

激光与光电子学进展

多芯光纤光栅写入技术研究进展

苏柏缙^{1,2}, 钟立熙^{1,2}, 许鸥^{1,2}, 秦玉文^{1,2,3*}

¹广东工业大学信息工程学院, 先进光子技术研究院, 广东 广州 510006;

²广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006;

³河源广工大协同创新研究院, 广东 河源 517000

摘要 为了进一步增加光纤通信容量,作为空分复用实现方案之一的多芯光纤技术吸引了人们越来越多的研究兴趣。与此同时,基于多芯光纤的各种新型有源、无源光器件也不断涌现。其中,多芯光纤光栅,由于结合了多芯光纤与光纤光栅的独特优势,为新型全光纤器件的设计和应用提供了多种可能,在光纤通信、光纤传感、光纤激光器等领域具有广泛的应用空间。本文分别从多芯光纤选择性刻写和全芯刻写出发,详细介绍了多种基于不同光源、不同写入方式的多芯光纤光栅刻写方案,并结合不同应用场景,分析了不同方案的技术特点。

关键词 光纤光栅; 光纤通信; 光纤传感器; 多芯光纤; 光栅刻写

中图分类号 TN24 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0300004

Multicore Fibre Gratings Inscription Technology Research Developments

Su Baijin^{1,2}, Zhong Lixi^{1,2}, Xu Ou^{1,2}, Qin Yuwen^{1,2,3*}

¹Advanced Institute of Photonics, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

²Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

³Synergy Innovation Institute of GDUT, Heyuan, Guangdong 517000, China

Abstract To improve fiber optic communication capacity, multicore fiber, a space division multiplexing implementation option, has attracted increasing research interest. At the same time, various new active and passive optical devices based on multicore fibers are emerging. Multicore fiber grating, which can combine the unique advantages of multicore fiber and fiber grating, offers a wide range of possibilities for the design and application of new all-fiber devices in various fields, such as fiber optic communication, fiber optic sensing, and fiber lasers. In this paper, multi-core optical fiber inscription is classified as selective inscription and full-core inscription. Various multicore fiber grating inscription schemes based on different light sources and different inscription methods are introduced. The technical characteristics of the different schemes are analysed relative to different application scenarios.

Key words fiber Bragg gratings; fiber optics communications; fiber optics sensors; multicore fiber; gratings inscription

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1800901)、国家自然科学基金(61941107, 62005052)、广东省珠江人才计划引进创新创业团队项目(2019ZT08X340)、广东重点领域研发计划项目(2018B010114002)

通信作者: *qinyw@gdut.edu.cn

1 引 言

经过数十年来研究者们不懈努力,标准单芯单模光纤的传输容量得到了指数型增长,并已逼近至香农定理所限定的传输容量物理极限^[1]。而随着当今互联网的高速发展,人们对通信容量的需求与日俱增,可以预见,传统单模光纤通信系统将难以支撑迅速增长的通信需求,解决当前的容量危机迫在眉睫。多芯光纤(MCF)通过增加同一包层内的纤芯数目,能够提供多个独立并行的空间信道。因此,基于多芯光纤的空分复用技术^[2]成为解决目前容量危机的重要方案。另一方面,多芯光纤借助不同空间位置的纤芯,能够实现空间弯曲与三维形状传感,且多芯光纤中的多个纤芯被集成在直径约百微米量级的包层中,各个纤芯感受到的温度变化近似相同,可以实现温度自补偿,提高测量精确度,因而具有空间结构优势、温度补偿优势、信道集成优势^[3],能够胜任不同场景下多种物理、化学参数的单独或同时测量,因而在传感领域中也备受关注^[4-5]。

作为一种重要的全光纤无源器件,光纤光栅具有以下优势:1) 尺寸小、质量轻,易于实现复合材料中的埋植;2) 传输损耗低;3) 耐腐蚀;4) 使用寿命长;5) 可进行分布式测量。因此,自 1978 年 Hill 等^[6]利用驻波法在掺铒光纤中制作出第一个光纤光栅后,光纤光栅的研究及应用得到了飞速的发展。

近年来,在多芯光纤受到日益关注的大背景下,人们逐渐将光纤光栅运用到多芯光纤中,制成各种不同类型的多芯光纤光栅。由于结合了多芯光纤与光纤光栅的优点,多芯光纤光栅型器件在光纤通信、光纤传感领域中都具有重要的应用价值和广泛的应用前景。在空分复用光纤通信系统中,多芯光纤光栅能够用于信道的色散补偿和滤波;在光纤传感领域,多芯光纤光栅可用于设计多维多参量的新型传感器,已有将其用于微型机器人和微创外科手术的相关报道^[7]。除此之外,多芯光纤光栅还被应用于高功率激光器^[8]、天文观测^[9]等技术领域。

多芯光纤光栅的应用与发展离不开行之有效的光栅刻写方法。自 2000 年 Gander 等^[10]利用紫外曝光法首次将光纤布拉格光栅(FBG)写入多芯光纤以来,多芯光纤光栅刻写技术越来越趋于成熟。目前多芯光纤光栅的刻写方法主要包括:紫外曝光法、飞秒激光刻写法、二氧化碳激光刻写法、电弧放

电法等。本文对近年来国内外的多芯光纤光栅刻写方案进行了较为全面的综述,并结合其在空分复用光纤通信、高功率激光器、多参数光纤传感、天文观测等领域的应用,分析了各种方案的技术特点。

2 选择性刻写

多芯光纤中选择特定纤芯进行光栅刻写,为空分复用光通信系统中特殊光器件以及新型光纤传感器的设计与应用提供了较为灵活的制作方案。评估选择性刻写方案是否可行,除了在目标纤芯上刻写的光栅各项指标符合器件需求外,其余非目标纤芯中要尽量避免残余光栅出现,否则可能会影响目标纤芯的正常使用。由于多芯光纤大都具有纤芯间距小、空间结构复杂等特点,因此选择性刻写法要求刻写系统具备较高的刻写精度。

目前的多芯光纤选择性刻写光栅方案,从刻写光源的角度进行分类,主要可以分为紫外光和飞秒激光两大类。

2.1 紫外光刻写

紫外光是最早用于光栅刻写的光源,使用时通常会与相位掩模版相结合,在经过掺杂、氢载等光敏性处理后的光纤上进行照射,诱导其折射率发生周期性变化,从而形成光栅结构。紫外曝光法是目前发展最为成熟,使用最为广泛的光栅制作方法,因此也自然被用于多芯光纤刻写光栅。早在 2003 年,赫瑞-瓦特大学的 Flockhart 等^[11]首次报道了使用紫外光结合相位掩模版将 FBG 选择性写入四芯光纤的三个独立纤芯中,并用于双轴弯曲测量。

西班牙巴伦西亚理工大学 ITEAM 研究中心的 Javier Madrigal 课题组对多芯光纤刻写光栅有着非常深入的探索。2017 年,该课题组对七芯光纤的三个独立纤芯选择性写入多个不同特性的 FBG,实验装置如图 1 所示。实验采用的七芯光纤包层直径

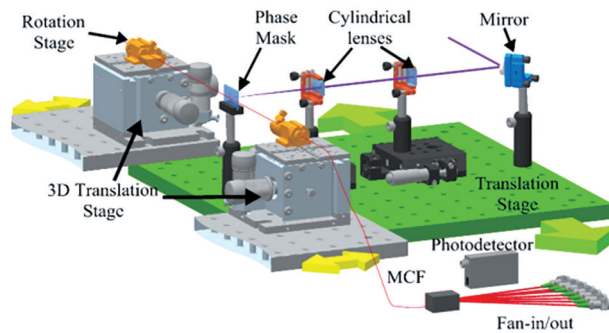


图 1 光纤光栅刻写装置^[13]

Fig. 1 General scheme of the FBG inscription setup^[13]

125 μm , 纤芯间距 35 μm , 模场直径为 6.4 μm 。实验设备可分为三个系统: 激光束调节子系统, 光纤定位子系统和纤芯跟踪子系统。其中, 基于光致发光的纤芯跟踪子系统可以将细窄光束精确对准多芯光纤特定纤芯的纤芯轴, 从而提高光栅的刻写质量。另外, 他们将目标纤芯置于最前方并使相位掩模版与光纤的位置尽可能靠近, 以限制光纤透镜

效应带来的影响。每条纤芯上刻有 3 个不同中心波长的 FBG, 目标纤芯的光谱图如图 2 所示, 光栅的反射率在 20%~40% 之间, 光栅间反射峰的最大差值约为 3 dB, 但在其余外芯中发现了比目标纤芯光谱峰值低 15 dB~29 dB 的残余光栅。该刻写结构可用于制作实时延迟线^[13]。

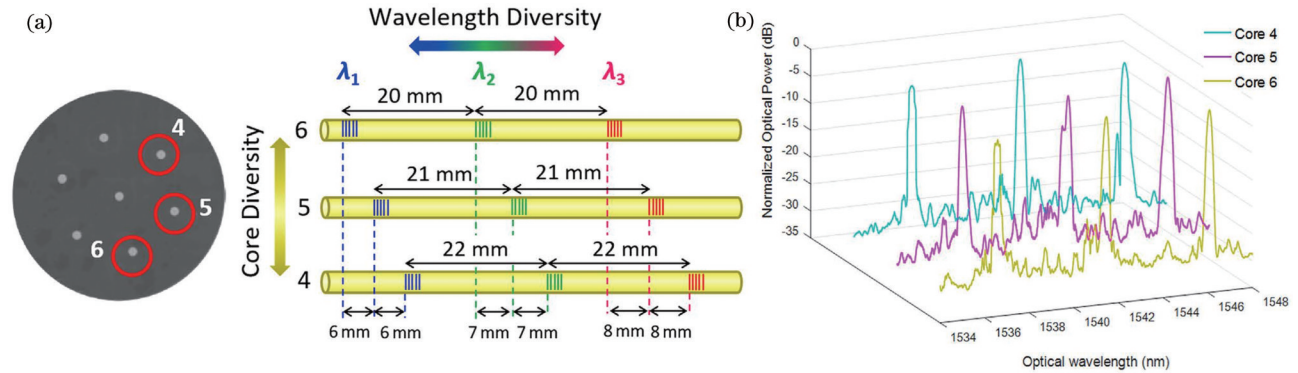


图 2 七芯光纤中选择三个独立纤芯刻写 FBG^[13]。(a) FBG 在纤芯上的分布; (b) 三个纤芯的光栅刻写结果

Fig. 2 Three individual cores of seven-core fiber are selected for FBG inscription^[13]. (a) FBG distribution on fiber cores;

同年, 该团队首次展示了在七芯光纤中的一组纤芯中选择性写入倾斜光纤布拉格光栅 (TFBG)。实验所用的七芯光纤纤芯呈六边形排布, 包层直径为 125 μm , 外芯与中心芯的间距为 35 μm , 每个纤芯模场直径为 6.4 μm 。他们使用 244 nm 连续波倍频氩离子激光结合相位掩模版扫描同一平面上的中

心芯与两个外芯, 配合纤芯跟踪子系统优化极窄激光束对极细纤芯的照射, 随后将相位掩模版绕激光束旋转 3°, 实现在三个纤芯中同时写入倾斜光栅, 刻写示意图与 TFBG 光谱如图 3 所示。从三个纤芯的光栅光谱中可以发现, 外芯比中心芯更靠近光纤包层, 因此会存在较多的包层模式, 两个外芯的包层

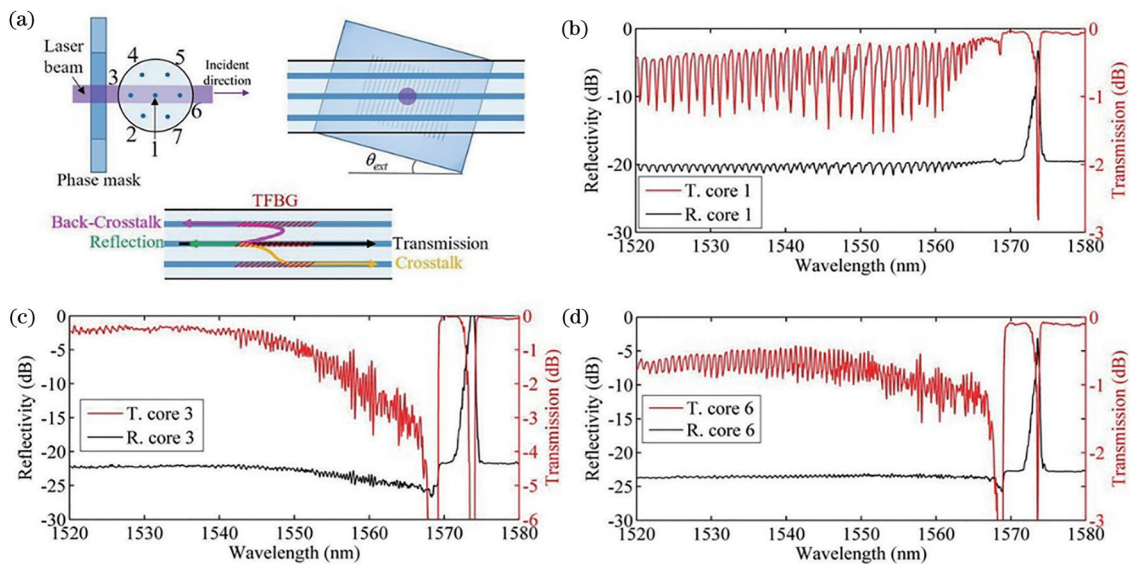


图 3 七芯光纤中选择三个纤芯同时写入 TFBG^[14]。(a) TFBG 刻写示意图; (b)~(d) 三个纤芯对应的光谱

Fig. 3 Three cores of the seven-core fiber are selected for simultaneous TFBG inscription^[14]. (a) Schematic diagram of TFBG inscription; (b)~(d) spectra of three cores

模式波长间隔也会更密集^[14]。2019年,该课题组利用该光栅增强多芯光纤的芯间串扰,成功实现折射率和温度的测量^[15]。

2020年,Aston大学的Wang等研究了不同激光聚焦位置对多芯光纤选择性刻写光栅的影响。他们使用芯距为50 μm的锗硼共掺四芯光纤,通过调整柱面透镜与光纤的距离控制焦点在光纤中的位置,实验示意图与对应的光栅透射谱如图4(a)所示。2016年,该课题组用同样的方法在芯距为36 μm的四芯光纤

内进行单芯刻写,由于衍射效应,目标纤芯轴心对称位置上的纤芯受到不良曝光^[16]。而从图4(b)中可以看出,改用50 μm芯径的四芯光纤后,只在纤芯A中存在1551.72 nm的强反射峰,其余三个纤芯几乎没有影响。另外,将激光焦点置于任意两个纤芯的连线中点处,可实现双芯选择性刻写,观察图4(c)和图4(d)可以发现,两种情况下,更靠近入射光束的纤芯中FBG反射强度会略强于远端的纤芯,这说明激光首先到达的纤芯会受到更强的曝光作用影响^[17]。

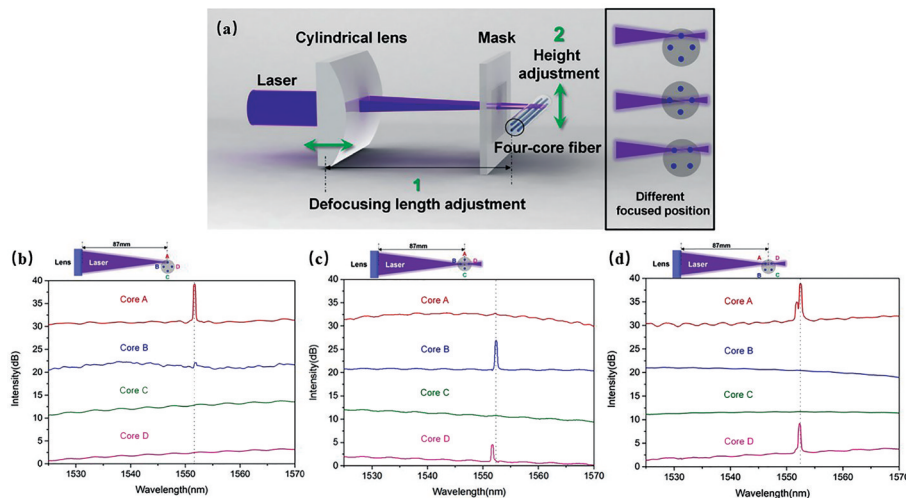


图4 不同聚焦位置对选择性刻写的影响^[17]。(a)激光聚焦位置示意图;(b)~(d)三种刻写方案的光谱图

Fig. 4 Effect of different focus positions on selective inscription^[17]. (a) Schematic diagram of laser focus position;

2020年,南安普敦大学的Jantzen等^[18]首次使用小光斑紫外线直写(SSDUW)技术将FBG选择性刻入多芯光纤中。SSDUW技术示意图如图5(a)所示,244 nm的氩离子激光束在聚焦之前被分成两束,并在光纤的一个纤芯中会聚成直径为14 μm的干涉点,该干涉点可以完全覆盖5 μm直径的纤芯。通过旋转多芯光纤使目标纤芯位于最上方进行刻写,以降低相邻纤芯的不良曝光与衍射。图5(b)显示了在四个独立纤芯的同一纵向位置上运用SSDUW方法刻写两个7 mm长度、光谱间隔5 nm的高斯切趾FBG结果,可见共振峰只出现在四个目标纤芯中,有效抑制了与其余纤芯的交叉曝光影响。

2.2 飞秒激光刻写

高功率飞秒激光能够利用多光子吸收与雪崩电离效应,诱导透明材料发生折射率变化^[19],且折射率改变区域可以小于1 μm^{3[20]},这一特性使得飞秒激光在多芯光纤的高精度选择性刻写中具有天然的优势。另外,飞秒激光可以在无光敏性处理、无需去除涂敷层的光纤上直接刻写光栅,且能够灵

活调整写入光栅参数,制作出来的光栅一般具有耐高温等特性。因此,近年来飞秒激光逐渐成为多芯光纤选择性刻写光栅的重要方案之一。

2017年,深圳大学王义平课题组^[21]使用800 nm飞秒激光结合相位掩模版,将FBG选择性刻在双芯双模光纤中的一个纤芯上,写入系统示意图如图6(a)所示。双芯双模光纤包含有两个相同的芯子,每个芯子由三层结构组成,且能够同时支持两个模式传输。由于写入光聚焦在纤芯A所在位置,而纤芯B所在位置的激光强度远远低于纤芯A,因此纤芯B中未能形成有效光栅结构。如图6(b)所示,从纤芯A光谱中可以观察到波长为1546.08,1547.65,1549.05 nm的三个反射峰,分别由LP11前后向模式耦合、LP01~LP11交叉模式耦合和LP01前后向模式耦合产生。值得一提的是,熔接时,单模光纤芯轴与纤芯A芯轴的偏差值会影响三个谐振峰的反射强度。当偏差值为24,28,29 μm时,三个峰的反射强度分别达到最大值,因此将偏差值调整至25.4 μm,可使得三个

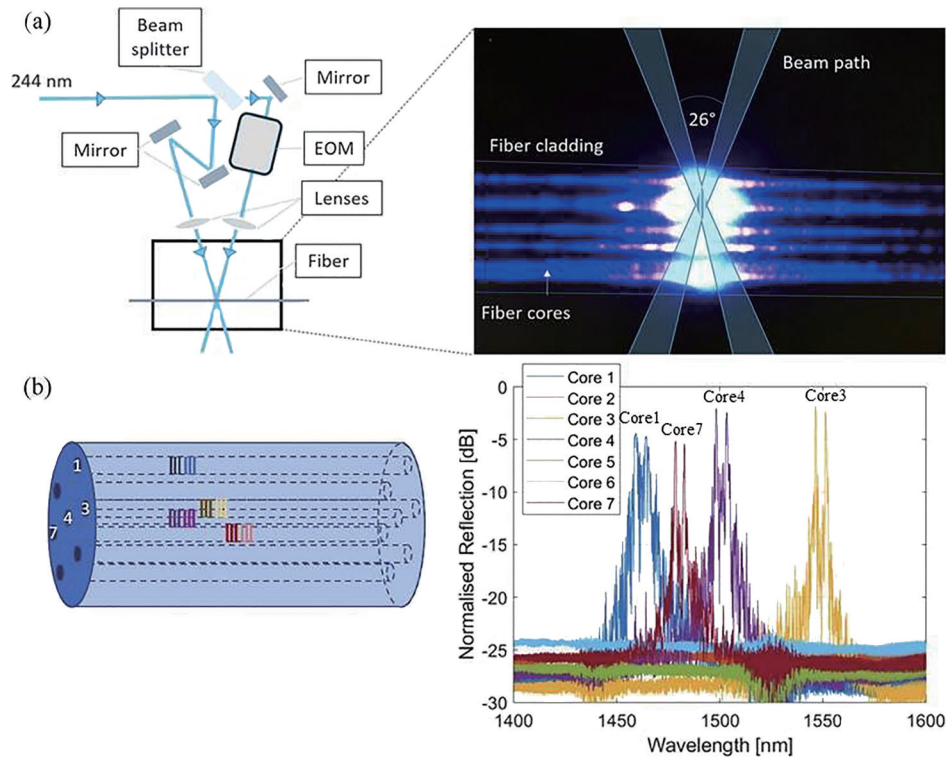


图 5 基于 SSDUW 技术的光栅制作^[18]。(a) SSDUW 技术的装置；(b) FBG 在多芯光纤的位置及各纤芯的反射光谱
Fig. 5 FBGs were fabricated using the SSDUW technique^[18]. (a) SSDUW setup; (b) schematic diagram of grating location in multicore fiber and resulting optical reflection spectrum of each core

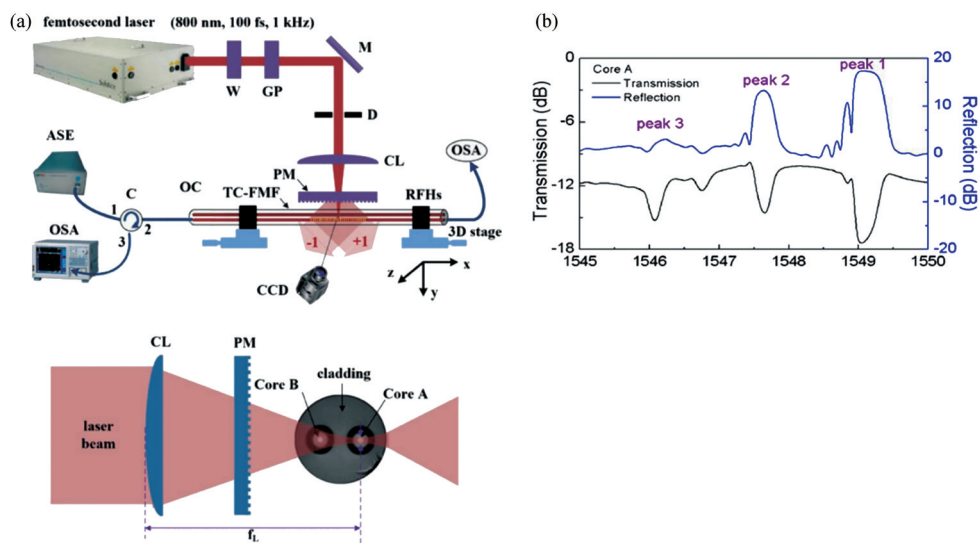


图 6 基于飞秒激光和相位掩模的选择性刻写^[21]。(a) 飞秒激光刻写系统示意图；(b) 纤芯 A 中的光谱
Fig. 6 Selective inscription based on femtosecond laser and phase mask^[21]. (a) Schematic of femtosecond laser writing system; (b) spectrum of core A

反射峰强度相对一致。刻写的光栅具有定向弯曲识别的能力。

2017 年,南安普敦大学的 Donko 等^[22]使用飞秒激光在七芯光纤中的三个独立纤芯中分别刻入了中心波长约为 1549, 1544, 1562 nm 的 FBG, 写入

光栅的消光比介于 3 dB~11.5 dB, 差异较大, 原因是激光的聚焦位置不够准确。2018 年, 他们改进了实验装置, 如图 7(a) 所示, 利用衍射狭缝对波长为 1030 nm 飞秒脉冲光束进行整形, 直接在未去除聚合物涂层的七芯光纤中, 选择四个特定纤芯分别

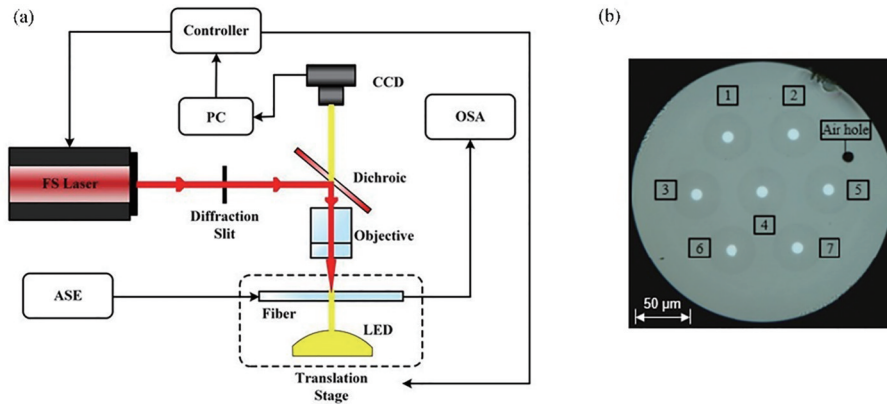


图 7 Donko 课题组的飞秒激光刻写方案^[23]。(a) 飞秒激光光栅刻写装置；(b) 七芯光纤横截面图

Fig. 7 Femtosecond laser inscription scheme of Donko's team^[23]. (a) Femtosecond laser grating writing device; (b) microscope image of 7-core MCF cross section

刻写 FBG, 四个光纤光栅的中心波长分别为 1532, 1538, 1541, 1548 nm。七芯光纤中的六个外芯呈六边形分布, 芯径为 10 μm , 平均芯间距为 50 μm 。飞秒脉冲光束从纤芯 6 附近入射, 刻写的四个 FBG 消光比介于 (10.08 ± 0.40) dB ~ (16.02 ± 0.40) dB, 刻写的四个光栅一致性有所提升, 具体参数如

表 1 所示。结果表明, 该方案能够在不旋转多芯光纤的情况下, 刻写位于七芯光纤最深处的纤芯 2, 但该芯的透射谱带宽比预期宽且透射峰强度较弱。因此, 要想获得带宽窄、反射性强的 FBG, 刻写时需要旋转光纤, 使目标纤芯尽可能地靠近写入光束^[23]。

表 1 四个纤芯中刻写的 FBGs 参数^[23]

Table 1 Characteristics of FBGs inscribed in four fiber cores^[23]

Core number	Period / μm	Bragg wavelength λ_B / nm	-3 dB bandwidth / nm	Extinction ratio / dB	Refractive index modulation $\Delta n / 10^{-3}$
2	1.598 ± 0.001	1541.01 ± 0.02	0.28 ± 0.03	13.97 ± 0.40	2.56 ± 0.06
3	1.605 ± 0.001	1547.82 ± 0.02	0.22 ± 0.03	16.02 ± 0.40	2.92 ± 0.06
4	1.589 ± 0.001	1532.66 ± 0.02	0.16 ± 0.03	10.08 ± 0.40	2.07 ± 0.02
6	1.594 ± 0.001	1537.42 ± 0.02	0.18 ± 0.03	13.40 ± 0.40	2.38 ± 0.17

近年来, 新西伯利亚大学的 Wolf 团队^[24]对飞秒激光选择性刻写多芯光纤光栅进行了多方探索。2018 年, 他们创新性地提出了图 8(a) 所示的光栅刻写结构, 其中多芯光纤被侧面抛光的特殊玻璃套圈固定, 套圈通过三轴线性平移台移动到聚焦区域, 飞秒激光从上方注入, 利用高精度气体轴承平移台移动光纤, 逐点写入 FBG。如图 8(b) 所示, 两个抛光面侧方的 CMOS 相机用于精确校准飞秒激光在光纤横向平面上的刻写位置, 以及实时监控整个刻写过程。

2019 年, Wolf 团队^[25]使用图 8 中的装置在七芯光纤的指定纤芯中刻写了不同类型的光纤光栅, 包括单个谐振波长的均匀 FBG, 周期变化率为 0.4 nm/mm 且反射谱宽度为 12.2 nm 的啁啾光纤光栅, 以及旁瓣抑制比为 10.2 dB 的高反射率高斯变迹 FBG。

与传统的逐点刻写装置相比, 逐面刻写装置的不同之处在于它在入射光路中增加了一个长焦距的柱面透镜, 如图 9(a) 所示。通过调整该柱面透镜, 能够使单个激光脉冲产生一个折射率改变平面, 从而实现在纤芯区域内的逐面刻写^[26]。2019 年, 新西伯利亚大学的 Wolf 团队^[27]将图 8 中的刻写方案进行改进, 将一个焦距为 -1000 mm 的柱面透镜安装在物镜之前, 把飞秒脉冲聚焦在带有聚酰亚胺保护涂层的七芯光纤中, 并且逐面刻写入 FBG 阵列, 如图 9(b) 所示。借助高精度线性平台移动光纤, 在中心芯与三个呈正三角分布的外芯中写入光栅。位于同一平面中的四个 FBG 特性一致, 沿光纤轴向分布的六组 FBG 周期从 1.0353 μm 递增至 1.0939 μm , 轴向相邻的两个 FBG 波长差为 16.7 nm。其中一条纤芯的 FBGs 反射及透射光谱见图 9(c), 可以明显看出, 六个 FBG 反射峰强度非常一致, 且中心波

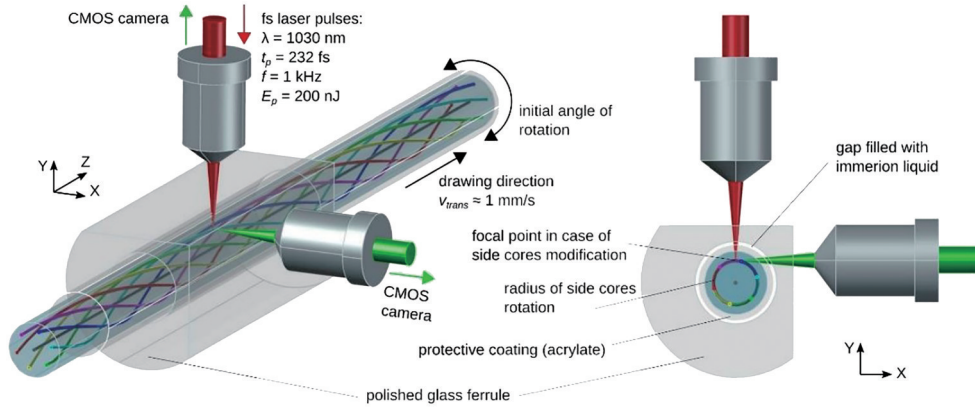


图 8 Wolf 团队提出的逐点光栅刻入结构^[24]

Fig. 8 Point-by-point FBG inscription structure proposed by Wolf's team^[24]

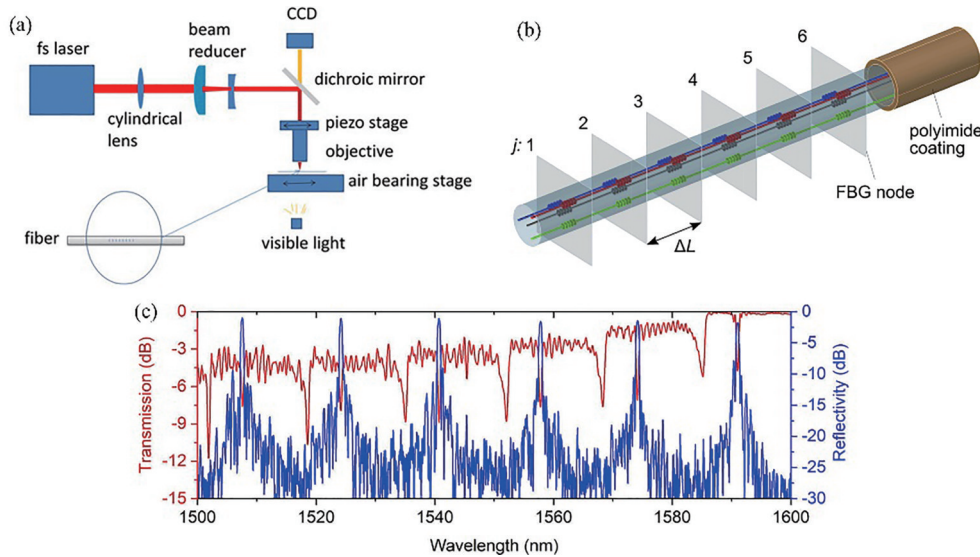


图 9 基于逐面刻写的飞秒激光选择性刻写方案。(a)逐面刻写装置示意图^[26];(b)六组 FBG 阵列在七芯光纤上的分布;(c)其中一条纤芯测量的 FBG 阵列反射、透射光谱^[27]

Fig. 9 Femtosecond laser selective inscription based on plane-by-plane inscription. (a) Schematic of setup for plane-by-plane grating fabrication^[26]; (b) schematic of six FBG arrays inscribed in 7-core optical fiber; (c) spectra of FBG array measured for one of cores of 7-core optical fiber^[27]

长间隔均匀,但是在布拉格波长的短波长侧,出现了较强的重影模式。成因是聚焦平面在刻写时有微弱的倾斜,刻写出倾斜布拉格光栅,因此激发出一组包层模式,即重影模式。实验制作的器件能够进行高精度二维、三维形状传感。

2020年,该团队使用相同的装置在螺旋七芯光纤上刻写光栅阵列。刻写过程中,只需单程移动光纤即可实现六个外芯中的光栅刻写,控制光纤的移动速度与脉冲选择器可配置各个纤芯的光栅周期,光纤移动的速度越快,刻写的光栅周期越小,反之亦然。如图 10(a)所示,若将脉冲选择器关闭一段时间,可跳过无需刻写的芯段。利用该方法实现的

相同谐振波长多芯光栅光谱如图 10(b)所示,光栅的峰值反射率范围在 43%~78% 之间,中心波长介于 1552.05~1552.8 nm,半峰全宽约为 2.2~2.95 nm,旁瓣抑制比 12.8 dB~14.9 dB。此外,他们通过精准旋转光纤,能够在螺旋七芯光纤中纤芯截面上四个纤芯的选择性光栅刻写。该方式刻写的光栅可用于矢量弯曲测量,为三维矢量、形状传感器提供了可能性^[28]。

2.3 两种光源的刻写技术对比

采用紫外光或飞秒激光进行多芯光纤选择性刻写,两种方案都各有优势。基于紫外光的刻写方案,装置简便,刻写时对系统的稳定性要求较

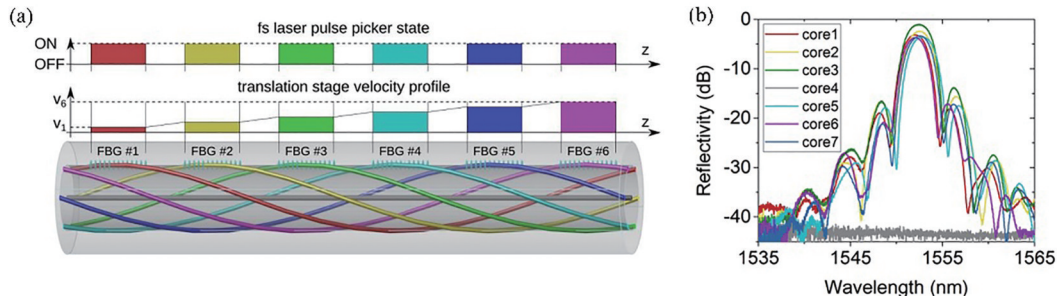


图 10 利用飞秒激光在螺旋七芯光纤上选择性刻写光栅^[28]。(a)脉冲选择器的状态以及纵向刻写 FBG 阵列的速度分布示意图；(b)单程中以固定周期刻写七个纤芯的反射光谱

Fig. 10 FBGs selectively inscribed in seven-core spun fiber by femtosecond laser^[28]. (a) State diagram of femtosecond laser pulse picker and velocity profile of fiber when longitudinal FBG array is inscribed; (b) reflection spectra of seven-core inscribed with a fixed period in a single pass

低,因此刻写光栅的成功率非常高。但是在刻写不同周期、不同类型的光栅时,需要更换相位掩模版,灵活性有所欠缺。另外,在上述的方案中,非目标纤芯偶尔会受到不良曝光的影响。基于飞秒激光的刻写方案,光纤光栅的刻写不再受相位掩模版的约束,通过控制光纤的移动速度即可实现

不同周期、不同类型光栅的刻写,并且刻写的精度很高,能够在复杂的多芯光纤中进行精确的加工。然而,这种方式的刻写难度较大,对电机和传动机的控制精度要求很高。表 2 对基于紫外光、飞秒激光两种光源的选择性刻写技术的一些关键性能给出了对比。

表 2 两种光源的选择性刻写技术性能对比

Table 2 Comparison of the selective inscription performance of two optical sources

Optical source	Ultraviolet	Femtosecond laser
Photosensitivity	High	Low
Accuracy of inscription	Low	High
System complexity	Low	High
Grating period	Limited by phase mask	Determined by the speed of the light source
Flexibility	Low	High
Grating stability	Low	High
Insertion loss	Low	High

3 全芯刻写

在多芯光纤的全部纤芯中刻写光栅能够应用于多参数传感、高功率激光器、天文观测等领域,从刻写方法的角度进行分类,可大致分为传统相位掩模法、改良相位掩模法以及全息干涉法。下面根据不同刻写技术,对近年来的各种多芯光栅全芯刻写方案进行介绍与分析。

3.1 传统相位掩模法

相位掩模法一直以来都是单芯光纤中刻写光栅的主要方法,在多芯光纤日渐兴起的环境下,这种技术也自然被人们运用到多芯光纤光栅的全芯刻写中。

2012年,美国 OFS 实验室的 Westbrook 等^[29]利

用 244 nm 的紫外光结合相位掩模对纤芯直径为 3.6 μm、芯距为 40 μm、纤芯数值孔径为 0.23 的掺铒七芯光纤进行单次曝光,一次性在所有纤芯刻入长度为 8 cm 的 FBG,如图 11 所示。由于光纤的透镜效应,距离入射光束最远的纤芯 2 和纤芯 3 非但

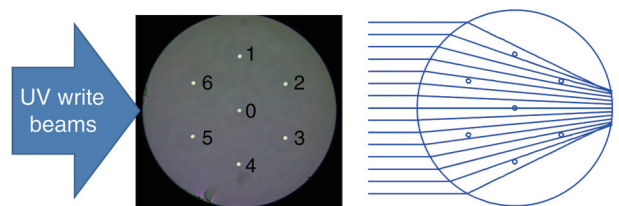


图 11 七芯光纤所有纤芯写入光栅的光线轨迹示意图^[29]
Fig. 11 Schematic of the light trace of a seven-core fiber with full-cores FBG inscription^[29]

不会受到遮挡,并且因光线的聚焦而受到比其他纤芯更强的曝光强度,具有最大的光谱宽度。该光栅用于构成分布式反馈激光器。2016年,哈尔滨工程大学的Kong^[30]分别在对称双芯、正三角分布的三芯光纤中,使用相位掩模法一次性在所有纤芯中写入FBG,并且研究了不同写入方向对光纤光栅特性的影响。多组实验数据都揭示了,对多芯光纤的所有纤芯同时曝光进行刻写时,纤芯离光束入射方向越远,或越靠近光束中心的位置,其受到的紫外光辐射越强,产生的有效折射率调制越大,制作的光栅峰值反射率越大,峰值半峰全宽越宽。

2017年,Westbrook等^[31]使用248 nm的紫外光源结合相位掩模版在具有紫外线透明丙烯酸酯涂层的掺锗螺旋七芯光纤上单次曝光,制作连续均匀多芯光栅阵列,实验装置如图12所示。图中的卷轴系统不断将光纤传输至相位掩模版下方进行曝光,精密的编码器可以控制光纤平移固定的距离,实现数米长的超长连续光栅阵列刻写。实验使用的螺旋七芯光纤旋转周期2 cm,纤芯数值孔径为0.21,芯径为6 μm,芯间距为35 μm,涂层直径为200 μm。与以往的紫外光刻写不同,该实验无需去除光纤涂层,紫外光可以透过丙烯酸酯涂层对纤芯进行刻写,最大化保留了光纤原有的机械强度。随后,该课题组使用同一装置,结合啁啾相位掩模版,制作出了带宽约为25 nm的宽带增强型光栅,该光栅能

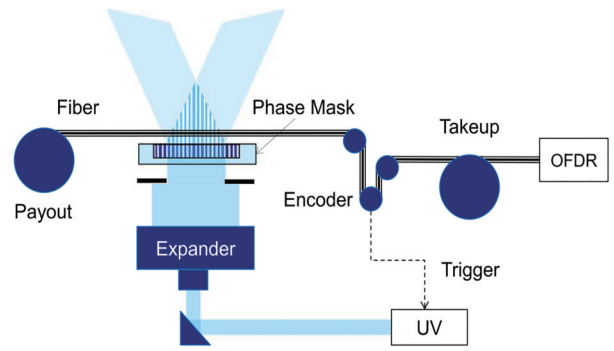


图 12 卷轴阵列刻写设备用于刻写螺旋多芯光纤光栅示意图^[31]

Fig. 12 Schematic of reel-to-reel array inscription apparatus for inscribing gratings in twisted multicore fiber^[31]

够增强光纤中的瑞利散射效应,从而提升分布式温度、应变、声音传感的有效性。

2017年,巴伦西亚理工大学的ITEAM研究中心Javier Madrigal课题组利用图1中的实验装置完成了七芯光纤的全芯刻写。他们对同一平面内的两个外侧芯和中心芯一次性写入光栅,每一个平面的刻写后,旋转多芯光纤,再进行剩余两个平面的刻写,反射谱如图13(b)所示。利用该方法刻写的光栅特性十分相似,反射率在90%~99%之间,18个FBG的反射带宽都在31.25~37.5 GHz之间。该光栅阵列用于制作实时延迟线^[13]。

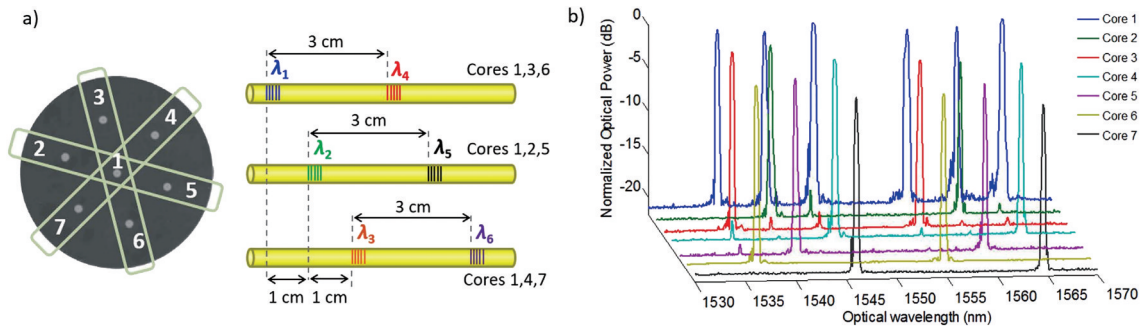


图 13 基于三个纤芯平面的全芯刻写光栅示意图^[13]。(a) FBG在纤芯上的分布;(b)所有光栅的刻写结果
Fig. 13 Schematic diagram of a full-core inscribed grating based on a three-core plane^[13]. (a) FBG distribution on fiber cores; (b) results for gratings inscriptions

再生布拉格光栅(RFBG)是指光纤光栅在高温下发生擦除后重新出现,形成的一种在高温下稳定工作的光纤光栅。2020年,Madrigal等^[32]首次在七芯光纤的所有纤芯中同时刻入再生布拉格光纤光栅。七芯光纤的包层直径为125 μm,纤芯间距为35 μm,使用纤芯跟踪子系统进行辅助对准,由244 nm氩离子激光结合相位掩模版将FBG同时刻

入七个纤芯中,如图14(a)所示。为了形成七芯RFBG,他们通过专门的退火工艺对已刻写的FBG进行热处理:先将FBG以6 °C/min的速度从环境温度加热至1000 °C,并使温度保持恒定至少2.5 h,再将RFBG冷却至室温,最后纤芯#1、#2、#3、#6的RFBG光谱如图14(b)所示。该方法刻写出来的光栅能够在恶劣条件下进行应变、温度、曲率的多参

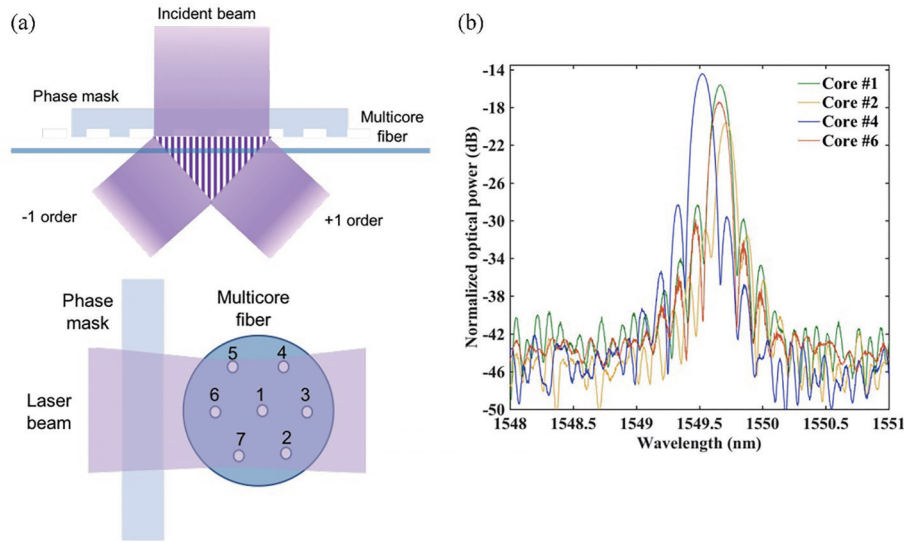


图 14 RFBG 的制作方案^[32]。(a)相位掩模法全芯刻写FBG示意图;(b)四个纤芯中再生光栅反射谱

Fig. 14 RFBG fabrication scheme^[32]. (a) Schematic of full-core inscribed FBG by phase-mask method; (b) RFBG spectra in four cores

数传感。同年, Madrigal 与西南交通大学的 Liu 等^[33]合作, 在强耦合多芯光纤 (SCMCF) 的全部纤芯中刻写两组 FBG, SCMCF 有六个相同尺寸的六边形纤芯, 芯距为 11 μm, 刻写的两个光栅分别在 1543 nm 和 1573 nm 处具有约 30% 的反射率。值得一提的是, 由于本次实验使用的多芯光纤纤芯距离较小, SCMCF 中的所有纤芯几乎都获得了均匀的曝光。

2018 年, 上海交通大学的 Deng 等^[34]提出了一种新颖的旋转写入方法, 在芯径 8 μm、芯距 41.5 μm、包层直径 150 μm 的多芯光纤内写入高质量多芯光纤光栅。实验过程中, 他们每次使用相位掩模法进

行全芯曝光后, 都会同步旋转左右两个旋转器, 使多芯光纤旋转一定角度, 直至光纤旋转达一周为止, 使不同空间位置的纤芯得到多个角度的充分照射。实验设置了六个对照组 (如表 3 所示), 其中 η 代表均匀度, 数值越小越均匀。样品 1、2 分别为无旋转写入 60 s 和 90 s; 样品 3、4、5 分别为每次旋转 60° 刻写 7 s、10 s、30 s; 样品 6 为每次旋转 120° 的刻写结果。从实验结果中可以清楚地看到, 旋转刻写与传统刻写相比, 光栅具有更窄的带宽, 并且旋转的次数越多, 每个光栅的特性越一致。值得注意的是, 虽然增加刻写时间可以获得更高的光栅反射, 但同时也会造成信号带宽的增加以及均匀性的恶化。

表 3 六个样本的光栅特性^[34]

Table 3 Grating characteristics of six samples^[34]

Sample	Number of rotations	Angle of each rotation / (°)	Time for each inscription / s	Average 3 dB bandwidth / nm	Maximum reflection / dB	Average reflection / dB	η
1	0	0	60	0.221	15.694	13.885	0.388
2	0	0	90	0.431	23.087	19.004	1.782
3	6	60	7	0.17	16.907	12.242	0.194
4	6	60	10	0.127	19.159	15.378	0.233
5	6	60	30	0.637	21.07	17.483	0.606
6	3	120	—	0.118	20.843	14.239	0.396

3.2 改良相位掩模法

在天文观测、高功率激光器、弯曲传感等一些特殊的应用场景中, 刻写高均匀性的多芯光栅能够提升器件的整体性能。然而, 由于多芯光纤结构复杂, 拉制过程中的各种不理想因素会引起纤芯折射率变化, 另外写入光栅过程中存在透镜效应、阴影

效应的影响, 这些问题都会导致刻写在不同纤芯中的光栅特性难以保持一致。为了提高多芯光纤光栅的均匀性, 需要对传统的相位掩模法进行改良, 改良主要有两条基本思路: 一种是基于多芯光纤本身进行修改; 另一种是修改用于刻写多芯光纤光栅的入射光场。

3.2.1 修改多芯光纤

早在 2007 年,海军研究实验室的 Askins 等^[35]根据不同空间位置纤芯的曝光差异来调控纤芯的光敏性,并且适当调整纤芯的位置,极大地改善了四芯光纤一次性写入光栅产生的反射光谱不一致问题。由于纤芯 A、B 受到的曝光最弱,所以只掺锗;而对于曝光较强的纤芯 M、C 则锗磷共掺,其中锗的含量分别

占 50% 与 25%。另外,减少纤芯 A、B 间的距离,使它们更加靠近入射光束轴心位置,以增加二者的曝光强度。改良前后的光栅光谱如图 15 所示,四个纤芯中光栅的中心波长大概介于 852.15~853.11 nm。由于修改纤芯特性需要精确计算掺杂量,并且制作工艺十分繁琐,因此后续并未追踪到该技术在多芯光纤光栅全芯刻写中的应用。

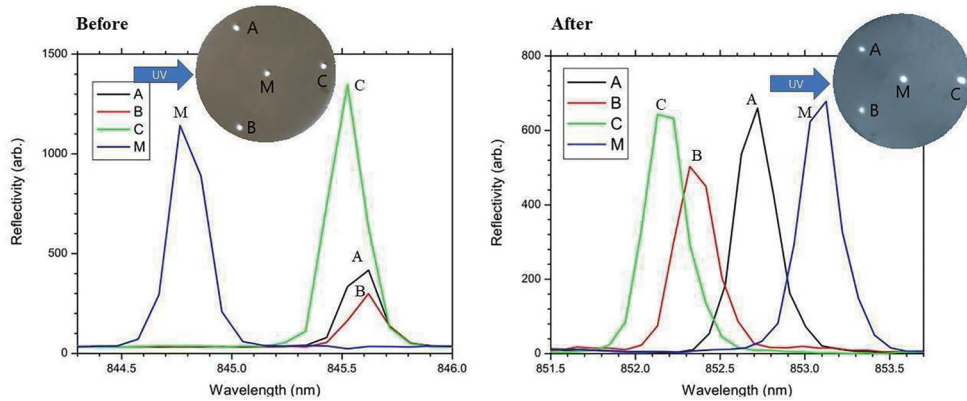


图 15 修改纤芯光敏性与调整位置前后光栅光谱图^[35]

Fig. 15 Before-after comparison of grating spectra with modified core photosensitivity and adjustment of position^[35]

2019 年,哈尔滨工程大学的苑立波课题组^[36]通过修改多芯光纤的纤芯排列方式,提高纤芯曝光均匀性。他们利用 248 nm KrF 准分子激光结合相位掩模在异质双周期线性排列的多芯光纤 (DPAMCF) 上刻写 FBGs, DPAMCF 如图 16(a) 所示,相邻纤芯间距均为 7.5 μm,两种尺寸的纤芯在同一平面内成周期性变化,进而形成两个超模组。通过旋转固定器将纤芯平面旋转至与相位掩模版

平行,以最大程度减小纤芯的照射差异。图 16(b) 为 DPAMCF-FBGs 的透射光谱,可以看出同一尺寸的纤芯具有近乎相同的共振波长,分别约为 1541.34 nm 和 1542.57 nm,由于芯 1、3、5 的尺寸较大,生成超模的有效折射率较高,因此具有更宽、更深的透射峰。采用该光栅对轴向应力、温度进行测量,结果表明不同的纤芯尺寸对传感灵敏度影响很少,说明该结构有望应用于多参数传感。

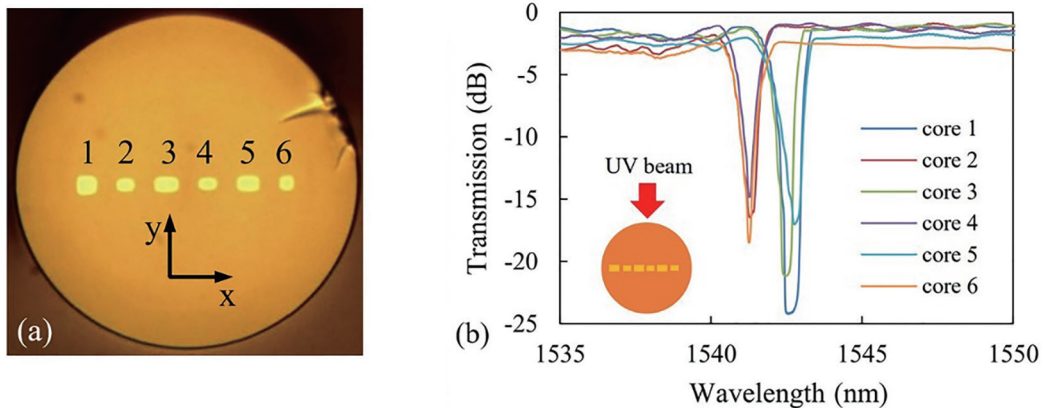


图 16 在 DPAMCF 上全芯刻写 FBG。(a) DPAMCF 的横截面示意图;(b) 纤芯平面与相位掩模版平行时刻写的光栅透射光谱^[36]

Fig. 16 Full-core FBG inscription of DPAMCF. (a) Cross-section of DPAMCF; (b) transmission spectra of DPAMCF-FBGs when plane containing six cores is parallel to phase mask^[36]

3.2.2 修改入射光场

2014 年,悉尼大学的 Lindley 等^[37],通过细微改

造,付出少量成本,就显著改善了光栅写入效果。具体方法为:刻写光栅之前,先将芯径为 5.5 μm、芯距

为 $35\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.174 的七芯光纤放进抛光毛细管中,并将毛细管的抛光面朝向入射光束,以此来解决光纤透镜效应带来的光强聚焦问题,使每个纤芯内的场强更加均匀,如图 17(a)所示。经过 5 次曝光后,所得的七芯光栅结果如图 17(b)所示,七个纤芯透射峰集中于 $-38\ \text{dB}$ 附近,外侧六个纤芯的反射波长以 $(1548.25 \pm 0.01)\ \text{nm}$ 为中心重叠,但中心芯的光

栅向较短波长偏移约 $100\ \text{pm}$,作者推测是因为七芯光纤的中心芯被六个外芯包围,而每个外芯被其他三个纤芯半包围,使中心芯受到的芯间串扰水平不同于其他的六个外芯,从而造成较大的中心波长偏移。不过,该方案要求抛光毛细管要与光纤紧密贴合,因此生产这种毛细管会有一些的技术难度。该技术制作的多芯光纤光栅可应用于制作天文光学仪器。

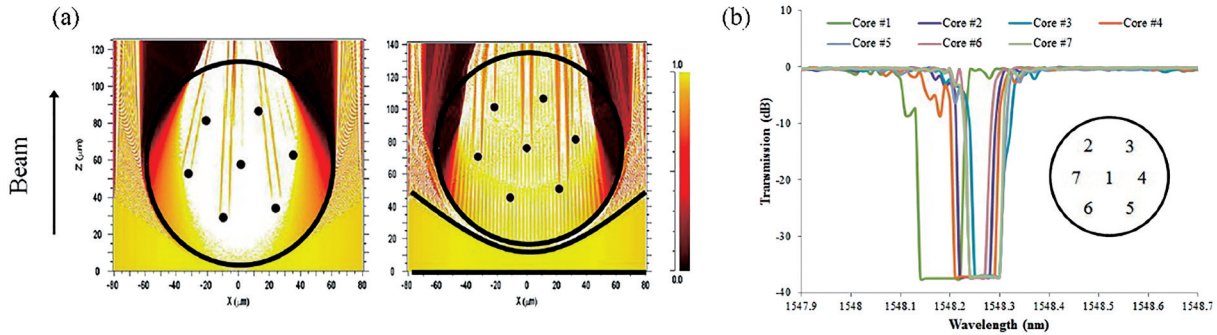


图 17 Emma Lindley 课题组的全芯刻写方案。(a)使用抛光毛细管前后七芯光纤内的紫外光功率分布;(b)使用毛细管后七芯光纤中同时写入光栅的透射光谱^[37]

Fig. 17 Full-core inscription scheme of Emma Lindley's team. (a) Before-after comparison of UV power distribution in a seven-core fiber using polished capillaries; (b) transmission spectra of gratings inscribed in seven-core fiber after using a capillary^[37]

散焦法是指把多芯光纤完全暴露在激光散焦区域内,实现多芯光栅全芯刻写的方法。由于光束在进入光纤曲面之前是发散的,能够一定程度上减轻透镜效应对入射光的聚焦,使纤芯曝光场更均匀。2019年,哈尔滨工程大学苑立波课题组利用散焦相位掩模法在三角形分布的四芯光纤(TFCF)上刻制了 10 组光纤光栅,光栅的中心波长范围在 $1528\sim 1566\ \text{nm}$ 之间,相邻波长间隔为 $4\ \text{nm}$ 。TFCF 的包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,芯径为 $8.4\ \mu\text{m}$,芯间距为 $35\ \mu\text{m}$ 。为了使四个纤芯的

FBG 特性一致,他们调整了纤芯距离以及焦点位置。退火处理 48 h 后,得到四个纤芯中的光栅反射谱如图 18(b)所示,可见所有光栅的中心波长位置几乎重合,反射率则有不同。为了验证这个刻写系统的可行性,他们重复以上操作,共制作了六个完全相同的 TFCF 光栅阵列样品,结果每组光纤光栅的芯间布拉格波长误差均小于 $0.783\ \text{nm}$,所有样品的波长方差小于 $0.125\ \text{nm}^2$,芯间反射率误差均小于 45.84% ,所有光栅样品的反射率方差小于 83.64% ^[38]。

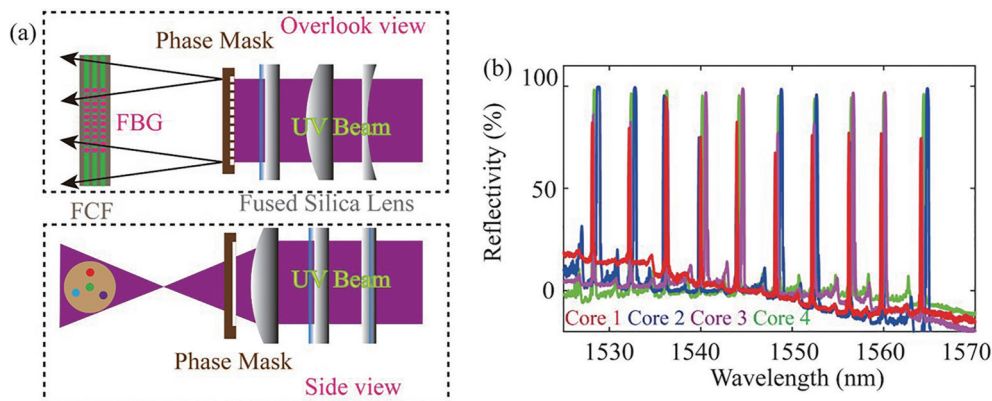


图 18 基于散焦相位掩模技术的全芯刻写^[38]。(a)TFCF 光栅刻写系统示意图;(b)四个纤芯的透射光谱
Fig. 18 Full-core inscription based on defocusing phase mask technology^[38]. (a) Schematic experimental setup of TFCF FBGs inscription system; (b) transmission spectra of four cores

2020年, Aston大学的 Wang 等利用散焦法, 分别对菱形、正方形纤芯排列的 $50\ \mu\text{m}$ 芯距四芯光纤一次性写入 FBG, 结果如图 19 所示。可以看到两

种纤芯排列下, 四个纤芯中心波长都在 $1552\ \text{nm}$ 附近波动, 反射率较为一致^[17]。

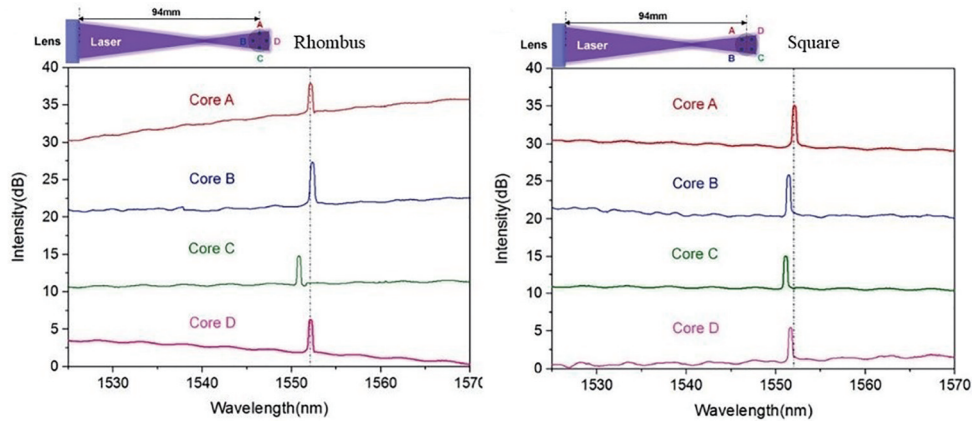


图 19 刻写的菱形与正方形排布的四芯光纤光谱图^[17]

Fig. 19 Spectra of four-core fiber with core position presents rhombus and square distribution^[17]

3.3 全息干涉法

全息干涉法是指利用双光束干涉所产生的干涉条纹对光纤进行刻写的方法, 它最大的特点是通过转动干涉仪的反射镜改变干涉图样的周期, 从而改变刻写光栅的周期。因此, 该方法与传统的相位掩模法相比更具灵活性, 并且在写入光源足够强的情况下, 只需曝光一次就能实现所有纤芯的光栅刻写, 装置简单有效。近年来, 基于塔尔博特干涉仪的全息干涉法被广泛应用在多芯光纤的全芯刻写中。

2014年, 波兰的 Stepień 等^[39]使用标准的塔尔博特干涉仪, 仅刻写一次就在七芯光纤的所有纤芯中写入了均匀的光纤光栅。实验使用的七芯光纤的芯径为 $7\ \mu\text{m}$, 每个纤芯都被 12 个空气小孔包围着, 如图 20 所示。干涉装置的反射镜旋转 -0.084° , 以产生布拉格波长为 $1550\ \text{nm}$ 的光栅。七个纤芯的光栅刻写结果如表 4 所示, 可以看出所

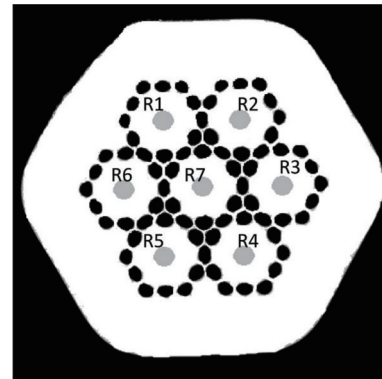


图 20 空气孔围裹的七芯光纤端面结构示意图^[39]

Fig. 20 Schematic diagram of cross-section of a seven-core fiber surrounded by air holes^[39]

有纤芯的布拉格波长都展现出良好的均匀性, 并且十分接近期望值 $1550\ \text{nm}$, 纤芯温度灵敏度的最大差异为 $2\ \text{pm/K}$, 这是由热惯性和热电偶测量温度不够精确所引起的。

表 4 根据 MCF 所有七个纤芯(其中 R1~R6 是外部纤芯, R7 是中心纤芯)的仿真和实验得出的有效折射率 (n_{eff})、布拉格波长 (λ_{B}) 及其应变和温度灵敏度^[39]

Table 4 Effective refractive index (n_{eff}), Bragg wavelength (λ_{B}), and its strain and temperature sensitivities according to numerical simulations and experiments in all of the 7 cores (where R1-R6 are the external cores and R7 is the central core) of the MCF^[39]

Item	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
n_{eff} (simulation)	1.4447	1.4447	1.4448	1.4449	1.4448	1.4446	1.4447
λ_{B} (experiment) /nm	1549.31	1549.49	1549.55	1549.78	1549.67	1549.23	1549.52
n_{eff} (experiment)	1.4426	1.4428	1.4428	1.4430	1.4429	1.4425	1.4428
Strain sensitivity /($\text{pm}/\mu\epsilon$)	1.03	1.04	1.06	1.07	1.05	1.06	1.06
Temperature sensitivity /($\text{pm}/\mu\epsilon$)	10.05	9.85	11.14	11.90	10.05	10.15	11.02

2016年,比利时的 van Hoe 等^[40]将光纤的拉丝工艺与干涉刻写法相结合,对四芯光纤单次曝光,将光栅刻入全部纤芯中,该技术制作的光栅称为拉丝塔光栅(DTG)。四芯光纤由一个中心芯和三个正三角分布的外芯构成,芯距为 $38\ \mu\text{m}$,图 21(a)是刻写装置。实验共刻写了 11 个不同波长的多芯 DTG,光栅结果如图 21(b)所示,可以看出,除了纤芯 3 的 DTG 中心波长向长波长侧偏移外,其他纤芯的 DTG 特性基本一致。

2018年,深圳大学王义平课题组^[41]使用经过改进的塔尔博特干涉仪结合透镜垂直扫描法,无需多

次曝光就在七芯光纤中的所有纤芯中同时写入光栅,实验装置如图 22(a)所示。他们在光束交汇前加装一个柱面透镜,用以提高光功率密度,并且将光束以 $0.002\ \text{mm/s}$ 的速度沿光纤径向进行扫描,确保每个纤芯得到充分的照射。实验使用的七芯光纤芯径为 $8\ \mu\text{m}$,芯间距为 $42\ \mu\text{m}$ 。扫描后的光谱图如图 22(b)所示,由于光纤的透镜效应,各纤芯的布拉格波长会在 $1549.41\sim 1550.65\ \text{nm}$ 之间波动,最大波长差 $1.24\ \text{nm}$,透射峰深度在 $-4.77\ \text{dB}\sim -9.58\ \text{dB}$ 之间。刻写得出的多芯光栅能够对弯曲曲率与方向进行有效识别。

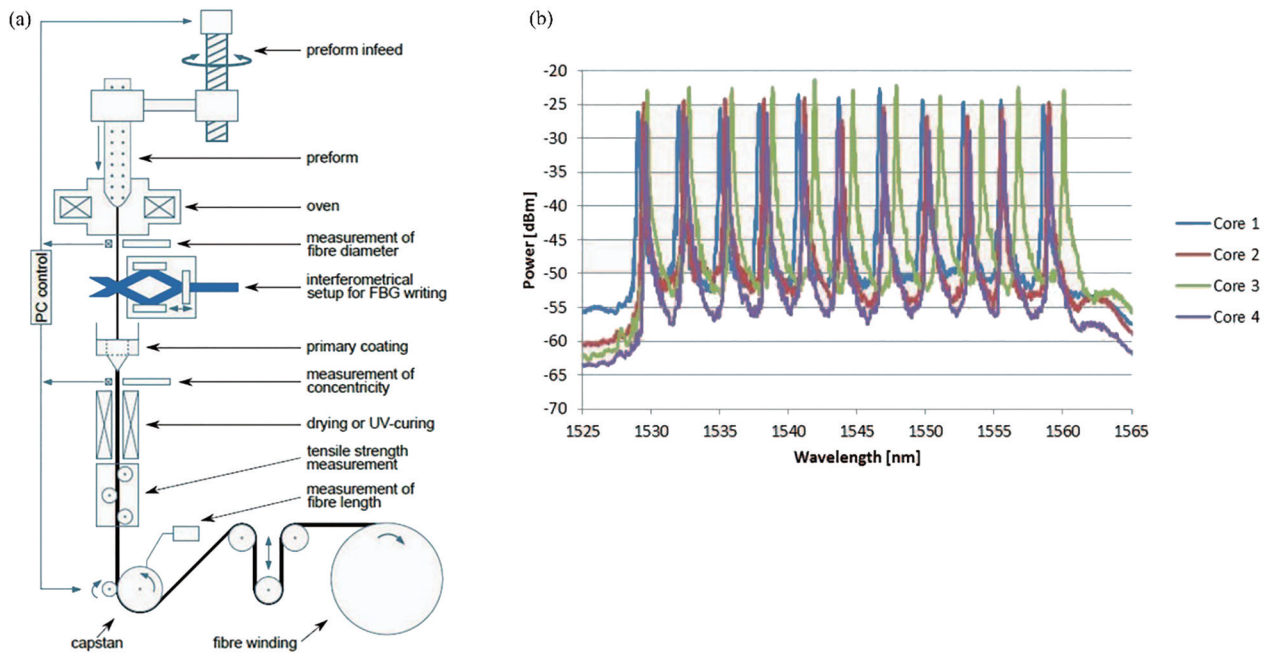


图 21 DTG 的全芯刻写方案。(a)DTG 制作装置示意图;(b)四个纤芯的 DTG 阵列反射光谱^[40]
Fig. 21 DTG's full-core inscription scheme. (a) Schematic diagram of DTG fabrication setup; (b) reflection spectrum of DTG array in four cores^[40]

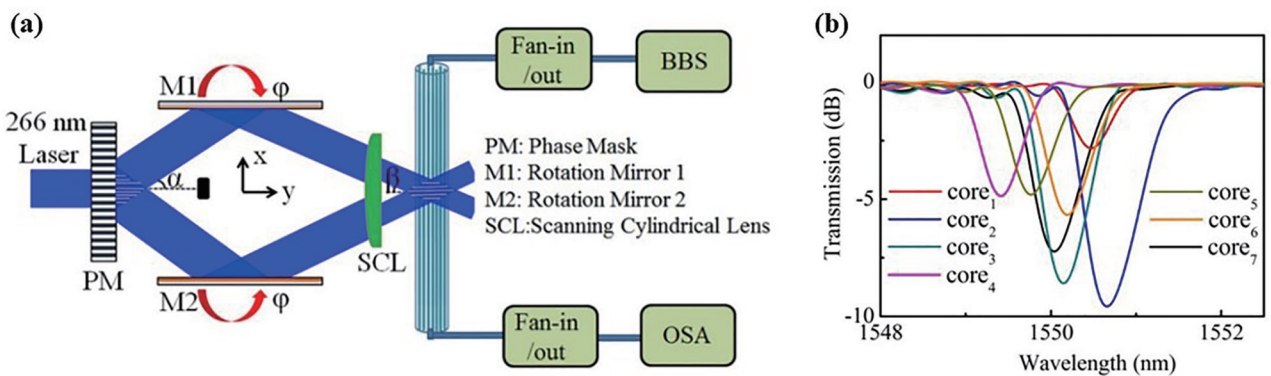


图 22 利用改进的塔尔博特干涉仪全芯刻写^[41]。(a)改进的塔尔博特干涉仪;(b)七芯光纤中的光栅透射光谱
Fig. 22 Seven-core FBGs full-core inscription using a modified Talbot interferometer^[41]. (a) Modified Talbot interferometer; (b) transmission spectra of the FBGs inscribed in a seven-core fiber

2020年, Egorova等^[42]使用塔尔博特干涉仪结合相位掩模版在七芯光纤的纵向位置上写入12组长度为10 mm的啁啾布拉格光栅(CFBG)。他们每刻写完一组MCF-CFBGs后都会将反射镜旋转一定角度,使下一组CFBGs具有不同的中心波长。刻写后的光栅平均光谱宽度3.3 nm,其中第六组CFBGs中七个纤芯的光栅中心波长大约在1550~1553.3 nm的范围内。

3.4 其他刻写方案

目前,绝大多数全芯刻写方案都是基于紫外光源开展的,另外也有一些使用其他光源的刻写方案,可供读者参考。

CO₂激光写入法具有成本低、制作灵活、无需氢载操作、光栅稳定性好等优点,因此成为长周期光纤光栅(LPFG)的常用制备方法。2017年,武汉光电国家实验室的Shen等^[43]开发了一种CO₂激光加热与扭转结合的光栅刻写技术,一次性在六边

形分布的19个纤芯中刻写螺旋长周期光纤光栅(HLPG)。本次实验使用的多芯光纤芯径为2.34 μm,芯间距为4.78 μm,纤芯区域与包层的直径分别为21.5 μm和125 μm。图23(a)是HLPG的制作示意图,刻写过程中,扫描电机以0.3 mm/s的速度移动光纤,使CO₂激光沿轴向加热,并且使右转子步进电机固定、左转子步进电机以120(°)/s旋转扭转多芯光纤。他们用该方法制作了四个HLPG样本,第四个HLPG光谱图如图23(b)所示,其中Dip A、D是纤芯基模与包层高阶模耦合的透射峰;一对高阶模耦合对应两个波长,如Dip E和F、B和C是包层高阶模互耦峰中分裂出来的子峰,主耦合峰在1550 nm左右,消光比达到20 dB。插图展示了其余三个不同周期的HLPG样本主耦合峰位置。该结构可用作折射率传感器和扭转传感器,且传感结果不易受温度或弯曲因素的干扰。

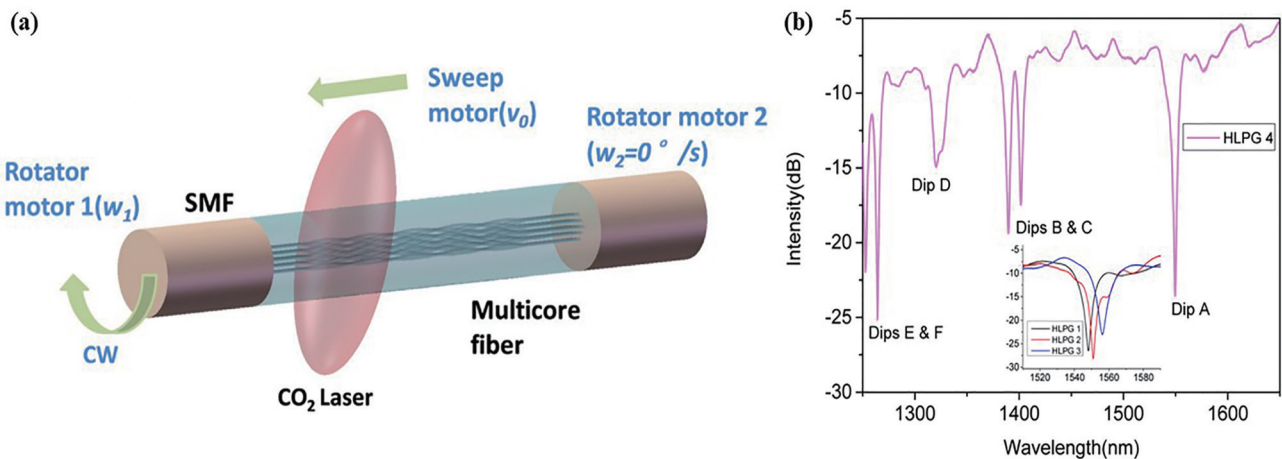


图 23 基于 CO₂ 激光的全芯刻写方案^[43]。(a) HLPG 刻写示意图; (b) 第四个 HLPG 样本的光谱以及其余三个不同周期的 HLPG 样本主耦合峰

Fig. 23 Full-core inscription based on CO₂ laser^[43]. (a) Schematic diagram of HLPG inscription; (b) spectrum of the fourth HLPG sample and spectrum of the main couplings of the other HLPGs with various pitches

电弧放电法因其成本低,制作过程简便,且适用于各种类型的光纤而逐渐受到更多的关注,该技术也被证实可用于多芯光纤光栅的刻写。2017年,华中科技大学唐明课题组^[44]将光纤熔接机应用在电弧放电法中,在异质型七芯光纤中写入LPFG,光栅制作平台如图24(a)所示。实验使用的七芯光纤包层直径为125 μm,芯距为42 μm。通过自主开发的计算机软件可设置光纤熔接机加工参数,以及实时监控电弧放电过程和光纤状态。MCF不同纤芯中写入LPFG后的光谱,如图24(b)~(i)所示,其中

图24(b)是中心芯透射光谱,图24(c)~(h)是六个外芯的透射光谱,图24(i)是将光注入到中心芯后,一根外侧芯中测得的串扰。可以看出,不同纤芯的LPFG无论是透射强度还是主共振峰波长位置都存在较大的差异。作者指出LPFG特性不一致主要以下原因:1)采用了异质多芯光纤(中心芯与外芯折射率不同);2)MCF的制作使用了堆叠和拉伸技术,芯间折射率会存在差异;3)放电过程中MCF的不同位置会受到不同影响。制作出来的LPFG阵列可实现温度、应变的联合传感。

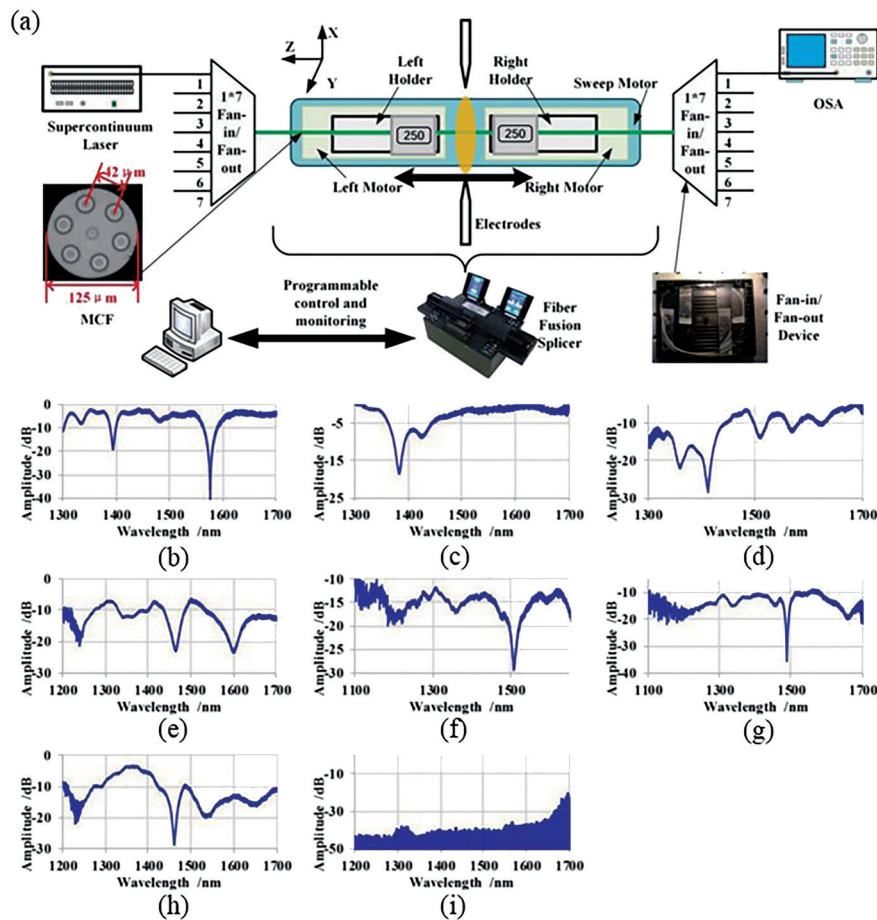


图 24 基于电弧放电法的全芯刻写方案^[44]。(a)基于光纤熔接机的可编程电弧放电法 LPFG 制作与监控平台示意图；(b)~(h)七个纤芯的 LPFG 透射光谱；(i)外芯中测得的串扰

Fig. 24 Full-core inscription based on the electrodes arc discharges method^[44]. (a) Schematic of LPFG fabrication and monitoring platform for programmable electrodes arc discharges method based on a fiber optic fusion splicer; (b)–(h) transmission spectra of LPFGs in seven cores; (i) crosstalk measured in outer cores

4 结束语

对于多芯光纤选择性刻写,采用紫外光或飞秒激光的刻写方案都各有优势。基于紫外光的刻写方案,刻写时对系统的稳定性要求不高,因此刻写光栅的成功率非常高。但是在刻写不同周期、不同类型的光栅时,需要更换相位掩模版,灵活性有所欠缺。另外,在上述的方案中,非目标纤芯偶尔会受到不良曝光的影响。基于飞秒激光的刻写方案,光纤光栅的刻写不再受相位掩模版的约束,通过控制光纤的移动速度即可实现不同周期、不同类型光栅的刻写,并且刻写的精度很高,能够在复杂结构的多芯光纤中进行精确的光栅加工。然而,这种方式的刻写控制难度较大,对电机和传动机的控制精度要求很高。

而对于多芯光纤全芯刻写,技术应用最为成熟的是基于紫外光的相位掩模法,而为了进一步提升其刻写的芯间均匀性,出现了一系列的衍生方案作为补充。另外,全息干涉法在写入光源足够强的情况下,只需曝光一次就能实现所有纤芯的光栅刻写,并且只需简单调整装置反射镜,就能达到刻写不同周期光栅的目的,因其制作简单有效、灵活性高,逐渐成为多芯光纤全芯刻写的重要方案。除此之外的其他刻写方案,因各个方案本身特有的优势,如:CO₂激光刻写法的耐高温性和灵活性、电弧放电法的制作成本低等,都将会作为多芯光纤全芯刻写方案的重要补充,为研究人员提供更多的选择。

在未来的研究工作中,基于飞秒激光的新型光栅刻写技术,虽然系统整体成本较高,但由于具有高灵活性与精准度,刻写的光栅特性较为稳定,将

会主要用于制作性能要求较高的多芯光纤光栅,而其制作工艺仍需进一步摸索。基于紫外光的传统刻写技术,因其制作工艺较为成熟,同时也有一些新的方案提升了其制作光栅的便利性、高效性与灵活性,因此仍将继续在多芯光纤刻写光栅中得到持续的应用与关注。相信随着刻写设备、刻写工艺、新型材料的发展,多芯光纤光栅的制作方案会不断完善,并且基于多芯光纤光栅的新型光学器件性能将会进一步提升,广泛应用于不同领域中。

参 考 文 献

- [1] Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [2] Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.
涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
- [3] Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170612.
苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170612.
- [4] Yan D, Chen N G, Tian Z, et al. Temperature sensor based on multicore fiber supermode interference[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0706007.
闫栋, 陈南光, 田振, 等. 基于多芯光纤超模干涉的温度传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0706007.
- [5] Gu J F, Lu B, Yang J Q, et al. Distributed acoustic sensing based on multi-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0706003.
顾金凤, 卢斌, 杨竣淇, 等. 多芯光纤分布式声传感[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0706003.
- [6] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [7] Shi C Y, Luo X B, Qi P, et al. Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: a survey[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2017, 64(8): 1665-1678.
- [8] Alon Y, Halstuch A, Sidharthan R, et al. Femtosecond Bragg grating inscription in an Yb-doped large-mode-area multicore fiber for high-power laser applications[J]. Optics Letters, 2020, 45(16): 4563-4566.
- [9] Min S S, Trinh C, Leon-Saval S, et al. Multicore fiber Bragg grating developments for OH suppression[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8450: 84503L.
- [10] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fiber[J]. Electronics Letters, 2000, 36(2): 120-121.
- [11] Flockhart G M H, MacPherson W N, Barton J S, et al. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber[J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 387-389.
- [12] Komukai T, Nakazawa M. Fabrication of high-quality long-fiber Bragg grating by monitoring 3.1-eV radiation (400 nm) from GeO defects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(11): 1495-1497.
- [13] Gasulla I, Barrera D, Hervás J, et al. Spatial division multiplexed microwave signal processing by selective grating inscription in homogeneous multicore fibers[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41727.
- [14] Barrera D, Madrigal J, Sales S. Tilted fiber Bragg gratings in multicore optical fibers for optical sensing[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1460-1463.
- [15] Madrigal J, Barrera D, Sales S. Refractive index and temperature sensing using inter-core crosstalk in multicore fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4703-4709.
- [16] Wang C L, Yan Z J, Sun Q Z, et al. Fibre Bragg gratings fabrication in four core fibers[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9886: 98860H.
- [17] Bao W J, Sahoo N, Sun Z Y, et al. Selective fiber Bragg grating inscription in four-core fiber for two-dimension vector bending sensing[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26461-26469.
- [18] Jantzen S L, Bannerman R H S, Jantzen A, et al. Individual inscription of spectrally multiplexed Bragg gratings in optical multicore fibers using small spot direct UV writing[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 21300-21309.
- [19] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [20] Glezer E N, Milosavljevic M, Huang L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. Optics Letters, 1996, 21(24): 2023-2025.
- [21] Yang K M, He J, Liao C R, et al. Femtosecond laser inscription of fiber Bragg grating in twin-core few-mode fiber for directional bend sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(21): 4563-4566.

- 4670-4676.
- [22] Donko A, Jung Y, Wang Y, et al. Multicore optical fiber components fabricated using a femtosecond laser direct writing[C]//Frontiers in Optics 2017, September 18-21, 2017, Washington, D.C., USA. Washington, D.C.: OSA, 2017: FW6A.3.
- [23] Donko A, Beresna M, Jung Y, et al. Point-by-point femtosecond laser micro-processing of independent core-specific fiber Bragg gratings in a multi-core fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2039-2044.
- [24] Wolf A A, Dostovalov A V, Wabnitz S, et al. Femtosecond writing of refractive index structures in multimode and multicore optical fibers[J]. *Quantum Electronics*, 2018, 48(12): 1128-1131.
- [25] Wolf A A, Dostovalov A V, Bronnikov K A, et al. Direct core-selective inscription of Bragg grating structures in seven-core optical fibers by femtosecond laser pulses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11029: 110290E.
- [26] Lu P, Mihailov S J, Ding H M, et al. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 926-931.
- [27] Bronnikov K, Wolf A, Yakushin S, et al. Durable shape sensor based on FBG array inscribed in polyimide-coated multicore optical fiber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38421-38434.
- [28] Wolf A, Dostovalov A, Bronnikov K, et al. Arrays of fiber Bragg gratings selectively inscribed in different cores of 7-core spun optical fiber by IR femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13978-13990.
- [29] Westbrook P S, Abedin K S, Taunay T F, et al. Multicore fiber distributed feedback lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4014-4016.
- [30] Kong J. Specialty optical fiber Bragg grating bending sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [31] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Continuous multicore optical fiber grating arrays for distributed sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(6): 1248-1252.
- [32] Madrigal J, Barrera D, Sales S. Regenerated fiber Bragg gratings in multicore fiber for multi-parameter sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(4): 1-6.
- [33] Liu Z M, Zheng D, Madrigal J, et al. Strongly coupled multicore fiber with FBGs for multipoint and multiparameter sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 58: 102315.
- [34] Deng S G, Ma X, Li X W, et al. The novel rotation writing method of fiber Bragg grating in multicore fiber[C]//2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), July 2-6, 2018, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [35] Askins C G, Taunay T F, Miller G A, et al. Inscription of fiber Bragg gratings in multicore fiber [C]//Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, September 2-6, 2007, Québec City, Canada. Washington, D.C.: OSA, 2007: JWA39.
- [36] Li P, Tian P X, Guan C Y, et al. Heterogeneous double period array multicore fiber and its application in Bragg grating sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(15): 6193-6196.
- [37] Lindley E, Min S S, Leon-Saval S, et al. Demonstration of uniform multicore fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31575-31581.
- [38] Liu Y, Zhou A, Xia Q, et al. Quasi-distributed directional bending sensor based on fiber Bragg gratings array in triangle-four core fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22): 10728-10735.
- [39] Stępień K, Slowikowski M, Tenderenda T, et al. Fiber Bragg gratings in hole-assisted multicore fiber for space division multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3571-3574.
- [40] van Hoe B, Van Roosbroeck J, Voigtländer C, et al. Distributed strain and curvature measurements based on tailored draw tower gratings[C]//2016 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP), October 31-3 November 2016, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 285-286.
- [41] Hou M X, Yang K M, He J, et al. Two-dimensional vector bending sensor based on seven-core fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23770-23781.
- [42] Egorova D A, Kulikov A V, Nikitenko A N, et al. Investigation of bending effects in chirped FBGs array in multicore fiber[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(2): 1-9.
- [43] Shen X, Hu X W, Yang L Y, et al. Helical long-period grating manufactured with a CO₂ laser on multicore fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10405-10412.
- [44] Wang R X, Tang M, Fu S N, et al. Spatially arrayed long period gratings in multicore fiber by programmable electrical arc discharge[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-10.