

基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展

李宏业¹, 饶斌裕¹, 赵晓帆¹, 胡琪浩¹, 王蒙^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3*}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 光纤光栅具有抗电磁干扰、耐腐蚀、可塑性强、体积小、质量轻、与光纤系统天然兼容等特点, 已被广泛应用于光纤传感、光纤通信、光纤激光器等领域, 并发挥了重要作用。目前, 常见的光纤光栅制作方法主要有紫外曝光法、CO₂激光刻写和飞秒激光刻写。飞秒激光刻写技术的出现大大简化了光纤光栅制作流程, 由于其成栅机理不同于常见的紫外曝光法, 无需对光纤进行载氢处理, 非常有利于在超大芯径光纤上制备高性能光栅。根据是否使用相位模板, 基于飞秒的光栅制备总体分为直写和相位模板辅助刻写两种方式。本文从刻写方式的角度对国内外基于飞秒激光的光纤光栅研制情况进行了全面综述, 详细总结分析了各种刻写方式的特点与光栅的应用场合, 指出其在分布式光纤传感、光纤通信波分复用、多波长激光器、大功率光纤激光器等具有潜在的重要应用价值和广泛应用前景。

关键词 激光器; 光纤光栅; 光纤传感器; 光纤激光器; 光纤通信; 飞秒激光

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111420

Development of Fiber Gratings Inscribed by Femtosecond Laser

Li Hongye¹, Rao Binyu¹, Zhao Xiaofan¹, Hu Qihao¹, Wang Meng^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China;

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Fiber gratings have the characteristics of anti-electromagnetic interference, good causticity resistance, strong plasticity, small size, light in mass, and natural compatibility with optical fiber systems. They have obtained wide applications in the fields of fiber sensing, fiber communications, fiber lasers, and so on. At present, the common fiber grating manufacturing methods include ultraviolet exposure, CO₂ laser inscribing and femtosecond laser inscribing. The advent of femtosecond lasers has greatly simplified the manufacturing process of fiber gratings. As its inscribing mechanism is different from the common ultraviolet exposure method, it does not need to carry hydrogen treatment on the fiber, which is very useful for fabricating high-performance gratings on ultra-large core fibers. According to whether a phase template is used, the fiber grating fabrication using femtosecond laser is generally divided into two ways: direct inscribing and phase mask method. This paper reviews the development of fiber gratings using femtosecond lasers at home and abroad from the perspective of inscribing methods. By summarizing and analyzing the characteristics of various femtosecond inscribing methods and the application of the fabricated gratings, we point that they potentially have important and broad applications in distributed fiber sensing, wavelength division multiplexing of fiber communication, multi-wavelength lasers, high-power fiber lasers, etc.

Key words lasers; fiber Bragg gratings; fiber optics sensors; fiber laser; fiber optics communications; femtosecond lasers

OCIS codes 140.3510; 060.3735; 060.2370; 060.3510; 060.2330; 320.7090

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-03-15; 录用日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974427)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金(2019JJ20023)

* E-mail: zefengwang_nudt@163.com

1 引言

1978年 Hill 等^[1]利用驻波法研制出第一根光纤光栅后,其制作工艺得到了快速发展。由于光纤光栅具有抗电磁干扰、抗腐蚀、体积小、质量轻、可塑性好、与光纤系统天然兼容等特点,在光纤传感器^[2]、光纤激光器^[3]、光通信系统^[4]等领域得到了广泛的应用。总的来说,按照光栅周期长度可分为光纤布拉格光栅(FBG)^[5]和长周期光纤光栅(LPG)^[6],其中 FBG 能够实现正向传输的模式与反向传输的模式耦合,即可以实现入射光的反射,通常用作高效率反射器;而 LPG 可以实现同向传输模式之间的耦合,在实际应用中通常利用其透射谱,如用作滤波器。

目前制作光栅的方法主要包括:紫外曝光法、CO₂激光刻写和飞秒激光刻写^[7]等。其中,紫外曝光法最为成熟,制备的光栅应用最为广泛。紫外曝光法可以实现 FBG 与 LPG 的刻写,但需要相位掩模板或者振幅掩模板的辅助,这在很大程度上影响了光栅刻写的灵活性,光栅的谐振波长由模板周期决定,此外光纤必须有光敏性,通常需要对光纤进行载氢处理,这也增加了光栅的刻写流程和难度,尤其是大芯径光纤光栅的刻写。利用紫外曝光法刻写的 FBG 稳定性较高,常被用于线性腔光纤激光器的反射镜^[3]、波分复用器件^[8]等。CO₂激光器主要用于刻写 LPG。早在 1998 年, Davis 等^[9]就利用波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光在普通单模光纤上刻写了 LPG,由于 LPG 可实现纤芯模向包层模的转化,其对弯曲、温度等外界物理量十分敏感,可用于光纤传感系统中^[10]。近年来,由于模分复用技术的发展,在少模光纤上刻写长周期光栅以实现基模向高阶纤芯模的转化得到了广泛关注^[11]。

飞秒激光的出现为光纤光栅的制备提供了一条新途径。由于飞秒脉冲激光具有非常高的峰值功率以及非常短的脉宽,它在与透明介质相互作用时会产生非线性效应(非线性场电离和雪崩电离),从而实现材料的折射率永久性改变。飞秒脉冲激光被广泛用于微纳光学器件^[12]、THz 波段器件^[13]、波导的制作^[14],利用飞秒脉冲激光同样能够实现高质量光纤光栅的刻写。由于刻写机理的不同,飞秒激光刻写比紫外曝光法具有更高的灵活性,光纤不需要具有光敏性,因此无需对光纤进行载氢处理,光纤涂敷层也无需去除,且光栅也具有一些独特的性质,如耐高温等。总体而言,基于飞秒激光的光纤光栅制备方法分为两种实现途径:1)利用飞秒激光直接刻写;

2)通过相位模板的辅助实现光栅刻写。这两种刻写方式所制作的光纤光栅具有不同的性质,应用场景也有所区别。

本文从光栅刻写方式的角度出发,对国内外基于飞秒激光的光纤光栅研制情况进行了全面综述,详细总结分析了各种刻写方式的特点与光栅的应用场合,指出其在分布式光纤传感、光纤通信波分复用、多波长激光器、大功率光纤激光器等方面具有潜在的重要应用价值和广泛应用前景。

2 飞秒激光直写

2.1 逐点刻写

早在 1999 年, Kondo 等^[15]首次提出了飞秒激光逐点刻写(PBP)技术,他们通过波长为 800 nm、重复频率为 200 kHz、脉宽为 120 fs 的飞秒激光在单模光纤上刻写了 LPG,这一工作,开启了光纤光栅刻写的新纪元,光纤光栅的刻写不再受到相位模板的限制,不同谐振波长的光栅只需要调整平移台的位移速度即可实现。2004 年, Aston 大学的 Martinez 等^[16]实现了飞秒激光逐点刻写 FBG,他们利用波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz、脉宽为 150 fs 的红外飞秒激光在非增敏的普通单模光纤上分别刻写了在 C 波段实现一阶、二阶、三阶谐振的 FBG。目前,国内外有许多课题组在逐点刻写光纤光栅上进行了非常深入的探索,由于刻写的灵活性,改变刻写的条件能够方便的调控模式耦合。2008 年,悉尼大学的 Mattias 与澳大利亚 Macquarie 大学的 Withford 课题组合作,从实验上揭示了利用逐点刻写的 type II 型光栅的损耗机理,光栅谐振峰短波处的损耗是由于米氏散射,抑制这一损耗可以通过改变光栅调制区域与纤芯的交叠程度来实现^[17]。2010 年,耶拿大学的 Thomas 和澳大利亚 Macquarie 大学的 Withford 课题组合作,从理论和实验上研究了逐点刻写的 type II 型光栅的纤芯模与包层模耦合特性,理论研究表明,在图 1 中,红色的点组成的包络为纤芯模与角量子数为 1 的电场分量占主导的混合(HE)模的耦合,蓝色的点为角量子数为 1 的磁场分量占主导的混合(EH)模,绿色的点为角量子数为 2 的 HE 模^[18]。2012 年, Withford 课题组研究了逐点刻写的 FBG 散射损耗对整体的反射率的影响,他们从实验上探究了刻写 FBG 的单脉冲能量对耦合系数 κ 与散射损耗系数 α 的比(κ/α)的影响^[19],这一工作对逐点刻写的 FBG 应用于光纤激光器中具有重要的意义。

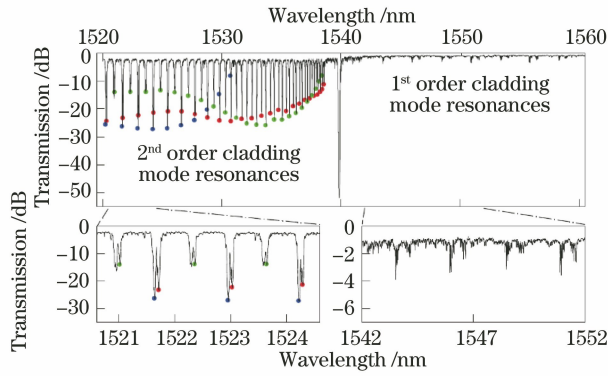


图 1 逐点刻写的包层耦合情况^[18]

Fig. 1 Transmission spectrum of a point-by-point inscribed FBG^[18]

在国内,以深圳大学王义平教授课题组为代表,对飞秒逐点刻写有非常深入的研究。2016年,该课题组利用波长为 800 nm、脉宽为 100 fs、重复频率为 1 kHz 的飞秒激光逐点刻写了采样光纤布拉格光栅(SFBG),为了有效地抑制纤芯基模和包层模的耦合,单脉冲能量为 200 nJ,实验结果表明,该SFBG在 1000 °C 高温退火 8 h 后,除了温度带来的光栅谐振波长漂移,其光谱形状没有发生任何改变,该光栅具有很高的温度稳定性^[20]。2019年,该课题

组创新性地同一根光纤的纤芯内,采用逐点刻写的方法平行地写入了多个 FBG,实验示意图如图 2(a)所示。激光器输出波长为 800 nm、脉宽 100 fs、重复频率为 1 kHz 的激光,通过平移台的移动以及旋转,依次将光栅写在纤芯不同的位置,图 2(b)所示为不同周期的光栅写在纤芯不同的位置所得到的反射谱,在实验中,不同的周期的光栅不会相互影响,由于光栅所处的位置不同,各光栅对弯曲的响应也有所差别。图 2(c)为相同周期的光栅

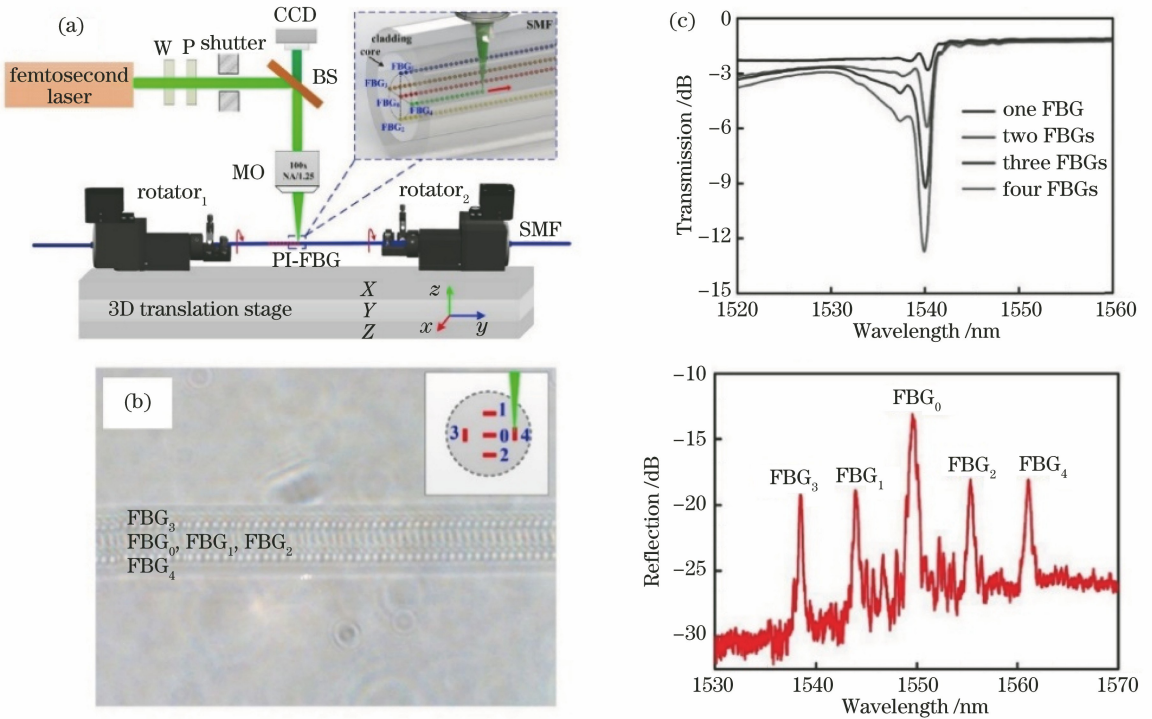


图 2 采用逐点刻写的方法制备 FBG。(a)实验装置;(b)刻写在不同位置的不同周期光栅的显微图与光谱;
(c)刻写在不同位置相同周期光栅的光谱^[21]

Fig. 2 FBG preparation by point-by-point writing. (a)Experimental device; (b) microscope images and reflection spectra of FBGs with different periods written in different positions; (c) spectrum of FBGs with the same period written in different positions^[21]

写在不同位置的光谱,随着不同光栅的刻写,透射谱的深度增加,且短波的损耗也逐渐增大^[21]。当利用直写法刻写 FBG 时,透射谱的短波处存在明显的损耗,其产生原因是飞秒激光刻写带来的纤芯折射率变化区域的米氏散射,为了抑制这一损耗,该课题组在不同芯径的单模光纤中利用飞秒逐点刻写了透射深度基本相同的光栅,发现芯径越小,短波处的损耗也越低,这是由于在芯径小的光纤内部飞秒激光刻写带来的折射率变化与纤芯区域有较大的交叠,因此米氏散射较小。此外,作者还在纤芯直径为 $4.4\ \mu\text{m}$ 的光纤上依次间隔 $2\ \text{mm}$ 刻写了 10 个不同

周期的光栅,实验发现由于米氏散射存在,光从光纤的不同端口入射,得到的光谱也是不同的^[22]。

2019 年,来自俄罗斯新西伯利亚大学的 Wolf 等^[23]在受扭转的七芯光纤上用 $1030\ \text{nm}$ 的飞秒激光刻写了 FBG,如图 3 所示,实现了在所有边侧的纤芯轴向刻写谐振波长相同或者不同的 FBG 阵列,在中间的纤芯或某个特定的边侧的纤芯刻写轴向 FBG 阵列,以及在某个横向端面的中间纤芯和三个边侧纤芯刻写 FBG 阵列,在光栅的刻写过程中未去除光纤的涂敷层,刻写出来的光栅阵列可以用于弯曲矢量传感。

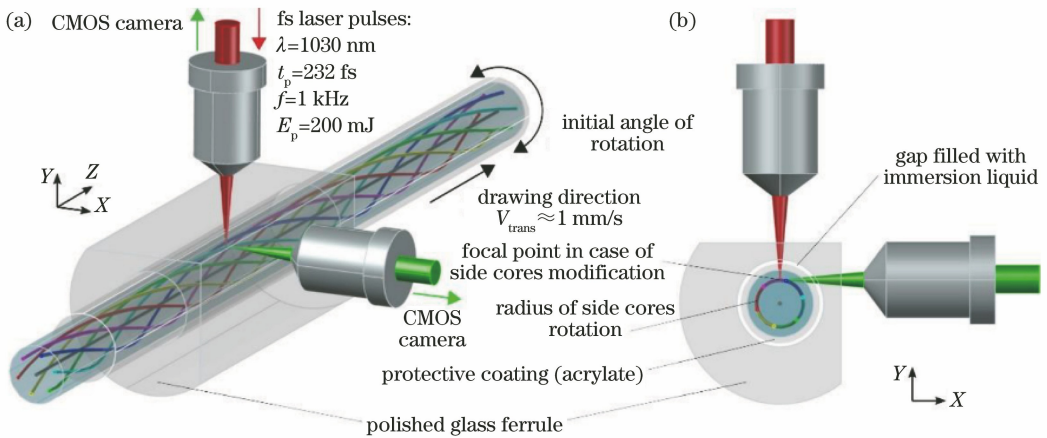


图 3 在扭转的七芯光纤上刻写 FBG 阵列^[23]

Fig. 3 FBG array inscription in twist seven-core fiber^[23]

2.2 逐线刻写

利用逐线刻写 (LBL) 的 FBG 最早由 Aston 大学的 Zhou 等^[24]实现,图 4(a)、(b)分别为逐线刻写 FBG 的示意图以及四阶 FBG 的显微成像图,其中 $v_1 = 90\ \mu\text{m/s}$ 、 $v_2 = 500\ \mu\text{m/s}$,光栅线的长度为 $30\ \mu\text{m}$,在刻写过程中,飞秒激光的聚焦点首先以速

度 v_1 垂直于光纤的轴向运动,之后以速度 v_2 快速移动到下一条线的刻写起点,光栅周期为 $2.2\ \mu\text{m}$,光栅的总长度约为 $4\ \text{mm}$,图 4(c)为利用逐线刻写的四阶 FBG 光谱,插损 (IL) 约为 $0.5\ \text{dB}$,透射深度为 $17\ \text{dB}$,相比于逐点刻写,逐线刻写的 FBG 具有较小的插损与偏振相关损耗。

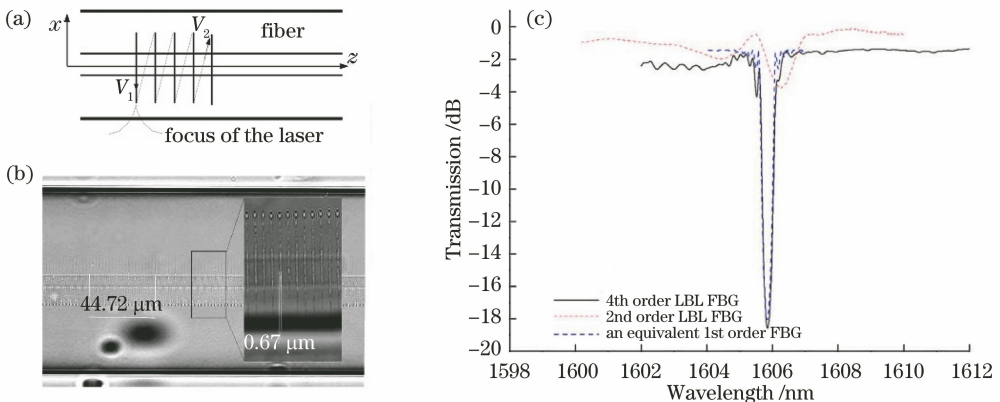


图 4 采用逐线刻写的方法制备 FBG。(a)飞秒激光逐线刻写示意图;(b)四阶 FBG 显微示意图;(c)逐线刻写 FBG 透射谱^[24]

Fig. 4 FBG preparation by line-by-line writing. (a) Schematic of femtosecond laser line-by-line inscription;

(b) microscopic of fourth-order FBG; (c) transmission spectrum of line-by-line inscribed FBG^[24]

2013年,比利时 Mons 大学的 Chah 等利用紫外飞秒激光逐线刻写了高双折射的 FBG,其中刻写的单脉冲能量为 $2 \mu\text{J}$,光栅的线长为 $20 \mu\text{m}$,栅区与纤芯间存在一定的偏移,构成了结构上的不对称性,两个布拉格谐振峰的间距为 847 pm ,对应的双折射为 7.93×10^{-4} 。2016年,来自华中科技大学的 Huang 等^[26]利用逐线刻写的方法在普通单模光纤上刻写了 π 相移光栅,光栅的线长为 $8 \mu\text{m}$,光栅周期为 $2.144 \mu\text{m}$,在 C 波段对应于光栅的第 4 阶谐

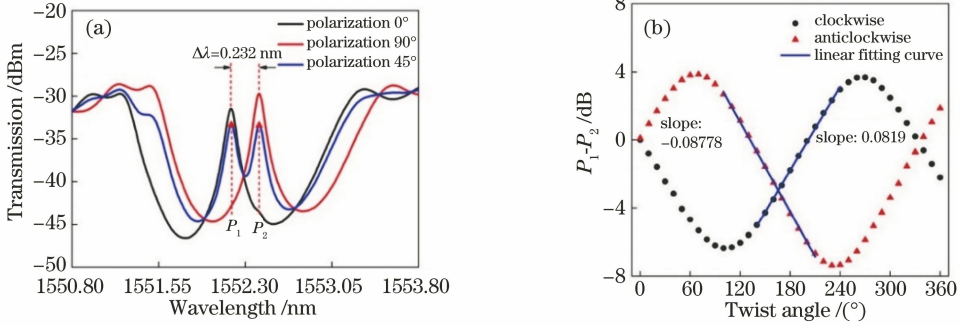


图 5 π 相移光栅。(a)光栅在不同偏振态下的透射谱;(b)不同扭转角下, $P_1 - P_2$ 的变化曲线^[26]

Fig. 5 π phase shift grating. (a) Transmission spectrum of different polarization states; (b) curves of $P_1 - P_2$ with different twist angles^[26]

2017年,深圳大学王义平课题组在预先通过熔接机放电所形成的锥形光纤上采用逐线刻写的方法在锥形区域的两端分别刻写了相同的 FBG,形成了相移 FBG 的效果,飞秒激光器刻写的单脉冲能量为 130 nJ ,光栅的周期为 $2.412 \mu\text{m}$,光栅的长度为 1.07 mm ,飞秒激光刻写的线长为 $15 \mu\text{m}$,该结构可进行应变传感,且实验发现锥区越粗对应应变越敏感^[27]。2019年,该课题组利用逐线刻写长度不同的

振。图 5(a)为光栅的透射谱,很明显光谱的形状受到输入光偏振态的影响, P_1 与 P_2 的间距为 232 pm ,对应的双折射值为 2.16×10^{-4} ,刻写的线能够破坏纤芯的圆对称性,所以会存在较大的偏振相关特性。图 5(b)为不同的扭转角下, P_1 与 P_2 的差值的变化(预先将偏振态调整到 45° 线偏振),该扭转传感器能够对扭转的方向进行识别,另外由于该传感器通过差值来进行解调,其基本不受温度与应力的影响。

光栅构成光栅阵列,通过光学后向散射反射计探测不同距离所反射的光,如图 6 所示,第一个光栅和最后一个光栅分别代表起始标志和结束标志,中间三个长度相同的光栅代表 3 位二进制编码(图中的编码为 111),存在光栅为 1,不存在为 0。此外,通过将其中编码 FBG 换成啁啾光栅可以实现调频加密,换成 π 相移光栅可以实现调相加密,换成不同谐振波长的 FBG 可以实现波长解调加密^[28]。

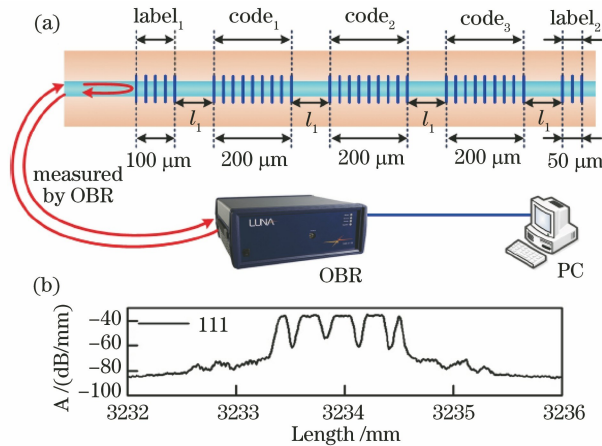
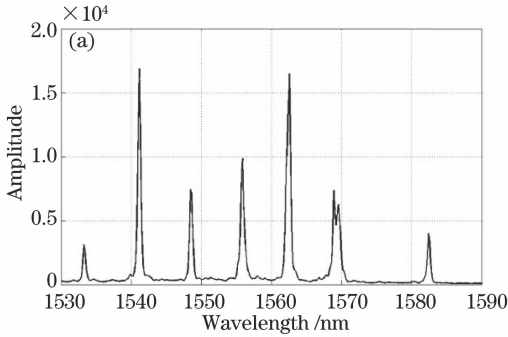


图 6 逐线刻写光栅阵列。(a) FBG 阵列编码的 3 位二进制编码的示意图;(b)编码 111 的 FBG 阵列的后向散射^[28]

Fig. 6 Line-by-line writing grating array. (a) Schematic diagram of the encoded FBG array with a 3-bit binary coding; (b) backscattering of FBG array with code 111^[28]

2.3 逐面刻写

来自塞浦路斯科技大学的 Kalli 课题组在飞秒激光直写方面有非常深入的探索,该课题组常用的刻写手段为逐面刻写(PI-B-PI)。2016年,该课题组尝试在未去涂敷层的单模光纤(SMF28)上利用飞秒激光逐面刻写的方式刻写了周期在 $2\ \mu\text{m}$ 附近、8个不同的谐振波长的光纤光栅阵列[光谱如图 7(a)所示],光栅的 4 级衍射恰好位于 C 波段。通过检测该光纤光栅阵列谐振波长的变化,能够实时反应光纤的形状变化^[29]。2017年,该课题组利用波长为 517 nm、脉宽为 220 fs、单脉冲能量为 100 nJ、重复频率为 50 kHz 的激光,通过逐面刻写的方式在 SMF28 光纤上刻写了倾斜光栅,该方式在未去涂敷层的光纤上刻写,另外在光栅的光谱上可以观察到



高阶谐振,如图 7(b)所示,不同阶数的光栅对外界的响应不同,阶数越低(谐振波长越长)的光栅谐振对折射率越敏感^[30]。

该课题组在聚合物光纤光栅方面有过非常多的尝试,2017年,利用飞秒激光逐面刻写的方式在多模环状透明聚合物光纤上刻写了只有一个谐振峰的布拉格光栅,常规的多模光纤里由于存在多个模式,谐振峰很难保证只有一个,利用逐面刻写的方式,在折射率调制区宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 、周期数目为 300 时,反射谱上只有一个明显的谐振峰。为了改善聚合物光纤光栅的传感特性,该课题组采用了不同方法对光纤光栅的温度、应力特性进行了补偿^[31];另外他们还利用飞秒逐面刻写的聚合物光纤光栅对温度、应力、扭转三参量进行同时测量^[32]。

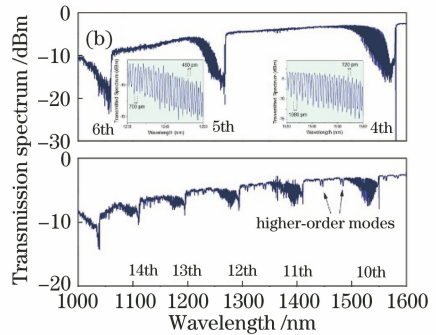


图 7 逐面刻写光栅阵列。(a) FBG 阵列^[29]; (b) 倾斜角为 7° 的 TFBG 光谱^[30]

Fig. 7 Plane-by-plane writing grating array. (a) FBGs array^[29]; (b) TFBG spectrum with a tilt angle of 7° ^[30]

利用飞秒激光逐面刻写的光纤光栅同样也可以用于连续或脉冲光纤激光器中。2019年, Kalli 团队在钕镱共掺的双包层光纤上刻写了如图 8(a)所示的光栅对,用于线性腔光纤激光器的腔镜,光栅的周期约为 $2.2\ \mu\text{m}$,利用第 4 级衍射可以在

1566 nm附近的谐振,由于这种钕镱共掺的光纤具有两个稳定的传导模式(LP_{01} 和 LP_{11}),光栅透射谱上存在两个谐振波长,较长的谐振波长代表 LP_{01} 模的自耦合,较短的谐振波长代表 LP_{01} 模向 LP_{11} 模的互耦合,激光器的光路如图 8(b)所示,其斜率效率

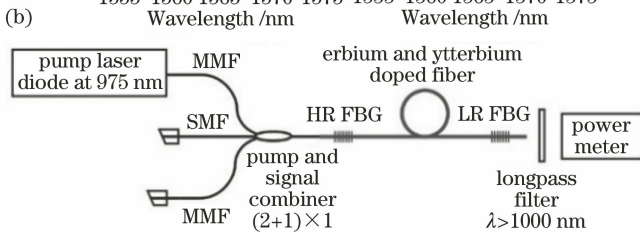
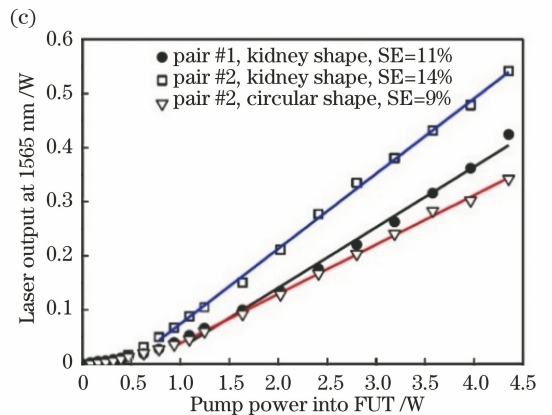
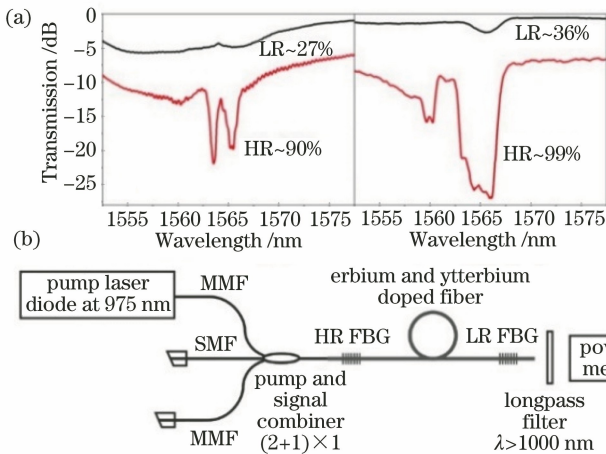


图 8 钕镱共掺的双包层光纤上刻写光栅对。(a) 光栅光谱图; (b) 振荡器光路; (c) 斜率效率^[33]

Fig. 8 Grating pair on double-clad fiber co-doped with Er and Yb. (a) Spectrum of FBGs;

(b) schematic of oscillator; (c) slope efficiency^[33]

如图 8(c)所示,当把增益光纤弯曲成“腰形”时,斜率效率能够得到显著提升,这是由于双包层光纤的内包层能够承载多模传输,由于弯曲使得不同模式的光耦合,能更好地与增益介质相互作用,且不会产生额外的弯曲损耗^[33]。

2019年,上海大学牟成博团队和 Kalli 团队合作,在 SMF28 光纤上刻写了 45° 倾斜角的布拉格光

栅,其结构和光谱、偏振相关损耗如图 9(a)所示,由于该结构具有较大的偏振相关损耗,通过搭建如图 9(b)所示的环形腔光纤激光器,可以实现非线性偏振旋转(NPR)锁模的光纤激光器。调整泵浦功率以及两个偏振控制器可实现如图 9(c)和(d)所示的单孤子锁模以及如图 9(e)和(f)所示的类噪声锁模^[34]。

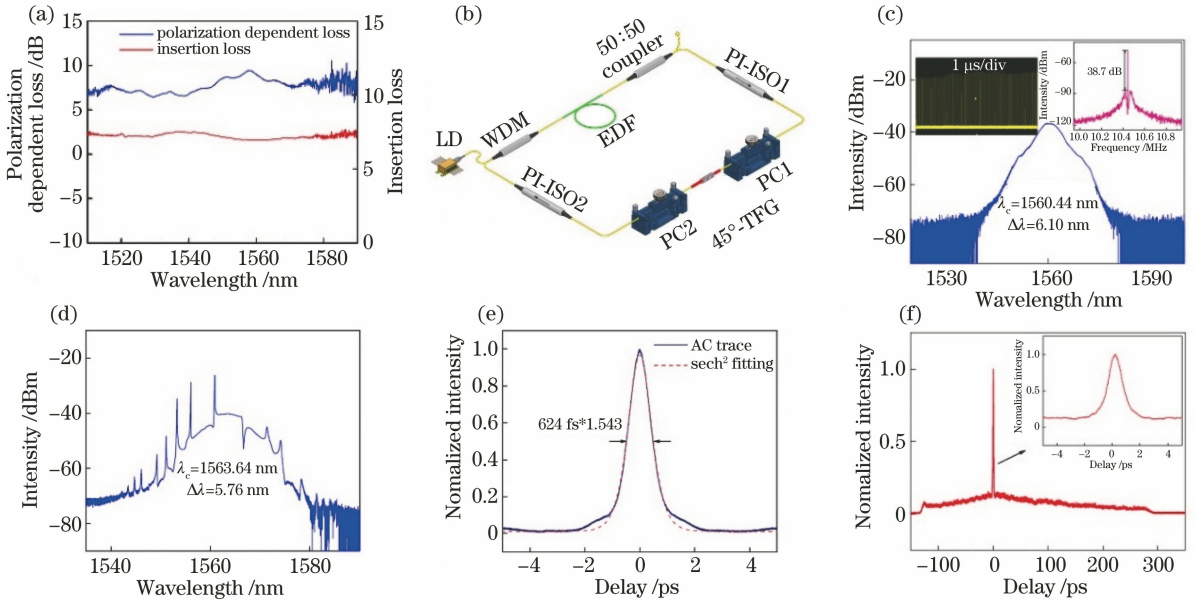


图 9 实验结果。(a) 45° 倾斜光栅插损与偏振相关损耗;(b)非线性偏振旋转锁模光路;(c)单孤子锁模光谱;(d)单孤子锁模自相关;(e)类噪声锁模光谱;(f)类噪声锁模自相关^[34]

Fig. 9 Experimental results. (a) Polarization dependent loss and insertion loss of 45° tilt grating; (b) schematic of NPR mode-locked fiber laser; (c) optical spectrum of single-soliton mode-locked fiber laser; (d) autocorrelation of single-soliton mode-locked fiber laser; (e) optical spectrum of noise-like mode-locked fiber laser; (f) autocorrelation of noise-like mode-locked fiber laser^[34]

上述逐面刻写都是通过位移平台的移动来改变聚焦位置实现的,除了这种方法还可以通过改变飞秒激光输出后的光路来实现,如图 10(a)所示,在飞秒激光器输出后添加一个柱形透镜,可以实现逐面刻写的 type I 型与 type II 型光栅。当添加至光路中柱透镜的焦距为 0.5 m 时,聚焦后的光斑长度为 11 μm。激光器输出的单脉冲能量为 1.6 μJ,可以实现 type I 型的 FBG,光谱如图 10(b)所示,所用的单脉冲功率要高于常规逐点刻写的能量,这是由于能量被扩散到更大的焦平面上。此外,该团队通过改变激光器输出的重复频率可实现啾啾光纤布拉格光栅(CFBG)的写制,这种方法与其他文献所报道的通过平移台加速有所不同,图 10(c)为利用该方法在载氩光纤上实现的长度为 260 mm、啾啾率为 2 nm/cm 的 CFBG,光栅的插损为 0.5 dB。当柱透镜的焦距为 1 m 时,光斑可以比较好的局限在纤芯内,图 10(d)为单脉

冲能量为 1.4 μJ 所刻写的 type II 型 FBG 的光谱,与 type I 型的 FBG 相比,其插损较大,且有比较明显的纤芯模向包层模的耦合。通过调整柱形透镜的角度,可以实现倾斜光栅的刻写^[35]。

2.4 纤芯扫描刻写

利用逐点刻写 FBG 通常存在较大的散射损耗,对于大芯径光纤,逐点刻写带来的折射率调制区域与纤芯的面积相比非常小,因此很难达到比较强的耦合,为此澳大利亚 Macquarie 大学的 Withford 课题组与德国耶拿大学的 Nolte 课题组合作,提出了一种纤芯扫描的技术,来克服逐点刻写带来的散射损耗大、耦合较弱的问题。图 11(a)为纤芯扫描的示意图,刻写光栅的区域置于压电控制平台上,并给压电陶瓷施加正弦交流电,这样形成的折射率变化区域横跨纤芯并且在包层中也有所分布,飞秒激光器输出波长为 800 nm、脉宽为 120 fs、重复频率为

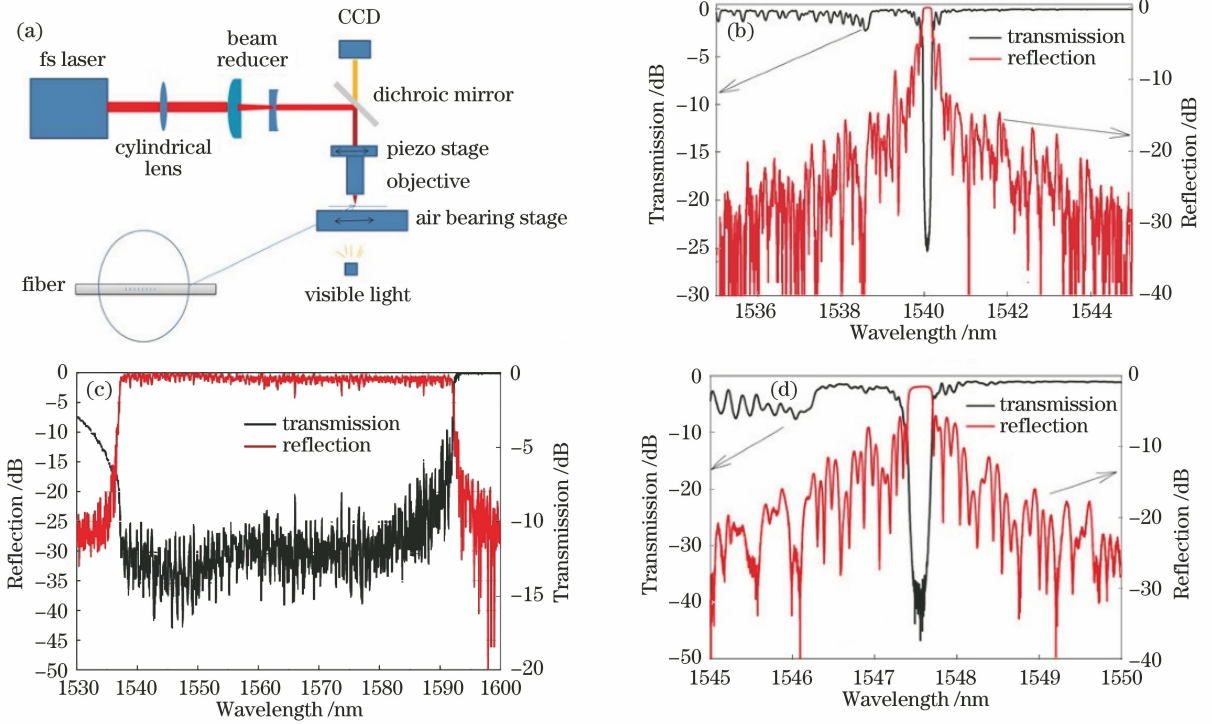


图 10 实验结果。(a)逐面刻写光栅的光路;(b) type I 型 FBG 光谱;(c)改变重复频率实现 type I 型 CFBG 刻写;(d) type II 型 FBG 光谱^[35]

Fig. 10 Experimental results. (a) Schematic of plane-by-plane inscription; (b) spectrum of type I FBG; (c) spectrum of type I CFBG; (d) spectrum of type II FBG^[35]

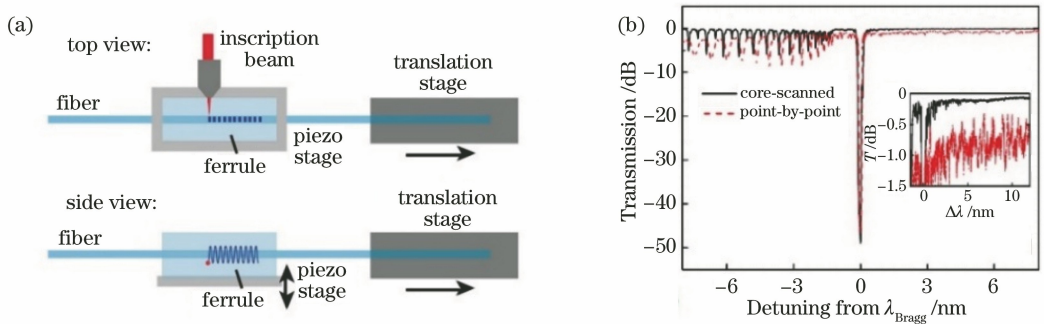


图 11 纤芯扫描技术。(a)示意图;(b)纤芯扫描与逐点刻写的 FBG 光谱对比^[36]

Fig. 11 Core-scanning technology. (a) Schematic of core-scanning; (b) FBG spectrum comparison of core-scanning and point-by-point^[36]

1 kHz 的激光。图 11(b)为利用纤芯扫描与逐点刻写形成的 FBG 的对比(两种 FBG 在耦合强度上保持一致),纤芯扫描形成的光栅的插损更小,这种方法在大芯径光纤中刻写啁啾光栅具有应用的前景^[36]。

Withford 课题组于 2016 年对逐点刻写、纤芯扫描以及一种改进的纤芯扫描刻写的 CFBG 进行了对比,这三种方法刻写带来的折射率变化示意图如图 12(a)~(c)所示。利用逐点刻写的非线性

CFBG 的光谱如图 12(d)所示,带宽为 12 nm,光栅的长度为 1.8 cm,这种情况下光谱的形状和光入射的方向有极大的关系;纤芯扫描形成的线性 CFBG 光谱如图 12(e)所示,光栅的长度为 19.5 cm,带宽为 10 nm,利用该方法可以刻写带宽为 30 nm 的 CFBG,反射率为 13%;改进的纤芯扫描刻写的 CFBG 如图 12(f)所示,其带宽为 5 nm,光纤的长度为 10 mm。此外,改进的方法能有效的抑制纤芯与包层模的互耦合,是一种控制模式有效手段^[37]。

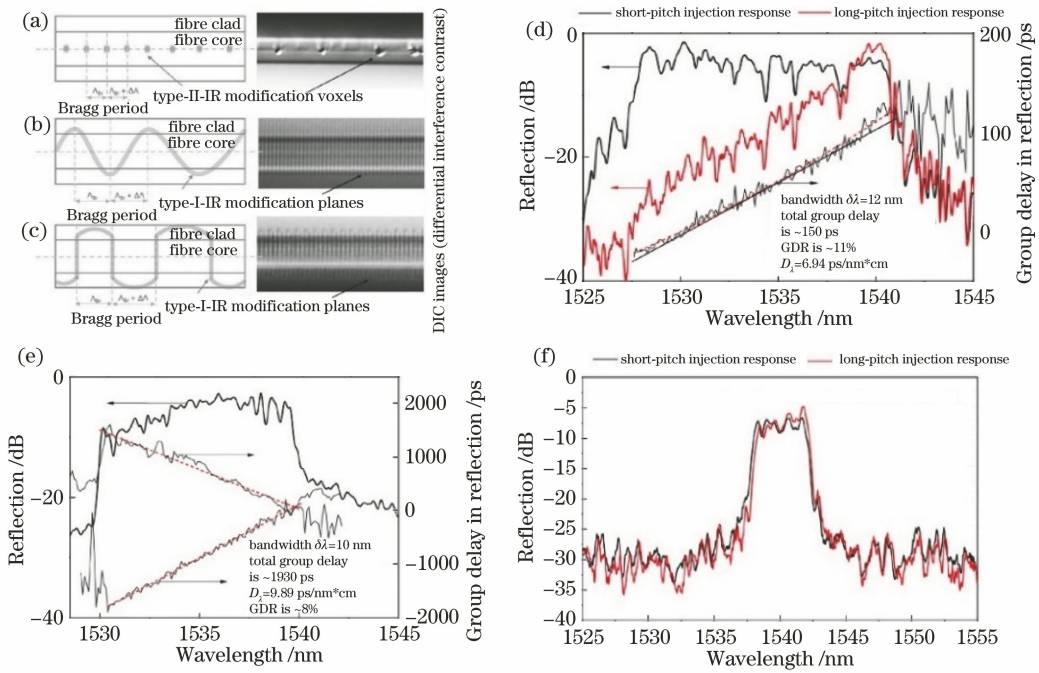


图 12 不同方法刻写的 CFBG。(a)逐点刻写;(b)纤芯扫描;(c)改进型纤芯扫描;(d)逐点刻写 CFBG 的光谱;(e)纤芯扫描刻写 CFBG 的光谱;(f)改进纤芯扫描刻写 CFBG 的光谱^[37]

Fig. 12 CFBG written by different methods. (a) Point-by-point; (b) core-scanning; (c) modified core-scanning spectrum of CFBG by point-by-point; (d) spectrum of CFBG by core-scanning; (e) spectrum of CFBG by modified core-scanning^[37]

2.5 飞秒激光直写方式的对比

如上所述,目前常见的飞秒直写的刻写光纤光栅的方式主要包括逐点刻写、逐线刻写、逐面刻写以及纤芯扫描技术,刻写光栅所需要的能量通常都在百 nJ 的量级,由于激光直接和纤芯介质作用,直写带来的插损通常比较大,且容易发生包层模耦合,通过逐面刻写可以在很大程度上抑制这些问题。飞秒直写通常需要比较严格的对准,但刻写方式相对灵

活,能够比较方便的刻写出新型光纤光栅,在新概念传感领域拥有应用前景;逐点刻写的 type II 型光栅能够承受高温,适用于超高温传感;通过飞秒激光直写,能够方便地制作光栅阵列,应用到准分布式传感中。刻写性质较为稳定的光栅需要通过逐面刻写的方式。目前针对纤芯扫描这种直写方式的报道较少,其刻写带来的插损较低且能抑制包层模耦合,相信未来会有更多应用。表 1 为四种直写方式的对比。

表 1 不同飞秒激光直写方式的对比

Table 1 Comparison of various femtosecond laser direct inscribing methods

| Method | Point-by-point | Line-by-line | Plane-by-plane | Core-scanning |
|--------------------------|---|--|--------------------|---------------|
| Alignment | Extremely high | High | Low | High |
| Pulse energy /(nJ/pulse) | 50—500 | 100 | 100 | 100 |
| Insertion loss | High IL at shorter wavelength | High IL at shorter wavelength | Low IL | Low IL |
| Application | Sensors (especially high temperature sensors) | Sensing by birefringence characteristics | Sensors and lasers | Sensors |

3 飞秒激光与相位模板结合刻写

2003 年加拿大通信研究中心的 Mihailov 等^[38]首次提出了飞秒激光和相位模板结合刻写 FBG,在未载氢的光纤上,利用该方法刻写的 FBG 折射率调制高达 1.9×10^{-3} ,且该光栅在 300 °C 的环境下放置两周,光栅特性稳定没有被擦除。

2004 年,该机构的 Grobnc 等^[39]改进了这一技术,通过飞秒激光聚焦点的垂直扫描,扩大了 FBG 折射率的调制范围,有效地抑制了纤芯模向包层模耦合。此后利用飞秒激光与相位模板技术结合的研究大量涌现,目前主要分为相位模板的静态刻写与动态刻写两大类,刻写出来的光栅在传感与激光器系统中都得到了应用。

3.1 静态刻写

2016年,深圳大学王义平课题组利用800 nm的飞秒激光与周期为1070 nm的相位模板刻写了不同性质的光栅。单脉冲能量为267 μJ ,曝光时间为600 s时,可以可写出带宽为5.02 nm的宽带FBG。另外,单脉冲能量为220 μJ 时,预先曝光60 s后,再次用相同的能量曝光180 s可以刻写出偏振相关的相移FBG,实验发现其光谱在电矢量平行于入射面(TM)偏振下才表现出相移的特性,而电矢量垂直于入射面(TE)偏振下不存在这一特性,并且这种光栅具有负折射率调制的特性,随着温度的升

高,光谱的中心波长发生蓝移^[40]。2017年,该课题组利用800 nm的飞秒激光器与周期为1070 nm、0级衍射低于4%的相位模板在双芯少模光纤中的一个纤芯上刻写了FBG,如图13所示,由于双芯光纤的结构对称性与少模光纤布拉格光栅(FMFBG)的光谱特性,该器件可用于弯曲传感,能够对弯曲的方向以及曲率半径进行有效的识别^[41]。同年,该课题组利用相同的方法,在选择性填充的光子晶体光纤的纤芯上刻写了FBG,克服了传统光子晶体光纤(PCF)难以刻写FBG的问题,利用该器件可实现温度、应力以及折射率传感^[42]。

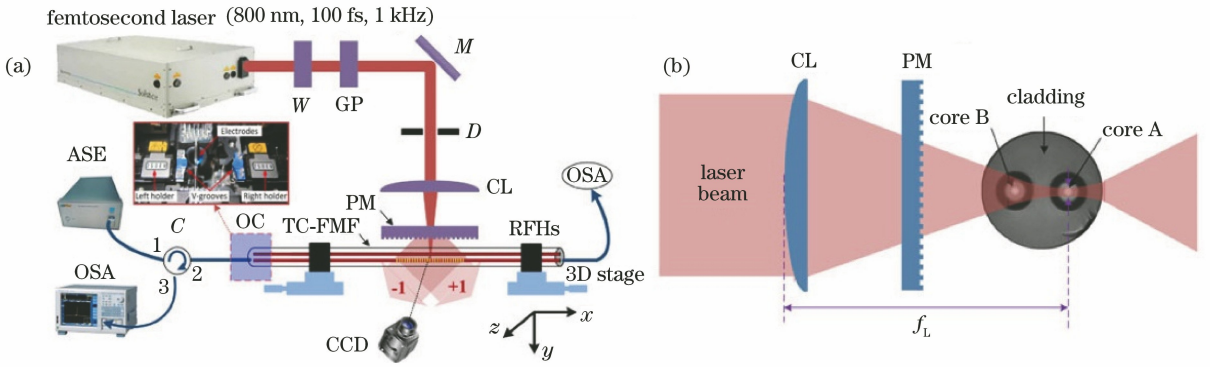


图13 双芯少模光栅。(a)实验光路;(b)局部放大图^[41]

Fig. 13 Twin-core FMFBG. (a) Experimental optical path; (b) partial enlarged view^[41]

吉林大学孙洪波课题组通过800 nm、重复频率为100 Hz的飞秒激光以及周期为3.33 μm 的相位模板,通过调整光纤与模板之间的距离,实现了 ± 1 级衍射光干涉诱导的主光栅结构与0级衍射光辅助诱导光栅的叠加,该“复合叠印光栅”在很宽的光谱范围上交错出现这两类衍射所形成的高阶谐振。当单脉冲能量高于0.5 mJ时,0级衍射所形成的光栅谐振非常明显,并且偶数阶的谐振会与 ± 1 级衍射所形成的光栅高阶谐振重叠,该光栅结构具有很好的高温特性,可用于超高温传感,此外还能用于轴向应力以及压力传感。利用该方法同样可以

实现高阶倾斜光栅,由于光谱上存在很多纤芯模与包层模的谐振,该光栅结构可用于折射率传感,以及温度、应变传感^[43]。

2017年,西北工业大学的赵建林课题组利用800 nm的飞秒激光与周期为2.142 μm 的相位模板在直径为20 μm 的少模光纤上刻写了长度为8 mm的FBG,除了基模与 LP_{11} 模各自的自耦合,还出现了纤芯模与包层模的耦合,该结构可以进行折射率、温度、应变的传感^[44]。2019年,该课题组利用同样的方式在少模光纤上刻写了二模光纤布拉格光栅(TMFBG),如图14(a)所示,通过调整光纤和模板

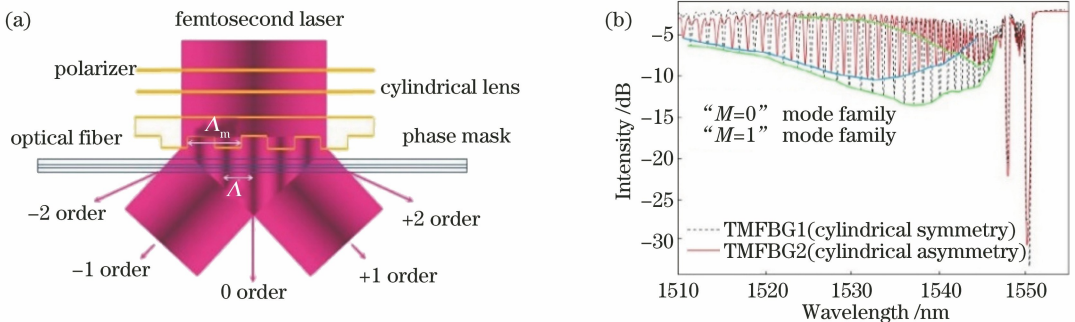


图14 TMFBG。(a)刻写TMFBG示意图;(b)TMFBG光谱图^[45]

Fig. 14 TMFBG. (a) Schematic of TMFBG inscription; (b) spectrum of TMFBG^[45]

之间的距离,使得光栅平面的一端折射率调制较大,可以实现纤芯基模向不同对称性的包层模耦合[图 14(b)].当光斑聚焦于正中心时,基模(HE_{11})向包层中具有轴对称特性的 HE_{1M} 模耦合,当光斑聚焦的位置发生偏移时,基模除了向具有轴对称特性的包层模耦合外,也向其他包层模耦合.利用基模和包层模的谐振,可以实现弯曲传感等外界物理量的传感^[45].

由于空气孔的影响以及非线性吸收过程,利用紫外光很难在光子晶体光纤的纤芯中刻写 FBG,但是通过飞秒激光可有效的避免这些问题.2018 年,来自比利时布鲁塞尔自由大学的 Baghdasaryan 等^[46]利用波长为 1030 nm、脉宽为 190 fs、重复频率

为 100 Hz 的飞秒激光与周期为 $2.175 \mu\text{m}$ 的相位模板,通过调整光纤的朝向,在六边形晶格的光子晶体光纤中刻写了透射深度为 4 dB 的 FBG.

2019 年,以色列本古里安大学的 Montz 等^[47]利用 800 nm 的飞秒激光进行三倍频处理得到 266 nm 的紫外飞秒激光,通过该紫外飞秒激光与周期为 1074.2 nm 的相位模板分别在去除涂敷层和保留涂敷层的 SMF28 光纤上刻写了反射率为 0.75% 的 FBG[光谱如图 15(a)所示],这是已知第一次用紫外飞秒激光在未去涂敷层的光纤上刻写 FBG.将其置于钕镱共掺的光纤激光器中用于输出腔镜,可实现斜率效率为 30%,最大输出功率为 6.4 W 的激光输出,如图 15(b)所示.

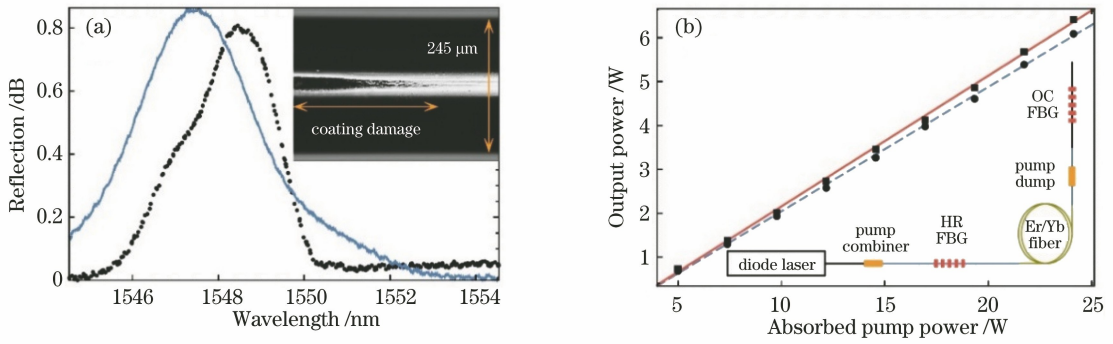


图 15 实验结果。(a)保留涂敷层(蓝)与去除涂敷层(黑)的光谱;(b)斜率效率与实验光路^[47]

Fig. 15 Experimental results. (a) Spectrum of FBG (blue is with coating, black is without coating); (b) slope efficiency and schematic of oscillator^[47]

静态刻写的光栅通常长度受到飞秒激光的光斑大小的限制,为了解决这一问题,2019 年,加拿大国家研究委员会的 Mihailov 课题组通过对飞秒激光扩束并与相位模板结合刻写了长度为 15 mm 的 FBG,实验中所用的飞秒激光的波长为 800 nm,重复频率为 1 kHz,脉宽为 80 fs,在刻写过程中 TE 偏振与 TM 偏振的光的单脉冲能量分别为 0.87 mJ 与 1.1 mJ,该光栅纤芯模和各包层模的耦合深度超过 30 dB,光谱范围达到 250 nm,此外该光栅在 1000 °C 的环境下,光谱不会发生退化^[48].

3.2 动态刻写

通过静态刻写的光栅在光纤的径向分布与轴向分布都比较受限,为了让光栅折射率调制区域与纤芯的模式有较大的交叠,飞秒激光在纤芯中的聚焦位置需要改变以提高折射率区域的面积,如果需要刻写较长的光栅如啁啾光栅,必须通过相位模板扫描技术.

2019 年,以色列本古里安大学的 Halstuch 等^[49]利用如图 16(a)所示的光路,在未去涂敷层的

光纤上实现了 FBG 的刻写,其中柱形透镜的 $NA = 0.1$,其被安装在平移台上可以进行二维的移动,以扩大刻写光栅折射率调制的范围,飞秒激光器的波长为 800 nm、模板的周期为 2140 nm,刻写光栅的宽度为 $5 \mu\text{m}$ 、长度为 6 mm,在 1 kHz 的重复频率、单脉冲能量为 0.4 mJ 下,其光谱如图 16(b)所示,刻写时间为 5 min 左右,此时光纤的涂敷层受到飞秒激光的照射而收缩,利用较低的重复频率 (200 Hz、250 Hz、500 Hz)照射 10 min 左右可以减少对涂敷层的损伤,图 16(c)为重复频率为 500 Hz 时的光谱,与图 16(b)相比,其光谱红移,且谐振深度增加.

飞秒激光相位模板扫描技术最早于 2006 年,由耶拿大学提出,如图 17(a)所示,波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz、脉宽为 50 fs 的激光聚焦于光纤的纤芯中,在刻写过程中,光纤和相位模板以速度 v 沿光纤的轴向运动,模板的周期为 $2.15 \mu\text{m}$,当单脉冲能量为 $600 \mu\text{J}$, $v = 4 \text{ mm/min}$,光栅的长度为 17.5 mm 的透射谱如图 17(b)所示,不同光栅长度

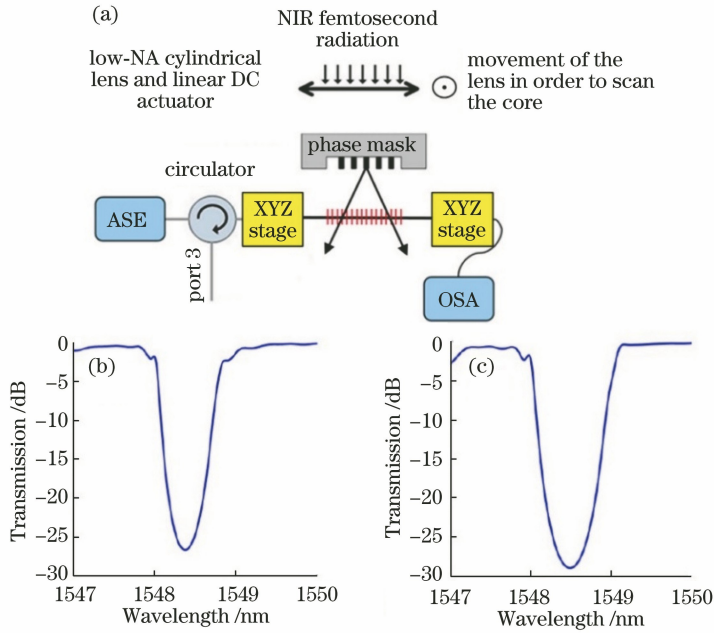


图 16 在未去涂敷层的光纤上刻写 FBG。(a)刻写光栅光路;(b)重复频率为 1 kHz,曝光时间为 5 min 的光谱;
(c)重复频率为 500 Hz,曝光时间为 10 min 的光谱^[49]

Fig. 16 Writing FBG on the optical fiber without decoating. (a) Schematic of FBG inscription; (b) spectrum of FBG with repetition rate 1 kHz and exposure time 5 min; (c) spectrum of FBG with repetition rate 500 Hz and exposure time 10 min^[49]

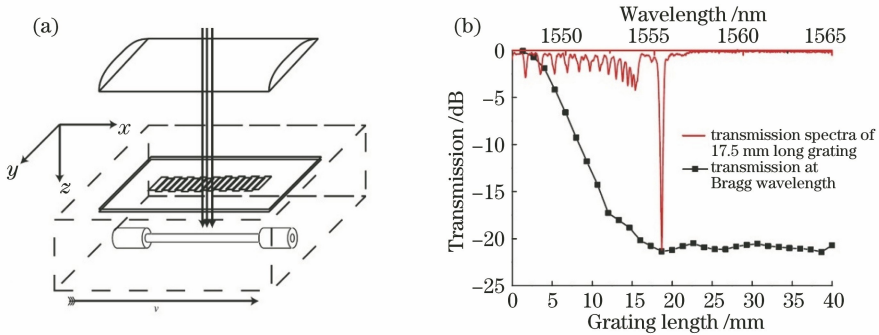


图 17 飞秒激光相位模板扫描技术。(a)相位模板扫描刻写示意图;(b)光栅透射谱以及透射深度随光栅长度的变化^[50]
Fig. 17 Femtosecond laser phase template scanning technology. (a) Schematic of phase mask scanning technology;
(b) transmission spectra and transmission over length^[50]

所对应的透射深度也在图中有所体现。研究发现,单脉冲能量以及移动速度 v 都会都耦合造成一定的影响^[50]。

同年,该课题组利用相位模板扫描技术在掺铒光纤(EDF)上刻写了 FBG,实现了连续激光的输出。所用的模板的周期为 $2.15 \mu\text{m}$,单脉冲能量为 $600 \mu\text{J}$,移动速度 $v = 4 \text{ mm/min}$,其透射谱如图 18(a)所示,连续光激光器的光路如图 18(b)所示,利用 976 nm 的泵浦源对带有 FBG 的掺铒光纤进行泵浦,可实现 1550 nm 波段的激光输出,图 18(c)为斜率效率曲线,受到泵浦功率的限制,该

激光器的最大输出功率为 38 mW ^[51]。

2013 年,该课题组利用 800 nm 波段、脉宽为 120 fs 的飞秒激光与相位模板扫描技术结合实现了大模场掺铒光纤(20/400)的 FBG 刻写,FBG 的中心波长为 1078.7 nm 、反射率为 96% 、半峰全宽(FWHM)为 0.8 nm ,通过 976 nm 的泵浦源对掺铒光纤进行泵浦,可以实现斜率效率为 78% ,受到泵浦源最大功率的限制,激光器最大输出功率为 514 W ,由于温度效应的影响,激光器的中心波长为 1080.5 nm ,带宽为 220 pm ^[52]。2019 年,该课题组利用中心波长为 $1.473 \mu\text{m}$ 、啁啾率为 2.3 nm/cm 的

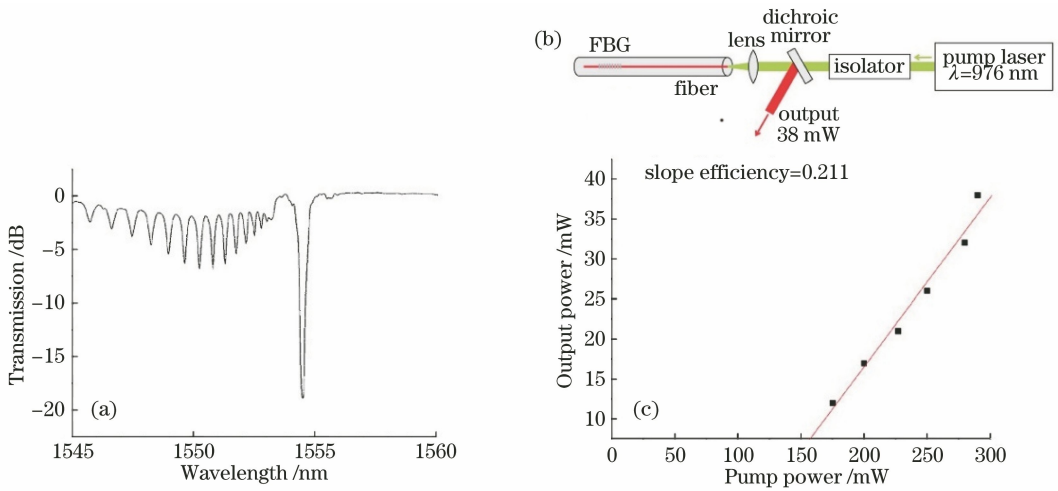


图 18 相位模板扫描技术。(a)掺铒光纤刻写 FBG 透射谱;(b)激光器示意图;(c)斜率效率^[51]

Fig. 18 Phase mask scanning technology. (a) Transmission spectrum of FBG in EDF; (b) laser experiment setup; (c) slope efficiency^[51]

相位模板与飞秒激光在 20/400 大模场掺铒光纤上刻写了带宽为 5 nm、中心波长为 1070 nm 的 CFBG,其光谱如图 19(a)所示,利用实验光路[图 19(b)]实现了斜率效率为 87%,最大输出功率为 1.9 kW 的激光输出,其斜率效率曲线如图 19(c)所示,在输出功率为 1.5 kW 时,光斑的质量因子 $M_2=1.25$ ^[53]。

除了作为激光器的腔镜,飞秒激光与相位模板扫描技术刻写的光栅还能用于泵浦反射镜。2019

年,加拿大拉瓦尔大学的 Talbot 等^[54]利用 BBO 晶体对 806 nm 的飞秒激光倍频,得到 403 nm、脉宽为 40 fs 的飞秒激光,然后通过与中心波长为 674 nm 的啁啾相位模板,在双包层掺铒光纤的内包层刻写了啁啾布拉格光栅,其光谱如图 20(a)所示,将该内包层啁啾布拉格光栅置于激光器的输出端,如图 20(b)所示,对 976 nm 的泵浦光进行反射。由于泵浦反射镜的作用,激光器的斜率效率由 17.1% 提升到了 22.7%。

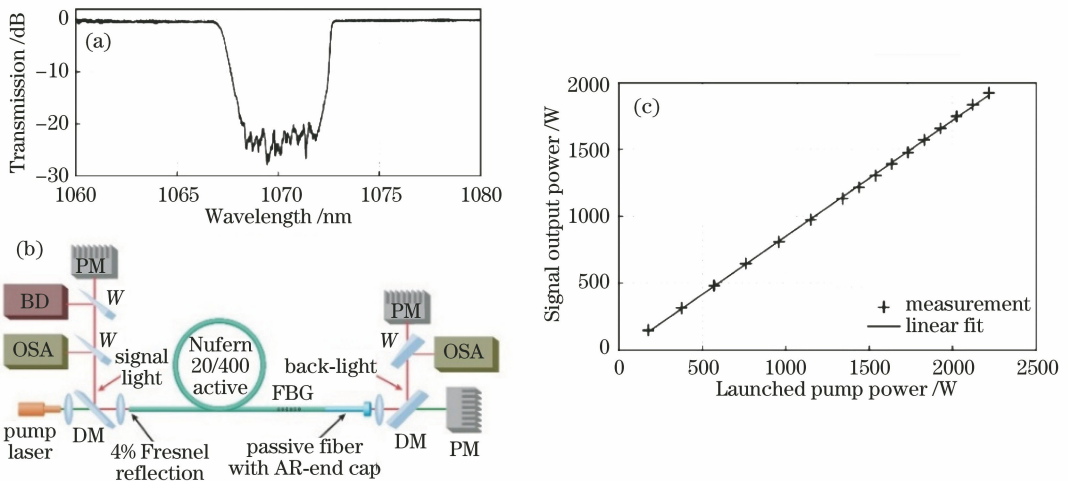


图 19 实验结果。(a)CFBG 光谱;(b)激光器光路;(c)大功率激光器斜率效率^[53]

Fig. 19 Experimental results. (a) Spectrum of CFBG; (b) laser experiment setup; (c) slope efficiency^[53]

3.3 飞秒激光相位模板刻写技术对比

相位模板动态刻写技术是对相位模板静态刻写技术的升级。由于飞秒激光器输出的光斑大小有限,如果只通过静态刻写,很难实现啁啾光纤光栅等删区长度要求比较大的光栅的制备,这也限制了飞

秒激光与相位模板结合刻写的光栅的应用,相位模板动态刻写技术能够有效的解决这一问题。目前绝大多数通过相位模板动态刻写的光栅都应用于光纤激光器中,而通过静态刻写方式的光栅通常用于传感领域。表 2 为这两种相位模板刻写技术的对比。

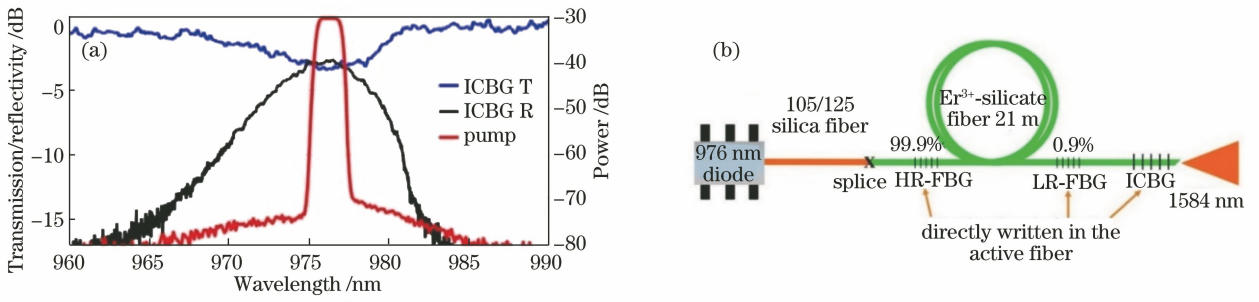


图 20 实验结果。(a)内包层 CFBG 光谱;(b)激光器光路^[54]

Fig. 20 Experimental results. (a) Spectrum of inner-cladding CFBG; (b) laser experiment setup^[54]

表 2 相位模板刻写技术的对比

Table 2 Comparison between phase mask writing methods

| Method | Static inscription | Dynamic inscription |
|------------------------|--------------------------|------------------------|
| Stability requirements | Low | High |
| System complexity | Low | High |
| Inscription time | Short | Long |
| Grating length | Limited by beam diameter | Limited by phase mask |
| Application | Sensors | High power fiber laser |

4 结束语

飞秒激光技术的发展为光纤光栅的刻写来了极大的便利,大大促进了光纤光栅的发展。表 3 总结了到目前为止国内外飞秒激光刻写光纤光栅的主要进展情况,其中, λ_{fs} 为飞秒激光的波长, f 为重复频率, T 为持续时间, E 为脉冲能量,DW为直接写入, P 为相位屏蔽周期; λ_R 为共振波长。相比紫外曝光法刻写的光纤,飞秒激光刻写可以通过直写技术在未去涂敷层和未载氢的光纤刻写,且光栅具有耐高温等一些特殊的性质,利用聚焦位置可控的特性可以实现对模式耦合的调控。但是,由于飞秒激光

与透明介质作用带来的非线性过程,光栅可能也会引入额外的插损,这需要进一步对刻写工艺进行摸索,来抑制这一问题。飞秒激光与相位模板结合能够刻写出性质相对稳定且重复性较高的光栅,但光栅的谐振波长在很大程度上受到了模板周期的限制,其适合应用于一些对光纤光栅性能要求比较高的场景。目前通过直写技术刻写的光栅大多数用于新型传感器,或通过改变谐振波长刻写光栅阵列用于准分布式传感,而通过飞秒激光与相位模板结合刻写的光栅,尤其是相位模板扫描所刻写的光栅通常用于光纤激光器。表 4 为直写技术与相位模板刻写技术的对比。

表 3 国内外飞秒激光刻写光纤光栅的进展情况

Table 3 Development of fiber gratings inscribed by using femtosecond laser

| Reference | λ_{fs}/nm | f/kHz | T/fs | E/nJ | Description | $P/\mu m$ | λ_R/nm |
|-----------|-------------------|---------|--------|-----------------------------|---|-----------|----------------|
| [15] | 800 | 200 | 120 | | First reported PBPLPG | DW | 1100-1700 |
| [16] | 800 | 1 | 150 | 300-1000 | First reported PBP FBG | DW | 1550 |
| [17] | 800 | 1 | 120 | 160-300 | Loss mechanism of PBP | DW | 1550 |
| [18] | 800 | | 110 | 200-275 | Cladding mode coupling | DW | 1540 |
| [19] | 800 | | | 80-350 | Impact of scattering loss on FBG reflectivity | DW | 1550 |
| [20] | 800 | 1 | 100 | 200 | Sampling FBG with high temperature resistance | DW | 1550 |
| [21] | 800 | 1 | 100 | 200 | Parallel-integrated FBGs | DW | 1550 |
| [22] | 800 | 1 | 100 | 59-174 | Mie scattering suppression in PBP FBG | DW | 1550 |
| [23] | 1030 | 1 | 232 | 200 | Bending sensing by seven cores FBG | DW | 1550 |
| [24] | 800 | 1 | 110 | 85 | LBL inscribed low IL and PDL FBG | DW | 1600 |
| [25] | 266 | 1 | 120 | 4×10^6 (maxima) | High birefringence FBG by LBL inscription | DW | 1550 |

| Reference | λ_{fs}/nm | f/kHz | T/fs | E/nJ | Description | $P/\mu m$ | λ_R/nm |
|-----------|-------------------|---------|--------|---|--|----------------------------|----------------|
| [26] | 520 | 200 | 400 | | LBL polarization-dependent π -PSFBG for twist sensing | DW | 1550 |
| [27] | | | | 130 | π -PSFBG for strain sensing | DW | 1550 |
| [28] | 513 | 200 | 250 | 14 | LBL inscribed fiber label | DW | 1550 |
| [29] | | 4 | | 100 | FBGs array for vibration sensor | DW | 1550 |
| [30] | 517 | 50 | 220 | 100 | High order resonance of TFBG | DW | 1560 |
| [31] | 517 | 5 | 220 | 80 | Polymer fiber grating sensor | DW | 1550 |
| [32] | 517 | | 220 | | Polymer fiber grating sensor | DW | 1550 |
| [33] | 517 | 100 | 220 | 150 | FBGs in oscillator | DW | 1560 |
| [34] | 517 | 50 | 217 | 150 | NPR mode locked by 45° TFBG | DW | 1560 |
| [35] | 800 | 0.25 | 120 | 1400-1900 | Beam expanding PI-B-PI | DW | 1550 |
| [36] | 800 | 1 | 120 | 117 | Core-scanning Low loss FBG | DW | 1540 |
| [37] | 800 | 0.1-1 | 112 | 83-200 | Core-scanning CFBG | DW | 1540 |
| [38] | 800 | 0.01、1 | 120 | 3×10^5 | First report of femtosecond laser and phase mask inscribed FBG | 4,284, 3,213, 2,142, 1,071 | 1550 |
| [39] | 800 | 0.125 | 125 | 6×10^5 | Cladding mode suppression by focal point scanning | 3,213 | 1550 |
| [40] | 800 | 1 | 100 | 1.08×10^5 -2.67×10^5 | Negative refractive index FBG | 1,070 | 1550 |
| [41] | 800 | 1 | 100 | 1.02×10^5 | Double cores FBG | 1,070 | 1550 |
| [42] | 800 | 1 | 100 | 2×10^5 | PCFBG for refractive index sensing | 1,070 | 1550 |
| [43] | 800 | 0.1 | | $0.4 \times 10^6 -$ 0.5×10^6 | Higher order resonance | 1,071 | 600-1700 |
| [44] | 800 | 1 | 50 | 4.2×10^5 | Cladding mode resonance in two mode fiber | 2,142 | 1550 |
| [45] | 800 | 1 | 35 | $4 \times$ 10^6 (maxima) | Cladding mode resonance in two mode fiber | 2,142 | 1550 |
| [46] | 1030 | 0.1 | 190 | | PCFBG | 2,175 | 1560 |
| [47] | 266 | 1 | 40 | | Oscillator used FBG inscription without coating removing | 1,0742 | 1550 |
| [48] | 800 | 1 | 80 | 0.78×10^6 ; 1.1×10^6 | Strong cladding mode resonant FBG by beam expanding focal point scanning | 1,07 | 1300-1550 |
| [49] | 800 | 0.2-1 | 35 | 0.4×10^6 | without coating removing | 2,14 | 1550 |
| [50] | 800 | 1 | 50 | 2×10^5 , 6×10^5 | phase mask scanning FBG | 2,15 | 1555 |
| [51] | 800 | 1 | 50 | 6×10^5 | High reflection FBG on EDF for oscillator | 2,15 | 1555 |
| [52] | 800 | | 120 | | Oscillator with 514 W output | | 1078.7 |
| [53] | 800 | | 100 | | Oscillator with 1.9 kW output | | 1070 |
| [54] | 403 | 1 | 30 | 6×10^6 | Pump reflector | 0,674 | 976 |

基于对飞秒激光刻写的光纤光栅进展情况的总结分析,我们认为在未来飞秒激光刻写光纤光栅会朝以下几个主要方向发展:1)利用直写技术刻写长距离或者阵列型的 FBG 和 LPG,以进行分布式或

准分布式的光纤传感;2)飞秒激光和相位模板结合刻写控制模式与耐高功率的光纤光栅,并在大功率激光器中得到应用;3)利用飞秒激光器制作光栅、波导等高度集成的光纤器件用于高速光通信系统。我

表4 飞秒激光直写与相位模板辅助刻写技术的对比

Table 4 Comparison between direct inscribing and phase mask assisted writing

| Method | Direct writing | Phase mask assisted writing |
|-----------------------------|---|--|
| Pulse energy / (nJ/pulse) | 100 | 0.5 |
| Resonance wavelength | Arbitrary | Limited by phase mask |
| IL | High | Low |
| Flexibility | High | Low |
| Alignment | High | Low |
| Repeatability | Low | High |
| Characteristics of gratings | 1. High polarization-related properties and high birefringence properties 2. Easily fabrication of novel gratings by adjusting inscription condition | Stable spectral properties |
| Application | Novel sensors and quasi-distributed sensors 1. Inscription of FBGs array with different resonance wavelengths to realize quasi-distributed sensors | Sensors and lasers |
| Developing trend | 2. Inscription fiber gratings with special refractive index profile to control mode coupling | Inscription of fiber gratings in high power oscillator |

们相信,随着飞秒激光技术和刻写工艺的不断发展,基于飞秒激光刻写的光纤光栅在各实际工程系统中得到越来越多的应用,必将大大推动光纤光栅及其应用的快速发展。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xu L, Ge J, Patel J H, et al. Dual-layer orthogonal fiber Bragg grating mesh based soft sensor for 3-dimensional shape sensing [J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24727-24734.
- [3] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120C.
- [4] Minato N, Kutsuzawa S, Sasaki K, et al. Field trial of time-spreading and wavelength-hopping OCDM transmission using FBG en/decoders [J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5853-5859.
- [5] Xue Y Z, Wang X F, Luo M M, et al. Review of regenerated fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020007.
薛渊泽, 王学锋, 罗明明, 等. 再生光纤布拉格光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020007.
- [6] Guo Y C, Liu Y G, Wang Z, et al. Dual resonance

and dual-parameter sensor of few-mode fiber long period grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0906003.

郭艳城, 刘艳格, 王志, 等. 少模光纤长周期光栅双峰谐振及双参量传感[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0906003.

- [7] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328009.
廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328009.
- [8] Poulin M, Vasseur Y, Trepanier F, et al. Apodization of a multichannel dispersion compensator by phase modulation coding of a phase mask[C] // OFC/NFOEC Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 2005., March 6-11, 2005. Anaheim, CA, USA. IEEE, 2005.
- [9] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, et al. Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses[J]. Electronics Letters, 1998, 34(3): 302.
- [10] Wang Y P. Study on the characteristics of new long period fiber gratings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
王义平. 新型长周期光纤光栅特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [11] Zhao Y H, Liu Z Y, Liu Y Q, et al. Ultra-broadband fiber mode converter based on apodized

- phase-shifted long-period gratings [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5905-5908.
- [12] Tian Z N. Design and fabrication of micro-optical components based on femtosecond laser direct writing [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
田振男. 基于飞秒激光直写微光学元件的设计与制备研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [13] Dai Z J, Su Q, Wang Y F, et al. Fast fabrication of THz devices by femtosecond laser direct writing with a galvanometer scanner[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(6): 065301.
- [14] Zhang Y F, Lin C P, Liao C R, et al. Femtosecond laser-inscribed fiber interface Mach - Zehnder interferometer for temperature-insensitive refractive index measurement [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4421-4424.
- [15] Kondo Y, Nouchi K, Mitsuyu T, et al. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 646-648.
- [16] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1170.
- [17] Åslund M L, Nemanja J, Groothoff N, et al. Optical loss mechanisms in femtosecond laser-written point-by-point fibre Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14248-14254.
- [18] Thomas J, Jovanovic N, Becker R G, et al. Cladding mode coupling in highly localized fiber Bragg gratings: modal properties and transmission spectra [J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 325-341.
- [19] Williams R J, Jovanovic N, Marshall G D, et al. Optimizing the net reflectivity of point-by-point fiber Bragg gratings: the role of scattering loss[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13451-13456.
- [20] Zhang C Z, Yang Y H, Wang C, et al. Femtosecond-laser-inscribed sampled fiber Bragg grating with ultrahigh thermal stability [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3981-3988.
- [21] Wang Y P, Li Z L, Liu S, et al. Parallel-integrated fiber Bragg gratings inscribed by femtosecond laser point-by-point technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2185-2193.
- [22] Liu X Y, Wang Y P, Li Z L, et al. Low short-wavelength loss fiber Bragg gratings inscribed in a small-core fiber by femtosecond laser point-by-point technology [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5121-5124.
- [23] 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.
- [24] Zhou K M, Dubov M, Mou C B, et al. Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16): 1190-1192.
- [25] Chah K, Kinet D, Wuilpart M, et al. Femtosecond-laser-induced highly birefringent Bragg gratings in standard optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 594-596.
- [26] Huang B, Shu X W. Ultra-compact strain- and temperature-insensitive torsion sensor based on a line-by-line inscribed phase-shifted FBG [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17670-17679.
- [27] Zhu F, Wang Y P, Zhang Z, et al. Taper embedded phase-shifted fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser line-by-line inscription [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-8.
- [28] Yang K M, Liao C R, Liu S, et al. Optical fiber tag based on an encoded fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6): 1474-1479.
- [29] Theodosiou A, Lacraz A, Polis M, et al. Modified fs-laser inscribed FBG array for rapid mode shape capture of free-free vibrating beams [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1509-1512.
- [30] Ioannou A, Theodosiou A, Caucheteur C, et al. Direct writing of plane-by-plane tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5198-5201.
- [31] Theodosiou A, Lacraz A, Stassis A, et al. Plane-by-plane femtosecond laser inscription method for single-peak Bragg gratings in multimode CYTOP polymer optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5404-5410.
- [32] Leal-Junior A G, Theodosiou A, Diaz C R, et al. Simultaneous measurement of axial strain, bending and torsion with a single fiber Bragg grating in CYTOP fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 971-980.
- [33] Theodosiou A, Aubrecht J, Peterka P, et al. Er/Yb double-clad fiber laser with fs-laser inscribed plane-by-plane chirped FBG laser mirrors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(5): 409-

- 412.
- [34] Huang Z N, Huang Q Q, Theodosiou A, et al. All-fiber passively mode-locked ultrafast laser based on a femtosecond-laser-inscribed in-fiber Brewster device [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5177-5180.
- [35] 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.
- [36] Williams R J, Krämer R G, Nolte S, et al. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1918-1920.
- [37] Antipov S, Ams M, Williams R J, et al. Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 30-40.
- [38] Mihailov S J, Smelser C W, Lu P, et al. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 995-997.
- [39] Grobnc D, Smelser C W, Mihailov S J, et al. Fiber Bragg gratings with suppressed cladding modes made in SMF-28 with a femtosecond IR laser and a phase mask [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1864-1866.
- [40] He J, Wang Y P, Liao C R, et al. Inscription and improvement of novel fiber Bragg gratings by 800 nm femtosecond laser through a phase mask [C] // *Asia Pacific Optical Sensors Conference*, Shanghai. Washington, D.C.: OSA, 2016.
- [41] 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): 4670-4676.
- [42] Wang C, He J, Zhang J C, et al. Bragg gratings inscribed in selectively inflated photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28442-28450.
- [43] Chen C. *Fabrication of robust fiber gratings by femtosecond laser and their applications* [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
陈超. 耐高温光纤光栅的飞秒激光制备及其应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [44] Jiang Y J, Liu C, Zhang W D, et al. Multi-parameter sensing using a fiber Bragg grating inscribed in dual-mode fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1607-1610.
- [45] Feng D Y, Albert J, Jiang Y J, et al. Symmetry selective cladding modes coupling in ultrafast-written fiber Bragg gratings in two-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18410-18420.
- [46] Baghdasaryan T, Geernart T, Morana A, et al. IR femtosecond pulsed laser-based fiber Bragg grating inscription in a photonic crystal fiber using a phase mask and a short focal length lens [J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14741-14751.
- [47] Montz Z, Shirakov A, Ami U B, et al. Inscribing an output coupler grating directly through the fiber coating with a 266 nm femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 13-16.
- [48] Abdukerim N, Grobnc D, Hnatovsky C, et al. High-temperature stable fiber Bragg gratings with ultrastrong cladding modes written using the phase mask technique and an infrared femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 443-446.
- [49] Halstuch A, Shamir A, Ishaaya A A. Femtosecond inscription of fiber Bragg gratings through the coating with a Low-NA lens [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16935-16944.
- [50] Thomas J, Wikszak E, Clausnitzer T, et al. Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique [J]. *Applied Physics A*, 2006, 86(2): 153-157.
- [51] Wikszak E, Thomas J, Burghoff J, et al. Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(16): 2390-2392.
- [52] Kramer R G, Liem A, Voigtlander C, et al. 514 W monolithic fiber laser with a femtosecond inscribed fiber Bragg grating [C] // *2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference CLEO EUROPE/IQEC*, May 12-16, 2013. Munich, Germany. IEEE, 2013.
- [53] Krämer R G, Matzdorf C, Liem A, et al. Femtosecond written fiber Bragg gratings in ytterbium-doped fibers for fiber lasers in the kilowatt regime [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 723-726.
- [54] Talbot L, Paradis P, Bernier M. All-fiber laser pump reflector based on a femtosecond-written inner cladding Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 5033-5036.