W, *et al.* Performance characteristics of continuous multicore fiber optic sensor arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10058: 100580V.
- [110] Froggatt M E, Klein J W, Gifford D K, *et al.* Optical position and/or shape sensing: US8773650 [P/OL]. 2014-07-08[2019-05-05]. <https://patents.glgoo.top/patent/US8773650B2/en>.
- [111] Lally E M, Reaves M, Horrell E, *et al.* Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8345: 83452Y.