

蓝宝石光纤光栅高温传感器研究进展与发展趋势 (特邀)

何俊^{1,2}, 徐锡镇^{1,2}, 贺佳^{1,2}, 吴嘉烽^{1,2}, 李卓达^{1,2}, 王义平^{1,2*}

1. 深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东深圳 518060;
2. 深圳大学广东省光纤传感技术粤港联合研究中心, 广东深圳 518060)

摘要: 在高速飞行器、航空发动机、核反应堆等国防安全和国民经济的重要领域, 需要实现 1800 °C 以上的高温原位测量。常规石英光纤传感器受限于材料特性, 无法在 1000 °C 以上高温环境中长期稳定使用。单晶蓝宝石光纤具有极高的熔点 (2053 °C) 和较低的传输损耗, 是一种良好的高温传感材料。在单晶蓝宝石光纤内部刻写布拉格光栅, 可以研制出蓝宝石光纤光栅传感器, 具有耐温性能好、测量精度高、便于多点测量等优点, 是当前最具发展前景的新型高温传感器件。首先介绍了蓝宝石光纤光栅高温传感器的工作原理和理论模型, 接着介绍了利用飞秒激光制备蓝宝石光纤光栅的三种主流技术, 包括相位掩模板扫描法、双光束干涉法、直写法, 并从制备效率、光谱质量等方面比较了三种技术的优劣, 指出飞秒激光直写法是制备蓝宝石光纤光栅高温传感器的最佳手段; 然后介绍了蓝宝石光纤光栅的光谱优化方法, 包括如何减小光栅光谱带宽和如何降低光谱噪声; 进一步介绍了蓝宝石光纤光栅的高温传感特性、封装工艺及高温温度、应变传感应用; 最后展望了蓝宝石光纤光栅传感器的未来发展趋势。蓝宝石光纤光栅高温传感器的快速发展和大规模推广应用, 必将有助于解决当前我国航空航天、核电等领域重大装备结构健康监测的卡脖子难题。

关键词: 高温传感器; 蓝宝石光纤光栅; 飞秒激光微加工

中图分类号: TN253; TP212; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220700

Research progress and development tendency of sapphire fiber Bragg grating-based high-temperature sensors (*invited*)

He Jun^{1,2}, Xu Xizhen^{1,2}, He Jia^{1,2}, Wu Jiafeng^{1,2}, Li Zhuoda^{1,2}, Wang Yiping^{1,2*}

1. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fibre Sensors, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In-situ measurement of ultra-high temperature above 1800 °C is critical in many key fields of national defense security and national economy, such as hypersonic vehicles, aero engines, and nuclear reactors. Conventional silica-based fiber sensors can not withstand a high temperature of 1000 °C, which is limited by the material characteristics of silica. A single-crystal sapphire fiber is a promising candidate for high temperature sensing owing to its ultra-high melting temperature of ~2053 °C and low transmission loss. Sapphire fiber Bragg grating (SFBG) sensors, which have the advantages of outstanding temperature resistance, high measurement

收稿日期:2022-09-30; 修订日期:2022-10-12

基金项目:国家自然科学基金(62222510, 61875128, 62005170); “广东特支计划”科技创新青年拔尖人才(2019TQ05X113)

作者简介:何俊,男,教授,博士生导师,博士,主要从事光纤高温力热传感技术、飞秒激光微纳加工技术方面的研究。

通讯作者:王义平,男,教授,博士生导师,博士,主要从事光纤微结构传感器制备技术、极端环境光纤传感技术方面的研究。

accuracy, and capability for multi-point measurement, are the most promising high temperature sensors and can be obtained by inscribing the grating in the single-crystal sapphire fiber. In this paper, we present the working principles and theoretical model of high temperature SFBG sensors. Then, three mainstream fabrication technologies, including femtosecond laser phase mask technology, femtosecond laser Talbot interferometry, and femtosecond laser direct writing technology, are introduced. Moreover, the advantages and disadvantages of these methods are discussed in preparation efficiency and spectral properties. It is concluded that the femtosecond laser direct writing technology is the best method for fabricating high temperature SFBG sensors. Moreover, the optimization methods of the reflection spectrum of SFBGs are summarized, including how to reduce 3 dB bandwidth and spectral noise. The temperature sensing characteristics, packaging process, and high temperature and strain sensing applications of SFBGs are further introduced. Finally, the future development trend of SFBG sensors is discussed. The rapid development and large-scale application of high temperature SFBG sensors will be helpful to solve the problem of containment in structural health monitoring of major equipment in aviation, nuclear power, and other fields.

Key words: high-temperature sensor; sapphire fiber Bragg grating; femtosecond laser micromachining

0 引 言

高速飞行器、航空发动机、先进核反应堆是关系国家安全和国民经济的国之重器。如何实现高温环境下的多物理场实时监测,是保障重大装备研制、实现故障诊断及预警的关键。例如,在航空发动机涡轮叶片、燃烧室内壁等关键部件的研制和维护过程中,需要实时原位测量发动机燃烧室内部的温度场。当前,航空发动机的涡轮前燃气温度高达 1500~1700 °C^[1],未来将进一步提升至 2000 °C^[2]。在高速飞行器领域,由于气动加热作用,飞行器尖锐前缘的潜在温度将超过 1900 °C^[3-4],结构内部产生的热变形和热应力严重时会导致破坏飞行器。因此,需要掌握飞行器关键部位的高温力热分布规律。在核能发电领域,核电站反应堆的燃料包壳是堆芯的第一道安全屏障,承受了 1255 °C 以上的高温^[5-6]。因此,为了保障核电站的安全运行,需要监测堆芯燃料组件的温度分布。

目前,主流的高温传感手段包括热电偶、示温漆、红外辐射测温 and 光纤高温传感器等。热电偶可以实现 1800 °C 高温测量,但长期稳定性差、测温点数少、抗电磁干扰能力差。红外辐射测温和示温漆只能测试可视范围内的表面温度,且测温精度不高。光纤高温传感器具有体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、便于组网等独特优势。然而,受限于石英玻璃材料的软化点,石英光纤传感器无法在 1000 °C 以上的高温环境长期稳定工作^[7]。现有高温传感器普遍存在有耐高温性能差、测量精度低、测量点数不足等瓶

颈。因此,如何突破上述瓶颈,发展超高温、多参量、分布式的新型高温传感器,具有重要意义。

单晶蓝宝石光纤是一种良好的高温材料,熔点高达 2053 °C,传输损耗低且耐化学腐蚀性能良好^[8]。目前蓝宝石光纤高温传感器主要包括黑体辐射型、法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 干涉型、拉曼散射型和光纤光栅型等。1983 年,美国国家标准局首次利用蓝宝石光纤黑体辐射实现了高温测量^[9]。1987 年,浙江大学成功制备了中国第一根单晶蓝宝石光纤和高温测试仪,实现从室温到高温 1800 °C 测量,测温精度优于 $\pm 0.2\%$ ^[10]。中北大学研制了黑体辐射蓝宝石光纤传感器,实现高温动态测量 (2000 °C, 响应时间 35 ms)^[11]。目前,黑体辐射型蓝宝石光纤传感器发展较为成熟,但存在致命问题:蓝宝石光纤与黑体 (金属/陶瓷) 属异质材料,热膨胀系数差异导致传感探头在高温下开裂,影响了传感器寿命。

美国弗吉尼亚理工学院王安波等^[12]系统研究了蓝宝石光纤 F-P 干涉仪高温传感器,实现 1500 °C 以上高温传感^[13];基于腔长复用实现了多支蓝宝石光纤 F-P 传感器的级联^[14]。然而, F-P 干涉仪存在严重的高温脱胶问题且插损较大导致大规模集成困难。采用直接键合的方法构建蓝宝石 F-P 干涉仪,有望解决脱胶问题,但这种方法只能用于制备端面干涉仪,无法实现多点复用^[15]。2015 年,美国弗吉尼亚理工学院还提出了一种蓝宝石光纤中拉曼散射信号检测方法,进而实现了 1200 °C 高温分布式测量^[16-17]。他们通过

改进实验装置,将蓝宝石光纤拉曼散射型分布式高温传感系统的测温上限提升至 1400 °C,空间分辨率为 10 cm^[18]。

在单晶蓝宝石光纤内部刻写布拉格光栅,可以研制出蓝宝石光纤光栅传感器,具有耐温性能好、测量精度高、便于多点测量等优点,是当前最具发展前景的新型高温传感器件。2004 年,加拿大通信研究中心 Mihailov 等^[19-20]首次利用飞秒激光相位掩模板扫描法制备出蓝宝石光纤光栅,并测试了其高温特性。2013 年,德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Elsmann 等^[21]利用双光束干涉法成功制备出蓝宝石光纤光栅波分复用阵列。2017 年,美国弗吉尼亚理工学院报道了利用飞秒激光逐点法制备的蓝宝石光纤光栅^[22]。2018 年,深圳大学笔者团队提出了飞秒激光逐线直写法,成功制备出蓝宝石光纤光栅,实现了 1800 °C 高温传感^[23]。该方法灵活性高、制备蓝宝石光纤光栅的光谱质量好,是当前研制蓝宝石光纤光栅的最佳方法之一。

文中系统地综述蓝宝石光纤光栅高温传感器的发展历程、最新进展与发展趋势。首先介绍蓝宝石光纤光栅的工作原理和理论模型,然后综述利用飞秒激光制备蓝宝石光纤光栅的研究进展,接着讨论蓝宝石光纤光栅的光谱特性优化方法,进而总结蓝宝石光纤光栅的高温传感应用,最后展望了蓝宝石光纤光栅传感器的未来发展方向。

1 蓝宝石光纤光栅的基本原理

1.1 单晶蓝宝石光纤的基本性质

单晶蓝宝石光纤材料是氧化铝,即 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,为六方晶格结构。到目前为止,蓝宝石光纤的生长方法已经比较成熟。其中,激光加热基座法具有设备结构简单、易控制光纤直径、制备过程不受污染等优点,已被广泛使用。该方法通常使用两束 CO₂ 激光对单晶蓝宝石棒的顶端进行聚焦加热,再用一根籽晶对顶端熔化区域进行向上引导拉丝,光纤直径通过控制籽晶移动速度控制^[24],商用的蓝宝石光纤直径通常为 75~500 μm 。

单晶蓝宝石光纤具有优异的光学性能,其传输窗口很宽 (0.3~5 μm),该波段内的透光率达 80% 以上^[25-26]。2000 年,浙江大学童利民等^[27]测试了蓝宝

石光纤的弯曲损耗,在弯曲半径 2.8 mm 时其弯曲损耗仅为 0.1 dB/m。这些优异特性使得蓝宝石光纤成为制备光纤传感器的理想材料。此外,蓝宝石光纤还具有十分优越的机械性质(表 1),抗拉强度高达 2.2 GPa^[28]。蓝宝石光纤熔点高达 2053 °C,远高于石英光纤(软化点为 1330 °C^[7]),因此可以用于 1900 °C 超高温环境。

表 1 单晶蓝宝石机械性能参数^[26,28]

Tab.1 Mechanical performance parameters of monocrystal sapphire^[26,28]

Parameter	Value
Flexural strength/GPa	0.48-0.895
Tensile strength (ultimate)/GPa	2.2
Compression strength (ultimate)/GPa	2.0
Young's modulus/GPa	345
Bulk modulus/GPa	250
Shear modulus/GPa	145
Poisson's ratio	0.29

1.2 蓝宝石光纤光栅的敏感机理

蓝宝石光纤光栅是利用飞秒激光微加工等手段在光纤内部产生的轴向一维周期性折射率调制结构,如图 1 所示。由于光栅具有周期性折射率调制,激发了反向传输模式。当纤芯中传输方向相反的两个模式发生耦合时,产生谐振作用。即满足布拉格条件的光波会被反射回去,其他波长则继续向前传输,布拉格波长为^[29-30]:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ 为布拉格波长; Λ 为光栅周期; n_{eff} 为光纤传输模式的有效折射率。

当外界环境的温度发生变化时,由于热光效应引起光纤中的模式有效折射率发生变化,由于热膨胀效应也会使得光栅周期随之改变,导致光栅的布拉格波长发生漂移。根据光栅方程可以分析光栅的温度传感特性,对公式(1)进行求导可得:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \cdot (\xi + \alpha) \quad (2)$$

式中: ξ 为蓝宝石光纤的热光系数; α 为蓝宝石光纤的热膨胀系数。表达式为^[26,31]:

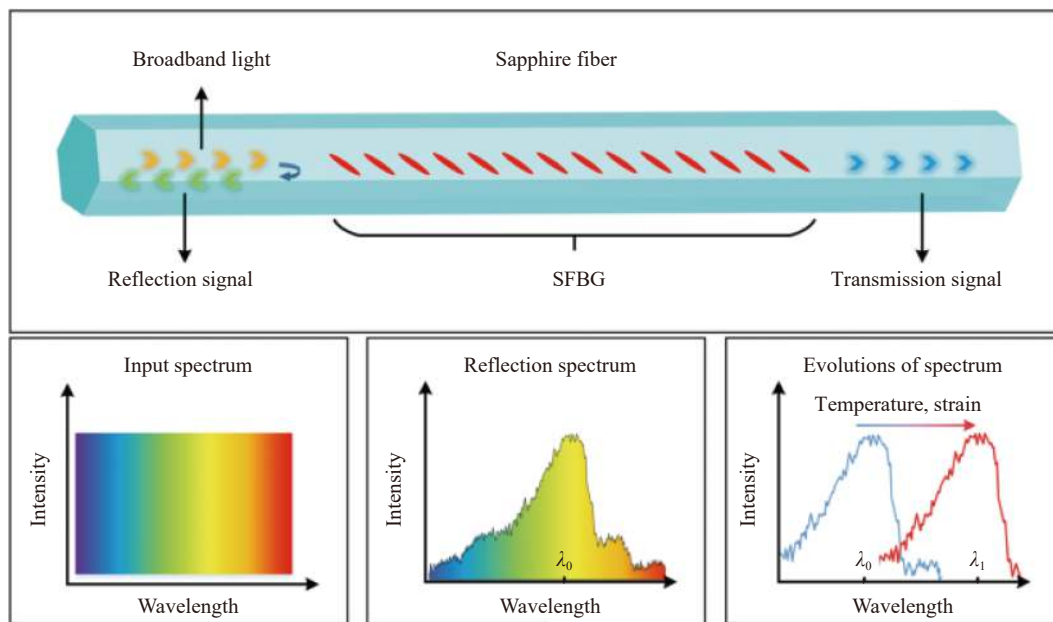


图 1 蓝宝石光纤光栅的工作原理示意图

Fig.1 Schematic of working principle of sapphire fiber Bragg grating (SFBG)

$$\xi = \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}dT} = 12.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{d\lambda}{\lambda dT} = 5.90 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (4)$$

进一步对公式 (2) 进行积分可得^[32]:

$$\lambda = A + B e^{(\xi+\alpha)(T-C)} \quad (5)$$

从公式 (5) 中可以看出, 当不受外力时, 蓝宝石光纤光栅的中心波长与温度之间呈指数关系, 在小温变范围内可简化为线性关系。

当沿着光纤施加轴向力, 则引起光栅产生应变。这一方面使得光栅周期变大, 另一方面使得光纤直径变小, 当忽略其径向变化量时, 对公式 (1) 进行求导可得:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (6)$$

其中, 在弹性范围内, $d\lambda/\lambda = \varepsilon$ 为沿光纤轴向的应变变量, 光纤的有效折射率变化为^[33]:

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon \quad (7)$$

式中: P_{11} 和 P_{12} 为弹光系数的分量; ν 为泊松比^[33]。根据 $P = -n_{\text{eff}}^2 \cdot [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]/2$ 可得:

$$\Delta\lambda = \alpha_\varepsilon \varepsilon \quad (8)$$

式中: $\alpha_\varepsilon = \lambda \cdot (1 - P)$ 为光纤光栅的应变灵敏度; P_{11} 、 P_{12} 和 ν 为与蓝宝石光纤材料相关的常数。因此, 蓝宝石光纤光栅的波长漂移量与应变之间呈线性关系。

1.3 蓝宝石光纤光栅的模式耦合理论

蓝宝石光纤没有常规的纤芯-包层结构, 呈现高度多模的特性。因此, 蓝宝石光纤光栅是一种典型的多模光纤光栅, 其光谱和常规单模光栅相比存在极大差异, 严重影响高精度光谱寻峰及传感特性。因此, 国内科研人员针对其模式特性进行了深入的理论和实验研究。

蓝宝石光纤是以空气为包层的单晶光纤, 属于阶跃型多模光纤, 传输的模式数量为^[34]:

$$M = \frac{1}{2} a^2 k^2 n_1^2 \Delta = \frac{V^2}{2} \quad (9)$$

$$V = 2\pi a NA / \lambda \quad (10)$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (11)$$

式中: a 为蓝宝石光纤半径; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ 为最大折射率差, n_1 为蓝宝石光纤折射率 ($n_o = 1.755$, $n_e = 1.763$ ^[35]), n_2 为空气包层的折射率; V 为归一化频率; NA 即数值孔径。通过计算可得: 对于直径为 $100 \mu\text{m}$ 的蓝宝石光纤而言, 其归一化频率 $V = 289.28$, 模式数量 $M = 41842$, 是一种高度多模的光纤。

当光从单模光纤入射多模光纤时将激发众多模式, 由于辐射模无法长距离传输, 多模光纤中的模式可以写成多个导模的集合:

$$E_s(r, 0) = \begin{cases} \sum_{v=1}^N c_{v,0} J_0\left(u_{v,0} \frac{r}{a}\right) & r \leq a \\ \sum_{v=1}^N d_{v,0} K_0\left(\omega_{v,0} \frac{r}{a}\right) & r > a \end{cases} \quad (12)$$

式中： $c_{v,0}$ 和 $d_{v,0}$ 分别为多模光纤的纤芯和包层模场激发系数； $u_{v,0}$ 和 $\omega_{v,0}$ 分别为在多模光纤的纤芯和包层中的径向归一化传播波数。从公式(12)中可以看出，当 $r \leq a$ 时，光场为J型贝塞尔函数，说明此时光波为震荡型，可稳定传输；当 $r > a$ 时，光场为K型贝塞尔函数，说明此时光波为消逝型，无法稳定传输。多模光纤各个模式的耦合效率可通过交叠积分计算^[36]：

$$\eta_v = \frac{\left| \int_0^\infty E_s(r) E_v(r) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |E_s(r)|^2 r dr \int_0^\infty |E_v(r)|^2 r dr} \quad (13)$$

式中： E_v 为激发出的第 v 个模式。对公式(13)积分可得：

$$\eta_v = \frac{2\left(\frac{\varpi}{a}\right)^2 \exp\left[-\left(\frac{\varpi^2}{a}\right)\left(\frac{u_v^2}{2}\right)\right]}{J_0^2(u_v) + J_1^2(u_v) + \left(\frac{J_0(u_v)}{K_0(\omega_v)}\right)^2 (K_1^2(\omega_v) - K_0^2(\omega_v))} \quad (14)$$

式中： ϖ 为基模的模场半径； u_v 和 ω_v 为基于渐近法求解得到的0阶贝塞尔函数 J_0 和 K_0 的根，其表达式为：

$$u_v = \left(2v - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

$$\omega_v = \sqrt{V^2 - \left(\frac{\pi}{2}\left(2v - \frac{1}{2}\right)\right)^2} \quad (16)$$

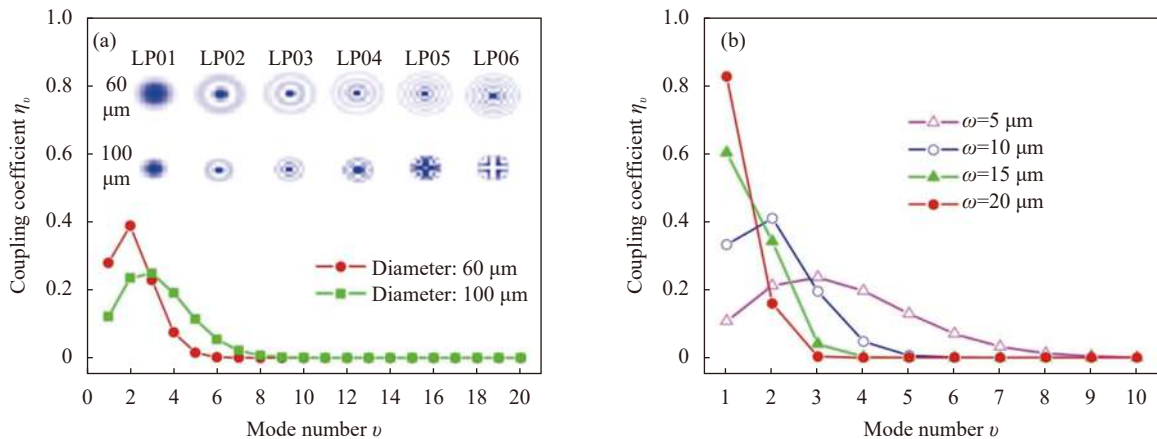


图 2 蓝宝石光纤中模式耦合效率的仿真计算结果。(a) 蓝宝石光纤直径的影响；(b) 输入模场尺寸的影响^[32]

Fig.2 Coupling efficiency of various modes in sapphire fiber. Effects of diameter of sapphire fiber (a) and dimension of input mode (b) on coupling efficiency^[32]

对于单模光纤光栅而言，其谐振峰由前向传输基模和后向传输基模耦合而成。而在多模光纤内部，多个模式之间均会参与耦合过程，不限于同种模式的前向传输和后向传输之间，还会发生在相邻模式之间，其传播常数和横向耦合系数分别为：

$$\beta_{vi} = (\beta_v + |\beta_i|)/2 \quad (17)$$

$$K'_{vi}(z) = \iint_0 \frac{\omega}{4} \Delta\varepsilon(x, y, z) \vec{e}_{v,i}(x, y) \cdot \vec{e}'_{i,i}(x, y) dx dy \quad (18)$$

式中： ω 为角频率； $\Delta\varepsilon$ 为光纤介电常数受到的微扰； $\vec{e}_{v,i}(x, y)$ 和 $\vec{e}'_{i,i}(x, y)$ 为第 v 个和第 i 个模式的横向电场分布。

多模光纤光栅的反射谱由多个不同模式的反射峰经耦合效率加权叠加而成^[37]：

$$R(\lambda) = \sum_{n=0}^v \eta(\lambda_n) \cdot R_{FBG}(\lambda_n) \quad (19)$$

为了理论研究蓝宝石光纤光栅的反射谱，需要首先考虑蓝宝石光纤内各个模式的能量耦合效率，然后仿真各个模式的布拉格谐振峰，最后通过加权叠加获得光谱仿真结果。

笔者团队计算了单模光纤与不同直径蓝宝石光纤的耦合效率及不同尺寸的输入模场与特定直径蓝宝石光纤的耦合效率^[32]。从图2(a)中可以看出：当单模光纤与直径为60 μm的蓝宝石光纤耦合时，LP₀₂模式的耦合效率最高(38.9%)。随着蓝宝石光纤直径增大，耦合效率最大的模式向更高阶转移，激发的各模式耦合效率更加均匀。从图2(b)中可以看出：当激发

模场与蓝宝石光纤模场越匹配时有利于基模激发,当输入模场的半径为 20 μm 时,蓝宝石光纤中基模的耦合效率最高,可达 82.7%。

北京理工大学江毅等^[38]也开展了蓝宝石光纤模式耦合仿真研究。他们设计了单模光纤与蓝宝石光纤之间的桥接光纤来实现模场匹配并提高耦合效率。桥接光纤由纤芯直径为 23、50、62.5 μm 的多模光纤依次熔接而成。基于该桥接光纤多级耦合后,基模耦合效率高达 56.1%,几乎是由单模光纤单级耦合时的两倍。此外,当使用纤芯直径为 62.5 μm 的多模光纤与直径 75 μm 的蓝宝石光纤耦合时,蓝宝石光纤

中的基模耦合效率最高可达 92.5%。

2015 年,德国慕尼黑工业大学 Müller 等^[39]研究了多模光纤光栅反射光谱。他们采用两种系统测试了多模光纤光栅的光谱,即基于宽带光源、光电探测器和多模耦合器的多模系统和基于光纤光栅解调仪的单模系统。如图 3(a) 所示,仿真与实验结果基本吻合,结果表明多模光纤光栅的光谱形状极大地依赖模式激发和测试条件,同一多模光纤光栅在不同测试系统测得的反射光谱存在较大差异,这是由于模式激发以及传输都存在很大差异。

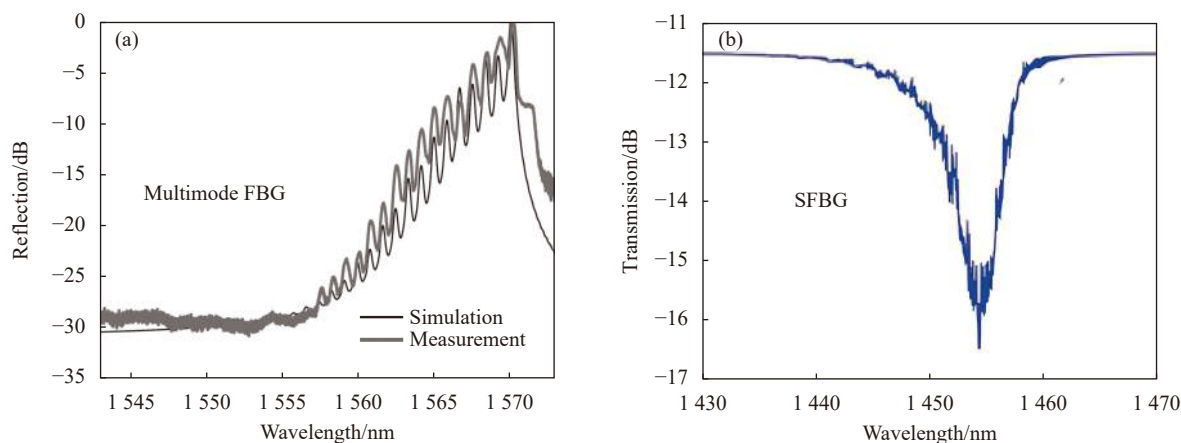


图 3 (a) 多模光纤光栅反射谱^[39]和 (b) 蓝宝石光纤光栅透射谱^[40]的仿真与测试

Fig.3 Simulated and measured reflection spectra of the multimode fiber Bragg gratings (a)^[39] and simulated transmission spectra of SFBG (b)^[40]

吉林大学于永森等^[40]利用耦合模理论分析了基模输入蓝宝石光纤时激发的各个模式的功率分布及不同横向耦合系数下蓝宝石光纤光栅的透射谱。当基模输入直径为 250 μm 的蓝宝石光纤时,通过分析对比前 50 个模式的功率分配可以发现, LP_{00} 模式的耦合效率最高,该理论分析结果也符合此前提及的规律:随着蓝宝石光纤直径的增大,耦合效率最大的模式向高阶转移(短波)。在弱耦合情况下,蓝宝石光纤光栅透射谱中的奇数阶模式的自耦合谐振峰是分立的。随着横向耦合系数增大,各个模式之间的互耦合增强,形成较宽的透射谱,如图 3(b) 所示。

综上,目前国内外学者针对蓝宝石光纤与不同类型光纤的耦合效率展开了数值计算分析,并初步仿真了蓝宝石光纤光栅的光谱特性。但由于蓝宝石光纤的传输模式众多,远超过常规阶跃型石英多模光纤,

在仿真时难以准确计算出所有的模式耦合。另一方面,受蓝宝石光纤制备工艺影响,光纤直径存在波动,传输模式的稳定性较差。上述因素均会影响到蓝宝石光纤光栅的光谱特性,使得仿真结果与实验结果存在一定差距。

2 飞秒激光制备蓝宝石光纤光栅

蓝宝石光纤作为单晶材料,没有光敏性。因此,无法利用常规连续紫外激光在单晶蓝宝石光纤中写入光栅。飞秒激光脉冲具有极短脉冲持续时间和极高峰值功率,经聚焦后在焦点处会引起光纤材料对激光的非线性吸收(非线性场电离和雪崩电离),导致产生大量的电子-离子等离子体,随着等离子体的结合和能量的消耗,光纤内部将形成永久性的折射率调制。因此,飞秒激光可以在几乎任何类型的光纤中诱

起折射率调制,如蓝宝石光纤、纯石英光纤等非光敏光纤。飞秒激光制备蓝宝石光纤光栅的方法主要有相位掩模板法、双光束干涉法、直写法三种。

2.1 飞秒激光相位掩模板法

2004 年,加拿大通信研究中心 Mihailov 等首次报道了利用飞秒激光相位掩模板扫描法制备的蓝宝石光纤光栅^[19-20]。实验装置如图 4(a) 所示,将波长 800 nm 的飞秒激光作为光源。利用压电装置驱动柱透镜相对光纤沿径向方向扫描,从而增大折射率调制面积,即增加折射率调制区域和光场的交叠积分。聚焦光

束通过周期 4.28 μm 的相位掩模板,在直径为 150 μm 的蓝宝石光纤中刻写了周期为 2.14 μm 的五阶蓝宝石光纤光栅。如图 4(b) 所示,这种方法引入的折射率调制区均匀且几乎覆盖光纤截面,最终获得 8% 的反射率。如图 4(c) 所示,蓝宝石光纤光栅的 3 dB 带宽为 6 nm。2018 年,吉林大学于永森等^[40]利用该方法在直径 250 μm 的蓝宝石光纤中成功写入可覆盖光纤截面 60% 的折射率调制区,获得高达 3.0 dB 的透射谐振深度。

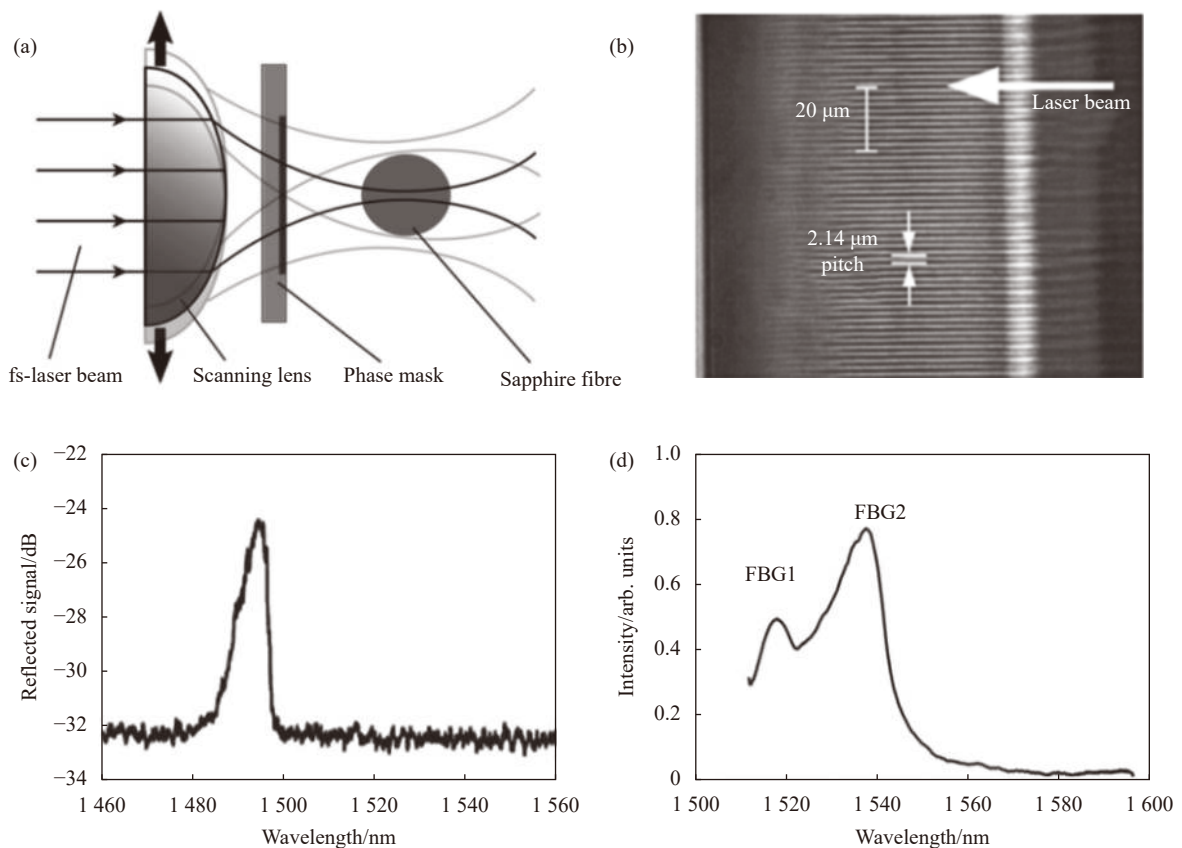


图 4 相位掩模板法制备蓝宝石光纤光栅。(a) 装置图;(b) 形貌图;(c) 单个光栅和 (d) 光栅阵列的反射谱^[19,41]

Fig.4 SFBG inscribed through phase mask method. (a) Experimental setup; (b) Microscope image; Reflection spectrum of (c) single SFBG and (d) SFBG array^[19,41]

2009 年,德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Busch 等^[41]利用该方法在直径为 100 μm 的蓝宝石光纤中成功制备二阶蓝宝石光纤光栅。他们进一步利用两个不同周期的相位掩模板在单根蓝宝石光纤上成功制备两个不同中心波长的蓝宝石光纤光栅,反射谱如图 4(d) 所示。

飞秒激光相位掩模板扫描法具有装置简单、制备效率高等优点,并且在蓝宝石光纤内诱起的折射率调制区面积大而均匀,写制的光栅反射率高。然而,受限于相位掩模板周期固定,利用同一块掩模板只能制备单一波长的光栅,灵活性差,难以制备大规模复用的光栅阵列。

2.2 飞秒激光双光束干涉法

2013 年, 德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Elsmann 等^[21] 利用双光束干涉法成功解决了相位掩模板扫描法难以制备波分复用蓝宝石光纤光栅阵列的问题。装置如图 5(a) 所示, 光束经过相位掩模板后被分成 ±1 级衍射光, 两束衍射光经过反射镜会聚于蓝宝石光纤上形成干涉, 从而在蓝宝石光纤内诱起周期性折射率调制。通过调整相干光的夹角, 可以精确地控制光栅周期。其中, 通过移动柱透镜可以对蓝宝

石光纤进行径向扫描, 形成大面积折射率调制区, 可提高蓝宝石光纤光栅的反射率。他们利用该方法在直径 100 μm 的蓝宝石光纤上成功制备三支不同中心波长的一阶光栅, 反射谱如图 5(b) 所示。该方法具有较高的加工灵活性, 可以高效制备波分复用蓝宝石光纤光栅阵列。然而, 飞秒激光的脉宽极短, 相干长度仅几十微米, 要确保两路激光有效相干, 必须将光程差严格控制在相干长度以内, 这对写制装置的稳定性提出了极高的要求。

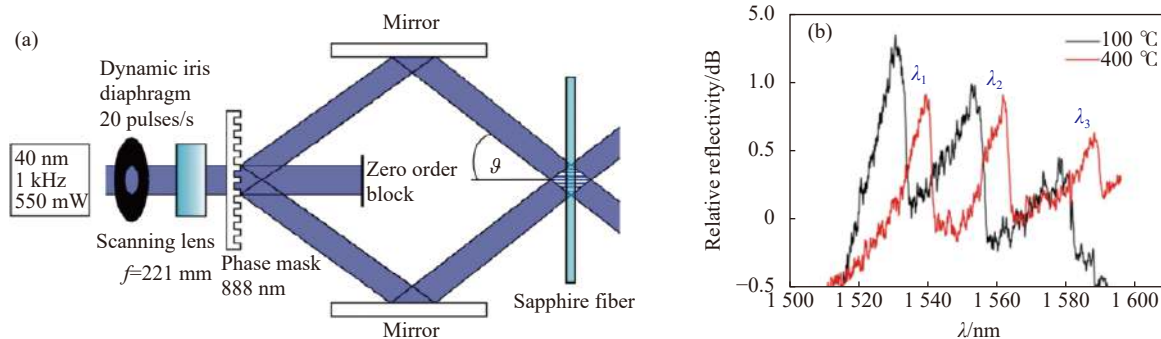


图 5 双光束干涉法制备蓝宝石光纤光栅。(a) 装置图; (b) 反射谱^[21]

Fig.5 SFBG inscribed through Talbot interferometer. (a) Schematic of experimental setup; (b) Reflection spectrum^[21]

2.3 飞秒激光直写法

飞秒激光直写法主要有逐点法、逐线法、螺线法等。光栅写制装置如图 6 所示, 其原理是通过精密位移平台来移动光纤, 同时对飞秒激光脉冲、激光快门进行同步控制, 在光纤内灵活写制一系列周期性的折射率调制点或线, 从而形成光栅。结合激光光束整形技术, 例如成丝效应等, 可以有效地增大单脉冲引入的折射率调制面积。此外, 还可以控制位移平台沿特定的轨迹移动, 形成多层结构或螺线结构等复杂图形, 可以灵活设定光栅调制区域, 从而制备出高质量的蓝宝石光纤光栅。因此, 飞秒激光直写法具有极高的灵活性, 不仅可以改变光栅的波长, 还可以通过设定调控折射率调制区域来获得所需的光栅谱型。

方法在单根蓝宝石光纤上写制了三支不同中心波长

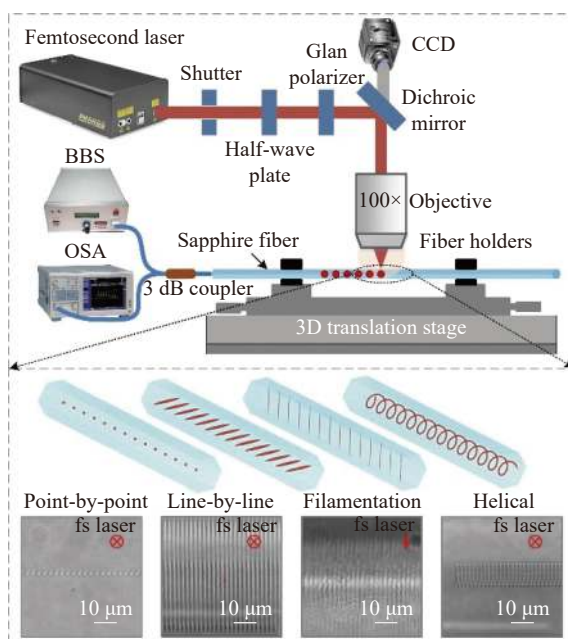


图 6 飞秒激光直写法制备蓝宝石光纤光栅装置图

Fig.6 Experimental setup of SFBG fabricated by femtosecond laser direct writing

2017 年, 美国弗吉尼亚理工学院王安波等^[22] 利用飞秒激光逐点法制备了蓝宝石光纤光栅。采用波长 780 nm、重频 500 Hz 的飞秒激光作为光源, 浸油物镜数值孔径为 1.25, 位移平台速度设置为 0.88 mm/s, 成功在直径 125 μm 的蓝宝石光纤中写入周期 1.776 μm、长度 2 mm 的四阶光栅, 制备过程仅需 2.5 s。利用该

的光栅。然而,如图 7(a)所示,由于物镜数值孔径高,单激光脉冲所形成的折射率调制面积十分有限($1.81\ \mu\text{m}\times 3.28\ \mu\text{m}$),仅获得了 0.6% 的光栅反射率。2022 年,吉林大学于永森等^[42]采用逐点法在蓝宝石光纤内写入了多个并联光栅,通过增加折射率调制面积解决了光栅反射率过低的问题。如图 7(b)所示,利

用上述方法在直径 $60\ \mu\text{m}$ 的蓝宝石光纤上并联集成 13 组二阶/三阶蓝宝石光栅,获得反射率 15%。然而,该方法需要制备多个光栅,导致制备效率下降。飞秒激光逐点法具有制备效率高、可灵活改变周期等优点,但是单个脉冲诱导的折射率调制面积过小,导致制备的光栅反射率过低。

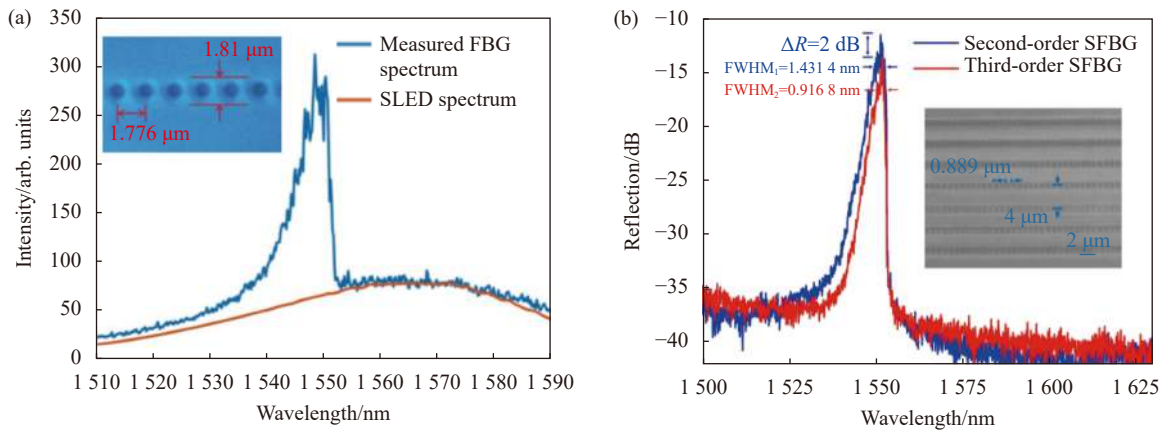


图 7 逐点法制备的 (a) 单个蓝宝石光纤光栅^[22] 和 (b) 并联集成蓝宝石光纤光栅^[42] 的光谱图及形貌图

Fig.7 Reflection spectrum and microscope image of (a) single SFBG^[22] and (b) parallel-integrated SFBG^[42] fabricated by femtosecond laser point-by-point method

2018 年,笔者团队首次提出了飞秒激光逐线刻写蓝宝石光纤光栅的新方法^[23]。通过多脉冲曝光形成折射率调制区,可以有效扩大折射率调制面积,从而获得更高反射率的蓝宝石光纤光栅。利用该方法在直径为 $60\ \mu\text{m}$ 的蓝宝石光纤中成功制备了 $50\ \mu\text{m}\times 5.94\ \mu\text{m}$ 的折射率调制区,获得的光栅反射率为 6.3%。2019 年,吉林大学于永森等^[43]利用该方法在直径 $60\ \mu\text{m}$ 的蓝宝石光纤中制备出反射率 15% 的三阶蓝宝石光

栅。2019 年,笔者团队利用多层逐线扫描法进一步增加折射率调制面积。如图 8(a)~(b)所示,制备了层间距 $5\ \mu\text{m}$ 的双层逐线光栅,反射率 34.1% ^[44]。此外,笔者团队在单根蓝宝石光纤上成功制备了 5 支不同中心波长的蓝宝石光纤光栅^[23]。因此,飞秒激光逐线法可以灵活写制不同周期的光纤光栅,还可以引入更大的折射率调制面积,获得更高的光栅反射率。但是,这种方法制备效率较低,制备一个光栅通常需要

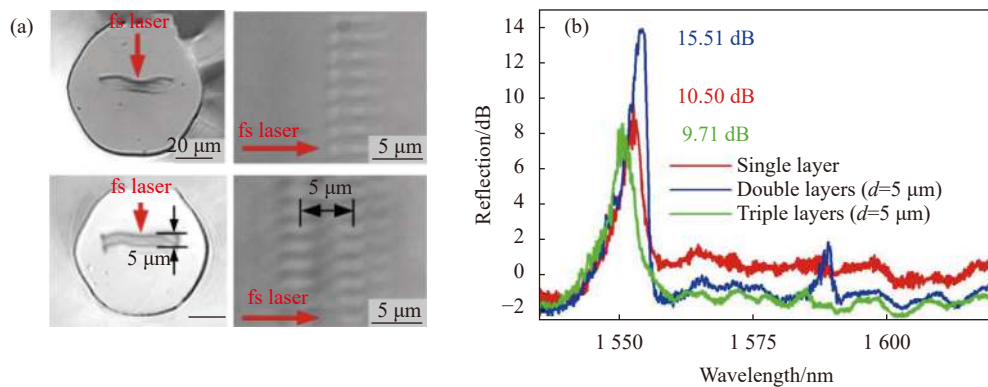


图 8 飞秒激光逐线法制备蓝宝石光纤光栅的 (a) 形貌图和 (b) 光谱图^[44]

Fig.8 (a) Microscope image and (b) reflection spectra of SFBG fabricated by femtosecond laser line-by-line inscription method^[44]

十几分钟。

2021 年, 笔者团队又提出利用飞秒激光成丝效应来高效制备蓝宝石光纤光栅, 即采用单个飞秒激光脉冲来写入线型折射率调制区, 克服了逐线刻写光栅效率低的问题。采用波长 514 nm、重频 200 kHz 的飞秒激光作为光源, 为了激发出飞秒激光成丝效应, 使用了低数值孔径 ($NA=0.7$) 空气物镜^[45]。如图 9(a) 所示, 通过优化脉冲能量和聚焦深度, 成功制备长度 90 μm 、宽度 1.4 μm 的折射率调制区。相比于常规逐线法, 这

种方法利用单个脉冲即可产生线型折射率调制区, 几乎贯穿蓝宝石光纤截面。光栅反射率提升至 2.3%, 虽然低于逐线法制备的蓝宝石光纤光栅, 但远高于常规逐点光栅的反射率, 而且极大地提高了光栅制备效率 (制备单个光栅仅需 1.1 s)。利用该方法在单根蓝宝石光纤上高效制备了 5 支不同中心波长的光栅, 如图 9(b) 所示。利用该方法有望制备大规模集成的蓝宝石光栅阵列。

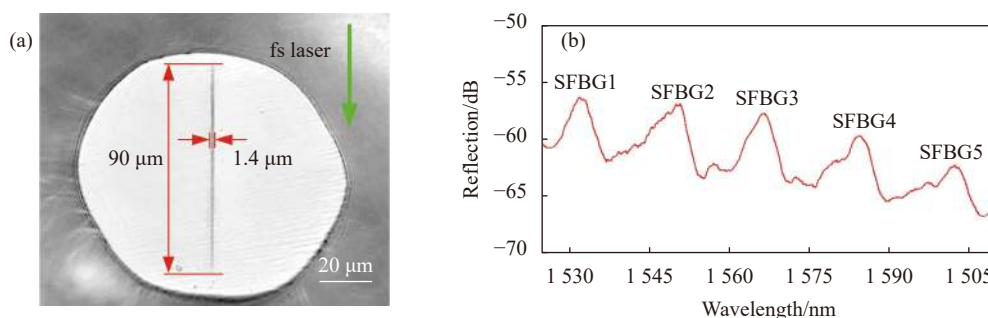


图 9 飞秒激光成丝效应制备蓝宝石光纤光栅^[45]。(a) 截面图; (b) SFBG 阵列反射光谱

Fig.9 SFBG inscribed by using femtosecond laser filamentation^[45]. (a) Cross-sectional view; (b) Reflection spectrum of the SFBG array

蓝宝石光纤光栅是典型的多模光纤光栅, 其反射峰 3 dB 带宽较宽, 不利于高精度传感。2021 年, 笔者团队首次利用飞秒激光在多模光纤内直写螺线型波导光栅结构, 实现了单模光栅^[46]。螺线结构在光纤内部可形成包层, 同时又具备周期性, 可以形成光栅。这种螺线型单模波导光栅具有反射率高和带宽小等优点。2021 年, 吉林大学于永森等^[47]利用该方法制备了螺线型的蓝宝石光纤光栅, 并证实这种光栅具有较好的抗弯性能。

率。利用飞秒激光成丝效应, 仅需要单个脉冲即可制备出线型折射率调制, 在提高反射率的同时也提高了制备效率。利用飞秒激光螺线直写法有望实现蓝宝石光纤光栅的单模工作, 即获得窄带的蓝宝石光栅反射谱。

综上, 表 2 为上述不同制备方法所获得的蓝宝石光纤光栅参数。相位掩模板法具有写制装置简单, 可形成大面积均匀调制、光栅反射率高、制备效率高等优点。但是受限于掩模板的周期, 该方法无法灵活制备不同波长的蓝宝石光栅。双光束干涉法可以制备不同波长的蓝宝石光栅, 但是对系统稳定性的要求极高。飞秒激光直写法具有高效灵活的优点。其中飞秒激光逐点法受限于物镜高数值孔径的影响, 制备的折射率调制区面积过小, 光栅反射率过低。利用飞秒激光逐线法或并联逐点法, 通过多脉冲曝光可以增加调制面积, 提高光栅反射率, 但是同时降低了制备效

表 2 不同方法制备的蓝宝石光纤光栅性能对比

Tab.2 Performance comparison of SFBGs which prepared by different methods

Fabrication method	Fiber diameter/ μm	Reflectivity	Band width/nm	Ref.
Phase mask	150	8%	6	[20]
Talbot interferometer	100	-	9.44	[21]
Point-by-point	125	0.6%	6	[22]
Parallel-integrated point-by-point	60	15%	0.92	[42]
Point-by-point (filamentation)	100	2.3%	8.84	[45]
Line-by-line	60	6.3%	6.08	[23]
Multiple-layer line-by-line	60	34.1%	1.74	[44]
Helical Bragg grating	30	40%	1.56	[47]

3 蓝宝石光纤光栅光谱特性优化

蓝宝石光纤光栅的反射峰带宽远大于常规单模光纤光栅, 严重影响了蓝宝石光纤光栅传感器的测量精度。针对这一难题, 国内外研究学者从滤除蓝宝石光纤光栅高阶模式、对蓝宝石光纤进行腐蚀处理、拉制蓝宝石衍生光纤和基于飞秒激光直写法制备螺旋型光纤光栅四个方面开展了研究。

3.1 蓝宝石光纤光栅的高阶模滤除

2006 年, 加拿大通信研究中心 Mihailov 等^[48]提出了一种基于锥形光纤的耦合方法, 如图 10(a) 所示,

采用锥形单模光纤与蓝宝石光纤光栅进行耦合对接。在锥形单模光纤中, 基模不再被束缚在纤芯内传输, 形成与锥形光纤直径相近的模场分布, 增加基模耦合效率, 抑制高阶模激发。采用直径为 50 μm 的锥形单模光纤与蓝宝石光纤光栅耦合, 可获得接近单模光纤光栅的 3 dB 带宽。2019 年, 他们进一步利用渐变折射率光纤滤除蓝宝石光纤光栅高阶模式。如图 10(b) 所示, 采用渐变折射率光纤熔接到单模光纤上形成光纤透镜, 匹配单模光纤模场和蓝宝石光纤模场, 获得 0.3 nm 的 3 dB 带宽, 这与此前使用锥形光纤耦合法的带宽相当^[49]。

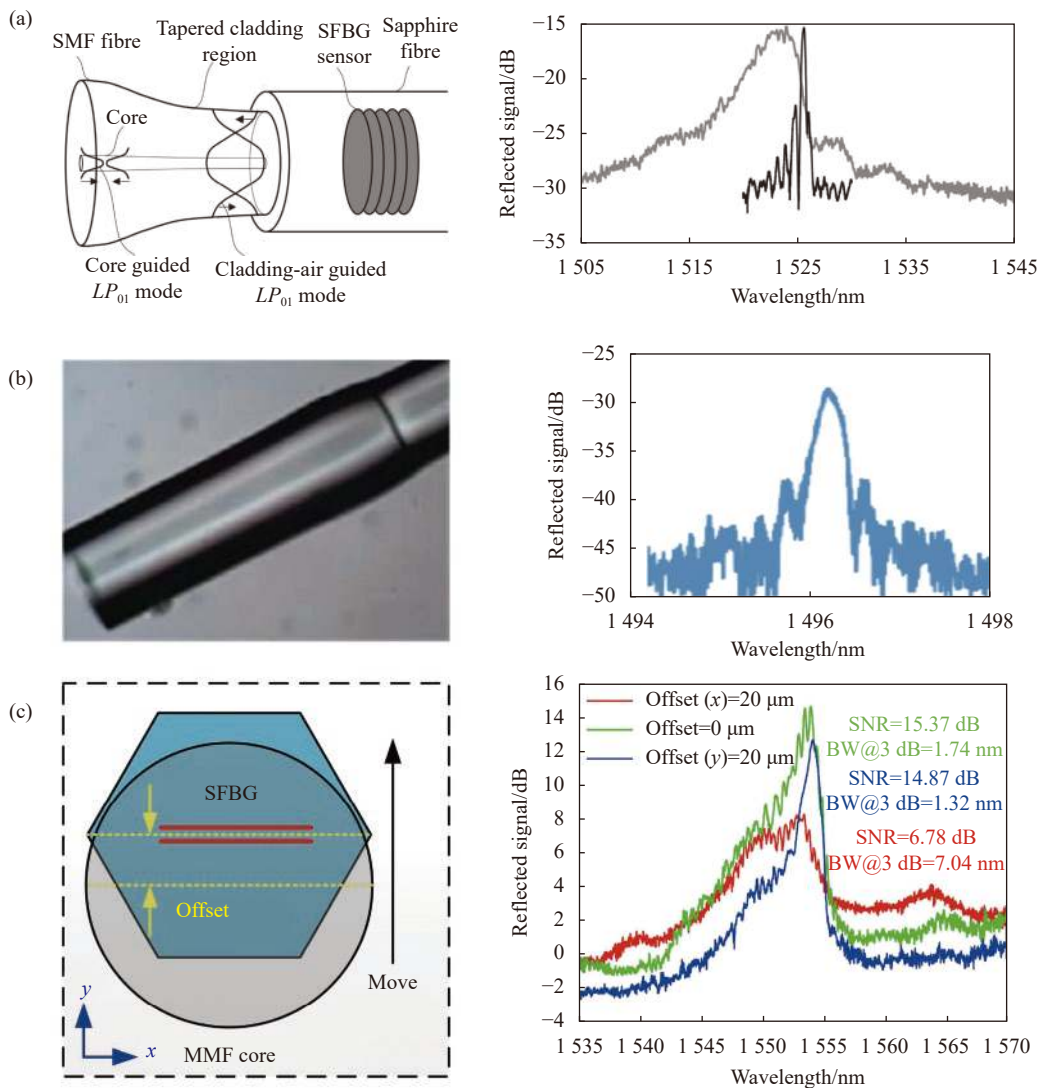


图 10 蓝宝石光纤光栅高阶模滤除方法及反射谱。(a) 锥形光纤耦合法^[48]; (b) 光纤透镜匹配法^[49]; (c) 偏置耦合法^[44]

Fig.10 High-order mode filtering method and reflection spectrum of SFBG. (a) Taper fiber coupling method^[48]; (b) Fiber lens matching method^[49]; (c) Offset-coupling method^[44]

2019 年,笔者团队提出一种基于偏置耦合的高阶模式滤除法^[44],结果表明:当蓝宝石光纤光栅和多模光纤耦合对准时,各个模式均得到有效激发,反射谱带宽较宽,如图 10(c) 中绿色曲线所示。当沿着即垂直于蓝宝石光纤光栅调制线方向偏置耦合时,能有效抑制高阶模式,如图 10(c) 中蓝色曲线所示,从而将 3 dB 带宽减小至 1.32 nm。采用这种方法仍可保证蓝宝石光纤光栅反射峰具有较高的信噪比。

上述三种方法均可以有效降低蓝宝石光纤光栅的反射谱带宽,但是都需要精确地调节蓝宝石光纤和传输光纤的相对位置,在实际使用过程中,耦合点容易受到环境影响而发生变动。2007 年,美国宾夕法尼亚州立大学 Yin 等^[50]提出弯曲蓝宝石光纤的方法来滤除蓝宝石光栅的高阶模式。该方法利用基模弯曲损耗小、高阶模弯曲损耗大的原理。通过设计合适的弯曲半径可以实现高阶模式的滤除。利用该方法成功将蓝宝石光纤光栅的反射谱带宽减小至~2 nm。这种模式滤除方法方便操作、易实现,但是该方法获得的蓝宝石光纤光栅反射谱旁瓣较高,并没有获得明显的窄带反射峰。

3.2 蓝宝石光纤光栅的热酸腐蚀

2015 年,美国弗吉尼亚理工学院王安波等^[51-52]设计了一种“风车”形蓝宝石光纤结构。与常规的蓝宝石光纤相比,这种“风车”结构具有独特优势。随着光纤直径的减少,蓝宝石光纤内传输模式数量也随之减少^[51]。通过设计并匹配合适的结构尺寸,可使高阶模损耗比基模高两个数量级以上,最终可实现单模传输^[52]。然而,这种“风车”形蓝宝石光纤目前仍停留在设计阶段。

另一方面,2017 年,他们又利用热酸腐蚀的方法成功制备了微米蓝宝石光纤,可以有效减少蓝宝石光纤中的传输模式数量^[53-54]。采用 98% 的硫酸和 85% 的磷酸,按摩尔比 3 : 1 进行混合,将蓝宝石光纤浸入 343 ℃ 的混合液中。在腐蚀过程中,随着光纤直径减小,蓝宝石光纤的传输模式数量也随之减少。最终在直径为 6.5 μm 的蓝宝石光纤实现了单模传输^[53]。2018 年,他们利用该方法实现了蓝宝石光纤光栅的少模化^[54]。如图 11 所示,光纤直径 9.6 μm 时,反射谱出现分立的窄带反射峰。但该方法制备的微纳蓝宝石光纤机械性能急剧下降,在实际使用时极易断裂。

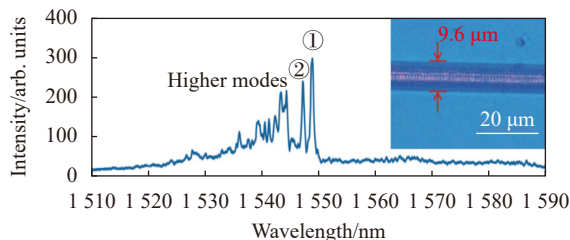


图 11 微纳蓝宝石光纤光栅的形貌和反射谱^[54]

Fig.11 Microscopic image and reflection spectrum of micro-SFBG^[54]

3.3 蓝宝石衍生光纤光栅

2012 年,美国克莱姆森大学 Ballato 等^[55]首次成功拉制出蓝宝石衍生光纤,解决了蓝宝石光纤没有包层易受外界环境影响及高度多模化的难题。制备蓝宝石衍生光纤时,首先将单晶蓝宝石光纤插入石英套管,再利用拉丝塔高温下拉制光纤,最终获得蓝宝石光纤为“芯”、石英为“包层”的光纤。上海大学庞拂飞等^[56-57]、台湾大学黄升龙等^[58]、台湾东华大学赖建智等^[59]也研制了蓝宝石衍生光纤,并成功制备蓝宝石衍生光纤马赫-曾德尔干涉仪^[56]、F-P 干涉仪^[57]和蓝宝石光纤激光器^[58-59]等。

2014 年,德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所的 Elsmann 等^[60]利用双光束干涉法,在纤芯直径 21 μm、包层直径 125 μm 的蓝宝石衍生光纤上成功制备光栅,反射光谱呈现出分立的窄带反射峰,这表明其模式数量大大减少。2015 年,加拿大通信研究中心 Mihailov 等利用飞秒激光相位掩模板法也成功制备了蓝宝石衍生光纤光栅^[61]。如图 12 所示,2021 年,吉林大学于永森等^[62]利用飞秒激光逐点法在纤芯直径 10 μm、包层直径 125 μm 的蓝宝石衍生光纤上成功制备出光栅,获得了接近单模光栅的 3 dB 带宽 (0.33 nm),其反射率高达 80%。

综上所述,蓝宝石衍生光纤的出现有望减少模式数量,并且石英包层能对光纤形成有效保护,但也正是因为石英包层的存在,使得蓝宝石衍生光纤光栅无法突破玻璃材料的固有限制^[7],使其无法应用于 1330 ℃ 及其以上的超高温恶劣环境中。制备蓝宝石光纤包层材料需要具备以下特点:(1)包层材料的折射率必须小于蓝宝石的折射率(允许在光纤包层边界处的全内反射),同时具有高熔点;(2)包层材料的热膨胀系数须与蓝宝石接近;(3)包层材料必须具有良好的热化学和机械稳定性,包括在纤芯-包层界面处的

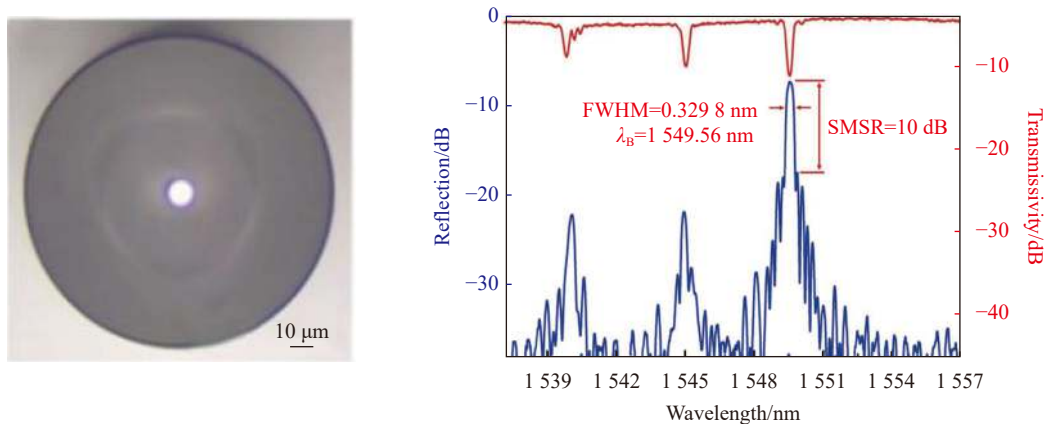


图 12 蓝宝石衍生光纤截面图和光栅光谱图^[62]

Fig.12 Microscopic image of sapphire derived fiber end face and reflection spectrum of SFBG^[62]

化学、结构和相平衡方面本质上稳定,以防止在恶劣环境下包层降解反应和扩散。国内外研究者们围绕蓝宝石光纤耐高温包层制备技术开展了大量研究工作,利用 $MgAl_2O_4$ ^[63-64]、 ZrO_2 ^[65]、多晶 Al_2O_3 ^[66]、BN^[67]、SiBCN^[68] 等材料制备了蓝宝石光纤的耐高温包层,改善了蓝宝石光纤的传输特性,能有效保护蓝宝石光纤,但目前尚未有在蓝宝石光纤光栅传感器上制备耐高温包层方面的报道。

3.4 单模蓝宝石光纤波导光栅

2021 年,笔者利用飞秒激光直写法首次在多模无芯光纤和蓝宝石光纤中成功制备螺线型单模光栅^[46]。这种螺线型光栅结构在围合区形成“纤芯”,即

实现了单模波导;另一方面,由于螺线结构具有一维周期性,可激发布拉格谐振,最终获得了窄带布拉格反射峰,即实现单模蓝宝石光纤光栅。如图 13(a)所示,螺线型蓝宝石光纤光栅的反射带宽仅为 0.53 nm,远小于多模蓝宝石光纤光栅。

2022 年,英国牛津大学 Fells 等^[69]提出一种凹陷型蓝宝石光纤波导光栅,成功在多模蓝宝石光纤内实现单模传输。这种凹陷型波导光栅包括两个部分:由多条损伤轨迹围合形成的凹陷型包层波导,其围合区域确保了单模传输,以及在凹陷型包层波导内写制的布拉格光栅。制备过程分为三步:制备下层波导结构、写制光栅、制备上层波导结构。如图 13(b)所示,

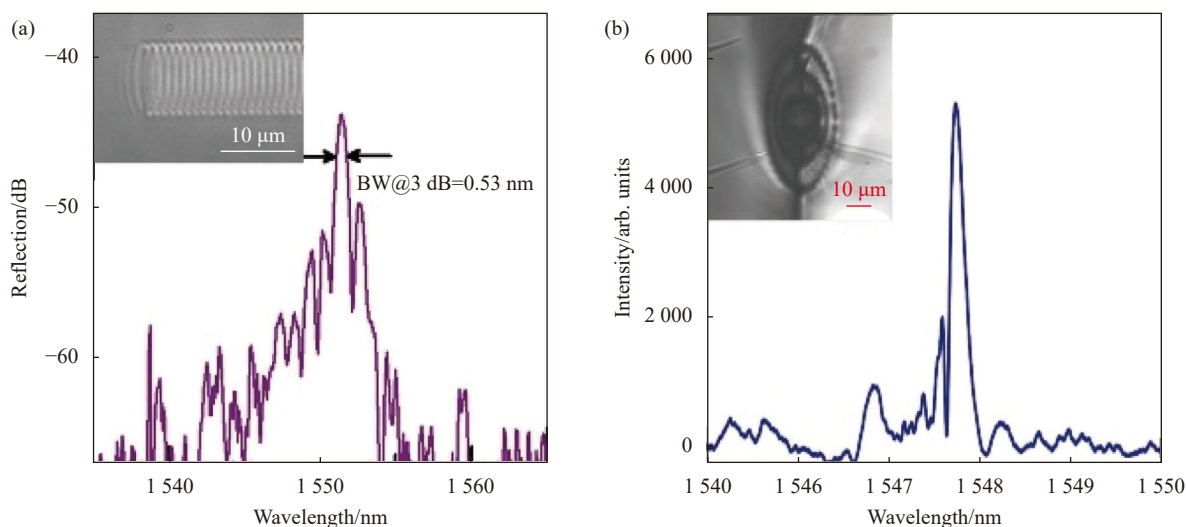


图 13 (a) 单模螺线型蓝宝石光纤光栅和 (b) 单模凹陷型蓝宝石波导光栅的形貌图和反射光谱^[69]

Fig.13 Microscopic images and reflection spectra of the (a) single-mode helical SFBG and (b) single-mode depressed sapphire waveguide Bragg grating^[69]

这种凹陷型蓝宝石光纤波导光栅的反射谱带宽仅为 0.50 nm, 具有较好的单模传输特性。

综上所述, 从表 3 中可以看出, 基于上述四种方式均可以有效地降低光栅反射谱带宽, 目前蓝宝石光纤光栅的反射带宽最窄为 0.3 nm。但这些方法还面临着一些难题, 如滤除蓝宝石光纤光栅高阶模式时需要精确地调节蓝宝石光纤和传输光纤的相对位置; 对

蓝宝石光纤进行腐蚀处理过后光纤机械性能急剧下降; 蓝宝石衍生光纤无法突破玻璃材料的温度上限等。蓝宝石光纤波导光栅的出现有望减少光栅的模式数量, 实现单模传输。考虑到制备效率和传输损耗, 这种方法只适用于构建长度为厘米级的单模蓝宝石光纤光栅。

表 3 蓝宝石光纤光栅反射谱带宽优化方法对比

Tab.3 Comparison of optimization methods for reflection spectrum bandwidth of SFBG

Optimization methods	3 dB bandwidth/nm	Ref.
High-order mode filtering methods	Taper fiber coupling	0.33 [48]
	Fiber lens matching method	0.30 [49]
	Offset-coupling	1.32 [44]
	Bent	<2 [50]
Wet-hot acid etching	Micro-SFBG	<6 [54]
Add glass cladding	Sapphire-derived FBG	0.33 [62]
Waveguide Bragg grating(WBG)	Helical SFBG	0.53 [46]
	Depressed sapphire WBG	~0.50 [69]

3.5 蓝宝石光纤光栅的光谱降噪

2007 年, 加拿大通信研究中心 Mihailov 等^[70]通过研究发现蓝宝石光纤的传输长度会影响蓝宝石光栅反射率。如图 14(a) 所示, 光栅距离耦合点 100 cm 和 20 cm 时, 其反射峰值相差 4~6 dB。2018 年, 德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Elsmann 等^[71]通过对比不同长度 (2 cm 和 100 cm) 的蓝宝石光纤透射谱发现, 在 0.5~2 μm 的宽谱范围内, 传输损耗约为 5 dB/m。

因此, 随着传输距离增加, 蓝宝石光纤光栅的反射谱逐步整体下降, 最终会被噪声淹没, 这严重影响了蓝宝石光纤光栅的实际应用。因此, 为了尽量提高蓝宝石光纤光栅的信噪比, 应尽可能提高反射率和降低噪声底。通过以下三种方法可降低噪声底的影响: (1) 建立参考谱, 去除光源背景噪声影响; (2) 将蓝宝石光纤的端面研磨成斜角, 降低端面反射; (3) 在蓝宝石光纤端面制备透镜, 降低端面反射。

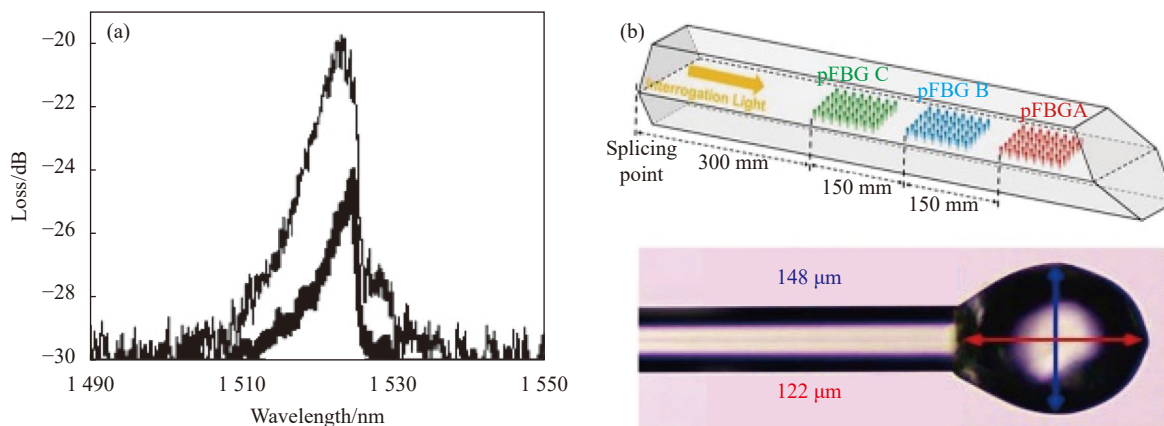


图 14 (a) 蓝宝石光纤传输长度对光栅反射光谱的影响^[70]; (b) 两种蓝宝石光纤端面减反处理方法^[72, 42]

Fig.14 (a) Effect of length of sapphire fiber on the reflection spectrum of SFBG^[70]; (b) Two methods of end face treatment of sapphire fiber^[72, 42]

德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Elsmann 等^[21]和美国弗吉尼亚理工学院王安波等^[72]在测试蓝宝石光纤光栅反射谱前建立了参考谱以去除光源背景噪声影响,该方法简单有效地提高了蓝宝石光纤光栅的信噪比。2022 年,王安波等研究了蓝宝石光纤端面角度研磨技术^[72]。如图 14(b) 所示,当蓝宝石光纤的末端为 30°斜面时,端面反射最小,在 30°下其反射谱与将蓝宝石光纤末端浸没在折射率匹配油中接近。因此,通过优化蓝宝石光纤末端斜面角度可以提高光栅的信噪比。

此外,美国能源部国家能源技术实验室刘波等^[73]和吉林大学于永森等^[42]研究了蓝宝石光纤端面透镜制备技术以降低端面反射。如图 14(b) 所示,通过在蓝宝石光纤端面制备直径大于蓝宝石光纤直径的球形透镜,激发的高阶模式在球形透镜内部会被散射掉,有效降低了反射光的强度。该方法可以将蓝宝石光纤光栅反射谱的信噪比显著提高至 22 dB。

因此,蓝宝石光纤的内部模式众多,导致蓝宝石

光纤光栅普遍具有较宽的反射谱带宽,且测得的反射率取决于光栅在蓝宝石光纤中的具体位置。因此,降低蓝宝石光纤光栅反射谱的 3 dB 带宽、提高信噪比是实现蓝宝石光栅的高精度波长解调的关键,有利于实现高精度的高温传感应用。

4 蓝宝石光纤光栅高温传感应用

鉴于蓝宝石光纤光栅拥有超高的耐温特性,研究人员开展了大量的高温传感研究和应用,测试了其高温温度和应变传感特性。

4.1 蓝宝石光纤光栅的高温响应

2004 年,加拿大通信研究中心 Mihailov 等^[19]研究了蓝宝石光纤光栅从室温至 1500 °C 的高温传感性能。结果表明,蓝宝石光纤光栅的反射率在 1500 °C 时没有明显下降,即光栅没有退化,指出了蓝宝石光纤光栅用于高温传感的可行性。2009 年,德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Busch 等^[41]进一步测试了蓝宝石光纤光栅在 1745 °C 的高温响应。如图 15(a) 所

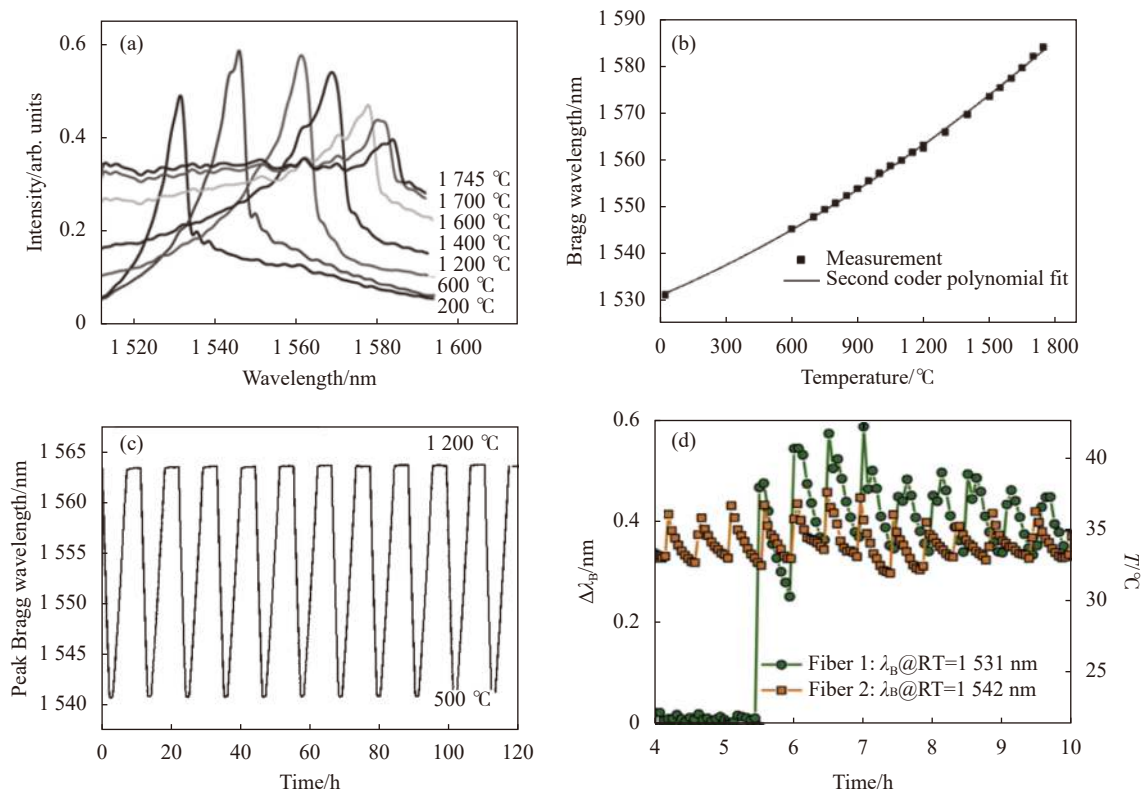


图 15 蓝宝石光纤光栅高温特性。(a) 在 22~1745 °C 的光栅反射谱;(b) 波长温度响应;(c) 高低温循环^[41];(d) 动态响应^[74]

Fig.15 High temperature characteristics of SFBG. (a) Reflection spectra at 22-1745 °C; (b) Temperature response of Bragg wavelength; (c) Temperature cycling test^[41]; (d) Dynamic response^[74]

示,在 1400 °C 以上,由于黑体辐射增加导致光谱的信噪比下降。另一方面,值得注意的是,1400 °C 以上,光栅反射峰强度出现明显下降,这预示着蓝宝石光纤光栅在 1400~1745 °C 下仅能短时间工作。

另一方面,他们利用二次多项式拟合研究光栅中心波长和温度的关系(图 15(b)),获得常温下的温度灵敏度为 20 pm/°C,1745 °C 下的温度灵敏度为 40 pm/°C,拟合误差小于 1 °C。他们还测试了蓝宝石光纤光栅的测温重复性。如图 15(c) 所示,经过多轮 1000 °C 退火后,中心波长显示出较高的稳定性,对光栅进行 500~1200 °C 的高低温循环试验,光栅中心波长和强度仍然较为稳定,将退火温度提高至 1745 °C,光栅在这个温度下使用时,波长会较为稳定。2015 年,他们进一步发现蓝宝石光纤光栅温度传感器在填充氩气的高温炉里可实现 1900 °C 的高温测试^[74],并初步研究了蓝宝石光纤光栅高温动态响应,如图 15(d) 所示,蓝宝石光纤光栅可响应 20 Hz 的温度变化。该研究成果有效推动了蓝宝石光纤光栅温度传感器的发展。

2018 年,笔者团队^[23]和吉林大学^[43]都报道了飞秒激光逐线法制备的蓝宝石光纤光栅的高温传感特性。随着温度升高,其温度灵敏度逐渐提高,在 1612 °C 时温度灵敏度达 36.5 pm/°C。为了提高拟合精度,利用指数函数对光栅中心波长-温度关系进行拟合,获得了极高的拟合优度 ($R^2 = 0.9992$)^[23]。

单个蓝宝石光纤光栅难以满足分布式高温传感需求。2013 年,德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Elsmann 等^[21]利用飞秒激光双光束干涉技术成功制备了蓝宝石光栅阵列,实现了 20~1200 °C 高温多点测量。2017 年,美国弗吉尼亚理工学院采用飞秒激光逐点法制备包含三个蓝宝石光纤光栅的阵列,研究发现 1400 °C 高温退火后,光栅反射率会增强约 5 倍^[22]。这可能是因为飞秒激光脉冲在晶体材料中引起的内应力和损伤在高温下被消除,从而提高了光栅的反射率。不过这种现象只出现在飞秒激光逐点法制备的蓝宝石光纤光栅中,可能是由于这种光栅原本的反射率极低,更为容易观察退火对光栅反射率的影响。如图 16(a) 和 16(b) 所示,2021 年,笔者团队采用飞秒激光逐点法结合成丝效应制备包含五个蓝宝石光栅的阵列并成功实现 1600 °C 准分布式高温传感^[45]。这是目前利用蓝宝石光纤光栅波分复用阵列进行分布式高温传感测点最多的实验报道。然而,受限光源带宽有限,难以继续增加测点数量。

2015 年,Elsmann 等^[74]通过拖动单个蓝宝石光纤光栅的方式,测量了 1500 °C 高温管式炉内的温场分布,如图 17 所示,检测误差小于 2 °C。仅使用单个蓝宝石光栅即可测量温度分布。然而,在测量过程中各个位置的温度不是同时获得的。另外,在某些应用环境,如测量高速飞行器的热防护结构等,需要直接将

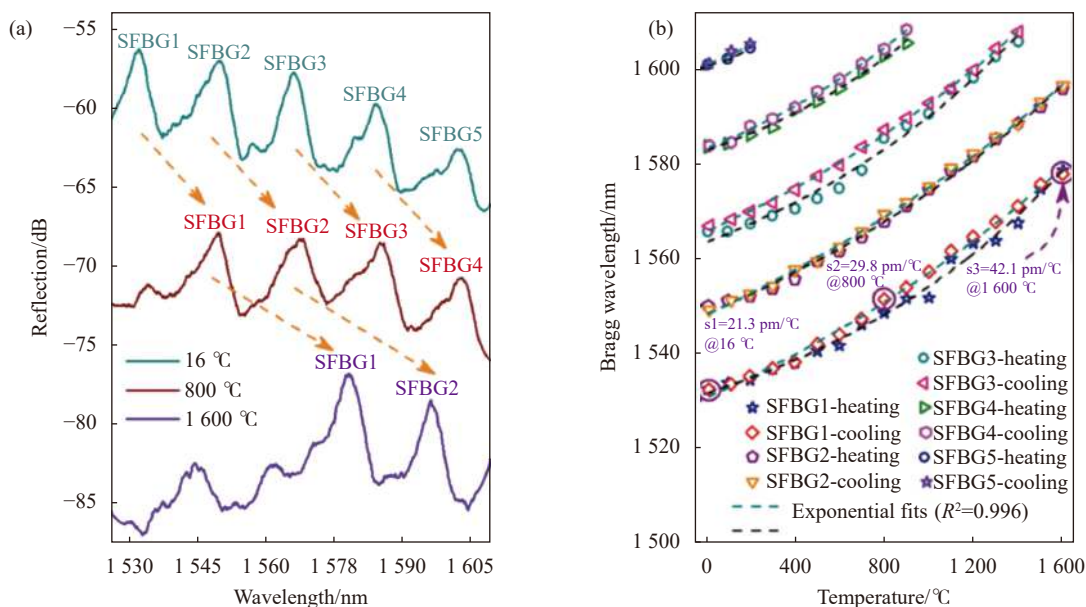


图 16 蓝宝石光纤光栅阵列的高温特性。(a) 在 16~1600 °C 的光栅反射谱;(b) 中心波长响应曲线^[45]

Fig.16 Distributed temperature sensing by using SFBGs array. (a) Reflection spectra at 16-1600 °C; (b) Temperature response of Bragg wavelength^[45]

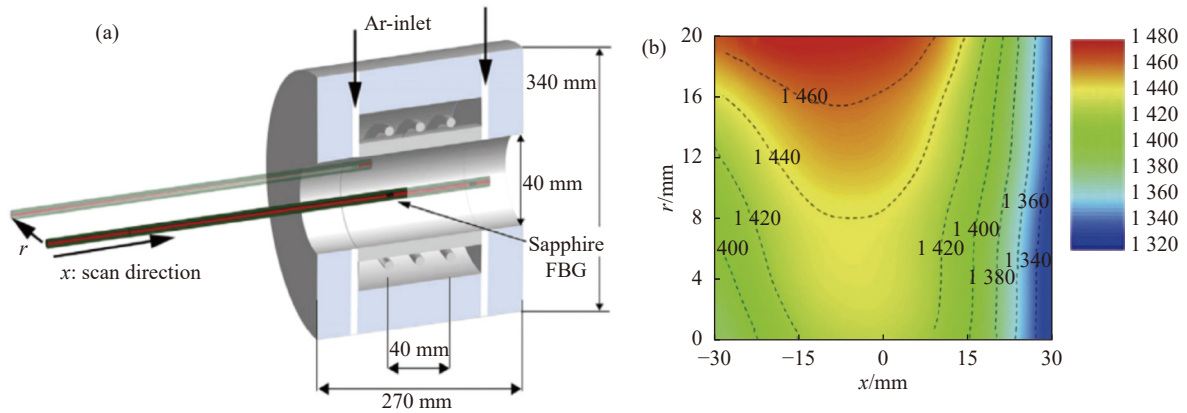


图 17 蓝宝石光纤光栅测炉内温场。(a) 装置图; (b) 温场分布图^[74]

Fig.17 Temperature field in furnace measured by using SFBG. (a) Schematic of experimental setup; (b) Temperature distribution^[74]

传感器布置在结构内部, 不具备拖动光纤的条件。

综上所述, 蓝宝石光纤光栅最高工作温度可达 1 900 °C, 在 1 400 °C 以上温度灵敏度超过 35 pm/°C。对温度和光栅中心波长的关系采用二次多项式或指数多项式拟合, 可获得极高拟合优度。基于蓝宝石光纤光栅波分复用阵列可实现有限测点的准分布式高温传感。

4.2 蓝宝石光纤光栅高温温度传感器

2018 年, 美国俄亥俄州立大学 Blue 等^[75] 发现蓝宝石光纤在 1 400 °C 下, 由于高温氧化作用, 蓝宝石光纤表面形成损伤斑, 其化学成分是某种形式的氢氧

化铝。这种损伤斑会导致蓝宝石光纤的传输损耗大幅增加, 严重影响光学传输性能。另外, 温度越高, 加热时间越长, 传输损耗会进一步增加。这些现象无疑会严重影响蓝宝石光纤光栅传感器在高温下长期稳定工作的性能。对此, 他们发现利用惰性气体隔绝蓝宝石光纤与外界空气, 在 1 400 °C 下蓝宝石光纤表面损伤斑会被完全消除。而且在 1 400 °C 下工作 200 h 后, 1 550 nm 波段的传输损耗仅小幅增加了 1 dB。这表明惰性气体可以用于抑制蓝宝石光纤高温损伤斑的产生。

2019 年, 美国弗吉尼亚理工学院王安波等^[76] 采用刚玉管对蓝宝石光纤光栅阵列进行封装, 如图 18(a)

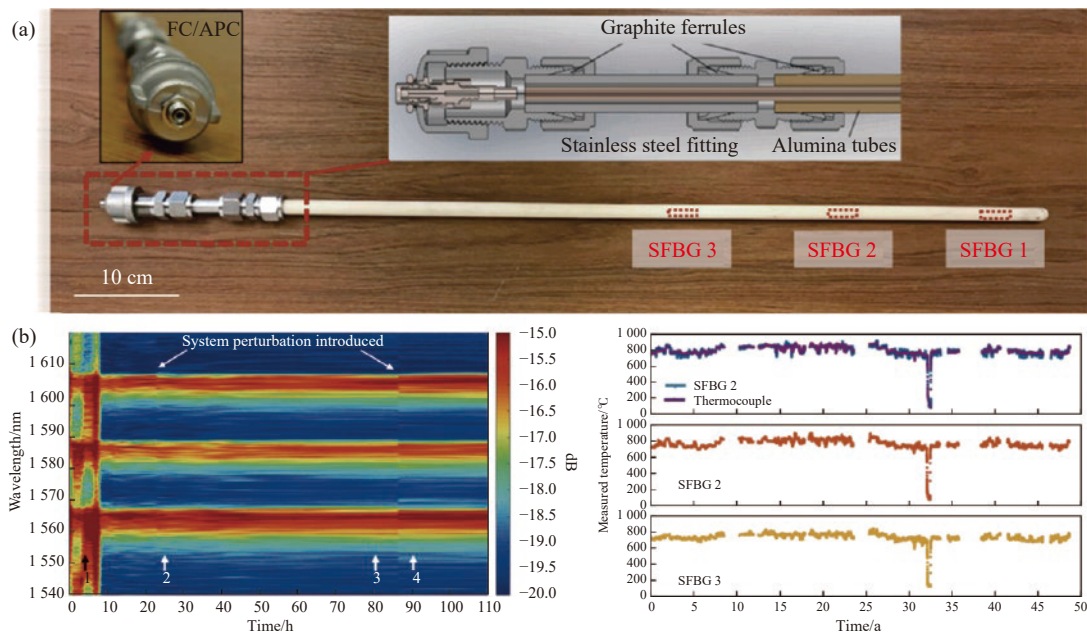


图 18 蓝宝石光纤光栅高温温度传感器。(a) 封装图; (b) 长期光谱稳定性和锅炉内温场分布^[76]

Fig.18 High temperature SFBG sensor. (a) Package diagram; (b) Long term spectral stability and temperature field distribution in boiler^[76]

所示,成功制备了一支实用的蓝宝石光纤光栅高温传感器。如图 18(b) 所示,该传感器在 1200 °C 下退火 110 h,完成标定校准,用于测试商用燃煤锅炉和燃气锅炉温场,完成了 40 天以上的长期稳定性测试。测量期间的最高温度达 950 °C,传感器的性能保持稳定,切实表明了蓝宝石光纤光栅高温传感器拥有良好的实用化前景。然而,采用该方法封装的蓝宝石光纤光栅传感器仍然无法在 1500 °C 以上长期稳定使用。

2022 年,笔者团队采用蓝宝石管和惰性气体对蓝宝石光纤光栅进行封装^[77],封装结构如图 19(a) 所示。实验结果表明,该方法有效解决了高温氧化导致的蓝宝石光纤表面损伤斑问题。如图 19(b) 所示,在 1600 °C 下,未采用惰性气体封装的蓝宝石光纤表面产生了大量损伤斑,采用惰性气体封装后损伤斑被完全消除。另一方面,利用梯度升温退火技术抑制了蓝宝石光纤表面微蚀刻线的形成。通过上述两个步骤避免传输损耗在高温下增大。因此,蓝宝石光纤光栅在 1600 °C 下能稳定工作 20 h,最高工作温度达 1800 °C。上述工作有力推动了蓝宝石光纤光栅高温传感器的实用化进程。

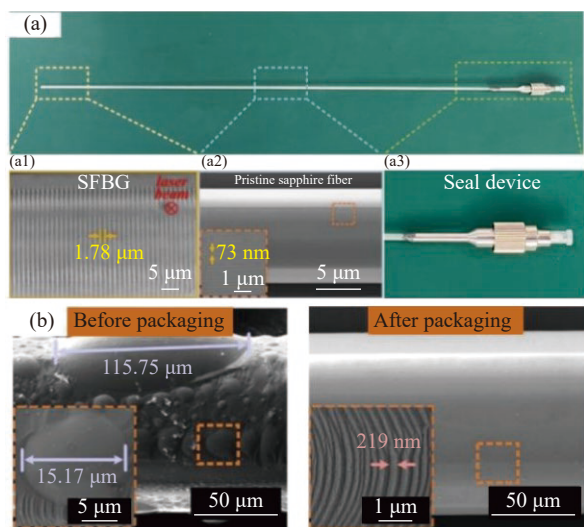


图 19 (a) 基于惰性气体封装的蓝宝石光纤光栅高温温度传感器;
(b) 1600 °C 退火后蓝宝石光纤表面形貌^[77]
Fig.19 (a) High temperature SFBG sensor based on inert gas packaging;
(b) Surface morphology of sapphire fiber annealed at 1600 °C^[77]

2022 年,德国联邦理工学院的 Eisermann 等^[78]进一步研究了蓝宝石光纤光栅高温传感器的精度和稳定性。由于模式在传输过程中耦合引起光栅反射峰

形状变化,导致蓝宝石光纤光栅的温度传感精度较差,稳定性不高。他们利用反射峰长波边缘追踪波长漂移来解决这个问题。采用国际单位制的标准温度对传感器进行校准,如图 20(a) 所示,传感器的不确定度在 1400 °C 以下为 10 °C,1600 °C 以上为 14 °C。此外,采用该传感器进行了 3 周共 25 轮的高低温循环测试,如图 20(b) 所示,最高温度达 1600 °C,稳定性为±8 °C,随后对比了试验前后传感器的标准温度读数差异为 (0.5±1.7) °C,十分接近经过严格校准的 B 型热电偶 (0.2±2.1) °C,这表明该传感器具有极高的测温精度和稳定性。

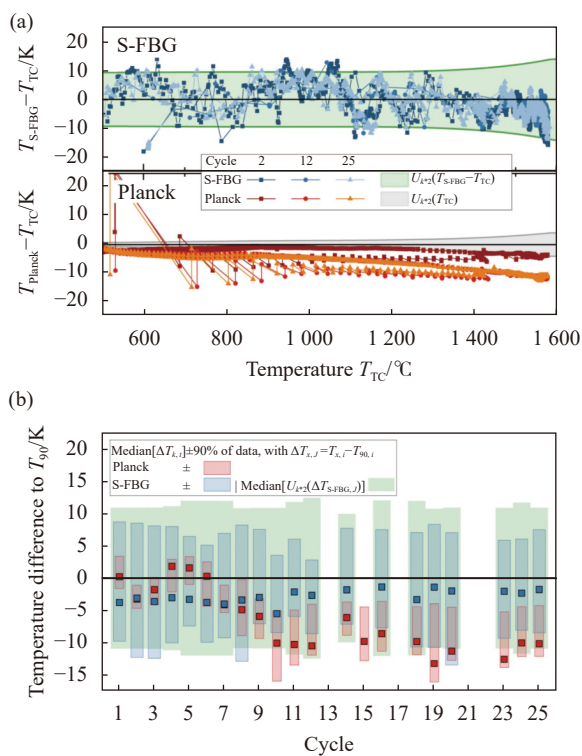


图 20 蓝宝石光纤光栅高温温度传感器的 (a) 测温精度和 (b) 不稳定性^[78]

Fig.20 (a) Temperature measurement accuracy and (b) uncertainty of high temperature SFBG sensor^[78]

综上所述,蓝宝石光纤光栅高温传感器在封装工艺、测温精度、稳定性和重复性等方面已有丰富的研究成果,较为接近实用化。

4.3 蓝宝石光纤光栅高温应变传感器

2010 年,加拿大通信研究中心 Mihailov 等^[79]首次提出了一种基于热辐射和蓝宝石光纤光栅的温度应变双参量传感器,具体通过探测热辐射和测量光栅

中心波长两个物理量实现温度与应变成耦。通过探测热辐射即可实现温度传感,通过测量光栅中心波长漂移即可测试应变。该蓝宝石光纤光栅传感器可用于 1288 °C 下温度应变同时测量。2018 年,吉林大学孙洪波等^[40, 43]研究了蓝宝石光纤光栅的应变响应特

性,从室温到 1600 °C,应变灵敏度从 1.42 pm/μ ϵ 增加到 1.45 pm/μ ϵ ,如图 21(a)所示,实验结果与理论计算吻合得较好。结果表明,蓝宝石光纤光栅在 1600 °C 可用于应变传感,有效地解决了石英光纤光栅在 700 °C 以上发生塑性变形无法测量应变的问题^[80]。

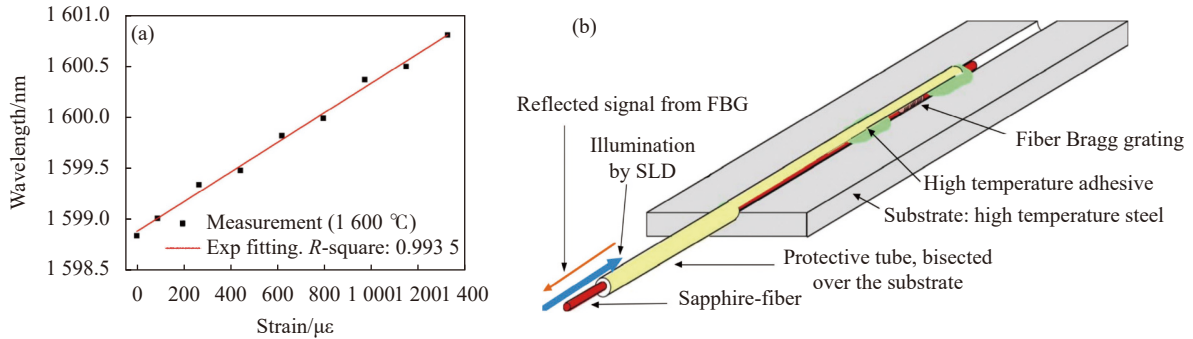


图 21 蓝宝石光纤光栅高温应变传感器。(a) 1600 °C 下应变响应曲线^[43]; (b) 结构图^[81]

Fig.21 High temperature strain sensor based on SFBG. (a) Strain response curve at 1600 °C^[43]; (b) Structure diagram^[81]

2016 年,德国耶拿莱布尼茨光子技术研究所 Habisreuther 等^[81]利用铬镍铁合金管、高温陶瓷胶、钢管和钢板等材料对蓝宝石光纤光栅高温应变传感器进行封装,如图 21(b)所示。他们研究了封装材料的热膨胀系数对传感器应变响应的影响,结果表明该传感器在 600 °C 下可稳定工作,应变分辨率为 10 μ ϵ ,量程为 1500 μ ϵ 。这推动了蓝宝石光纤光栅应变传感器的实用化进程,但仍然存在使用温度较低的问题。

综上所述,蓝宝石光纤光栅在 1600 °C 下不会发生塑性变形,可用于超高温环境下的应变传感。然而,蓝宝石光纤光栅高温传感器仍然处于起步阶段,关于传感器的封装结构、封装材料等研究仍然较少。另一方面,利用热辐射和光栅中心波长两个物理量解决温度-应变交叉敏感问题时,由于热辐射在低温时难以探测,仅能在 650 °C 以上奏效。此外,利用蓝宝石光纤光栅在高温环境下测试应变,仍然面临着温度和应变交叉敏感的困扰。

5 发展趋势分析

目前,关于蓝宝石光纤光栅的制备技术、高温传感特性、封装工艺的研究已取得了不少成果,逐步推动蓝宝石光纤光栅高温传感器走向实用化,满足 1000 °C 以上高温环境下的温度、应变测量需求。然

而,蓝宝石光纤光栅仍然面临以下挑战。

5.1 蓝宝石光纤的单模化

蓝宝石光纤是高度多模的光纤,目前提出的蓝宝石衍生光纤能减少传输模式的数量,但由于玻璃包层限制了测温上限,采用其他具有更高温度的材料制备蓝宝石光纤包层,如铝酸镁、氮化硼、二氧化锆等,存在着包层折射率高于蓝宝石光纤材料导致无法稳定传输光波、热膨胀系数不匹配导致高温下包层剥离、高温下包层材料的热力学性质不稳定等各种原因^[82]。另一方面,通过热酸腐蚀获得的微纳蓝宝石光纤可以减少蓝宝石光纤的传输模式,但是机械强度大幅下降,不利于工程应用^[53-54]。基于辐照改性技术降低蓝宝石光纤外围折射率实现单模化是一个极具前景的方案,然而该方法需要用到中子源等核设施^[83-84]。目前仍然没有形成实用化的单模蓝宝石光纤商业产品。

5.2 蓝宝石光纤光栅的高精度波长寻峰

蓝宝石光纤的多模工作特性导致光栅反射峰呈现出明显的展宽,且谱型不平滑。为了实现高精度寻峰,研究人员通过采集多个光谱并平均处理,然后采用光滑曲线对反射光谱进行拟合,进而寻峰^[72]。通过上述方式实现了蓝宝石光纤光栅的有效寻峰,但寻峰精度仍然低于常规单模石英光纤光栅。另一方面,蓝宝石光纤光栅的模式众多,易受环境影响导致谱型出

现变化,影响光谱稳定性。因此,为了提高蓝宝石光纤光栅反射光谱寻峰的精度和稳定性,最根本的方法是减少蓝宝石光纤的传输模式数量或者彻底实现单模化。

5.3 蓝宝石光纤光栅的大规模集成

蓝宝石光纤光栅具有较宽的反射峰带宽,构建波分复用阵列时,每个光栅占据较多的带宽资源,目前单个阵列最多只包含五个光栅,仅能实现十分有限的分布式传感^[45]。因此,需要降低蓝宝石光纤光栅反射谱的带宽才能增加单根光纤上的光栅数量。另一方面,可以考虑采用全同弱反射光栅阵列方案提高光栅集成数量,这要求采用光频域反射技术或光时域反射技术来解调光纤上不同位置光栅的反射谱。然而,这种方法无法有效对多模的全同弱反射蓝宝石光纤光栅光谱实现精准定位。因此,无论是采用波分复用光栅阵列还是全同弱反射光栅阵列,都需要实现蓝宝石光纤的单模化。

5.4 蓝宝石光纤光栅多参量同时传感

目前,关于蓝宝石光纤光栅应变传感器的成果还较为缺乏,仍然停留在高温应变响应特性的研究。为了推进蓝宝石光纤光栅高温应变传感器实用化,需要考虑到在超高温下蓝宝石光纤光栅如何和被测材料实现有效连接,保证材料应变能稳定传递至蓝宝石光纤光栅。另一方面,需要准确测量蓝宝石光纤光栅所在位置的实时温度变化,以实现温度-应变解耦。目前,虽然加拿大通信研究中心 Mihailov 等^[79]提出了测量热辐射和光栅中心波长实现温度-应变同时测量,但无法在低于 650 °C 环境下应用。德国耶拿光子技术研究所 Habisreuther 等^[81]研究了基于铬镍铁合金管的蓝宝石光纤光栅高温应变封装结构,但只能在低于 600 °C 环境中应用。

6 结 论

文中详细综述了蓝宝石光纤光栅的研究进展,首先介绍了蓝宝石光纤的特性,以及蓝宝石光纤和石英光纤的耦合效率、蓝宝石光纤光栅的光谱仿真研究。然后对比分析了目前利用飞秒激光制备蓝宝石光纤光栅现有方法的原理、光栅光谱质量、制备效率等,研究表明:采用飞秒激光逐点法和成丝效应在保证制备效率的同时也获得了较高反射率的蓝宝石光纤光

栅。进一步介绍了蓝宝石光纤光栅反射峰的优化方法,讨论了多种耦合方式用于减小反射峰带宽,以及分析了微纳蓝宝石光纤、蓝宝石衍生光纤等对降低反射峰带宽的有益意义。另一方面,采用飞秒激光螺旋线法制备单模蓝宝石光纤光栅可获得和单模石英光纤光栅相近的带宽。进一步介绍了端面烧球和端面研磨两种方式提高蓝宝石光纤光栅的信噪比。此外,介绍了蓝宝石光纤光栅温度传感特性、耐高温抗氧化封装工艺以及准分布式温度传感应用,又介绍了蓝宝石光纤光栅高温应变同时传感和应变封装工艺研究。目前,蓝宝石光纤光栅用于温度传感方面,有望在近期内实现工程应用,可以满足航空发动机、高声速飞行器等领域的高温传感需求。蓝宝石光纤光栅在高温应变传感方面距离实用化还有一段距离。最后,展望了蓝宝石光纤单模化是未来蓝宝石光纤光栅传感器发展的重要基础,进而进一步提高蓝宝石光纤光栅寻峰精度,实现大规模集成,从而实现分布式传感。

参考文献:

- [1] 陈卫,程礼,李全通.航空发动机监控技术[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [2] 柳迎春,李洪伟,李明.军用航空发动机状态监控与故障诊断技术[M].北京:国防工业出版社,2015.
- [3] Borrelli R, Riccio A, Tescione D, et al. Thermo-structural behaviour of an UHTC made nose cap of a reentry vehicle [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(3-4): 442-456.
- [4] 陈红波. ZrB₂基超高温陶瓷材料催化/氧化性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [5] 刘文学.核电站反应堆冷却剂系统在线仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [6] Liu Jianquan, Zhang Jiguo, Shi Jingda, et al. Analysis on the reactivity of reactor noncontrolled lifting rod based on RELAP5 [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2018, 34(4): 343-346, 355. (in Chinese)
- [7] Liao C R, Wang D N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing [J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(2): 97-101.
- [8] Ye L H, Shen Z P, Tong L M, et al. Optical properties of sapphire fiber under high temperature [C]//Advanced Materials and Devices for Sensing and Imaging, Proceedings of SPIE, 2002, 4919(1): 161Y.
- [9] Dils R R. High-temperature optical fiber thermometer [J].

- Journal of Applied Physics*, 1983, 54(3): 1198-1201.
- [10] Shen Y H, Tong L M, Wang Y Q, et al. Sapphire-fiber thermometer ranging from 20 to 1 800 °C [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(7): 1139-1143.
- [11] 王高, 徐兆勇, 周汉昌. 基于蓝宝石光纤传感器的瞬态高温测试及校准技术[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(4): 441-443.
- [12] Wang A, Gollapudi S, Murphy K A, et al. Sapphire-fiber-based intrinsic Fabry-Perot interferometer [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(14): 1021-1023.
- [13] Wang A, Gollapudi S, May R G, et al. Advances in sapphire-fiber-based intrinsic interferometric sensors [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(21): 1544-1546.
- [14] Wang J J, Dong B, Lally E, et al. Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 619-621.
- [15] Li W W, Liang T, Chen Y L, et al. Interface characteristics of sapphire direct bonding for high-temperature applications [J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2080.
- [16] Liu B, Yu Z H, Tian Z P, et al. Temperature dependence of sapphire fiber Raman scattering [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2041-2044.
- [17] Liu B, Yu Z H, Hill C, et al. Sapphire-fiber-based distributed high-temperature sensing system [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4405-4408.
- [18] Liu B, Buric M P, Chorpene B T, et al. Design and implementation of distributed ultra-high temperature sensing system with a single crystal fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(23): 5511-5520.
- [19] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, et al. Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2004, 16(11): 2505-2507.
- [20] Mihailov S J, Grobnc D, Walker R B, et al. Femtosecond laser inscribed high temperature fiber Bragg grating sensors [C]/Proceedings of SPIE, 2007, 6770: 677009.
- [21] Elsmann T, Habisreuther T, Graf A, et al. Inscription of first-order sapphire Bragg gratings using 400 nm femtosecond laser radiation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4591-4597.
- [22] Yang S, Hu D, Wang A B. Point-by-point fabrication and characterization of sapphire fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4219-4222.
- [23] Xu X Z, He J, Liao C R, et al. Sapphire fiber Bragg gratings inscribed with a femtosecond laser line-by-line scanning technique [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4562-4565.
- [24] Phomsakha V, Chang R, Djeu N. Novel implementation of laser heated pedestal growth for the rapid drawing of sapphire fibers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(12): 3860-3861.
- [25] 郝晓剑. 瞬态表面高温测量与动态校准技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- [26] WAFER DICING. Sapphire optical properties and sapphire optical transmission [EB/OL]. [2022-09-29]. <https://valleydesign.com/sapppic.html>.
- [27] Tong L M, Shen Y H, Chen F M, et al. Plastic bending of sapphire fibers for infrared sensing and power-delivery applications [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(4): 494-501.
- [28] Micromaterials. LHPG Sapphire Fibers[DB/OL]. (2019-09-10) [2022-09-29]. <http://www.micromaterialsinc.com/specsFiber.html>.
- [29] 廖延彪, 黎敏, 张敏, 等. 光纤传感技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [30] Mihailov S J. Ultrafast laser inscribed fiber Bragg gratings for sensing applications [C]/SPIE Commercial + Scientific Sensing & Imaging, 2016, 9852: 98520P.
- [31] Malitson I H, Murphy F V, Rodney W S. Refractive index of synthetic sapphire [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1958, 48(1): 72-73.
- [32] Xu Xizhen. Research on the fabrication techniques and high-temperature sensing characteristics of sapphire fiber Bragg gratings[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019. (in Chinese)
- [33] 廖延彪. 光纤光学——原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [34] Mizunami T, Djambova T V, Niiho T, et al. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(2): 230-235.
- [35] 沈永行. 荧光测温与辐射测温一体化的蓝宝石光纤温度传感器[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [36] Mohammed W S, Mehta A, Johnson E G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 469-477.
- [37] Yu H G, Wang Y, Xu Q Y, et al. Characteristics of multimode fiber Bragg gratings and their influences on external-cavity semiconductor lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1903-1912.
- [38] Feng X X, Jiang Y, Xie S R, et al. Higher-order mode suppression technique for multimode sapphire fiber external Fabry-Perot interferometers [J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 4759-4767.
- [39] Schmid M J, Müller, Mathias S. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 8087-8094.

- [40] Chen C, Zhang X Y, Yu Y S, et al. Femtosecond laser-inscribed high-order Bragg gratings in large-diameter sapphire fibers for high-temperature and strain sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3302-3308.
- [41] Busch M, Ecke W, Latka I, et al. Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibres for high-temperature sensor applications [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(11): 115301.
- [42] Guo Q, Zhang Z D, Zheng Z M, et al. Parallel-integrated sapphire fiber Bragg gratings probe sensor for high temperature sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(6): 5703-5708.
- [43] Guo Q, Yu Y S, Zheng Z M, et al. Femtosecond laser inscribed sapphire fiber Bragg grating for high temperature and strain sensing [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2019, 18: 208-211.
- [44] Xu X Z, He J, Liao C R, et al. Multi-layer, offset-coupled sapphire fiber Bragg gratings for high-temperature measurements [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4211-4214.
- [45] Xu X Z, He J, He J, et al. Efficient point-by-point Bragg grating inscription in sapphire fiber using femtosecond laser filaments [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2742-2745.
- [46] He J, He J, Xu X Z, et al. Single-mode helical Bragg grating waveguide created in a multimode coreless fiber by femtosecond laser direct writing [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 2052-2059.
- [47] Guo Q, Liu S R, Pan X P, et al. Femtosecond laser inscribed helical sapphire fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4836-4839.
- [48] Grobnc D, Mihailov S J, Ding H, et al. Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fiber Bragg grating sensor with tapered fibers [C]//Bruges, Belgium-deadline Past, International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [49] Ding H M, Grobnc D, Hnatovsky C, et al. Sapphire fiber Bragg grating coupled with graded-index fiber lens [C]//2019 Photonics North (PN), 2019.
- [50] Zhan C, Kim J H, Yin S, et al. High temperature sensing using higher-order-mode rejected sapphire fiber gratings [J]. *Optical Memory & Neural Networks*, 2007, 16(4): 204-210.
- [51] Cheng Y J, Hill C, Liu B, et al. Modal reduction in single crystal sapphire optical fiber [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(10): 107103.
- [52] Cheng Y J, Hill C, Liu B, et al. Design and analysis of large-core single-mode windmill single crystal sapphire optical fiber [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(6): 066101.
- [53] Hill C, Homa D, Yu Z H, et al. Single mode air-clad single crystal sapphire optical fiber [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(5): 473.
- [54] Yang S, Homa D, Pickrell G, et al. Fiber Bragg grating fabricated in micro-single-crystal sapphire fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 62-65.
- [55] Dragic P, Hawkins T, Foy P, et al. Sapphire-derived all-glass optical fibers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(9): 629-635.
- [56] Xu J, Liu H H, Pang F F, et al. Cascaded Mach-Zehnder interferometers in crystallized sapphire-derived fiber for temperature-insensitive filters [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1406-1413.
- [57] Liu H, Pang F, Hong L, et al. Crystallization-induced refractive index modulation on sapphire-derived fiber for ultrahigh temperature sensing [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6201-6209.
- [58] Wang S C, Yang T I, Jheng D Y, et al. Broadband and high-brightness light source: glass-clad Ti: sapphire crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5594-5597.
- [59] Lai C C, Lo C Y, Nguyen D H, et al. Atomically smooth hybrid crystalline-core glass-clad fibers for low-loss broadband wave guiding [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20089-20106.
- [60] Elsmann T, Lorenz A, Yazd N S, et al. High temperature sensing with fiber Bragg gratings in sapphire-derived all-glass optical fibers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26825-26833.
- [61] Grobnc D, Mihailov S J, Ballato J, et al. Type I and II Bragg gratings made with infrared femtosecond radiation in high and low alumina content aluminosilicate optical fibers [J]. *Optica*, 2015, 2(4): 313-322.
- [62] Guo Q, Jia Z X, Pan X P, et al. Sapphire-derived fiber Bragg gratings for high temperature sensing [J]. *Crystals*, 2021, 11(8): 946.
- [63] Jiang H M, Cao Z S, Yang R D, et al. Synthesis and characterization of spinel $MgAl_2O_4$ thin film as sapphire optical fiber cladding for high temperature applications [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 539: 81-87.
- [64] Bera S, Liu B, Picard Y N, et al. Fabrication and evaluation of sol-gel derived magnesium aluminate spinel-clad sapphire fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102801.
- [65] Wang J J, Lally E M, Wang X P, et al. ZrO_2 thin-film-based sapphire fiber temperature sensor [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2129-2134.
- [66] Shen Y H, Tong L M, Chen S Y. Performance stability of the sapphire fiber and cladding under high temperature [C]//Harsh Environment Sensors II. International Society for Optics and Photonics, 1999, 3852: 134-142.

- [67] Luan X R, Yu R, Zhang Q Q, et al. Boron nitride coating of sapphire optical fiber for high temperature sensing applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 363: 203-209.
- [68] Chen S, Zhang Q, Luan X G, et al. Sapphire optical fiber with SiBCN coating prepared by chemical vapor deposition for high-temperature sensing applications [J]. *Thin Solid Films*, 2020, 709: 138242.
- [69] Wang M H, Salter P S, Payne F P, et al. Single-mode sapphire fiber Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 15482-15494.
- [70] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, et al. Study of the sapphire Bragg gratings probed with multimode and single mode signal from fiber collimators and evanescent fiber tapers [C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6796: 67961J.
- [71] Elsmann T, Habisreuther T, Becker M, et al. Physical properties of fiber Bragg gratings in single crystalline sapphire fibers[C]//Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides and Materials, 2018: BM4A.2.
- [72] Shi G N, Shurtz R, Pickrell G, et al. Point-by-point inscribed sapphire parallel fiber Bragg gratings in a fully multimode system for multiplexed high-temperature sensing [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4725-4727.
- [73] Buric M, Liu B, Huang S, et al. Modified single crystal fibers for distributed sensing applications [C]//SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2017.
- [74] Habisreuther T, Elsmann T, Pan Z W, et al. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 860-865.
- [75] Wilson B A, Petrie C M, Blue T E, et al. High-temperature effects on the light transmission through sapphire optical fiber [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 101(8): 3452-3459.
- [76] Yang S, Homa D, Heyl H, et al. Application of sapphire-fiber-Bragg-grating-based multi-point temperature sensor in boilers at a commercial power plant [J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3211.
- [77] He J, Xu X Z, Du B, et al. Stabilized ultra-high-temperature sensors based on inert gas-sealed sapphire fiber Bragg gratings [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(10): 12359-12366.
- [78] Eisermann R, Krenek S, Habisreuther T, et al. Metrological characterization of a high-temperature hybrid sensor using thermal radiation and calibrated sapphire fiber Bragg grating for process monitoring in harsh environments [J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 1034.
- [79] Mihailov S J, Grobnc D, Smelser C W. High-temperature multiparameter sensor based on sapphire fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2810-2812.
- [80] Ding Xudong, Zhang Yumin, Song Yanming, et al. Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106003. (in Chinese)
- [81] Habisreuther T, Elsmann T, Graf A, et al. High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 6802608.
- [82] Chen H, Buric M, Ohodnicki P R, et al. Review and perspective: Sapphire optical fiber cladding development for harsh environment sensing [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(1): 011102.
- [83] Wilson B A, Blue T E. Creation of an internal cladding in sapphire optical fiber using the ${}^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ reaction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(22): 7433-7439.
- [84] Wilson B A, Blue T E. Quasi-distributed temperature sensing using type-II fiber Bragg gratings in sapphire optical fiber to temperatures up to 1300°C [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(20): 8345-8351.