DOI:10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2026.0110

# 蓝宝石光纤布拉格光栅高温传感解调技术研究进展

张景威[1,2],覃志威[1,2],李卓达[1,2],常馨予[1,2],陈晓乐[1,2],白志勇[1,2],
徐锡镇[1,2],王义平[1,2],何 俊[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/广东省重点实验室,
深圳大学射频异质异构集成全国重点实验室,深圳 518060;
2. 广东省光纤传感技术粤港联合研究中心,深圳物联网光子器件与传感系统重点实验室,深圳 518060)

**摘要**:蓝宝石光纤布拉格光栅(SFBG)可在1 800 ℃以上实现原位、多点高精度测温,是航空发动机、核能与工业炉等极端环境监测的重要传感器。然而,蓝宝石光纤的强多模特性导致反射谱宽带、多峰叠加且对耦合与封装高度敏感,使其解调机理与传统石英光纤布拉格光栅(FBG)显著不同。本文围绕SFBG波长解调需求,系统梳理并对比光谱分析仪(OSA)阵列光谱仪直接测量及光学频域反射(OFDR)解调等技术路线,从解调速度、分辨率/精度、量程、复用能力与鲁棒性等关键指标总结代表性进展。进一步归纳提升信噪比与稳定性的工程与算法研究,包括模式滤除、模式减少、单模化与稳模、端面与耦合优化、高温封装、互相关算法及机器学习辅助算法等。最后从阵列波导光栅(AWG)小型化解调、扫频激光路线快速解调与干涉型高精度解调三方面展望SFBG解调系统的发展方向,为光纤高温及应变传感工程化实时解调的发展提供参考。

**关键词**:蓝宝石光纤;蓝宝石光纤布拉格光栅;波长解调;高温传感;光谱仪;信噪比;解调算法
**中图分类号**:T09 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-985X(XXXX)XX-0001-37

# Research Progress in High-Temperature Sensing Demodulation Technologies for Sapphire Fiber Bragg Gratings

*ZHANG Jingwei*[1,2], *QIN Zhiwei*[1,2], *LI Zhuoda*[1,2], *CHANG Xinyu*[1,2], *CHEN Xiaole*[1,2], *BAI Zhiyong*[1,2],
*XU Xizhen*[1,2], *WANG Yiping*[1,2], *HE Jun*[1,2]

(1. State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education/Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Shenzhen Key Laboratory of Photonic Devices and Sensing Systems for Internet of Things, Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fibre Sensors, Shenzhen 518060, China.)

**Abstract**: Sapphire fiber Bragg gratings (SFBG) can realize *in-situ*, multipoint, and high-accuracy temperature measurement above 1 800 ℃, making them important sensors for extreme-environment monitoring in aerospace engines, nuclear energy systems, and industrial furnaces. However, the strong multimode characteristics of sapphire fibers lead to broadband reflection spectra, overlapping multiple peaks, and high sensitivity to coupling and packaging conditions, making their demodulation mechanisms significantly different from those of conventional silica fiber Bragg grating (FBG). Focusing on the wavelength demodulation requirements of SFBG, this paper systematically reviews and compares technical routes including direct spectral measurement by optical spectrum analyzers (OSA) or array spectrometers, as well as optical

**收稿日期**:2026-06-04
**基金项目**:国家自然科学基金(62435012,62375176);"广东特支计划"科技创新青年拔尖人才(2024TQ08Z673,2024A1515010108)
**作者简介**:张景威(2002—),男,广东省人,硕士研究生。E-mail:2510232193@mails.szu.edu.cn
**通信作者**:徐锡镇,博士,副教授。E-mail:xizhenxu@szu.edu.cn

frequency domain reflectometry (OFDR) demodulation. Representative progress is summarized in terms of key performance indicators such as demodulation speed, resolution/accuracy, measurement range, multiplexing capability, and robustness. Engineering and algorithmic approaches for improving signal-to-noise ratio and stability are further summarized, including mode filtering, mode reduction, single-mode operation and mode stabilization, end-face and coupling optimization, high-temperature packaging, cross-correlation algorithms, and machine-learning-assisted algorithms. Finally, future development trends of SFBG demodulation systems are discussed from three perspectives: miniaturized demodulation based on arrayed waveguide gratings (AWG), high-speed demodulation based on swept-laser schemes, and high-precision demodulation based on interferometric methods. This review provides a reference for the engineering development of real-time demodulation in high-temperature and strain sensing using optical fibers.

**Key words**: sapphire fiber; sapphire fiber Bragg grating; wavelength demodulation; high-temperature sensing; spectrometer; signal-to-noise ratio; demodulation algorithm

# 0 引 言

在航空发动机、高速飞行器热防护结构及核反应堆等重大装备的服役过程中,关键部件通常处于高温、高应变、强振动及辐照等多物理场耦合环境中,相关极端工况对传感与监测提出了很高要求[1-2]。这些工况下若缺乏实时、可靠的健康监测数据支撑,将难以开展高可信的故障诊断、寿命评估与安全预警[3]。然而传统电学温度传感器如热电偶等在高温与辐照环境中易出现漂移、老化或长期稳定性不足等问题,而基于辐射测温的非接触方案又容易受发射率变化、校准误差及测量条件限制,难以在复杂结构内部实现原位、长期稳定测量[4-5]。

目前,光纤传感因具有抗电磁干扰、耐腐蚀、可远距离传输与易于多点或分布式测量等优势,成为极端环境测温的重要技术方向[6]。尤其是光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)具备波长编码、易复用及灵敏度高等特点,在工程监测中应用广泛[7]。然而,常规石英光纤受材料耐温极限及高温下结构弛豫、漂移等因素限制,难以在更高温度环境中实现长期稳定工作[8]。相比之下,由于蓝宝石材料具有更高的耐温上限与较好的化学稳定性,蓝宝石单晶光纤被认为是实现超高温原位测量的重要候选材料[9-10]。基于蓝宝石光纤制备的蓝宝石光纤布拉格光栅(sapphire fiber Bragg gratings, SFBG)进一步兼具高温适应性与波长型测量优势,为超高温、多点测温提供了新的实现路径[11]。

需要指出的是,SFBG的工程落地关键并不止于“能不能感”,更在于“能不能稳定、实时、精确地解调”。与单模石英FBG不同,蓝宝石光纤通常呈现显著多模传输特性,使SFBG反射谱常表现为宽带、多峰叠加,并且对耦合状态、光纤结构与模式分布较为敏感[12-13]。在高温与热循环条件下,模式能量分布及耦合条件的微小变化还可能引起谱形漂移或峰形重构,从而导致传统“单峰寻峰”或“质心”等解调方法误差放大,解调结果在长期稳定性与重复性方面面临挑战[14-15]。现有SFBG解调方案主要包括基于光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)的直接测量,电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)图像传感器阵列,互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)线阵图像传感器及光频域反射等不同技术路线;这些方法在速度、分辨率或复用能力上各具优势,但在超高温应用背景下仍普遍存在系统复杂度、现场鲁棒性、长时漂移抑制与复杂谱形适配等方面的瓶颈[7,16-17]。

本文从常见FBG解调的基本工作原理出发,为了突出SFBG与常规石英FBG在谱形和系统读出上的差异,本文先概述FBG解调的国内外研究进展,再重点讨论SFBG解调的研究进展并列举其典型应用,最后总结当前存在的主要问题并对未来发展方向进行讨论。

# 1 FBG解调技术

## 1.1 FBG传感原理

FBG是在光纤纤芯中沿轴向形成周期性折射率调制的无源敏感结构。当宽带光入射到光栅区域时,满足布拉格条件的特定窄带波长会被选择性反射,其中心波长即布拉格波长,满足$\lambda_B=2n_{\mathrm{eff}}\Lambda$,其中$n_{\mathrm{eff}}$为导模有效折射率,$\Lambda$为光栅周期[18]。因此,当外界应变或温度发生变化时,一方面会改变光栅周期,另一方面会通过

弹光效应或热光效应改变有效折射率,从而引起布拉格波长漂移;通过检测该漂移即可实现对应变、温度、压力等物理量的测量,如图 1 所示[18-20]。相较于传统电学传感器,FBG 具有抗电磁干扰、尺寸小、耐腐蚀、可远距离传输及易于波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)等优点,因此已广泛应用于结构健康监测、航空航天、能源装备和工业过程监测等领域[19-21]。

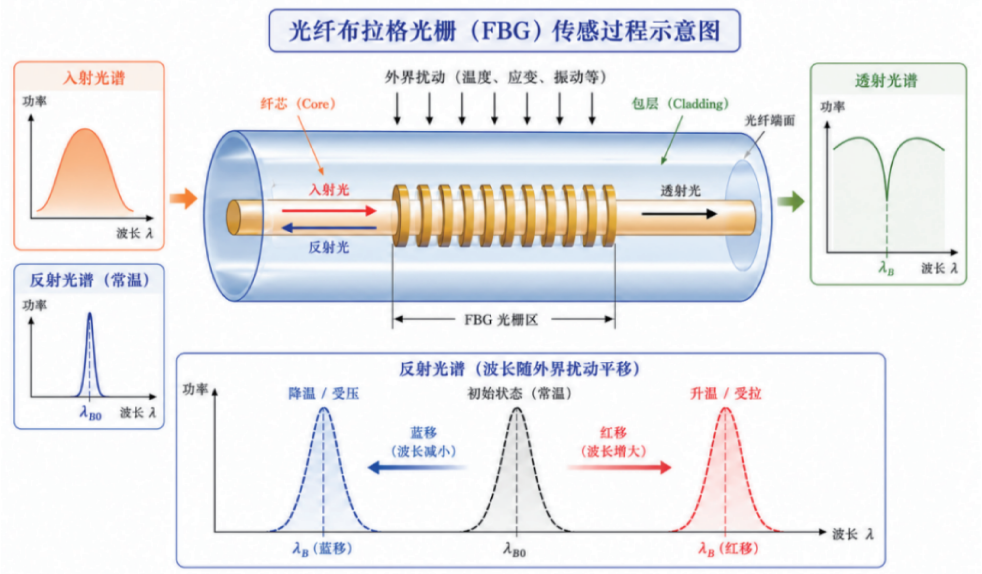



图 1　FBG 传感示意图

Fig. 1　Schematic diagram of an FBG sensor

### 1.2　FBG 解调基本原理

FBG 和 SFBG 解调都是从反射谱或透射谱中准确提取布拉格中心波长 $\lambda_B$ 及其漂移量 $\Delta\lambda$,并进一步依据传感灵敏度关系或标定模型,将波长变化映射为温度、应变、压力等外界物理量[17,19]。因此,所谓“解调”并不只是读取一个谱峰位置,而是包含了光谱获取、特征提取、波长标定与物理量反演等连续环节;其中,中心波长的稳定跟踪精度,通常直接决定了整个传感系统的测量性能上限[19,22]。

### 1.3　FBG 解调的评价指标

从评价指标上看,解调系统通常需要综合考察分辨率、精度、速度、解调范围、复用能力、鲁棒性及成本与体积等因素[17,19-20]。其中,分辨率描述系统可分辨的最小波长变化,常以 pm 表示,并可结合温度或应变灵敏度换算为℃或 με;精度则反映解调结果与真实值之间的一致程度,受到光谱分辨率、峰值提取算法、噪声、波长标定误差及长期漂移等多因素共同影响[22]。速度决定了解调系统适用于静态、准静态还是高速动态测量场景,而解调范围则体现系统能够解调的总波长范围;对于多点传感网络,还需进一步关注其对 WDM、时分复用(time division multiplexing, TDM)及其他复用架构的支持能力[19]。近年来,围绕高速和集成化解调的研究表明,基于阵列波导光栅(arrayed waveguide gratings, AWG)、光子集成电路(photonic integrated circuit, PIC)、扫频光源的方案,正在同时推动解调速度、可复用规模和系统小型化能力的提升[17,23],以辅助解调技术在极端环境中的实时原位健康监测。

### 1.4　FBG 典型解调技术

1)宽带光源与光谱仪直读式 FBG 解调方法

宽带光源与光谱仪直读式 FBG 解调系统以放大自发辐射宽带光源(amplified spontaneous emission, ASE)光栅,利用 OSA 获取完整反射或透射光谱,并通过跟踪中心波长及谱形特征的变化实现传感参数解调。在基于 ASE 与 OSA 的光谱直读式解调研究中,Yun 和 Kim 等[16]较早将直接测谱链路用于 FBG 阵列解调,验证了通过获取完整光谱并跟踪谱峰变化实现波长读取的可行性。随后,Jung 等[24]利用单个 FBG 与掺铒光纤放大器实现了应变与温度的同步测量,表明宽带光源结合光谱分析方法不仅能够完成中心波长解调,也可支持多参量测量。Lai 等[25]进一步提出了基于 ASE 的 FBG 传感系统,证明该类系统的优势主要体现在宽谱

覆盖和系统搭建便利性，因此更适合作为标定和算法验证平台。随着解调对象由常规石英FBG拓展到复杂谱形的高温光栅，ASE+OSA链路保留完整谱形信息的优势更加突出。Sugavanam等[26]在压缩感知研究中将OSA直读光谱作为参考基准，用于评估重建与解调方法的准确性，由于OSA保留完整反射谱，该系统常被用作重建算法的参考谱和波长标定基准。Wang等[27]在高温倾斜FBG研究中利用OSA完成了器件光谱表征，证明该方法能够有效反映高温条件下的谱形演化特征。Alla等[28]在级联SFBG高温传感研究中进一步给出了高温测谱与表征结果，表明ASE+OSA链路在SFBG制备验证和标定实验中仍被广泛采用。此外，Wang等[29]在少模FBG温度-应变同时测量的结果表明，完整反射谱的保留有助于模式特征分析和参数解耦；Zhang等[30]针对重叠谱FBG开展了解调研究，也说明当谱线重叠或畸变时，整体光谱信息对于后续特征提取和算法处理是必要的。Wang和Tang[31]通过混凝土、沥青材料上的温度波动/稳定性、FBG间接拉伸应变及串联LPFG液位实验，验证了FBG与长周期光纤光栅（long-period fiber grating，LPFG）传感器可在ASE+OSA解调平台下实现基础设施温度、应变和液位的多参量无损监测如表1所示。ASE+OSA方案由于能够直接提供反射谱或透射谱全貌，便于同时观察中心波长漂移、带宽变化及谱形畸变，长期被用作FBG/SFBG实验研究中的基准测量链路[25-27,29-30,32]。

不过，该方案也存在扫描速度较慢、体积较大、成本较高等局限，更适用于器件表征、机理分析和标定测量，而难以满足高速在线监测需求，因此工程化系统正逐步转向扫频激光、阵列探测式光谱仪及AWG/PIC等更高速、更紧凑的解调方案[26,32]。

2）基于阵列光谱仪的FBG解调方法

基于阵列光谱仪（CCD/CMOS线阵）的FBG波长解调方法，通常采用宽带光源照明、反射谱获取、色散映射到线阵像素，以及数字寻峰或拟合反演中心波长的技术路线，本质是将波长信息并行编码为空间像素信息，从而避免扫频或机械扫描器件所带来的系统复杂度。围绕这一思路，Simpson等[33]采用闪耀光纤布拉格光栅（BFBG）作为色散元件，并结合CCD线阵探测器构建了解调系统，实现了对WDM传感阵列的并行读取，同时对系统的带宽、漂移特性和信噪比等关键指标进行了系统分析，表明该类方法具有结构简单、成本较低和易于多通道扩展等特点。在此基础上，Zhou等[34]提出了基于叠加BFBG和CCD侧向探测的解调结构，通过改进色散方式与探测布局扩展了系统的动态范围和可用带宽，并将其用于WDM阵列的应变/温度同时测量，说明线阵光谱法在多参数复用传感中具有较好的应用潜力。随后，Li等[35]采用InGaAs光电二极管线阵替代传统CCD，并结合BFBG实现了适用于1.55 μm波段的FBG解调系统，从而推动了该类方法向近红外通信波段工程应用的发展，同时验证了线阵光谱解调方案在系统设计与性能优化方面的可行性（见表1）。对于SFBG，Tan等[32]在基于CCD光谱解调法的基础上针对SFBG原始反射谱提出滤波与拟合相结合的阵列解调方法，实现高温下的SFBG快速解调及SFBG阵列的快速解调。除系统结构的演进外，线阵光谱法的解调精度及其影响因素也受到了持续关注。Das和Chandra[36]将CCD光谱解调方案与光纤Mach-Zehnder干涉解调方案进行了直接对比，结果表明，在合理标定和信号处理条件下，CCD光谱仪同样能够获得接近干涉解调方案的高分辨波长测量能力，甚至达到亚皮米量级，这说明线阵光谱法的最终精度不仅取决于光谱仪本身的分辨率和像元尺寸，还与后续标定和解调算法密切相关。在器件实现路线方面，Liu等[37]提出了基于线性可变滤波器（linear variable filter，LVF）和线阵探测器的FBG解调结构，并对其进行了较系统的理论建模与仿真分析，结果表明，该方案在保留线阵并行探测优势的同时，为解调系统的小型化和集成化提供了新的实现路径。面向工程应用，Schröder等[38]在实际监测系统中采用了由成像衍射光栅和CCD/CMOS线阵构成的紧凑型光谱解调单元，实现了多个FBG的高速并行读取。相关结果表明，该系统可同时解调32个FBG，采样速率达到5 000次/s，体现了线阵光谱法在动态监测和工程部署中的应用潜力。不过，Buck等[39]指出，当光谱仪用于动态FBG信号采样时，若采样率与被测信号频率之间匹配不当，则容易产生混叠现象，从而导致频谱失真和解调误差，因此在线阵光谱法面向快速动态测量时，需要同时考虑采样率设计与抗混叠处理问题。此外，Negri等[40]对多种FBG谱峰检测算法进行了基准评测，并进一步引入神经网络方法改善峰值提取性能，结果表明，线阵光谱法的解调精度不仅受限于色散器件和探测器本身，还明显依赖于质心法、高斯拟合、相关法及智能算法等后端处理策略。

总体而言，阵列光谱仪路线的核心优势是把波长读取转化为像素并行采样，适合多通道和动态监

测[33-38]。但其解调性能同时受限于光谱分辨率、探测器像元尺寸、系统漂移、动态采样条件与谱峰提取算法等因素，因此在实际应用中通常需要结合硬件设计、标定补偿与信号处理算法进行综合优化[36,39-40]。

3）基于窄线宽可调光源/扫频激光的FBG解调方法

基于窄线宽可调光源或扫频激光的FBG解调技术，基本原理是通过周期性波长扫描将布拉格波长信息映射到时间域，再根据反射信号在时间轴上的峰位实现中心波长反演与多点传感读出。Yun等[16]最早采用波长扫频光纤激光对FBG传感阵列进行解调，证明了该方法能够利用时间间隔计数实现阵列传感器的有效读取，为扫频式FBG解调提供了早期实验基础。随后，Wang等[41]将波长扫频光纤激光用于FBG传感系统，实现了静态与动态信号的同步测量，表明该技术路线不仅适用于准静态监测，也具备较好的动态响应能力，具体如表1所示。为进一步提升扫频速度和实时测量能力，Jung等[42]将傅里叶域锁模（Fourier domain mode-locking，FDML）光源波长扫频激光引入FBG解调系统，并对其解调性能进行了系统表征，结果表明该结构可将扫频速率提升至kHz量级，从而显著增强系统的实时监测能力。在此基础上，Chen等[43]提出了基于频谱受限FDML光纤激光的多FBG解调方法，实现了多光栅阵列的快速读取，说明FDML方案在高速、高复用解调中具有明显优势。随着该技术向远距离和高复用方向发展，系统中的非理想因素及工程实现问题也逐渐受到关注。Liang等[44]针对基于FDML扫频激光的解调系统在长距离链路中可能出现的反射峰延迟乱序问题，提出了延迟失配delay-disorder识别与校准方法，实现了反射峰与对应FBG传感器之间的准确匹配，从而提高了复杂传输条件下的解调可靠性。Yamaguchi和Shinoda[45]则基于温度控制的FDML激光器构建了实时FBG测量系统，进一步验证了该类扫频结构在连续实时监测中的可行性。针对扫频非线性及时间-波长映射失真问题，Lee等[46]提出了基于热光调谐激光芯片的线性波长扫描解调系统，通过改善扫描线性度提高了解调精度和长期稳定性。此外，Borisov等[47]采用直接调谐普通激光二极管波长的方法测量FBG反射谱，将解调频率推进到100 kHz量级，显示出该路线在高速、低成本解调系统中的应用潜力。在工程应用方面，Chan等[48]构建了基于连续扫频激光和定制数据采集系统的FBG读出装置，并验证了其在极端环境下工作的可行性，体现了该技术较强的工程适应能力。

总体来看，基于窄线宽可调光源或扫频激光的FBG解调技术已经从早期的阵列读取方法发展为兼具高速响应、实时读出和高复用能力的重要技术路线[16,41-45]。该方法在动态测量、多点实时监测及电子系统集成方面具有明显优势[41-43,47-48]；但与此同时，扫频非线性、时间-波长映射误差、长距离传输导致的峰值乱序及复杂反射谱条件下的稳健识别问题，仍然是制约系统性能进一步提升的关键因素。因此，结合线性化驱动、参考标尺校准及后处理补偿算法来提高系统稳定性与鲁棒性，仍是该类解调技术的重要发展方向[44,46,48-49]。

4）基于滤波器的解调方法

滤波器型强度解调是FBG解调中常用的一类方法。该类方法的基本思想是利用具有特定谱响应的光学滤波器，将FBG布拉格波长漂移转换为光强变化，再通过光电探测器完成读出。与完整光谱重建方法相比，滤波器型解调通常具有结构简单、响应速度快、成本较低和易于小型化等优点，适合对动态响应和系统集成度要求较高的应用场景。根据滤波器谱形和工作机理的不同，该类方法主要包括边缘滤波器、薄膜滤波器和匹配滤波器等形式。

首先，边缘滤波器解调是FBG波长解调中典型的“波长-强度”转换方法，基本思想是利用具有单调谱斜率的滤波器，将布拉格波长漂移映射为输出光强变化，并通过参考臂与滤波臂的强度比值抑制光源功率波动和链路损耗影响[50-54]。Wang等[50]首先提出采用宏弯单模光纤作为低成本边缘滤波单元，实现了基于宏弯损耗谱的波长测量；随后又进一步将其用于比率式波长解调，并验证了该方案在FBG传感中的可行性[51]。Wu等[52]研究了边缘滤波器在比率式系统中的放置位置对解调性能的影响，指出系统拓扑会显著影响灵敏度与稳定性。Wang等[53]还分析了边缘滤波器的传输响应特性，讨论了滤波器斜率、线性区范围等因素对测量性能的影响；Rajan等[54]则从噪声角度出发，建立了边缘滤波比率式波长测量系统的噪声模型，揭示了光学噪声和电路噪声对分辨率的限制。近年来，边缘滤波技术逐步向器件多样化和系统集成化发展。Pereira等[55]采用石英与聚合物超短FBG作为边缘滤波器，并引入温度补偿方法以改善测量稳定性。Donisi等[56]提出基于全息软物质滤波器的光学解调系统，Beccherelli等[57]进一步展示了基于集成光学滤波器的FBG解调原型，反映出该技术向集成化方向的发展趋势。此外，Dey等[58]利用SMS光纤结构结合OTDR实现了边缘滤

波解调；Liang 等[59]提出基于 π 相移啁啾 FBG 的可调谐边缘滤波器；Guo 等[60]则研究了啁啾倾斜 FBG 在边缘滤波解调中的应用。总体来看，边缘滤波解调适用于小型化、低成本和高速强度读出场景，但量程与线性区受滤波器斜率直接限制[50-60]。

其次，匹配 FBG 解调是一种典型的光谱滤波-强度解调方法，基本思想是利用一只与传感 FBG 中心波长接近、谱形相似的参考光栅作为匹配滤波器，使两者反射谱重叠面积随 Bragg 波长漂移而变化，从而将波长信息转换为光功率或电压信号输出[61-63]。Jackson 等[61]最早通过 FBG 传感网络的复用实验验证了基于谱匹配进行读出的可行性。随后，Davis 和 Kersey[62]提出了匹配光纤解调技术，并将其用于 FBG 阵列解调，建立了匹配接收光栅解调的基本框架。Lobo Ribeiro 等[63]进一步对反射式匹配方案进行了理论分析，指出参考光栅与传感光栅之间存在可获得最大灵敏度的最优偏置条件，为后续线性化设计提供了依据。此后，Leiderman 等[64]对包括匹配滤波在内的多种 FBG 解调方法进行了归纳。为改善单匹配光栅方案量程有限、输出多值性及对功率波动敏感等问题，Chiang 等[65]提出了基于光功率检测的多点温度无关应变传感系统，Zhan 等[66]发展了多路复用反射式匹配解调方法，Wade 等[67]分析了透射式匹配结构的工作特性与灵敏度表现。在工程实现方面，Cui 等[68]通过优化反射式匹配条件与读出方法，实现了约 0. 3 pm 的分辨率和 500 kHz 的响应速度，显示出该技术在高速高分辨测量中的潜力。近期，Soman 等[69]又将匹配 FBG 方法用于导波结构健康监测，验证了其在远距离、温度变化环境和多点监测中的应用可行性。

最后，薄膜滤波器型 FBG 解调的基本原理，是利用薄膜器件的谱选择特性将 FBG 的 Bragg 波长漂移转换为输出光强或阵列光强分布变化，再结合光电探测与相应算法实现波长读出。围绕这一思路，现有研究主要形成了两类技术路线。其一是介质薄膜边缘滤波器方案，Ogawa 等[70]设计了一种采用光学边缘滤波器的无线便携式 FBG 解调系统，通过将波长漂移映射为透射光强变化，实现了结构紧凑、低功耗和便携化的传感读出，表明该方法在工程应用中具有较好的实用性，但其性能仍受线性工作区、光源功率波动和滤波器温漂等因素制约如表 1 所示。其二是基于 LVF 的解调方案。Wuchrer 等[71]较早提出基于滤波器的 FBG 解调方法，验证了通过滤波器谱响应将波长信息转换为强度分布信号的可行性；随后，Wuchrer 和 Härtling[72]进一步研制了用于光学波长漂移传感器的滤波式解调单元，展示了该类方案在结构紧凑和快速读出方面的应用潜力。Liu 等[37]针对基于 LVF 的 FBG 解调仪建立了理论模型与仿真框架，系统分析了滤波器响应、光斑分布及探测器参数对解调性能的影响，说明基于 LVF 与线阵探测器结合后可将光谱漂移映射为位置或强度分布变化，并通过质心等方法实现高分辨率波长反演如表 1 所示。此外，Kiesel 等[73]研制了紧凑、低成本且高分辨率的光学传感解调单元，证明了薄膜滤波读出方案在小型化和高精度测量方面的可行性；Schmidt 等[74]进一步实现了 pm 级波长漂移分辨，表明该类技术在低成本条件下仍具备较高分辨能力。总体而言，薄膜滤波器型 FBG 解调具有结构简单、体积小、易于集成和响应速度快等优点，在普通 FBG 传感系统中具有较强应用潜力，但其线性范围、环境稳定性及温漂补偿仍是后续优化的关键问题[37,70-74]。

5）基于干涉仪的 FBG 解调方法

基于干涉仪的 FBG 解调方法是一类典型的高分辨率相位型解调技术，基本思想是利用干涉结构中的光程差，将 FBG 布拉格波长的微小漂移转换为干涉相位、条纹频率或输出强度的变化，再通过相位解调、条纹分析或频域处理实现波长反演。与直接光谱检测方法相比，干涉仪解调对微小波长变化具有更高的灵敏度，适合动态应变、振动和高精度温度测量等场景。根据干涉结构不同，该类方法主要包括基于不平衡 Mach-Zehnder 干涉仪（UMZI）和 Michelson 干涉仪（MI）的解调系统，两者均可通过引入 3×3 耦合器、扫描滤波器、参考通道或片上集成结构来提高解调稳定性、多路复用能力和系统集成度。Kersey 等[75]首先提出基于干涉波长判别的高分辨率 FBG 应变传感方案，验证了干涉式检测对微小波长漂移的高灵敏度；随后又引入漂移补偿机制，提高了系统长期稳定性和工程可用性[76]。Brady 等[77]进一步表明，干涉型传感器与 FBG 传感器可在同一系统中实现同步解调，拓展了该方法在复合传感系统中的应用能力。在系统化和多路复用方面，Johnson 等[78]将 3×3 耦合器与扫描滤波器结合，实现了 FBG 的解调与复用。

首先，基于 UMZI 的 FBG 解调方法，是利用干涉仪臂长差将 FBG 布拉格波长微小漂移转换为相位变化或等效强度变化，从而实现高分辨率波长解调[75-77,79]。Todd 等[80]构建了扫描滤波器、UMZI 与 3×3 耦合器相结合的解调系统，提升了多栅读取能力和动态测量可行性如表 1 所示；Jiang[81]则针对热漂移等问题提出稳定化

3×3耦合器干涉结构，改善了系统解调稳定性。在高速测量方面，Perry等[82]实现了可同时获取动态信息与绝对波长信息的高速干涉型FBG解调仪，推动了该方法向高带宽工程应用发展。进一步地，Zhou等[83]提出UMZI方案，将波长漂移映射至射频相位或幅值特征，提高了系统灵敏度、稳定性和抗噪性能。Marin等[84]则在硅光平台上实现了集成式UMZI解调器，并结合主动相位解调完成FBG传感验证，表明该方法具有小型化、集成化和多通道扩展潜力。Roy等[49]将可调分布式反馈激光器（distributed feedback laser，DFB）激光与光纤Mach-Zehnder干涉仪相结合，在不依赖OSA的条件下实现了高分辨率FBG解调，表明引入干涉参考标尺是提高波长标定精度的有效途径。总体而言，UMZI型FBG解调技术已由早期高分辨率验证逐步发展到多路复用、高速动态测量和片上集成阶段，但热漂移、偏振敏感和相位衰落等问题仍是其工程化应用中需要重点解决的关键因素[79]。

其次，基于MI的FBG波长解调，本质上是将Bragg波长漂移转换为干涉相位或条纹频率变化，再通过相位解算或频域分析实现波长反演。Davis和Kersey[85]早期将光纤傅里叶变换光谱仪用于Bragg光栅波长编码信号检测，验证了扫描式Michelson/傅里叶变换光谱仪（Fourier transform spectrometer，FTS）架构用于高分辨率波长解调的可行性。随后，Rao等[86]提出双腔干涉解调方案，通过双光程差设计扩展了无模糊测量范围，减弱了单腔结构受$2\pi$相位周期限制的问题。在多点复用方面，Rochford和Dyer[87]采用Hilbert变换处理干涉图，在单接收干涉仪架构下实现了多只FBG的解复用，表明该方法具备阵列传感应用潜力。Gornall和Amarel[88]则进一步研究了Michelson干涉法在FBG绝对波长精确测量中的应用，验证了其工程可行性。此后，O'Mahoney等[89]提出短扫全光纤Michelson干涉方案，在较短扫描范围内实现了FBG阵列的高分辨率解调。在结构实现上，Flavin等[90]提出短扫描Michelson干涉式FBG阵列解调方法，通过扫描MI获取串联FBG阵列的复合干涉信号，并利用Hilbert变换获得解析信号相位，再在频域中分离不同光栅的信号，从而实现各FBG平均波长的绝对测量。近年该技术进一步向集成化和高精度发展：Huang等[91]报道了基于硅光MI的片上相位解调器，可用于WDM FBG传感；Li等[92]则提出可调MI与并联FBG结合的高精度解调结构，进一步提升了解调精度。

总体来看，MI FBG解调具有分辨率高、适合多点复用和易于与相位检测结合等优点，但仍受偏振衰落、环境扰动、扫描线性度与标定精度等因素影响，实际应用中通常需要结合参考通道、偏振控制与稳健信号处理方法以提高长期稳定性[85-92]。

6）基于法布里-珀罗器件的FBG解调方法

基于Fabry-Perot（FP）器件的FBG解调方法，是利用F-P腔的窄带透射/反射特性或周期性干涉谱作为波长判别函数，将FBG布拉格波长漂移转换为时间域峰位、扫描电压、光强变化或相位响应变化，再通过光电探测与标定实现波长反演。按照工作方式不同，该类方法可大致分为可调谐F-P滤波器扫描式解调、F-P标准具/光纤F-P干涉仪判别式解调，以及谐振锁定式高灵敏解调。前者通常通过压电陶瓷/锆钛酸铅驱动器（lead zirconium titanate，PZT）、微机电系统（micro-electro-mechanical systems，MEMS）等方式驱动F-P腔长连续变化，使窄带透射峰扫描待测FBG反射谱，从而根据峰值出现的时间或驱动电压确定布拉格波长。Ma等[93]构建了高分辨率、大量程的FBG解调系统，验证了扫描式FP滤波方案在宽范围波长检测中的有效性；Park和Song[94]进一步引入Fabry-Perot ITU波长参考谱线作为校准标尺，以降低扫描非线性带来的误差；Allan等[95]采用MEMS Fabry-Perot可调滤波器实现了复用FBG阵列解调，表明该方案在小型化、扫描速度和阵列复用方面具有较好的应用潜力（见表1）。然而，扫描式F-P解调的性能容易受到扫描非线性、迟滞、温漂和动态谱形畸变的影响，因此后续研究通常需要结合参考标定、非线性补偿、峰值检测优化或全谱算法来提高稳定性和鲁棒性[96-101]。

除扫描式结构外，光纤法布里-珀罗干涉仪（fiber Fabry-Perot interferometer，FFPI）、F-P标准具和F-P谐振腔也可作为FBG波长判别或参考解调单元。Kersey等[102]较早利用光纤Fabry-Perot滤波器构建复用型FBG应变传感系统，验证F-P波长滤波器用于FBG解调的可行性；Rao等[103]将FBG与FFPI结构结合，实现了应变、温度和振动等多参量测量；Wang等[104]利用多参考光栅对光纤F-P标准具进行标定，以降低标准具峰位漂移带来的解调误差。在动态测量方面，Díaz等[105]将in-line FPI用作边缘滤波器，实现了基于FBG的低成本高速动态信号解调，最高实现了5 kHz的解调速率，并在两类器件中分别获得了3.6和2.4 pm量级的分辨率，

说明该方法在动态监测场景中兼顾了速度与分辨率；Chow 等[106]首先提出利用二极管激光器电流调制对光纤 Fabry-Perot 传感器进行读出，展示了谐振式光纤器件在高灵敏检测中的应用潜力；随后又进一步提出针对 FBG F-P 谐振腔的相位敏感型解调方法，将 Pound-Drever-Hall（PDH）式相敏锁定引入 FBG 谐振腔解调中，从而提高了系统灵敏度与抗噪声能力，为高分辨率、小信号检测提供了新的实现路径[107]。

总体来看，F-P 类 FBG 解调方法具有结构紧凑、光电检测链路相对简单、分辨率较高和适合阵列复用或动态测量等优点；但其性能通常受 FP 腔扫描特性、周期性谱响应、工作点选择、量程解歧、腔长漂移和环境温度扰动等因素限制，因此实际系统中一般需要结合参考标尺、漂移补偿、锁定控制或算法校正来保证长期稳定运行[104-105,108]。

7）基于 AWG 的 FBG 解调方法

基于 AWG 的 FBG 解调方法，通常是将 FBG 反射谱输入 AWG 解复用器，利用不同输出通道的谱响应差异，把布拉格波长变化转换为多通道光强分布变化，再结合边缘滤波、相邻通道比值、质心法或标定拟合等算法实现连续波长反演，因此具有无需机械扫描、并行读出和响应速度较高等特点。Koch 等[109]较早对 AWG 用于 FBG 解调进行了实验与仿真研究，验证了 AWG 作为 FBG 传感解调器的可行性，并分析了器件谱响应与解调性能之间的关系，为后续 AWG 型解调器设计奠定了基础。随后，Li 等[110]针对 PLC 平台的 AWG 结构开展了面向 FBG 解调系统的器件设计研究，给出了通道间隔、串扰与谱形等关键参数的优化方法，说明了 PLC-AWG 在 FBG 解调中的工程实现潜力。Marrazzo 等[111]则提出多通道联合解调思路，通过综合多个 AWG 输出通道的信息提升波长估计的连续性与鲁棒性，进一步改善了基于 AWG 的 FBG 解调性能。近年来，随着 PIC 技术的发展，AWG 型 FBG 解调器逐步由分立器件系统转向片上集成实现。Zhuang 等[112]在 SOI 平台上实现 1×16 片上 AWG 连续解调器，通过将 FBG 反射峰能量分布到多个通道并结合标定算法，实现了 1 544~1 568 nm 的连续解调，实验绝对波长精度 RMSE 达 0. 73 pm。Chen 等[113]进一步报道了全集成片上 FBG 解调器，将关键光子器件集成于单芯片平台，实现了优于 2 pm 的绝对解调精度，并给出了最高 80 nm 的解调范围，体现出 PIC 解调路线在高精度与大范围兼顾方面的优势。Li 等[114]实现了 AWG 与光电探测器单片集成的解调芯片，实验表明该器件可达到约 6. 79 pm 的解调精度、1 pm 的分辨率和 1. 56 nm 的动态范围，说明单片化方案在紧凑集成和高分辨读出方面具有明显潜力（见表 1）。除了解调精度与集成度提升外，AWG/PIC 路线也逐渐面向具体应用系统扩展。Słowikowski 等[115]研制了基于 InP 的 AWG 解调器，并将其应用于核磁共振（magnetic resonance imaging, MRI）环境下的患者状态监测，验证了该类系统在强电磁环境中的应用可行性。Jiao 等[116]进一步将光子 AWG 芯片模块、光电检测与信号处理模块及输出接口板集成为小型化完整解调设备，整机尺寸达到 160 mm×100 mm×80 mm，体现了 AWG 型解调仪向仪器化、小型化发展的趋势。在复用规模扩展方面，Xu 等[117]将 32 通道 AWG 与 1×4 MEMS 光开关结合，构建了 WDM×TDM 复合解调架构，实现了 64 个 FBG 传感点的同时解调，显示出 AWG 方案在多点复用场景中的扩展能力。此外，Li 等[118]还利用 AWG 的温度依赖特性构建大动态范围解调系统，实现了 28. 67 nm 的动态范围、优于 25 pm 的解调精度和 6 pm 的分辨率，为通过器件特性协同扩展解调范围提供了新的思路。

总体来看，AWG/PIC 解调路线的工程意义在于把多通道光谱判别和探测阵列集成到芯片级平台，但通道一致性、串扰、温漂、标定模型及算法仍决定最终的解调指标[109-118]。

8）基于光频域反射的 FBG 解调方法

基于光学频域反射（optical frequency domain reflectometry, OFDR）、非相干光频域反射（incoherent OFDR, iOFDR）的 FBG 解调技术，通常以扫频窄线宽光源获取传感链路的频域响应，并借助参考或辅助干涉仪对扫频非线性进行校正，再通过相干/外差检测及傅里叶变换将频域信息映射到空间域，从而实现不同位置 FBG 的空间分离与波长解调[119-123]。Moore[119]系统总结了 OFDR 用于 FBG 传感测量的基本理论和工作机理，阐明了频域采样、相位校正、空间重建与 FBG 解调之间的关系，为该类方法的后续发展提供了理论基础。Werzinger 等[120]提出步进式非相干 OFDR（stepped iOFDR）用于准分布式 FBG 传感，实现了 FBG 阵列的空间分离与准分布式解调，验证了 iOFDR 在多点复用中的可行性。在此基础上，Clement Bellido 等[121]提出基于稀疏射频响应的快速 iOFDR 方法，通过减少频域采样点数提升了解调速度，在保持阵列识别能力的同时改善了系统实时性。随后，Clement 等[122]又提出基于同频电光下变频接收的 iOFDR 方案，实现了对 FBG 阵列频域

响应的有效获取,表明该技术路线具有较好的工程实现潜力。针对阵列参数反演问题,Werzinger、Zibar和Schmauss等[124]进一步提出基于模型的位置与反射率估计方法,可同时估计FBG阵列中各光栅的位置和反射率,提高了复杂阵列条件下的参数重建精度。面向大容量密集阵列,Wang等[125]提出基于混沌的非相干OFDR方法,实现了高密度FBG阵列的有效解调,说明chaos-based I-OFDR在提升复用容量方面具有优势如表1所示。Yang等[126]则提出一种基于OFDR的灵活FBG复用方法,增强了系统在不同复用配置下的适应性。在超大规模弱光栅阵列方面,Zhang等[127]利用OFDR实现了5 000个超弱FBG传感器的解调,展示了该方法在大容量、弱反射阵列复用中的应用潜力。不过,随着阵列规模和传输距离增加,多重反射、串扰及模型失配问题逐渐突出。Hart、Williams和Cranch[128]的研究表明,在全光栅链路的OFDR分布式应变与温度传感中,Born近似失效会对系统量程形成明显限制。Zhou等[123]则提出低相干OFDR方案,实现了FBG传感器的解调与识别,进一步拓展了OFDR技术的实现形式。

总体而言,OFDR/iOFDR兼具较高空间分辨率、较强复用能力及对弱反射、中心波长相同或相近FBG阵列的适应性,但在大规模阵列和长距离应用中,仍需围绕多重反射、谱阴影效应、偏振衰落及模型失配等问题进一步优化[120-128]。

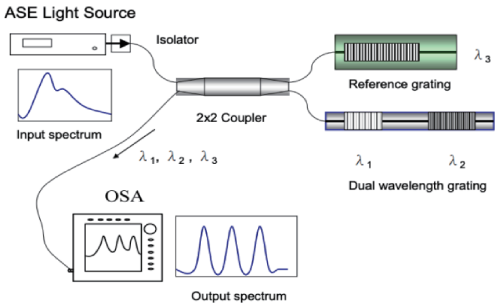
9)基于连续波线性调频的FBG解调方法

基于连续波线性调频(frequency-modulated continuous wave, FMCW)的FBG解调方法,主要是将不同传感点的光程延迟映射为电域拍频信号,从而在频域或距离域实现传感点区分与复用。Chan等[129]最早将FMCW引入FBG传感复用,提出通过线性扫频射频子载波调制与参考信号混频,使不同位置FBG对应不同拍频峰值,验证了FMCW用于FBG阵列解复用的可行性;随后又系统完善了FMCW复用FBG的基本原理与实现结构,并进一步提出频分复用方案,拓展了该方法在多点FBG解调中的应用形式[130-131]。除连续扫频FMCW外,Breglio等[132]提出的啁啾脉冲频率调制(chirped-pulsed frequency modulation, C-PFM)方法同样利用调频脉冲将FBG传感点的位置信息与波长信息映射到电域信号中,实现了FBG传感阵列的复用解调,为基于调频编码的FBG多点读出提供了另一种实现路径。Gagliardi等[133]则采用激光射频调制方式进行FBG应变传感解调,说明射频调制不仅可用于传感点复用,也可用于将Bragg波长漂移转换为可检测的电域频率或相位变化,从而丰富了调频/射频调制型FBG解调技术路线。在此基础上,Hanto和Iiyama[134]采用非相干I-FMCW光学测距系统,实现了6.6 km光纤链路上的三点FBG区分,表明该方法具有长距离、多点解调潜力。You等[135]进一步在500 m光纤中实现了10个同布拉格波长FBG的距离分复用,测距分辨率约1 m,并完成了48 h长时稳定测量,显示出其在长距离结构健康监测中的应用前景。此外,Perez-Herrera等[136-137]围绕FMCW光纤传感系统的参考、复用与性能优化开展研究,指出通过优化扫频参数、检测链路及引入光放大,可改善系统分辨率、动态范围和稳定性如表1所示。

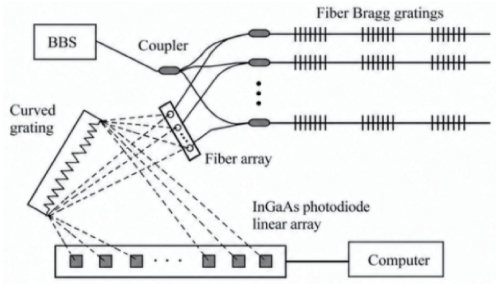
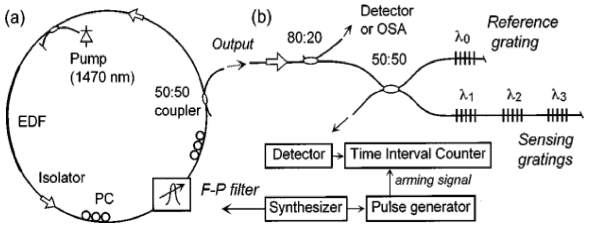
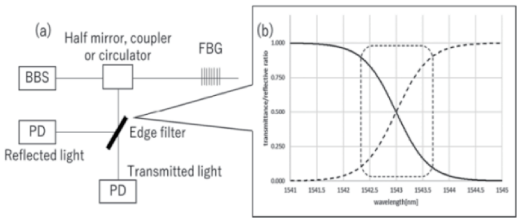
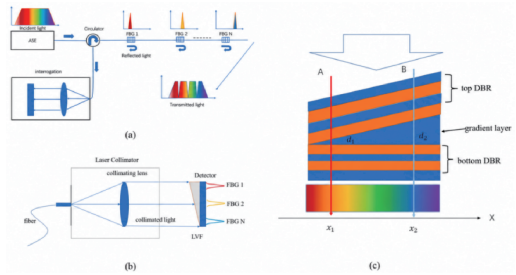
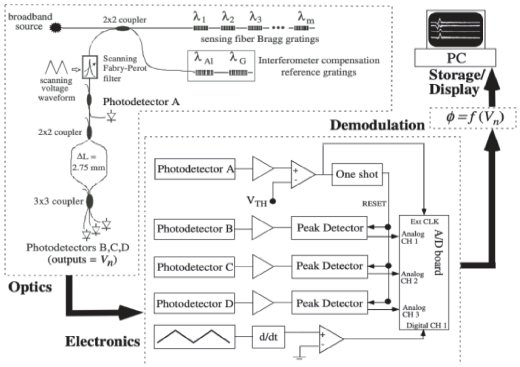
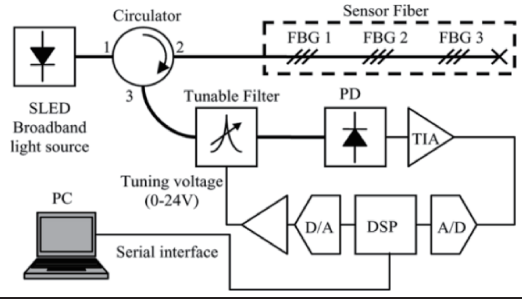
总体而言,FMCW/I-FMCW及相关射频调制技术在长距离、多点及同波长FBG阵列解调中具有独特优势,但其性能仍受扫频线性度、混频噪声、多反射干扰及旁瓣串扰等因素限制,通常需要结合系统标定与补偿策略进一步提升解调性能[132-133,136-137]。

**表1　FBG解调系统相关图示**

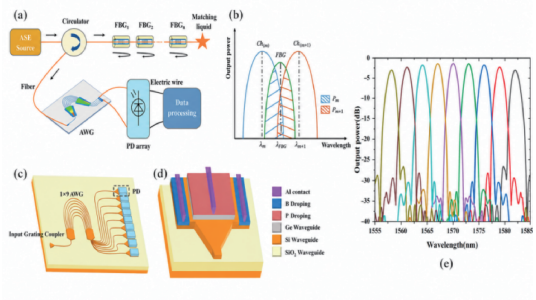
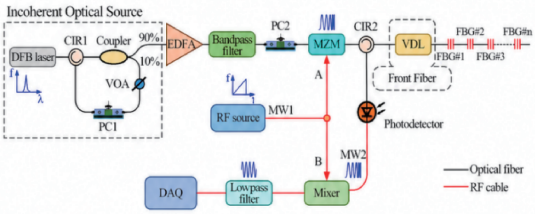
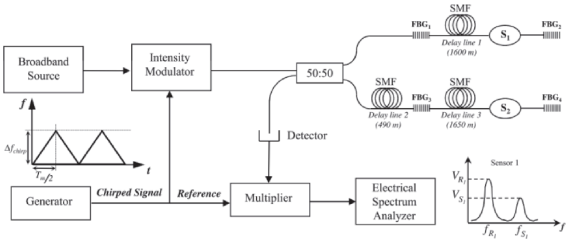
**Table 1　Summary of figures related to FBG interrogation systems**

| Fiber Bragg grating demodulation system | Schematic diagram of the FBG demodulation system | Research progress in related studies |
|---|---|---|
| 基于光谱仪直读式的解调方法 |  | Wang和Tang基于光谱仪直读的FBG传感解调系统通过实时获取FBG/LPFG反射或透射谱的波长漂移,实现温度、应变和液位等参量的解调[31] |

续表

| Fiber Bragg grating demodulation system | Schematic diagram of the FBG demodulation system | Research progress in related studies |
|---|---|---|
| 基于InGaAs光电二极管线阵图像传感器的解调方法 |  | Li等采用InGaAs光电二极管线阵替代传统CCD的FBG阵列解调结合BFBG实现了适用于1.55 μm波段的FBG解调系统[35] |
| 基于波长扫频光纤激光器的解调方法 |  | Wang等将波长扫频光纤激光用于FBG传感系统，实现了静态与动态信号的同步测量[41] |
| 基于边缘滤波器的解调方法 |  | Ogawa等实现了采用光学边缘滤波器的无线便携式FBG解调系统[55] |
| 基于LVF的解调方法 |  | Liu等建立了基于LVF的FBG解调模型，说明LVF与线阵探测器结合可将波长漂移转换为位置或强度分布变化，并通过质心法实现高分辨率波长解调[37] |
| 基于扫描式Fabry-Perot滤波器/Mach-Zehnder干涉仪的解调方法 |  | Todd等构建的基于扫描式Fabry-Perot滤波器与3×3耦合器Mach-Zehnder干涉仪的FBG解调系统[80] |
| 基于Fabry-Perot可调滤波器的解调方法 |  | Allan等采用MEMS Fabry-Perot可调滤波器实现复用FBG阵列解调系统[95] |

续表

| Fiber Bragg grating demodulation system | Schematic diagram of the FBG demodulation system | Research progress in related studies |
|---|---|---|
| 基于AWG相对强度解调的解调方法 |  | Li等实现了AWG与光电探测器单片集成的解调芯片,实验表明该器件可达到约6.79 pm的解调精度、1 pm的分辨率和1.56 nm的动态范围[114] |
| 基于OFDR的解调方法 |  | Wang等提出基于混沌的非相干OFDR方法,实现了高密度FBG阵列的有效解调[125] |
| 基于FMCW的解调方法 |  | Perez-Herrera等针对FMCW光纤传感解调系统,研究了参考、复用及性能优化方法[136-137] |

## 2　SFBG解调系统

### 2.1　基于宽带光源与光谱仪直读式SFBG解调系统

基于光谱仪直读的SFBG解调,是目前最基础、也最具基准意义的一类方法。基本思路是利用ASE宽带光源或其他宽谱光源入射进SFBG,通过OSA或高分辨光谱仪直接获取反射谱,再从完整谱形中提取温度相关特征。对于SFBG而言,这一路线之所以长期占据主流,并不只是因为它能够读出中心波长漂移,更重要的是它能够完整保留谱形信息,使研究者同时观察中心漂移、峰宽变化、包络畸变、模式起伏与退火前、后谱形演化,因此特别适合用于制备评估、机理分析、温度标定和算法验证[11,15,138-141,142,143]。从已有工作看,早期SFBG研究就是以直接反射谱读出为基础建立起来的。Grobnic等于2004年首次报道飞秒激光写入SFBG,为超高温SFBG传感研究提供基础;Habisreuther等[11,140]于2015年进一步展示了基于反射信号直接读出的高温与动态温度诊断系统,工作温度达到1 900 ℃,温度分辨能力优于±2 K,说明直接测谱路线不仅适合实验室验证,也可扩展到高温动态测量场景如图2(a)、(b)所示。此外,Eisermann等[141]将SFBG与热辐射、热电偶集成构成高温混合传感器,并对SFBG反射谱信号处理、固定点标定和工业高温过程监测进行了系统计量表征,进一步说明光谱直读链路在SFBG不确定度评估、标定溯源和恶劣环境过程监测中的基础作用。在实验室标定和工程前验证中,ASE+OSA仍然是最常见的参考架构。Yang等[138]在2019年的锅炉多点测温工作中,采用OSA记录SFBG反射谱,并结合双高斯经验拟合提取平均布拉格波长,完成了室温至1 200 ℃的标定,以及1 000 ℃、110 h的稳定性测试,随后又在商业锅炉环境中实现了数十天的现场运行。这表明"宽带光源+OSA+谱形拟合"方案非常适合承担SFBG的高温标定、长期稳定性评估和工程验证任务。不过,对于光谱仪直读式的方案也存在系统体积大,采集速度不够快等缺点,因此不适用于工程上对温度应变的实时解调,更适用于实验室的数据采集相关工作。

### 2.2　基于阵列图像传感器的SFBG解调系统

与OSA型直读系统相比,基于阵列图像传感器的SFBG解调系统本质上仍属于光谱直接测量,但其实现

方式已由传统的扫描式高分辨采谱，转向“色散映射+阵列探测+电子高速采集”的架构。核心做法是利用体相位光栅、衍射光栅或其他色散元件将SFBG反射谱映射到CCD、CMOS或InGaAs阵列探测器上，再通过像素信号重建光谱并提取温度特征。与OSA相比，这类方案在刷新率、体积、成本和多点同步读出能力方面更具优势，因此更适合在线监测和准分布式高温测量[32,144-145]。这一路线在SFBG中已经有明确应用。Shi等[145]于2022年研究了全多模系统中的蓝宝石并联光栅，并采用低成本全多模850 nm解调仪实现了最高1 500 ℃的可靠高温测量，说明对于多模SFBG，阵列式快速读出并不一定要求单模条件和超高分辨率，而可以通过系统级多模匹配获得可用性能。在此基础上，Liu等[144]于2024年进一步将该方向推进到“低分辨率但高速”的范式：他们使用分辨率约为166 pm的快速低成本光谱仪直接采集SFBG反射谱，再结合机器学习补偿欠采样带来的信息损失，最终在5 kHz采样率下实现了0.23 ℃的温度精度。该结果说明，对峰宽较大、谱形冗余较多的SFBG而言，阵列图像传感器型系统不一定必须追求OSA级别的波长分辨率；只要前端采样和后端建模设计合理，较粗分辨率也能够换取显著更高的时间分辨率。更接近工程化和阵列化应用的代表是Tan等于2025年提出的SFBG阵列准分布式高温测量系统。该工作采用基于InGaAs的解调仪对SFBG阵列进行读出，并结合多峰自动跟踪算法实现多栅同步测量，最高测试温度达到1 900 ℃。该类研究表明，阵列图像传感器型系统已经不再局限于单个SFBG的快速读谱，而是进一步发展到面向多栅阵列、多峰自动跟踪和准分布式高温监测的系统级实现（见图2(c)、(d)）[32]。

总体来看，光谱仪直读型系统更适合作为SFBG制备评估、退火实验、温度标定、计量表征和算法验证的基准平台；而阵列图像传感器型系统则代表了SFBG直接测量向高速化、紧凑化和工程在线化发展的重要方向。前者强调“完整保留谱形信息”，后者强调“以较高刷新率同步读取并处理光谱信息”，二者共同构成了当前SFBG光谱直接测量路线的两种主要实现形态[11,15,32,138-139,141,144-145]。

### 2.3 基于OFDR的SFBG解调系统

与基于光谱成像型解调和扫频激光型解调不同，OFDR本质上是利用窄线宽可扫频激光与干涉检测，将光纤沿程的后向散射或离散反射信息映射到空间频域，再经傅里叶变换与局部相关运算恢复各空间位置处的谱漂移信息。对于传统石英光纤，OFDR最典型的优势在于其毫米级甚至更高的空间分辨能力，以及在短中距离范围内同时获得“位置-谱移-温度/应变”三类信息的能力。因此，它天然适合构建“分布式测量+准分布式反射点测量”并存的混合型解调体系，若将这一思路放到SFBG场景中，OFDR的吸引力主要体现在两个方面。第一，极端高温设备通常存在显著温度梯度，仅靠少量离散SFBG难以完整描述温度场，而OFDR可弥补离散点之间的信息空白。第二，SFBG本身适合承担超高温关键点的长期测量任务，若能与分布式链路协同，就可以形成“连续感知+热点高精度读数”的架构。不过，SFBG与OFDR结合并不能简单照搬石英FBG-OFDR方案。根本原因在于单晶蓝宝石光纤通常呈强多模传播，SFBG反射谱表现为宽包络、多峰和模式叠加；而OFDR对相干性、模式稳定性和参考签名重复性较为敏感，多模耦合、端面状态变化、热致模式重分布及高温辐射背景都会削弱光谱匹配与离散反射峰定位的稳定性（见图2(e)）[9]。已有研究表明，商业OFDR平台，特别是美国Luna公司的OBR4600，能够实际用于SFBG反射谱读取和高温测试，但其稳定性仍受多模耦合、端面反射和高温工况背景影响[146-148]。从已报道的研究看，光学背向散射反射仪（optical backscatter reflectometer，OBR）Luna OBR 4600在SFBG领域的使用主要体现在两类场景。在飞秒激光逐点写入SFBG阵列的研究中，Xu等[147]明确采用Luna Innovations OBR 4600作为SFBG阵列的读出系统，用于获得各光栅的反射响应与阵列分布信息。验证了OFDR系统已经能够胜任SFBG阵列的基础表征与空间定位任务。在惰性气体密封封装SFBG的超高温测量研究中，He等[146]使用Luna OBR 4600对SFBG传感器进行高温测试过程中的解调，同样验证了OFDR系统在超高温环境下对SFBG进行动态读出的可行性。Tan也用Luna OBR解调仪器进行了高温黑体热源的测量，并实现了1 900 ℃的测温。不过蓝宝石光纤与普通单模石英光纤在导模条件和散射特性上存在显著差异。Luna官方针对高温蓝宝石光纤传感的一篇技术文章[148]明确指出：对OFDR而言，蓝宝石光纤的多模特性会引入额外模式，导致测量失真；同时，由于单晶蓝宝石光纤晶体结构高度完整，其天然Rayleigh背散射信号很弱，这又会削弱OFDR依赖背散射信号进行高精度定位与解调的能力。换言之，OFDR系统虽然能够被用于SFBG的反射谱读出和传感实验，但其在蓝宝石光纤上的工作条件并不像在常规单模石英光纤中那样理想。对于SFBG来说，可用不等于完全无障碍适配，还需要考虑多模耦合、光谱稳定

性、高温的工况和算法补偿。所以 Luna OBR/OFDR 在 SFBG 领域目前更适合被理解为一种研究型、高分辨读出平台。一方面,它的空间分辨能力和反射谱读出能力,使其非常适合用于 SFBG 阵列定位、飞秒写制后光栅质量表征、局部谱响应分析及高温实验室验证[146-147];另一方面,面对蓝宝石光纤固有的多模传播、耦合敏感性、宽峰/多峰谱形,以及高温下模式重分布等问题,OFDR/OBR 仍然需要结合专门的光纤结构设计、稳模处理和后端算法补偿,才能进一步提升其在 SFBG 解调中的稳定性与准确性[146,148]。

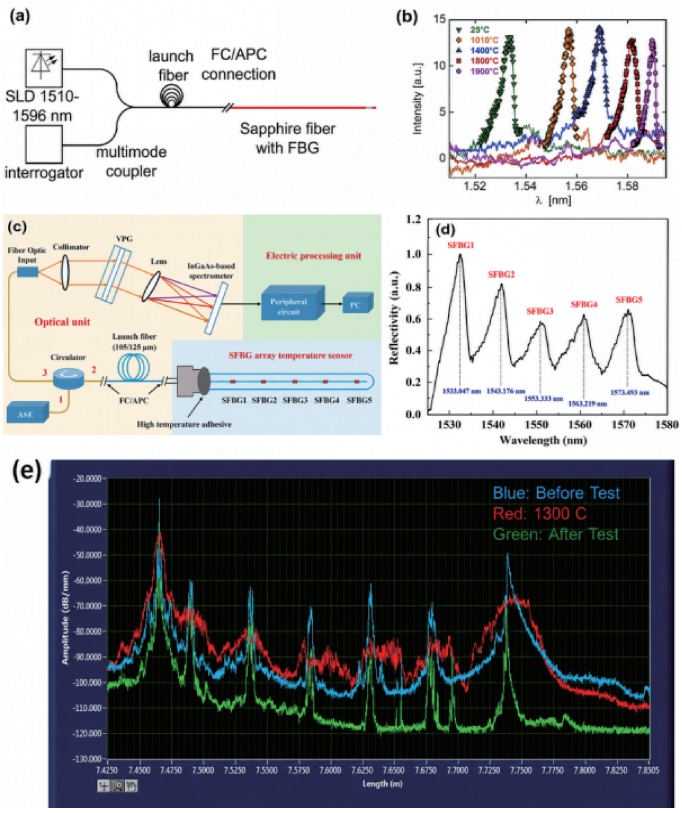



图2　面向高温测量的三种主流 SFBG 解调系统及其典型反射光谱。(a)FBG 解调装置;(b)SFBG 从室温至 1 900 ℃的反射率光谱演化,SFBG 阵列的光信号采集系统及反射光谱;(c)SFBG 阵列光信号采集系统示意图,包括 SFBG 温度传感器、光学单元和电信号处理单元;(d)五个 SFBG 阵列的实测反射光谱;(e)基于 OFDR 原理的 Luna 光纤光栅解调仪不同光纤长度位置处 SFBG 反射光谱幅值分布[9,11,32]

Fig. 2　Three mainstream SFBG interrogation systems for high-temperature measurements and their typical reflection spectra. (a) FBG interrogation setup; (b) evolution of the reflection spectra of the SFBG from room temperature to 1900 ℃, optical signal acquisition system and reflection spectra of an SFBG array; (c) schematic diagram of the SFBG array optical signal acquisition system, including the SFBG temperature sensor, optical unit, and electrical signal-processing unit; (d) measured reflection spectra of five SFBG in the array; (e) amplitude distribution of SFBG reflection spectra at different fiber-length positions measured by a Luna fiber grating interrogator based on the OFDR principle[9,11,32]

因此,Luna OBR 4600 等商业 OFDR/OBR 仪器已经可以用于 SFBG 的读出、阵列表征及高温传感实验,这为“OFDR 与 SFBG 结合”的可行性提供了直接依据;但受蓝宝石光纤多模特性和弱背散射特性的限制,该路线目前仍更多体现为一种高分辨实验平台与潜在混合解调手段,而非完全成熟的标准化 SFBG 解调体系[146-148]。在 SFBG 阵列测温的研究方面,Ohanian 等[149]提出了一种面向极端环境的单模蓝宝石光纤分布式传感方法。该工作并非传统单点测温,而是在约 0.55 m 长的单模化蓝宝石光纤中写入 50 个飞秒激光 Type-Ⅱ光栅,形成测点间距约 11 mm 的准分布式传感结构。解调方面,作者采用 OFDR 技术对沿光纤分布的光栅反射谱进行空间定位,并通过测量光谱相对于参考光谱的频移/谱移,结合互相关算法和温度标定曲线实现温度反演。实验结果表明,该传感器可在室温至 1 000 ℃以上范围内实现分布式温度测量,谱移-温度关系经三次多项式拟合后相关系数达到 $R^2$=0.999 9,最大温度残差约 5 ℃,典型误差约 2 ℃,空间分辨率约 11 mm。该方法能够有效重构炉内温度平台及炉壁附近温度梯度,并进一步展示了对冷却流影响和局部沉积物导致的热响应变化的识别能力,说明单模化蓝宝石光纤结合 OFDR 解调在超高温分布式测温和复杂工况监测中具

有较好的应用潜力，直接地说明了该方案在长距离分布式温度/流速监测中的适用场景。

### 2.4　SFBG的光谱解调挑战

1)反射峰带宽过宽

与传统石英单模FBG不同，蓝宝石光纤通常不具备典型的纤芯-包层折射率突变结构，且纤径较大、折射率分布较为均匀，因此通常表现出明显的多模传输特性[11,138,150-152]。在这种情况下，SFBG的反射并非来源于单一传播模式，而是多个模式分别满足布拉格条件后产生的反射分量共同叠加的结果，因此其反射光谱通常不呈现传统单模FBG那样的窄带单峰形态，而更容易表现为宽谱、多峰、尖峰叠加、不稳定及旁瓣明显的复杂结构[11,138,152]。已有研究表明，飞秒激光刻写的SFBG普遍存在谱宽较大、峰形复杂和模式相关性强等特点，这与蓝宝石光纤本身的多模波导属性密切相关[11,138,142,150,152-156]。

这种复杂谱形不仅是SFBG的重要特征，也是其解调难点的根源。Elsmann等[11,152]在研究飞秒激光制备SFBG时指出，SFBG的反射谱明显区别于传统石英单模FBG，其多峰化和宽带化现象与多模耦合直接相关。Zhang等与Busch等的研究同样表明，SFBG的反射率、带宽和谱形稳定性与光纤尺寸、写入参数及模式分布密切相关[138,150]。因此，对于SFBG而言，所谓“中心波长”并不对应一个理想、孤立且对称的单峰，而更接近于复杂模式叠加谱中的主特征位置，这使得传统建立在单峰、对称峰假设基础上的高斯拟合、质心法等算法在某些情况下难以获得稳定结果[11,138,152-153]。

此外，SFBG光谱形态对耦合条件具有很高敏感性。在实际系统中，蓝宝石光纤通常需要与石英光纤或其他过渡光纤耦合连接，而耦合偏移、入射角度、端面质量及对准误差等因素都会改变进入蓝宝石光纤中的激发模式分布，进而引起反射谱峰强比例、峰形轮廓乃至主峰位置的变化[11,138,151,157-158]。Groves等在高温SFBG传感研究中发现，蓝宝石光纤的模式激发状态和光谱响应对耦合与结构条件较为敏感，这种敏感性会进一步影响解调稳定性。Xu等[151]在蓝宝石光纤传输特性的研究中发现，当沿垂直于光栅刻线方向进行偏置耦合时，SFBG的3 dB带宽明显减小，说明模式激发和耦合方式的变化会显著改变反射谱形态 。

在高温环境下，这一问题会进一步加剧。一方面，温度升高会引起有效折射率与光栅周期变化，使各模式反射分量整体漂移；另一方面，高温还可能改变蓝宝石光纤内部应力分布、端面状态和耦合条件，从而使谱形随温度产生动态变化[11,138,150-151]。在高温测试部分明确指出，SFBG反射峰是由多个模式反射峰叠加而成，呈现众多尖峰，因此必须通过平滑处理后再进行特征提取；并比较认为Savitzky-Golay滤波方法比邻域平均更有利于保留反射峰高度和宽度等谱形特征，对于单个SFBG反射峰来说寻峰反射峰光谱过宽会导致寻峰难度增加如图3(a)所示，对于SFBG阵列传感器来说，过宽的反射光谱会导致侵占反射峰的个数，导致无法写制数量多的SFBG阵列传感器。因此，相比传统单模FBG，SFBG的解调问题不再只是简单跟踪布拉格波长漂移，而是在模式分布不断变化的复杂反射谱中稳定提取有效波长特征的问题(见图3(b))。

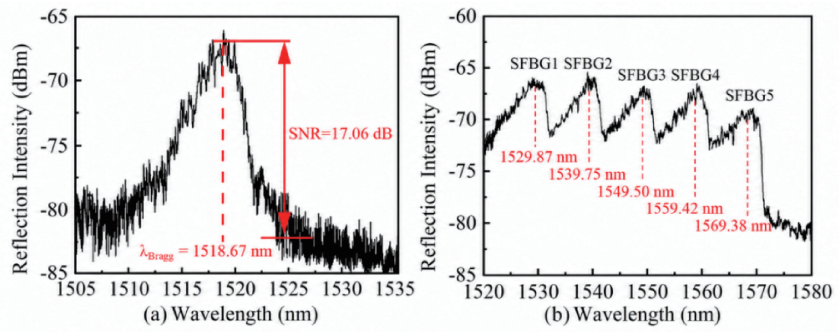



图3　SFBG光谱图。(a)单个光栅；(b)光栅阵列[154]

Fig. 3　Reflection spectra of SFBG. (a) Single grating; (b) grating array[154]

综上，SFBG的光谱形态问题本质上来源于多模波导结构、模式耦合机理及链路反射点三者的共同作用[11,138,150-153]，反射谱通常更宽、更复杂，并且对外界扰动和高温环境更加敏感，这直接增加了波长解调的难度。因此，面向SFBG的解调系统通常需要引入更具鲁棒性的光谱处理与特征提取方法，例如平滑预处理、多峰拟合、质心算法、互相关跟踪，以及面向复杂谱形的智能解调算法，以提高复杂工况下的温度测量稳定

性和重复性[11,138,152-153]。

2)反射峰信噪比较低

SFBG反射光谱中反射峰信噪比较低,主要与光栅本征反射率、传输链路寄生反射及高温环境下的表面损伤有关。首先,SFBG本身的反射率通常低于常规石英单模FBG,反射信号强度有限。研究指出,SFBG反射率约为8%时,反射谱信噪比仅约8 dB;同时,随着蓝宝石光纤长度增加,模式传播损耗和模式转换会进一步削弱返回信号,例如光纤长度由20 cm增加至120 cm时,信噪比可下降约4~6 dB。其次,蓝宝石光纤通常缺少标准包层结构,蓝宝石与空气之间折射率差较大,使光纤中存在大量导模,不同模式的衰减和耦合状态不同,导致反射谱表现为宽带、多峰、非对称包络,而不是单模FBG中窄而稳定的高斯型反射峰;同时,SFBG反射谱带宽可达约7 nm,明显大于常规单模FBG约0.5 nm的带宽。这种多模宽谱会把有限的反射能量分散到多个模式峰上,使单个反射峰峰值不高,并且在扭转、振动或耦合状态变化时,模式间能量重新分配,进一步造成峰值起伏和寻峰不稳定[15]。此外,传输链路中的端面反射、耦合界面反射和端面加工缺陷也会抬高背景噪声。蓝宝石光纤硬度高、脆性大,普通切割容易形成不规则断面、损伤区和局部解理面,使端面Fresnel反射强度不可控;这些寄生反射会与光栅反射信号叠加,形成背景干扰或伪峰,从而降低有效反射峰的信噪比。同时,较长传输光路虽然可用于稳定多模分布,但会不可避免地降低反射强度;同时蓝宝石光纤在宽谱范围内传输损耗较大,光栅反射信号会随光纤长度增加而降低,严重时甚至被噪声淹没[154]。

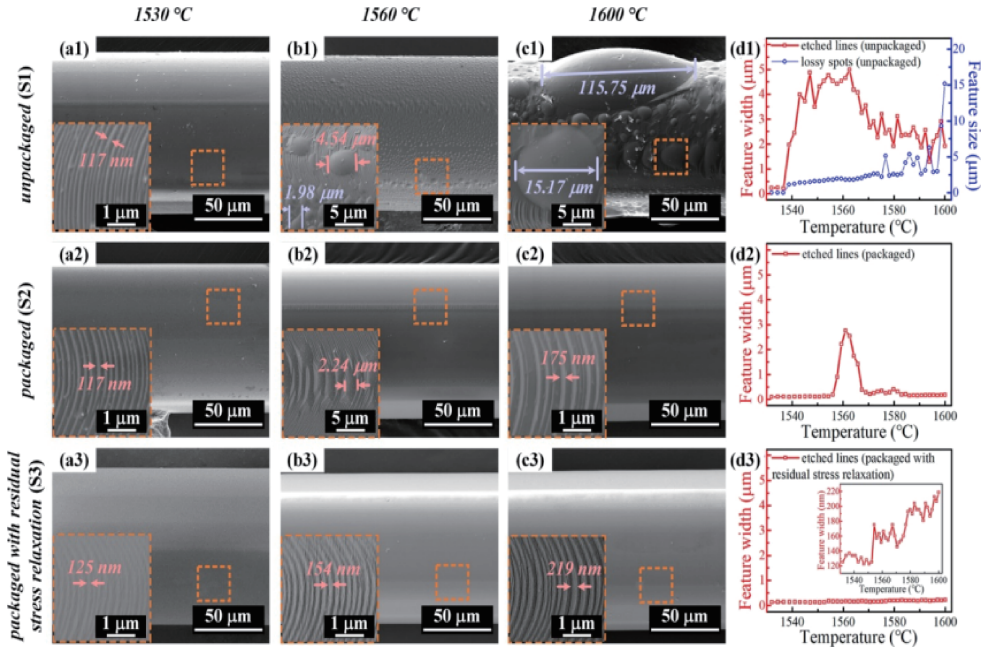



图4　三种蓝宝石光纤样品S1~S3在长期高温退火后的表面形貌SEM照片。(a1)~(a3)1 530 ℃;(b1)~(b3)1 560 ℃;(c1)~(c3)1 600 ℃;(d1)~(d3)光纤样品表面损伤斑特征尺寸和刻蚀线特征宽度的变化情况,其中,S1为未封装样品,S2为封装样品,S3为经过应力释放处理的封装样品[146]

Fig. 4　SEM images showing the surface topography of three sapphire fiber samples S1~S3 after long-time high-temperature annealing. (a1)~(a3) 1 530 ℃; (b1)~(b3) 1 560 ℃; (c1)~(c3) 1 600 ℃; (d1)~(d3) evolutions of the feature size of lossy spots and feature width of the etched lines on the surface of the fiber samples (S1, unpackaged sample; S2, packaged sample; S3, packaged sample with stress relaxation)[146]

高温损伤斑是导致SFBG反射峰信噪比恶化的另一个关键原因。蓝宝石光纤在1 400~1 500 ℃以上长期暴露于空气中时,由于缺乏包层保护,表面会与外界气氛发生高温氧化反应,形成损伤斑和微刻蚀线等微结构缺陷。常规SFBG在超高温长期工作后光谱会明显退化,其原因与蓝宝石光纤表面形成的损伤斑和微刻蚀线结构有关;其中损伤斑主要是由高温氧化诱导形成的某种氢氧化铝,而微刻蚀线则与非均匀残余应力释放有关。这些表面缺陷会破坏原本较规则的波导边界,增强散射和模式扰动,使前向模式与后向模式耦合变得不稳定,进而显著增加传输损耗(见图4)[146]。1 500 ℃退火后蓝宝石光纤表面形成小气泡成核及低密度包层,这些表面斑点会破坏波导结构、干扰模式传输,使反射峰信噪比急剧恶化,甚至被噪声完全淹没[154]。

因此，高温下SFBG反射峰信噪比低并不是单纯由光源或解调仪噪声造成的，而是“弱反射光栅信号-多模宽谱能量分散-链路寄生反射抬高噪底-高温损伤斑增加传输损耗”共同作用的结果。其中，反射率低决定了有效信号起点较弱，多模传输使峰形宽且不稳定，端面和链路反射提高背景噪声，而高温氧化损伤斑会进一步增加散射损耗，最终导致反射峰峰值降低、噪底升高、谱形畸变和解调稳定性下降。

## 3　SFBG解调优化方法

### 3.1　光纤传输链路反射点优化方法

首先，端面研磨与斜切处理是抑制寄生反射、改善回损和降低驻波噪声的最直接手段。对于法向端面，空气-光纤界面会形成明显菲涅耳反射，该反射在反射式SFBG系统中容易与光栅本征反射、连接器反射及器件腔反射共同构成微弱的寄生干涉腔，进而造成基线起伏、谱形畸变和时域漂移。工程上常采用约8°的斜角抛磨或斜切端面，使反射光偏离纤芯回耦方向，从而显著降低导模回返功率[159-160]。关于角抛光光纤组件的研究指出，8°角抛光是降低导引回反射的常规做法，可将回反射压低到极低水平；在高温蓝宝石光纤传感实验中，也已经采用带光纤斜切端面的光纤准直结构，说明该方法已进入实际系统设计[159-160]。Li等[15]在蓝宝石端面研磨的研究中采用金刚石研磨膜对蓝宝石光纤倾斜端面进行逐级抛光，粒径从30、9、5、3 μm逐步减小到1 μm，其中1 μm研磨条件下端面可获得较平滑表面，显著降低端面菲涅耳反射；结合输入端8°抛磨和输出端约30°倾斜端面处理后，SFBG反射谱信噪比最高提升至16 dB，端面菲涅耳反射降至0.019%，这说明端面反射和链路寄生反射确实是影响信噪比的重要因素（见图5）。

斜切端面的意义不仅在于“降低一个反射点”，更在于打断由端面、准直镜、耦合透镜和光栅反射面共同形成的弱反馈。对于扫频激光、干涉式解调和高动态测量系统，这种弱反馈尤其容易造成强度起伏、相位噪声抬升或触发不稳定，因此端面角度优化本质上是在为后级解调“清基线”[160]。不过，这一优化并非没有代价。角度过大时，返回光束偏轴加剧，会对准直回耦效率产生影响；对于蓝宝石光纤这种本身就模式丰富、端面加工难度高的介质，还可能诱发额外的模式再分布，因此需要联合优化端面角度与耦合结构。

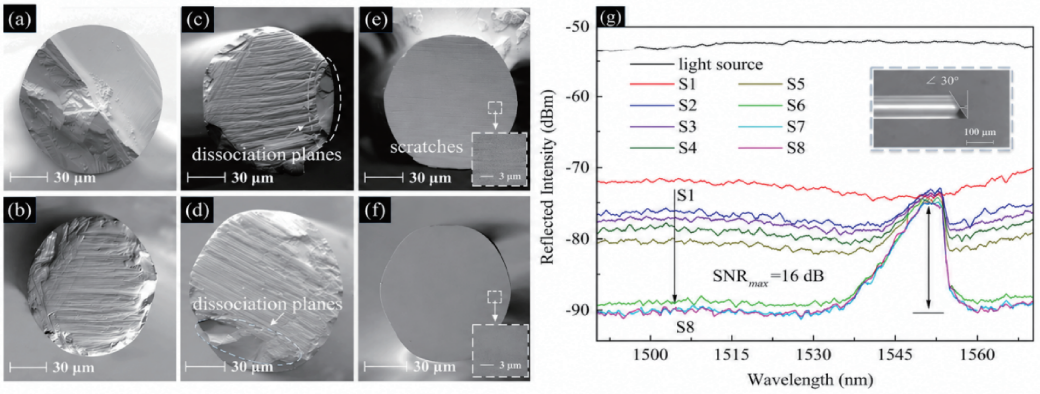



图5　Li等在蓝宝石端面研磨的研究中的蓝宝石光纤端面处理后的形貌及SFBG光谱。(a)采用Miller钳压断得到的蓝宝石光纤端面；采用粒径为30 μm(b)、9 μm(c)、5 μm(d)、3 μm(e)和1 μm(f)的金刚石研磨膜抛光后的蓝宝石光纤端面；(g)不同端面处理方式下的SFBG光谱。样品信息缩写为[样品名称，耦合面，端面，研磨膜粒径]：[S1，0°，折射率匹配]，[S2，8°，断裂端面]，[(S3，S4，S5，S6，S7)，8°，30°，(30，9，5，3，1 μm)]，[S8，8°，30°，折射率匹配]，插图为蓝宝石光纤显微图[15]

Fig. 5　Morphology of sapphire fiber end faces after end-face processing and corresponding SFBG spectra reported by Li et al. (a) Sapphire fiber end face obtained by cleaving with a Miller clamp; sapphire fiber end faces polished using diamond lapping films with particle sizes of 30 μm (b), 9 μm (c), 5 μm (d), 3 μm (e), and 1 μm (f), respectively; (g) SFBG spectra under different end-face processing conditions. Sample abbreviations are given as [sample name, coupling face, end face, lapping-film particle size]: [S1, 0°, index matching], [S2, 8°, fractured end face], [(S3, S4, S5, S6, S7), 8°, 30°, (30, 9, 5, 3, 1 μm)], and [S8, 8°, 30°, index matching], the inset shows a microscopic image of the sapphire fiber[15]

### 3.2　光栅反射率提高方法

对于SFBG而言，解调的信噪比并不只取决于后端算法或解调仪结构，前端光纤导模特性与光栅本体谱

形质量更具决定性。SFBG这样的谱形会直接降低峰位判定的一致性，使基于峰值、质心、互相关或模板匹配的解调方法都面临更大的不确定性；同时，谱宽增大还会压缩多点复用时的可用波长间隔，并放大耦合扰动、温漂和模式起伏对解调结果的影响。因此，若希望从系统层面提升SFBG的解调效率和信噪比，首先应从“减少可导模式数、改善反射谱主峰形态、提升反射率并抑制旁模/旁瓣”三个方向对光纤结构和光栅结构进行前置优化[138]。

光栅写入方式则决定了折射率调制区域的几何形貌与空间对称性，进而直接影响反射率、带宽和噪声底。早期的逐点（point-by-point）法刻写SFBG具有很高的设计灵活性，适合实现波长可定制和级联复用；Yang等[161]2017年的工作表明，逐点法刻写可以在单晶蓝宝石光纤中实现级联光栅，并且经热处理后反射率还能进一步提高约5倍。这个结果证明，制备工艺本身不仅影响初始谱形，也影响后续退火后的结构稳定性与反射增强。

但从“提升解调效率和信噪比”的角度看，传统逐点法刻写并不是最优路线。问题在于，单个折射率调制点横向尺寸有限、轴向离散度较强，容易导致折射率调制区域有效重叠不足，从而表现为反射率偏低、谱峰较宽或谱底不够干净。针对这一点，Xu等在2018年提出了飞秒激光逐线（line-by-line）法扫描的SFBG制备方法。该方法通过逐条折射率调制线构建更连续的周期性微结构，改善了调制区域的覆盖程度与一致性。文中给出的优化结果显示，SFBG反射率可达到6.3%，并系统比较了纤径、写入轨迹长度和光栅周期数对谱特性的影响。通过写入轨迹几何参数优化，可以同时作用于反射强度和谱宽，即制备工艺已经开始从“能否写出光栅”转向“能否写出便于高精度解调的谱形”[162]。

在此基础上，进一步提升信噪比的关键，是扩大有效折射率调制体积并改善模式耦合选择性。Xu等于2019年提出的多层逐线（multi-layer LbL）写入正体现了这一思路。该工作指出，多层结构能够显著扩大折射率调制区域，因此反射率由单层结构的约6.3%提升至34.1%；更关键的是，通过偏置耦合（offset coupling）抑制高阶模后，SFBG的−3 dB带宽进一步压缩到1.32 nm。对于解调系统来说，这个结果几乎正对应“高反射+窄谱”的理想前端：高反射意味着更大的光电转换余量和更高的检测信噪比（signal-to-noise ratio，SNR），窄谱意味着更低的峰位估计不确定度和更强的多点复用能力，而高阶模抑制则减少了谱形随耦合扰动变化的随机性。换言之，多层逐线并不只是提高回波幅度，它同时在“峰高”“峰宽”“谱纯度”三个维度上减轻了后端解调负担（见图6）[151]。

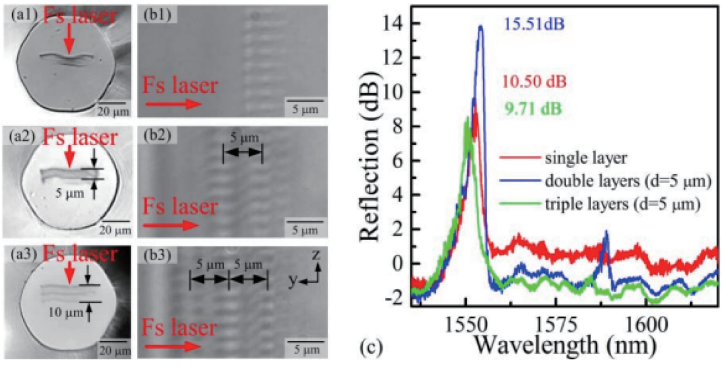



图6　Xu等于2019年提出的多层逐线写入多层SFBG的显微图像及反射光谱。（a）分别具有1层、2层和3层刻写结构的单层、双层和三层SFBG截面显微图像；（b）对应SFBG的侧向显微图像；（c）单层、双层和三层SFBG的反射光谱[151]

Fig. 6　Microscopic images and reflection spectra of multilayer SFBG fabricated by multilayer line-by-line writing, proposed by Xu et al. in 2019. (a) Cross-sectional microscopic images of single-layer, bilayer, and three-layer SFBGs with one, two, and three written layers, respectively; (b) corresponding side-view microscopic images of the SFBG; (c) reflection spectra of the single-layer, bilayer, and three-layer SFBG[151]

与多层逐线写入类似，螺线型/螺旋型光栅（helical SFBG）也是通过改变折射率调制区几何对称性以优化谱形的代表路线。Guo等在2021年报道的helical SFBG采用60 μm直径蓝宝石光纤和515 nm飞秒激光制备。由于螺旋结构在横向上具有更大的调制覆盖面积和更高的结构对称性，结果表现为较高质量的反射

谱：当螺旋直径为30 μm时，光栅反射率达到40%，FWHM为1.56 nm，SNR达到16 dB，并且在较小弯曲半径下仍能保持较好的谱质量。对解调而言，螺旋结构的价值在于它并非简单增加耦合强度，而是通过更均匀、更连续的三维周期调制改善模态选择性与谱形对称性，因此更有利于稳定峰位拟合、减弱弯曲或微扰引入的谱形畸变，并提高实际工程环境中的可重复性（见图7）[163]。

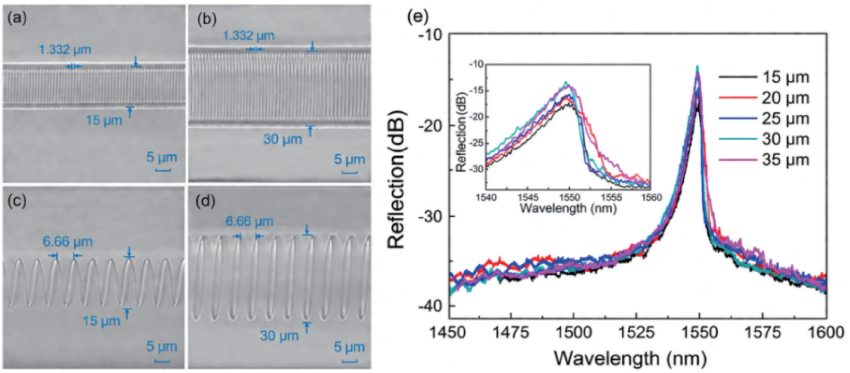



图7　Guo等研究的不同周期和螺旋直径HSFBG的显微图像及光谱对比。(a)、(b)周期为1.332 μm、螺旋直径分别为15 μm和30 μm的HSFBG显微图像；(c)、(d)周期为6.66 μm、螺旋直径分别为15 μm和30 μm的HSFBG显微图像；(e)螺旋直径分别为15 μm、20 μm、25 μm、30 μm和35 μm的HSFBG光谱对比。插图为20 nm波长范围内的局部放大图[163]

Fig. 7　Microscopic images and spectral comparison of HSFBG with different periods and helical diameters studied by Guo et al. (a), (b) Microscopic images of HSFBG with a period of 1.332 μm and helical diameters of 15 μm and 30 μm, respectively; (c), (d) microscopic images of HSFBG with a period of 6.66 μm and helical diameters of 15 μm and 30 μm, respectively; (e) spectral comparison of HSFBG with helical diameters of 15 μm, 20 μm, 25 μm, 30 μm, and 35 μm. The inset shows a magnified view over a 20 nm wavelength range[163]

综合来看，这一类优化本质上是在做一件事：把原本复杂、多模、宽带、起伏大的SFBG反射谱，尽量重塑为高反射、窄带、单峰主导且旁瓣受控的“易解调谱形”。从提升解调效率的角度，这会减少预处理、降噪、峰识别和异常剔除的计算压力，提高实时解调吞吐率；从提升信噪比的角度，这会把有限的反射能量更多集中在主峰附近，抬高有效信号并压低模式噪声、谱底噪声和拟合误差。对于后续系统设计，它们并不是彼此割裂的独立方案，而是可以在器件设计中逐层叠加的谱形工程手段[12,138,139,151,161-164]。

### 3.3　光谱稳定性提高方法

在SFBG解调系统中，多模传输特性与高温环境的耦合作用使输出光谱中普遍存在显著的模式干涉起伏与功率随机波动。这类模态噪声源于不同传播模式之间的相干叠加，在宽谱、非理想反射谱形的SFBG中尤为突出，表现为光谱细结构随机扰动与基线起伏，从而降低波长解调的稳定性与精度。从统计光学角度看，输出光强可表示为各模式强度项与干涉项的叠加，其中干涉项依赖于模式间相位差，当相位关系稳定时将产生明显的谱域振荡结构，而当相位关系被随机化后，干涉项在时间或空间上平均趋零，从而实现噪声抑制[165-166]。因此，通过引入稳模机制降低模式间相关性，是提升解调稳定性和信噪比的重要路径。稳模光纤核心作用不是“减少模式数量”，而是让已经存在的大量模式在进入蓝宝石光纤前得到更充分的激发、耦合和均匀化分布，从而降低模式分布对外界扰动的敏感性，提高反射谱包络的稳定性。文章明确提出，SFBG的问题在于多模传输容易受扭转、振动等扰动影响，导致谱形变化和波长检测不稳定；加入AMMF后，模式场分布更均匀，近场模式场强度波动的相对标准偏差可随长度增加而明显下降，这说明它起到了“稳模”的作用[15]。Li等[15]针对SFBG在多模传输条件下反射谱宽、谱形易受扰动、波长判定不稳定的问题，提出了一种结合外加多模光纤（added multimode fiber, AMMF）与反射包络长波边跟踪的可靠波长检测方法。该方法首先在引入光路中加入不同长度的多模石英光纤，以改善蓝宝石光纤中的模式场分布；实验表明，随着AMMF长度由1 m增加至1 000 m，近场模式场分布的相对标准偏差（RSD）可由57%降低至10%，说明模式分布均匀性明显提高（见图8(b)、(c)）；综合传输损耗与光谱平滑效果后，500 m AMMF被认为是更适合实际解调的长度[15]。

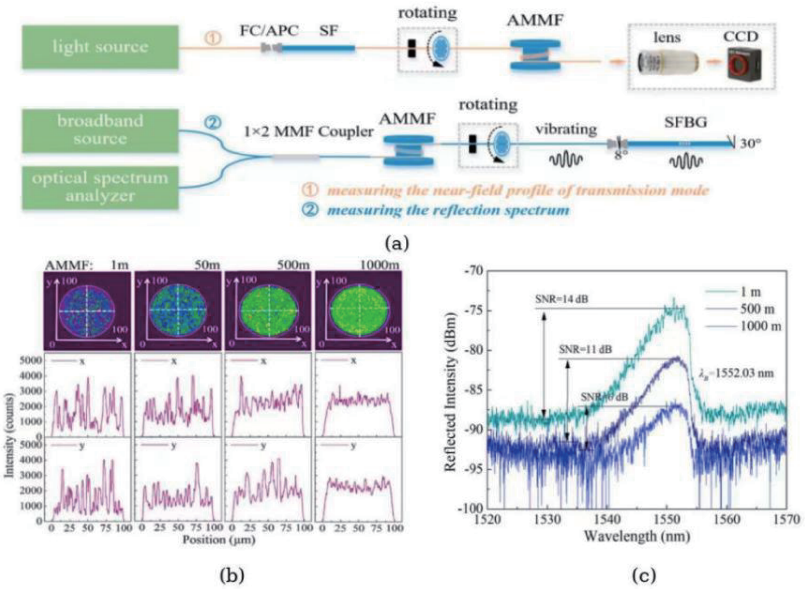



图8　不同长度AMMF条件下蓝宝石光纤近场传输模式场及光学表征装置。(a)光学特性表征实验装置示意图,包括蓝宝石光纤近场传输模式分布和SFBG反射光谱的测量;(b)不同AMMF长度下蓝宝石光纤近场传输模式场测量结果,分别对应1m、50 m、500 m和1 000 m;(c)不同长度AMMF条件下SFBG反射峰形貌[15]

Fig. 8　Near-field transmission mode fields of sapphire fibers and optical characterization setup under different AMMF lengths. (a) Schematic diagram of the optical characterization setup, including measurements of the near-field transmission mode distribution of the sapphire fiber and the SFBG reflection spectrum; (b) measured near-field transmission mode fields of sapphire fibers for AMMF lengths of 1 m, 50 m, 500 m, and 1 000 m, respectively; (c)SFBG reflection peak profiles under different AMMF lengths[15]

此外,通过对光纤施加机械扰动或压电驱动,使其弯曲状态随时间变化,可以实现模式间相位关系的动态去相关,使干涉项在探测时间尺度内被平均抑制;同时,通过控制弯曲半径对高阶模式引入更高损耗,也可以实现一定程度的模式滤除与稳模效果。相关研究表明,通过合理设计模式扰动结构可以有效抑制模态噪声[166,167]。稳模机制对解调性能的提升主要体现在谱形稳定性、信噪比及动态一致性等方面。首先,在谱形层面,模式噪声的降低使SFBG反射谱在不同时间与不同测量条件下保持更高一致性,从而减少解调算法中的不确定性来源。对于依赖全谱信息的互相关或模板匹配方法而言,谱形稳定性直接影响匹配函数的单峰性与收敛性,稳模处理后可有效减少局部极值与误匹配问题。其次,在信噪比层面,模式干涉本质上属于乘性噪声,会放大系统中的光强波动,通过降低模式间干涉对比度,可以将系统等效噪声显著降低,从而提升解调信噪比[165-166]。然而需要指出的是,稳模结构通常伴随一定插入损耗,其数值与模式混合强度及实现方式密切相关,因此在系统设计中需在噪声抑制能力与光功率预算之间进行权衡。

### 3.4　SFBG反射光谱带宽压缩方法

1)滤模技术

耦合偏置与模式选择是SFBG系统区别于普通单模FBG系统的关键优化环节。由于蓝宝石光纤中一般同时存在大量可传播模式,而这些模式对光栅的耦合系数、有效折射率和温度响应会略有差异,最终叠加成宽峰、多峰或不规则肩峰。此时,若入射光场在空间位置、角度和偏振上不受控制,不同测试时刻激发的模式组合会发生变化,即使温度本身不变,也会引起峰形和峰位表观波动,直接恶化解调精度。Xu等[151]的实验研究发现,横向偏置耦合可以有效抑制高阶模式,使反射谱带宽显著缩窄并提升稳定性(见图9(c)、(d))。这一点对提升解调效率和信噪比的意义在于:当耦合结构将更多光功率集中到低阶模式时,光栅反射谱由多模叠加转向更稳定的准单模或少模特征,从而使谱线更窄、斜率更陡,增强波长漂移对应的信号变化灵敏度[143,151]。Liu等[143]的进一步研究表明,采用单模引入光纤(single-mode fiber, SMF)与蓝宝石光纤的直接耦合结构,在较低光谱分辨率条件下仍可实现高精度与高速解调,这从侧面验证了模式选择对系统性能的关键作用(见图9(a)、(b))。此外,通过在蓝宝石光纤内部构建单模波导结构,可从源头上实现模式约束,使反

射谱显著收窄，这代表了模式工程进一步发展的方向[139]。弯曲与模式滤除可作为一种低复杂度、易集成的高阶模抑制手段。物理机制在于高阶模式对弯曲更敏感，适度弯曲会引入更大的高阶模损耗，从而保留低阶模式为主的传播状态。相关研究指出，通过弯曲蓝宝石光纤可以实现高阶模式选择性抑制，从而改善信号稳定性与可重复性[168,169]。然而，该方法在蓝宝石光纤中也存在局限性，例如所需弯曲半径较大、结构实现复杂及附加损耗不可忽略等问题，因此更适合作为辅助优化手段。模式滤除也可以通过拉锥完成，2006年，加拿大通信研究中心 Mihailov 等[170]采用60 μm直径的拉锥单模光纤和150 μm直径的蓝宝石光纤进行熔接，达到滤模的效果，从而有效降低FBG的反射光谱带宽(0. 33 nm)(见图9(e)、(f))。

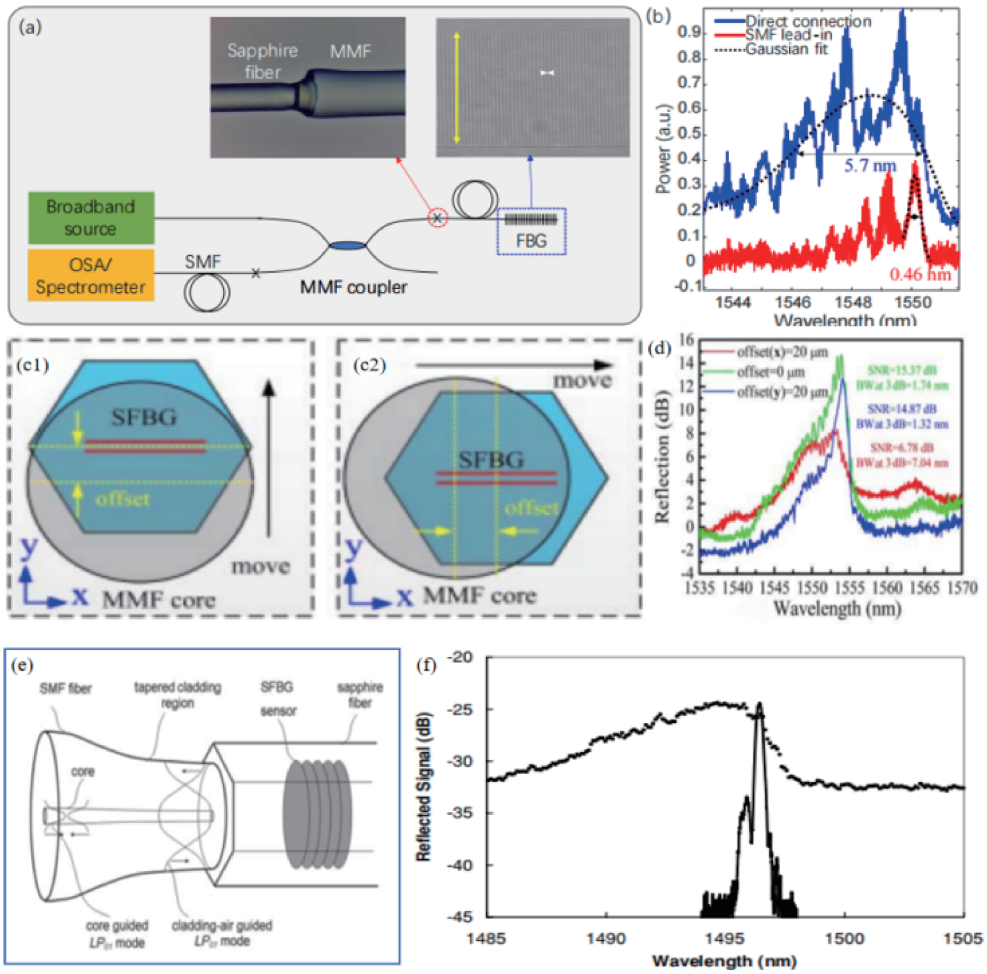



图9　三种SFBG滤模技术及其反射光谱优化效果。(a)所提出的SFBG传感系统的实验装置图，插图展示了熔接点和FBG结构的显微图像；(b)室温下测得的 FBG 光谱。蓝色曲线表示传统连接方式，即多模光纤(multimode fiber，MMF)直接连接到OSA；红色曲线表示所提出系统的测试结果；虚线表示高斯拟合结果；(c1)双层SFBG与入射MMF沿$y$轴偏置耦合示意图；(c2)沿$x$轴偏置耦合示意图；(d)无偏置(0 μm)、沿$y$轴偏置20 μm和沿$x$轴偏置20 μm时双层SFBG的反射光谱；(e)拉锥单模光纤耦合滤模法示意图；(f)采用100 μm二氧化硅芯多模光纤和60 μm拉锥光纤作为输入耦合器时，SFBG的反射光谱[144,151,170]

Fig. 9　Three mode-filtering techniques for SFBG and their effects on reflection-spectrum optimization. (a) Experimental setup of the proposed SFBG sensing system, the inset images show microscopic views of the splicing point and the FBG structure; (b) measured FBG spectrum at room temperature, the blue curve represents the conventional case, where the MMF is directly connected to the OSA; the red curve shows the result obtained using the proposed system, and the dashed curves indicate the Gaussian fitting results; (c1) schematic diagram of offset coupling between the bilayer SFBG and the input multimode fiber (MMF) along the $y$-axis; (c2) Schematic diagram of offset coupling along the $x$-axis; (d) reflection spectra of the bilayer SFBG without offset (0 μm), with a 20 μm offset along the $y$-axis, and with a 20 μm offset along the $x$-axis; (e) schematic of the mode-filtering method based on tapered single-mode fiber coupling; (f) reflection spectra of the SFBG using a 100 μm silica-core multimode fiber and a 60 μm tapered fiber (black line) as input couplers[144,151,170]

围绕“波导实现单模化”的技术主线,相关研究已形成从蓝宝石中单模波导基础验证到单模 SFBG 器件化与系统稳模化逐步推进的发展脉络。Wu 等[14]从系统层面提出螺旋锥形凹陷包层波导(helical tapered depressed-cladding waveguide, HTDCW),将其插入 SMF 与 SFBG 之间,通过模场扩展与高阶模滤除实现耦合,使 SFBG 的−3 dB 带宽由多模条件下的 5.08 nm 压缩至 0.62 nm,并在 25~1 600 ℃表现出更好的稳定性与重复性(见图 10)。

总体来看,上述工作表明,SFBG 的波导单模化研究已经从“在蓝宝石中写出单模波导”发展到“在波导中写出单模光栅”,再进一步发展到“通过直波导、螺旋波导和前端稳模器件协同提升高温解调稳定性”的阶段,其核心目标始终是通过模式工程从源头抑制多模引起的宽谱、分峰和随机起伏问题,从而提高 SFBG 的可解调性、重复性与计量精度[14]。

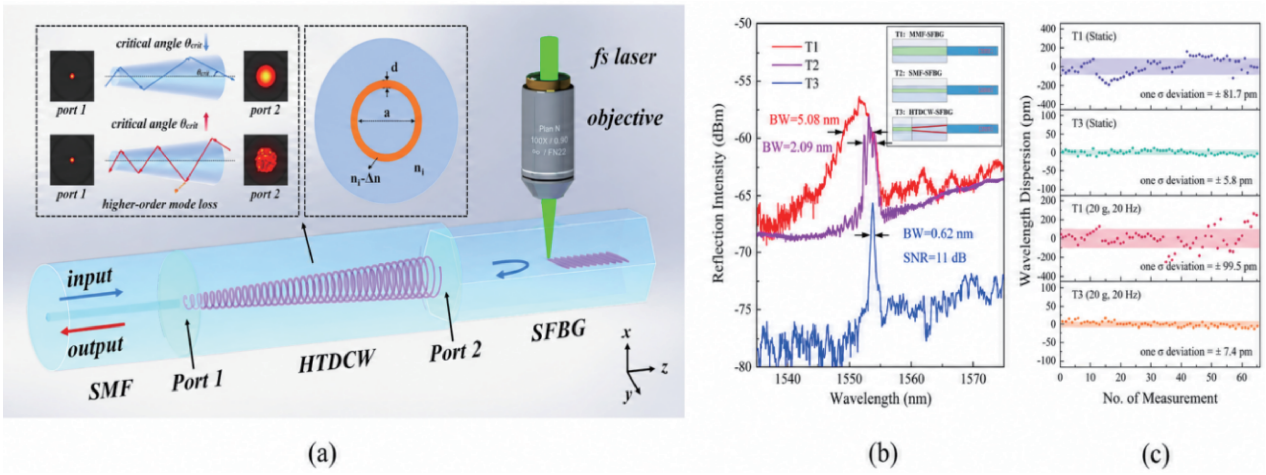



图 10　Wu 等则进一步从系统层面提出螺旋锥形凹陷包层波导(HTDCW)飞秒激光直写制备的 HTDCW 与 SFBG 结构示意图。光在螺旋轨迹凹陷包层波导(HTDCW)中正向和反向传播时的模拟模式场及光路示意图;HTDCW 的截面结构示意图;(b)通过与 MMF、SMF 和 HTDCW 对接耦合测得的 SFBG 反射光谱,插图:SFBG 与 MMF、SMF 和 HTDCW 对接耦合的结构示意图;(c)在无振动和 20 Hz 振动条件下 65 次测量的波长离散分布[14]

Fig. 10　Schematic diagrams of the helically tapered depressed-cladding waveguide (HTDCW) and SFBG structure fabricated by femtosecond-laser direct writing, further proposed by Wu et al. from a system-level perspective. (a) Simulated mode fields and optical paths for forward and backward propagation in the helical-trajectory depressed-cladding waveguide (HTDCW); cross-sectional structure of the HTDCW; (b) reflection spectra of the SFBG measured through butt-coupling to MMF, SMF, and HTDCW, inset: schematic diagram of the SFBG butt-coupled to MMF, SMF, and HTDCW; (c) wavelength dispersion obtained from 65 repeated measurements under no-vibration and 20 Hz vibration conditions[14]

2)少模技术

从光纤结构角度看,减小蓝宝石光纤直径是最直接的“源头治理”方法。其物理逻辑很明确:纤径减小后,横向可支持模式数下降,不同模式对应的布拉格反射分量减少,模式间重叠与谱峰拥挤现象随之减弱,最终体现为反射谱变窄、可辨识性增强,这就是少模技术。Yang 等在工程应用总结中指出,对于空气包层 SFBG,当光纤直径减小到 20 μm 以下时,不同模式的反射峰更容易被区分,且各峰带宽可降至 1 nm 以下;进一步地,他们通过先在大直径单晶蓝宝石光纤中写入光栅、再采用湿热酸腐蚀减径的方法,制备了直径 9.6 μm 的 micro-SFBG,从而把“减模—窄谱—易解调”这一路线真正落到器件实现上。该路线的意义并不只是把谱峰“做细”,更重要的是把原先混杂的模间反射展开,使后续解调从“宽带复杂谱形拟合”转向“相对孤立主峰识别”,从而显著降低谱处理复杂度,提高峰位提取稳定性和信噪比(见图 11)[12,138]。不过,单纯依赖纤径微缩也存在明显代价。首先,湿法腐蚀减径通常工艺时间较长,且纤径越小,机械强度、装调容差与封装可靠性问题越突出。其次,极细蓝宝石纤维在高温场中的固定、引出和长期稳定运行都比常规直径结构更困难。

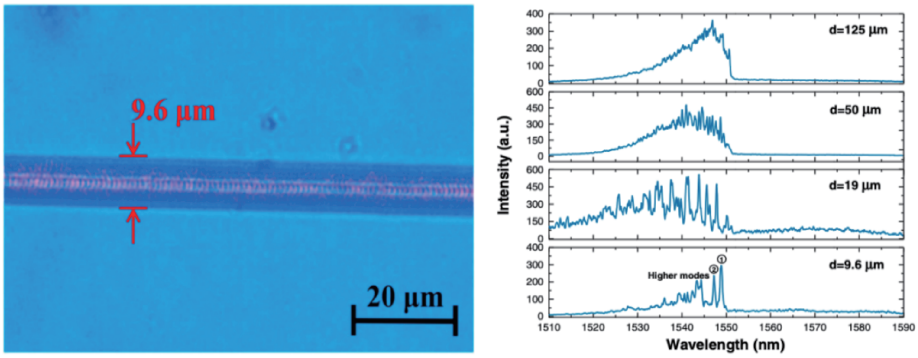



图 11 Yang等制备的微型SFBG及表征。(a)制备得到的9.6 μm直径微型SFBG的光学显微图像,其中通过向光纤中注入638 nm红光实现FBG的可视化;(b)不同直径(d)下空气包层SFBG的反射光谱[12,138]

Fig. 11 Fabrication and characterization of a micro-SFBG by Yang et al. (a) Optical microscopic image of the fabricated micro-SFBG with a diameter of 9.6 μm, where the FBG is visualized by injecting 638 nm red light into the fiber; (b) reflection spectra of the air-clad SFBG under different diameters, $d$[12,138]

3)单模化技术

近年的研究逐渐从“单纯减小外径”扩展到“通过内嵌微结构实现等效减模或单模化传输”的思路。Bérubé等首先在块体蓝宝石中利用飞秒激光写入凹陷包层波导,并在中红外波段实现单模导光,证明了蓝宝石中构建单模波导结构的可行性,为后续在蓝宝石中引入单模波导并集成光栅提供了参观(见图12(a)~(c)[15,165-167,171-172])。在此基础上,Kefer等提出蓝宝石光子晶体波导并集成Bragg结构,说明蓝宝石中的单模波导并不局限于传统凹陷包层方案,还可通过周期性包层工程实现单模导光与光栅结合[15,166-167,171-173]。一个代表性进展是Wang等提出的单模SFBG:在直径425 μm的蓝宝石光纤内部,利用飞秒激光直写形成多层凹陷包层波导与布拉格结构,在保持较大外径、兼顾机械可操作性的同时,实现了接近单模的导光与窄带反射,所得光栅带宽可小于0.5 nm。这个结果说明,对于SFBG而言,“降低模式数”并不一定只能靠把整根纤维做得很细,也可以通过内嵌波导/凹陷包层/折射率微结构来重塑横向模场分布,把多模蓝宝石纤维中的有效传输限制到更少甚至单一模式中。

对解调来说,这类结构优化的价值非常大:一方面,窄带单峰谱显著提升反射峰的质量;另一方面,谱形标准化后,后端方案都更容易获得稳定响应。随后在2022年将多层凹陷包层波导与Bragg光栅直接写入蓝宝石光纤,在1 550 nm波段实现了真正意义上的单模SFBG,使反射带宽收窄到0.5 nm以内,并经受1 000 ℃退火,这标志着“波导写入+光栅集成”路线正式进入SFBG本体[15,139,167,171-173]。进一步地,Wang等在2024年又将这一思路推进为单模蓝宝石光纤温度传感器,通过沿100 μm蓝宝石光纤写入凹陷包层波导并刻写二阶Bragg光栅,实现了高反射率、窄带谱宽及1 200 ℃测温能力,说明波导单模化已由概念验证走向高性能器件(见图12(c)、(d)[15,139,167,172-174])。Xu等提出单模螺旋蓝宝石光栅,通过飞秒激光构造螺旋结构实现单模SFBG,表明三维螺旋模式工程可以作为传统直波导之外的另一条单模化路径(见图12(f)、(g)[15,139,172-175])。

## 4 解调算法

### 4.1 FBG传统算法的谱峰提取与跟踪

SFBG的解调问题与常规单模石英FBG有本质区别。普通FBG反射谱通常表现为窄带、单峰且谱形较稳定,因此解调重点主要是准确提取布拉格中心波长并建立波长漂移与温度或应变之间的映射关系;而SFBG由于蓝宝石光纤缺少标准纤芯-包层结构、折射率反差大且存在显著多模传输,反射谱一般表现为宽峰、峰形不对称、局部多峰叠加甚至谱包络随耦合状态和热扰动发生变化。由此,SFBG解调并不能简单归结为“寻峰”,而更应理解为在谱形时变、模态功率重分配和噪声扰动共同作用下,对稳定谱特征进行提取、跟踪和反演的过程[9,12,140,170]。从传统算法看,SFBG解调最早仍沿用常规FBG的中心波长提取思路,包括最大值法、阈值法、半高全宽法、质心法及普通多项式拟合、高斯拟合和类高斯拟合[176]等,总结如表2所示。这

类方法实现简单、计算量低,在反射谱单峰明显、信噪比较高且谱形变化不大的情况下仍具有实用价值。但对SFBG而言,单点极值会受到局部峰起伏和模间干涉的明显影响,质心法容易被宽谱尾部拖拽,而固定窗口拟合也容易在峰分裂和非对称展宽时引入系统偏差。因此,这类方法更多只能作为初步估计或低复杂度实现方案,而难以单独支撑高温、长时和强扰动环境下的稳定解调[22,138]。

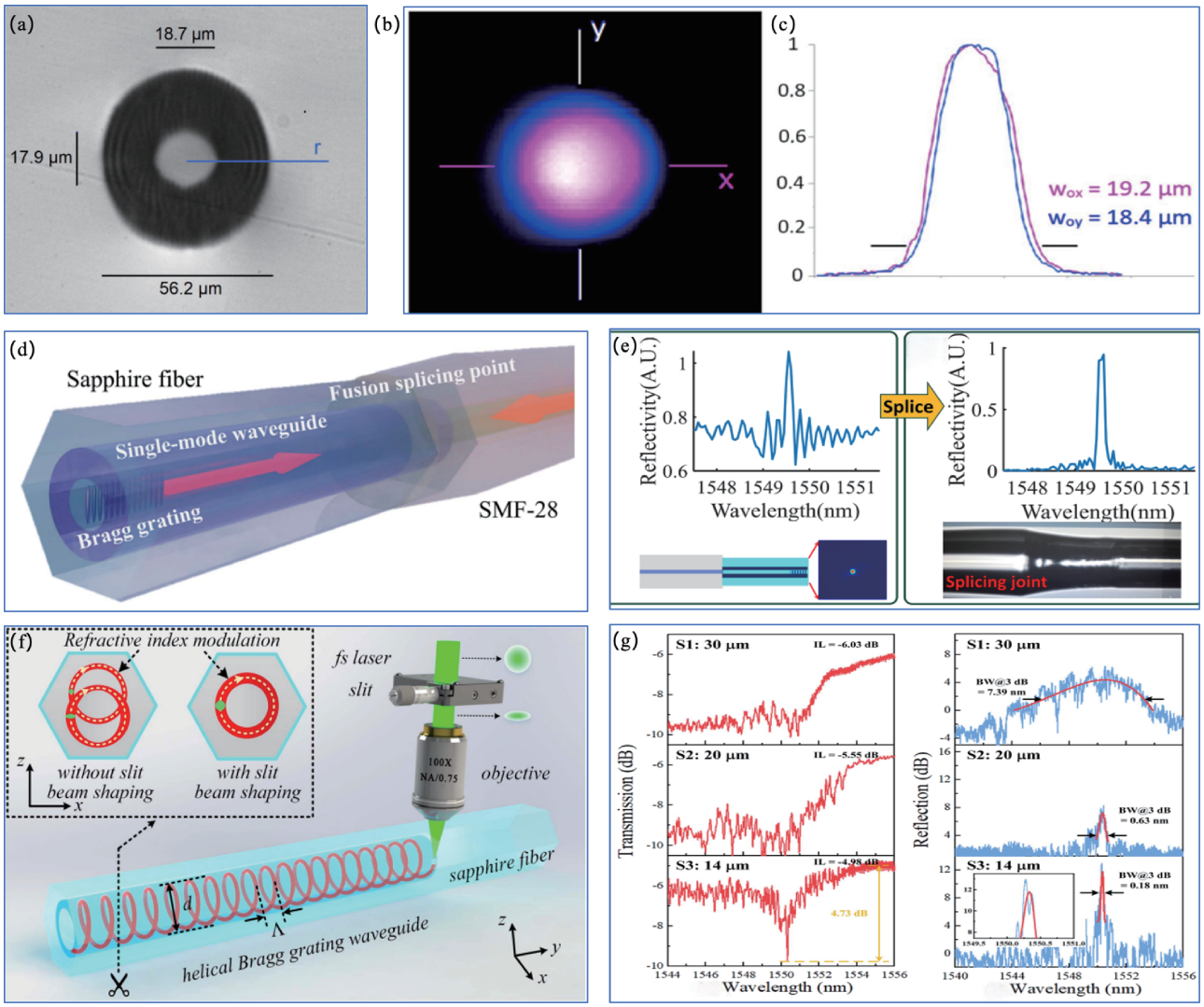



图12　在块体蓝宝石中利用飞秒激光写入凹陷包层波导蓝宝石中凹陷包层波导(DCWS)的截面形貌、折射率分布及近场输出。(a)蓝宝石中刻写的DCW截面图像;(b)、(c)波长为2 850 nm的透射光在DCW波导输出端测得的近场强度分布;(d)蓝宝石传感器示意图;(e)耦合进入单模蓝宝石波导芯;从优化位置成功熔接后的光谱图,以及成功熔接后的熔接接头图像与光谱图;(f)采用飞秒激光直写技术在蓝宝石光纤中制备的HBGW结构示意图,插图为带狭缝和不带狭缝的HBGW横截面结构示意图;(g)蓝宝石光纤中制备的三个HBGW样品S1、S2和S3的相应光谱,其中S1、S2和S3的直径依次减小,分别为30、20和14 μm:透射光谱;反射光谱[172,174-175]

Fig. 12　Cross-sectional morphology, refractive-index distribution, and near-field output of depressed-cladding waveguides (DCWs) inscribed in bulk sapphire by femtosecond laser writing. (a) Cross-sectional image of the DCW inscribed in sapphire; (b), (c) near-field intensity distributions measured at the output end of the DCW for transmitted light at a wavelength of 2 850 nm; (d) schematic diagram of the sapphire sensor; (e) coupling into the single-mode sapphire waveguide core, spectrum after successful splicing from the optimized position, and image of the splicing joint after successful splicing; (f) schematic of an HBGW fabricated in sapphire fiber using femtosecond laser direct writing, insets: cross-sectional schematics of the HBGW inscribed with and without a slit; (g) corresponding transmission and reflection spectra of three fabricated HBGW samples, S1, S2, and S3, in sapphire fibers with decreasing diameters of 30, 20, and 14 μm, respectively [172,174-175]

表 2 6种传统FBG解调算法总结[177]

Table 2 Summary of six traditional FBG demodulation algorithms[177]

| Algorithm | Demodulationaccuracy | Anti-noiseperformance | Evaluation |
|---|---|---|---|
| Direct peak-finding | Low | Low | Higher requirements on the number of sampled spectral points |
| Power weighting algorithm (centroid method) | Low | Low | Peak-seeking error will be reduced in the case of low noise |
| General polynomial fitting | Middle | Low | Accuracy is with regard to the observed data. If the peak value is not within the sampling point, the error will be large |
| Gaussian fitting algorithm | High | High | Strict requirements on spectrum |
| Gaussian-polynomial fitting algorithm | Middle | Low | Accuracy is with regard to the observed data. If the peak value is not within the sampling point, the error will be large |
| Gaussian nonlinear curve fittingalgorithm | High | High | Be not applicable to actual situation |

为提高鲁棒性,SFBG传统解调方法逐渐从“峰值定位”转向“特征跟踪”。其中,一类典型思路是边缘特征提取,尤其是长波边缘跟踪。相较于峰顶位置,边缘特征对局部峰形畸变和模态能量再分配的敏感性通常更低,因此在宽峰、多峰谱形中表现出更好的稳定性。另一类更具代表性的路线是互相关与模板匹配,即将整段反射谱视作一个整体模板,通过当前谱与参考谱之间的相关性最大位置来估计漂移量。这类方法不依赖单个峰点,能够在一定程度上抵抗局部噪声、峰形轻微畸变与强度波动。Habisreuther等[179]针对SFBG反射谱宽峰、非对称及多模包络明显等特点,采用非对称峰拟合和多次测量平均来提高波长提取稳定性,并结合温度标定曲线扣除温度漂移,从而得到由应变引起的波长变化,实现高温应变解调(见图13(a)、(b))。Xu等[15,178]对SFBG高温传感的解调研究发现,基于互相关的SFBG解调在1 500 ℃、1 000 h级别长期高温实验中仍可将布拉格波长离散度控制在较小范围内,而基于附加多模光纤的长波边缘跟踪方法则可显著改善多模扰动下的波长检测稳定性(见图13(c)、(d))。

在多点或阵列型SFBG系统中,单一峰位提取已不能满足要求,因此又发展出多峰联合跟踪方法。其核心思想不是独立寻找某一个“最高峰”,而是同时利用包络、局部峰簇、峰间相对位置和连续采样过程中的谱形相似性来实现整体追踪。例如,Tan等近年的多峰自动寻峰算法将Hilbert变换、包络增强与互相关分析结合起来,实现了SFBG阵列的准分布式高温解调。这说明对于SFBG,真正有效的传统算法不是把某个峰拟合得更精细,而是构造一组在温度变化下整体迁移,但对模态扰动相对稳定的谱特征(见图14[32])。为了使上述算法稳定工作,光谱预处理和归一化是不可缺少的步骤。SFBG原始反射谱通常同时叠加了光源功率波动、探测器噪声、背景漂移、采样触发误差及不同批次采集条件差异;若直接对原始谱寻峰或回归,算法很容易把系统噪声误识别为温度信息。因此,SFBG解调前通常需要进行暗电流扣除、背景去除、参考通道校正、平滑去噪和波长轴重采样。常见平滑方式包括滑动平均、Savitzky-Golay滤波和小波去噪;若存在明显基线漂移,还需结合多项式基线校正、包络归一化或局部背景扣除。归一化方面,最常用的包括最小-最大归一化、$z$-score标准化、按峰值归一化、按谱面积归一化与L2范数归一化。对于互相关、模板匹配和边缘跟踪等传统方法,面积归一化和向量归一化更有利于保留谱形相对结构并抑制整体光功率变化;而对于机器学习方法,$z$-score标准化和全局归一化通常更有利于模型训练收敛和不同批次数据的一致性。因此,归一化在SFBG中并不是简单的数据格式处理,而是将“强度漂移”与“谱形变化”分离开的关键环节。作用是减少系统波动对解调结果的污染,为后续特征提取和模型反演提供可比较、可学习的输入空间[22,180-181]。

在标定与反演层面,SFBG传统算法可大致分为显式特征模型与隐式映射模型两类。显式模型先提取中心波长、长波边缘、包络中心、峰间距或多峰组合特征,再建立这些特征与温度之间的线性、分段线性、多项式或查找表关系;这种方式物理意义清晰,便于工程实现和误差分析。隐式模型则不要求中间变量必须对应某个明确的“中心波长”,而是将相关系数、模板距离、主成分得分或多通道功率响应直接映射到温度输出,尤其适用于宽峰、畸变峰和多模谱形。在温区较宽、谱形变化较强时,单一标定公式通常难以覆盖全温区,因此分段标定、在线重标定和动态补偿逐渐成为更现实的实现策略[180-181]。

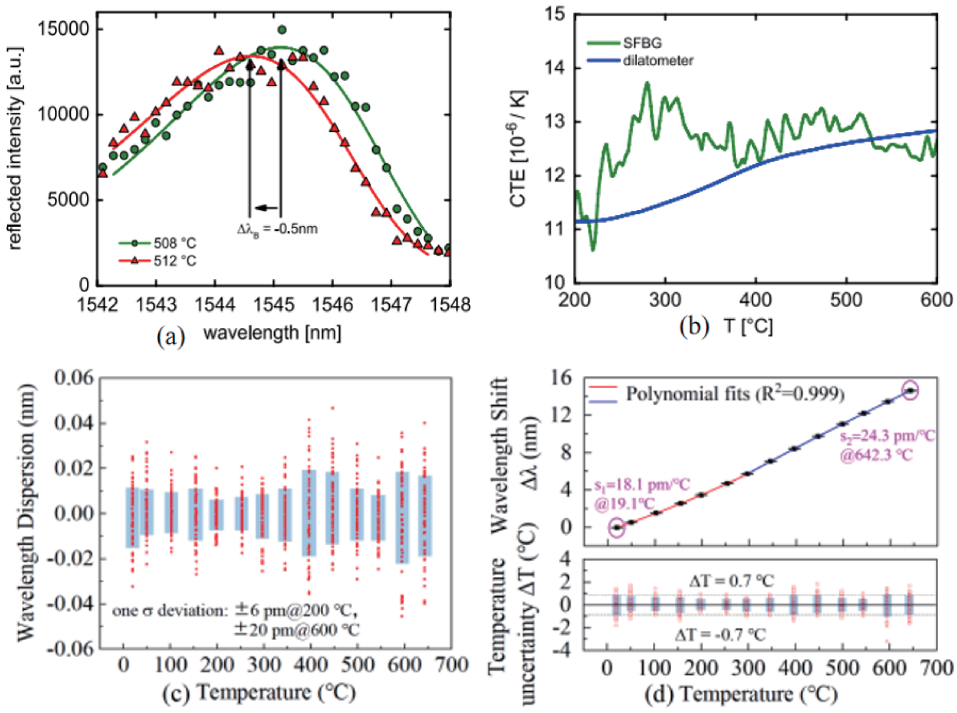



图 13　不同解调算法下 SFBG 的反射光谱分析与寻峰稳定性对比。(a)SFBG 的非对称反射峰,图中符号表示实测反射强度,单位为任意单位,实线表示采用式(2)拟合得到的峰函数,光纤中的应变释放导致 Bragg 波长向较短波长方向移动 0. 5 nm,如箭头所示,(b)所用钢基底热膨胀系数(CTE)随温度的变化,其中绿色曲线为基于 SFBG 的传感装置测得的结果,蓝色曲线为膨胀仪测得的结果,SFBG 传感器在 19 ℃至 650 ℃范围内的温度标定结果:(c)波长稳定性;(d)温度响应及其多项式拟合曲线[178-179]

Fig. 13　Comparison of reflection spectrum analysis and peak-detection stability of SFBG using different interrogation algorithms. (a) Asymmetric reflection peak of the SFBG, the symbols represent the measured reflection intensities in arbitrary units, and the solid lines represent the peak functions fitted using Eq. (2) strain release in the fiber causes the Bragg wavelength to shift by 0. 5 nm toward shorter wavelengths, as indicated by the arrows; (b) temperature dependence of the coefficient of thermal expansion (CTE) of the steel pad used in this study, as determined by the SFBG-based sensing device (green line) and by a dilatometer (blue line), temperature calibration results of an SFBG sensor from 19 ℃ to 650 ℃; (c) wavelength dispersion; (d) temperature response and its polynomial fitting curve[178-179]

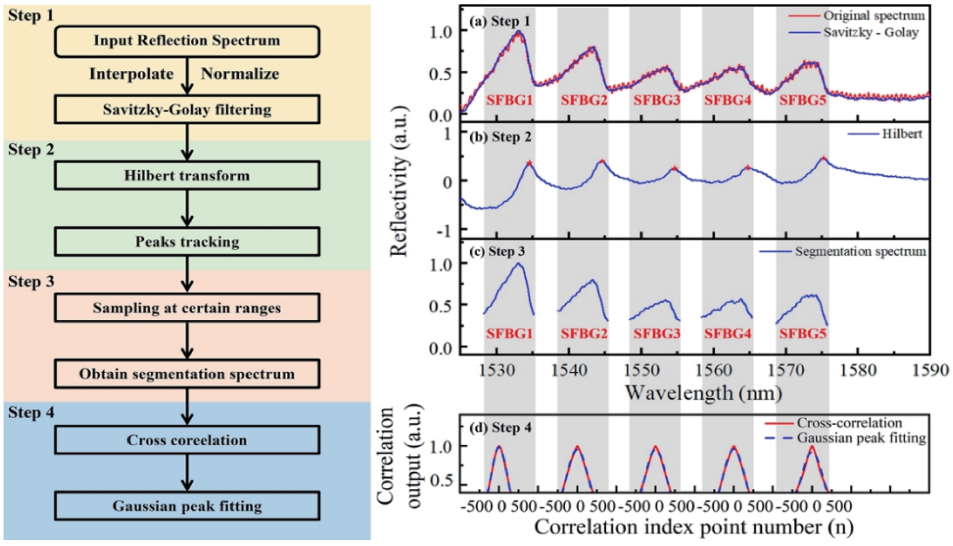



图 14　多峰检测算法流程图[32]

Fig. 14　Flowchart of the multi-peak detection algorithm [32]

### 4.2 机器学习在FBG/SFBG中谱峰提取与跟踪应用

近年来，机器学习方法（见表3）开始被引入FBG/SFBG解调，主要目的并不是简单“替代寻峰”，而是利用数据驱动模型学习复杂谱形与参量之间的非线性映射关系。对于宽峰、多峰、不对称及随工况变化而时变的反射谱，人工构造的单一特征通常不足以完整表征温度信息，而机器学习可以直接从整段光谱或高维特征向量中挖掘更稳定的模式。较轻量的模型包括PCA-KNN、偏最小二乘回归、支持向量回归、随机森林和极限学习机等；更强的非线性模型则包括多层感知机、一维卷积神经网络（one-dimensional convolutional neural network，1D-CNN）与结合连续采样信息的时序模型[180,182]。对SFBG来说，机器学习的优势在于它可以同时利用峰位、带宽、偏斜度、边缘斜率、局部峰簇结构与多通道能量分布等多种信息，从而在谱形剧烈变化时仍保持较好的温度反演能力。

目前在FBG解调中，基于AWG的解调架构中，机器学习显示出更强的应用潜力。传统两通道比值法默认相邻通道输出与波长之间近似单调对应，这一前提对于谱形稳定的普通FBG较为适用，但对宽峰、时变且多模的SFBG并不总成立。更合理的做法是将AWG全部输出通道看作对反射谱的离散采样结果，把多通道功率向量作为一种“谱指纹”，再利用轻量回归模型或神经网络进行联合解码。近年的FBG研究已经出现了AWG与机器学习模型协同设计的高精度宽量程解调系统，这为SFBG的片上高速解调提供了重要参考[110,114,182]。

**表3 9种机器学习算法对FBG解调效果对比总结[177]**

**Table 3 Performance comparison of FBG interrogation systems[177]**

| Model | Interrogation range | $R^2$ | RMSE | Training time |
|---|---|---|---|---|
| Net2 | 2 nm | 0.99 | 14.7 pm | — |
| BPNN | 2 nm | — | 1.291 5 pm | 200.4 s |
| Adam | 8 nm | 0.999 7 | 9.47 pm | 15.46 min |
| Lorentzian fitting | 1.6 nm | — | 3.7 pm | — |
| Liner fitting | 13.5 nm | — | 20 pm | — |
| Liner fitting | 1.6 nm | — | 2.1 pm | — |
| Gauss fitting | 1.56 nm | — | 6.79 pm | — |
| BPNN | 49.35 nm | 0.999 64 | 0.83~0.85 pm | — |
| Polynomial regression | 24 nm | 0.999 99 | 0.48~0.99 pm | 10.757 s |

近年来，机器学习方法开始被引入SFBG高温解调中，主要用于解决SFBG反射谱宽、多峰叠加、谱形不规则及低分辨率快速采集条件下传统寻峰算法稳定性不足的问题。Liu等[144]针对稀疏SFBG反射谱提出深度神经网络（deep neural network，DNN）机器学习辅助解调方法，通过单模光纤与蓝宝石光纤多模输出端直接耦合，并利用低成本、高速、粗分辨率光谱仪采集反射谱，再由机器学习模型补偿欠采样带来的信息损失，在5 kHz采集速率下实现约0.23 ℃的温度解调精度，说明全光谱特征学习可显著优于传统峰值搜索和曲线拟合，方法如图15所示。Wang等[183]则将准单模化SFBG结构与主成分分析-近邻算法（principal component analysis-k-nearest neighbor，PCA-KNN）算法结合，用于降低多模传输、振动串扰和高温背景辐射对解调精度的影响，实现了最高1 700 ℃的实时温度解调，并将高温解调精度提升至约2.42 ℃。总体来看，机器学习的核心作用不是简单替代寻峰，而是利用稀疏谱、宽谱或多峰谱中的整体特征，建立复杂反射谱形与温度之间的非线性映射，从而提高SFBG在高温、振动、低信噪比和快速动态测量场景下的解调稳定性。

不过，机器学习方法在SFBG解调中的有效性依赖若干前提。首先，训练数据必须覆盖真实使用条件，包括升温、降温、恒温、热循环及不同耦合状态和不同光强扰动下的谱形分布，否则模型很容易在现场工况中失效。其次，若不进行恰当的平滑、对齐和归一化，模型可能学习到的是光源涨落、背景漂移或采集批次差异，而非真正的温度特征。再次，高温长期应用场景要求模型具有在线更新能力，因此增量学习、在线序列学习和动态补偿比一次性离线训练更有工程意义。

总体来看，SFBG解调算法的发展正在从“单峰寻峰”转向“多特征鲁棒解码”。传统方法并未失去价值，而是在SFBG场景下演化为边缘跟踪、互相关、模板匹配和多峰自动跟踪等更稳健的形式；机器学习方法也

并不是与传统方法对立,而是建立在预处理、归一化、特征构造和标定补偿基础上的进一步增强。未来更有前景的SFBG解调路线,很可能是将光谱预处理、多特征联合跟踪、轻量机器学习反演,以及在线校准与高速实时处理结合起来,形成面向超高温、长时和复杂工况的完整读出链路[9,15,22,32,138,178,180-182]。

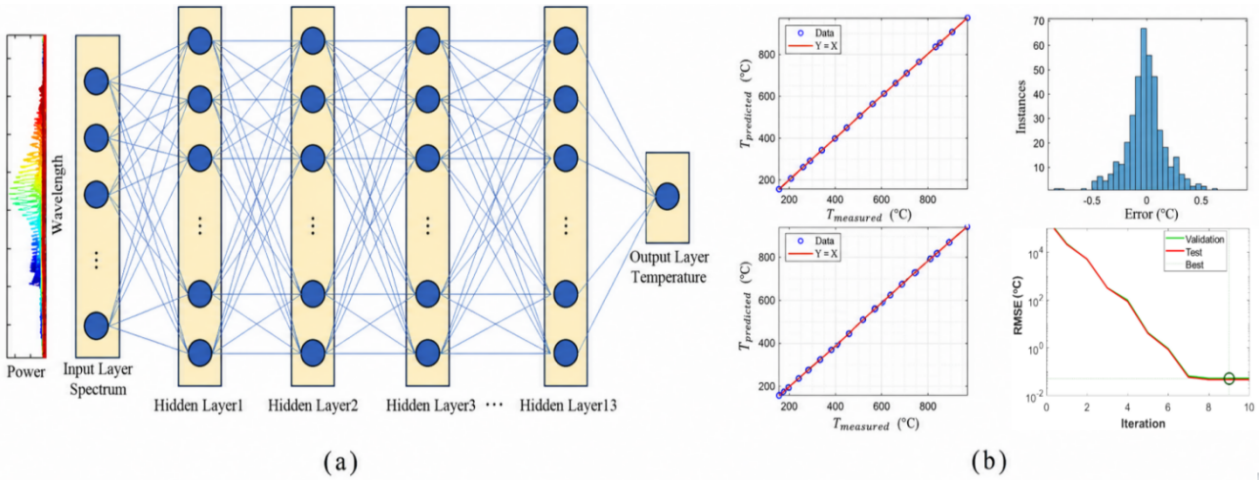



图15　基于DNN的SFBG解调算法。(a)实验中所采用的DNN模型结构;(b)DNN模型在静止条件下的性能表现及2 720组输入光谱的误差直方图;训练集和验证集的损失曲线图[144]

Fig. 15　DNN-based SFBG demodulation algorithm. (a) Structure of the DNN model used in the experiment; (b) performance of the DNN model under stationary conditions, together with the error histogram of 2 720 input spectra; loss graph of the raining and validation datasets[144]

## 5　典型应用

### 5.1　SFBG高温传感应用

SFBG解调技术的应用价值,主要体现在其能否在超高温、强热梯度、机械振动、辐照及长期服役等复杂环境中,稳定提取温度或应变信息。现有研究表明,SFBG已从早期实验室超高温单点测温,逐步拓展到动态测温、应变感知、阵列化与过程监测等方向[9,11,32,146,184-185]。在航空发动机燃烧室和涡轮热端部件测温中,SFBG可在最高约1 900 ℃下实现动态温度诊断,且温度分辨率优于±2 K,但该场景更强调抗振动、抗多模扰动和温度-应变联合解调能力[11,139,185-186]。在多点测温方面,SFBG的研究重点已从单个传感点的极限耐温能力,逐渐扩展到高温场的准分布式测量。Yang等[138]将3个SFBG级联写入同一根蓝宝石光纤中,构建了多点温度传感器,并在商用锅炉环境中进行了长期部署,说明SFBG阵列具备复杂工业高温环境下多点监测的可行性如图16(a)所示。随后,Tan等[32]进一步发展了5个SFBG阵列,并结合多峰自动跟踪算法,实现了高温环境下多个宽谱、复杂谱峰的稳定解调,提升了SFBG阵列在准分布式测温中的实用性(见图16(b))。Huang团队则报道了10个一阶SFBG高度级联阵列,进一步提高了蓝宝石光纤中可复用传感点数量,为更大范围热场分布测量提供了基础(见图16(c)[187])。此外,Luna相关方案展示了在蓝宝石光纤上写入更多光栅点并结合空间分辨解调的可能性,表明SFBG多点测温正朝着高密度阵列化、准分布式化和工程场景长期部署方向发展[149]。在核反应堆堆芯与燃料包壳监测中,关注重点则转向高温、辐照、长周期在线服役条件下的可靠性、冗余性与可追溯性,SFBG因蓝宝石材料的高温和抗辐照潜力而具有应用前景,但仍需进一步解决长期漂移、封装稳定性和远距离读出问题[15,178,188-189]。在冶金过程和工业炉温度场监控中,SFBG已较接近工程落地,相关研究不仅完成了锅炉现场数十天连续运行验证,还实现了多点阵列高温解调与长期稳定测试,表明该方向最直接推动了阵列化、长期稳定和闭环过程监测导向的解调体系发展[9,32,138,141,146,178]。总体而言,不同应用场景对SFBG解调技术的牵引各不相同:航空领域更强调高速与抗扰动,飞行器热端更强调高重复性,核能场景更重视高可靠与长期在线监测,而工业过程则最直接推动多点阵列与工程化系统的发展[9,11,15,32,138-139,146,175,178,185,188-189]。

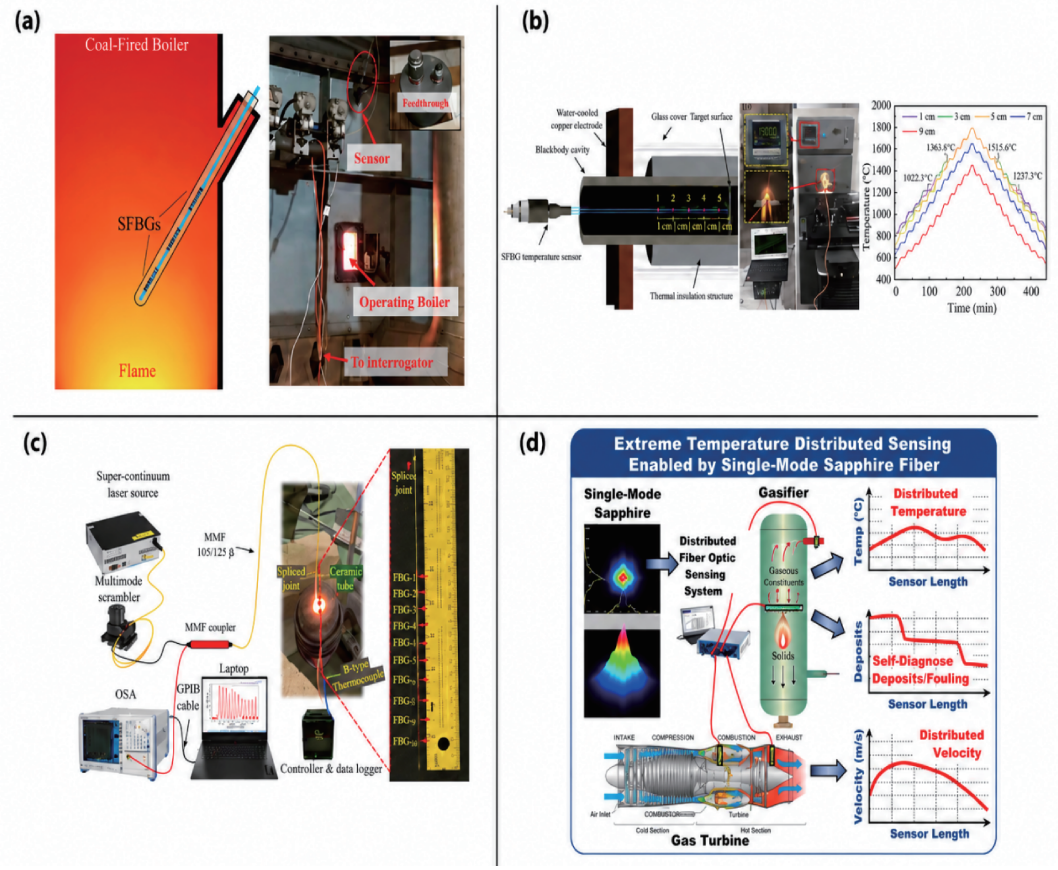



图 16 SFBG 高温传感应用示例。(a)Yang 等在燃煤锅炉中的传感器部署,包括传感器配置方案示意图和现场部署照片;(b)Tan 等基于 SFBG 阵列传感器的超高温黑体辐射炉温度分布测量,包括高温黑体辐射源温度分布测量原理、现场部署照片及不同热工况下的温度分布结果;(c)用于测试 SFBG 阵列在加热和冷却循环下性能的实验装置;(d)面向基于 FE 能源系统的传感系统概念图[32,138,149,187]

Fig. 16 High-temperature sensing applications of SFBG. (a) Sensor deployment in a coal-fired boiler reported by Yang et al., including the schematic diagram of the sensor configuration and the photograph of the deployment site; (b) ultrahigh-temperature blackbody radiation furnace temperature-distribution measurement based on an SFBG array sensor reported by Tan et al., including the measurement principle, field deployment, and temperature distributions under different thermal conditions; (c) experimental setup for testing the performance of an SFBG array during heating and cooling cycles; (d) sensing concept for FE-based energy systems [32,138,149,187]

## 5.2 SFBG 应变传感应用

在应变传感应用方面,SFBG 的研究主要围绕高温下应变传递、光谱稳定性和温度-应变交叉敏感展开。Habisreuther 等[179]较早报道了一阶 SFBG 高温应变传感器,重点解决蓝宝石光纤在高温结构表面固定和应变传递的问题,实验表明其可在 600 ℃条件下用于应变测量,并可用于金属热膨胀测试,为 SFBG 从单纯测温扩展到高温结构应变监测提供了基础(见图 17(a))。随后,吉林大学 Chen 等[190]利用飞秒激光在大直径蓝宝石光纤中写入高阶 Bragg 光栅,研究了不同高阶谐振峰的温度和应变响应特性,说明大直径 SFBG 可嵌入高温智能材料或结构中用于复合参量监测。Guo 等[191]进一步采用飞秒激光直写方式制备 SFBG,验证了其在高温和应变传感中的可行性,推动了 SFBG 在结构健康监测场景中的应用。近年,He 等[185]系统研究了 SFBG 在高温加载应变条件下的长期稳定性,指出 SFBG 在 1 600 ℃、650 με 条件下会发生不可逆塑性变形,而在 1 200 ℃以下能够较稳定地进行应变测量,并在 25、800 和 1 100 ℃下获得较好的线性响应和小于 15 με 的测量误差如图 17(b)所示。同时温度-应变的交叉影响也是极端温度下应变测量研究的重点,SFBG 的中心波长同时受温度和应变影响,因此在高温应变测量中存在显著的温度-应变交叉敏感性。其波长漂移可表示为温度项与应变项的叠加:温度变化主要由蓝宝石热膨胀系数和热光系数引起,应变变化则由光弹效应引起。

Habisreuther 等研究表明,SFBG 的温度灵敏度约为 24~30 pm/K,理论值约 30.5 pm/K,而应变灵敏度约为 1.4 pm/με,因此 1 K 的温度变化约等效于 20 με 的应变变化;若要实现约 10 με 的应变分辨率,需要将温度测量或稳定精度控制在约 0.5 K 以内。其解耦思路是先对无应变状态下的 SFBG 进行温度标定,获得纯温度-波长关系,再在实际高温应变测试中从总波长漂移中扣除温度引起的漂移,剩余部分换算为应变;温度可由外置热电偶、独立温度传感器或复用的另一根/另一段 SFBG 提供。He 的研究进一步表明,在 25、800 和 1 100 ℃下 SFBG 的应变响应仍保持良好线性,灵敏度约为 1.43~1.50 pm/με,但炉温±1 ℃的波动会带来几十 pm 的波长离散,说明高温下温度补偿仍是应变精确解调的关键。总体来看,SFBG 温度-应变解耦的核心并不是消除交叉敏感性,而是通过独立温度标定与同步温度补偿,将总波长漂移分解为温度漂移和真实机械应变漂移两部分[179,185]。在高速飞行器前缘与热防护结构中,局部热集中通常伴随热变形和热应力,因此相比单纯测温,更需要依赖小型化高重复性解调来支撑温度—应变耦合反演[139,175,178,185]。因此,SFBG 应变传感的优势在于耐高温和抗恶劣环境能力,但其工程应用仍受限于高温封装、应变传递可靠性、温度交叉敏感及蓝宝石材料高温塑性变形等问题。

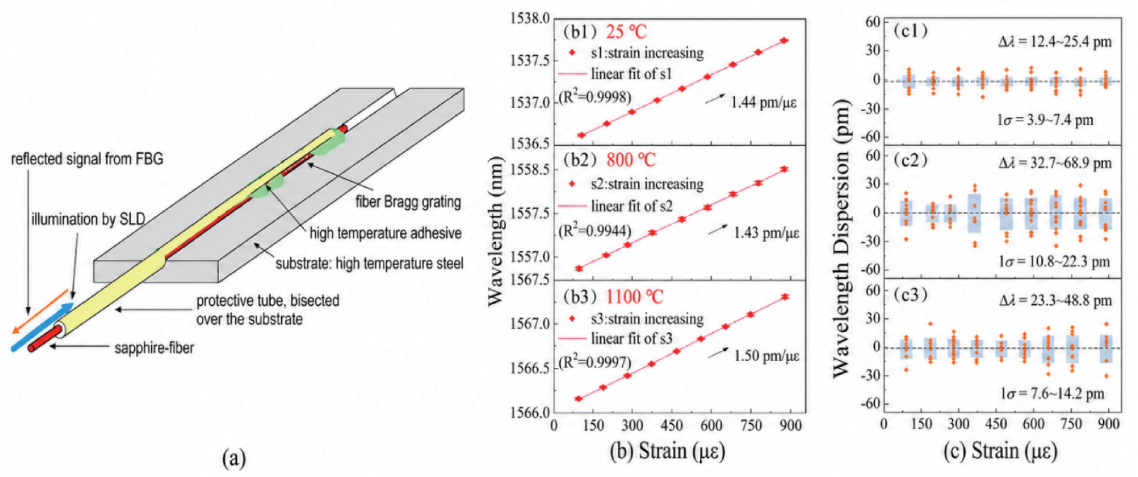



图 17　SFBG 应变传感应用示例。(a) SFBG 应变传感器设计图;SFBG 在 25、800 和 1100 ℃下的应变响应;(b)布拉格波长与应变之间的线性拟合关系;(c)应变测试过程中布拉格波长的离散分布[179,185]

Fig. 17　Examples of strain-sensing applications of sapphire fiber Bragg gratings. (a) Design diagram of the SFBG strain sensor and strain response of the SFBG at 25, 800, and 1 100 ℃; (b) linear fitting relationship between Bragg wavelength and strain; (c) discrete distribution of Bragg wavelength during the strain test [179,185]

## 6　总　　结

本文首先介绍了 FBG 的传感原理、解调基本流程及分辨率、精度、速度、量程、复用能力和鲁棒性等主要评价指标。随后围绕普通石英 FBG 和 SFBG 两类对象,综述了宽带光源与光谱仪直读、阵列光谱仪、窄线宽可调光源/扫频激光、滤波器、干涉仪、Fabry-Perot 器件、AWG/PIC、OFDR 及混合解调等典型技术路线,分析了不同解调方法的工作原理、性能特点和适用场景,并进一步归纳了 SFBG 在高温传感、多点测温、应变测量和复杂工程环境监测中的应用进展。从普通 FBG 解调技术看,OSA 和 CCD 阵列图像传感器能够获得完整反射谱信息,适合器件表征、标定实验和复杂谱形分析,但系统体积、成本和实时性仍然限制其现场应用。扫频激光和 Fabry-Perot 扫描式解调具有较好的速度和复用能力,但需要重点处理扫描非线性、迟滞、温漂与时间-波长映射误差。滤波器型解调结构简单、响应速度快,适合小型化和低成本系统,但其线性范围、温度稳定性和抗功率波动能力仍需补偿。干涉式解调在高分辨率动态测量方面具有优势,但容易受到偏振、相位漂移和环境扰动影响。AWG/PIC 解调则兼具并行读取、小型化和集成化潜力,是未来紧凑型多通道解调系统的重要方向。

对于 SFBG 而言,解调难点并不只是布拉格波长提取,而是由蓝宝石光纤强多模传输、宽带多峰反射谱、耦合状态敏感和高温封装扰动共同造成的谱形不稳定问题。传统单峰寻峰、质心法和类高斯拟合方法在

SFBG宽峰、峰分裂和非对称谱形条件下容易产生较大误差；互相关、分段标定、多峰约束跟踪和机器学习方法能够在一定程度上提高复杂谱形下的稳定性。与此同时，端面处理、耦合优化、模式滤除、稳模链路、高温封装和单模化等工程措施，是提升SFBG信噪比、重复性和长期可靠性的关键基础。近年的发展趋势表明，SFBG前端正在由“可写制光栅”转向“可解调谱形设计”，即通过细径化、偏置耦合、稳模光纤、单模波导和螺旋光栅等手段压窄带宽、提高FBG反射率并抑制高阶模，以提升高温长期读出的稳定性；后端解调则逐步由简单峰值法转向互相关、长波边缘跟踪和多峰自动跟踪等鲁棒策略，并结合在线标定与机器学习提高长期可靠性。在此基础上，AWG/PIC小型化解调可被视为SFBG工程化的重要潜在方向，因为常规FBG领域已经形成了基于PLC、单片集成AWG+PD、自温度补偿微型解调器及高速光子AWG芯片的解调方案，为高速并行、小型低功耗解调提供了较成熟的技术基础；但就目前仍主要停留在“常规FBG的AWG/PIC平台可为SFBG借鉴”，尚缺少直接面向SFBG的完整AWG解调系统实证研究。类似地，扫频激光/窄带可调光源路线在常规FBG阵列中已实现由波长到时间的映射，并发展出波长扫频光纤激光、FDML、多面转镜扫描器及热光扫频芯片等多种高速方案，说明其在动态测量、信噪比和实时性方面具有明显优势；对SFBG而言，扫频激光的潜在价值主要在于服务燃烧监测、瞬态热冲击和高温梯度快速跟踪，但前提是解决扫频线性化、触发同步、光源功率波动补偿及多模畸变谱稳定判读等问题。因此，未来更现实的发展路径应是：以前端稳模和谱形整形为基础，一方面面向SFBG的宽谱、多峰和温漂特征重构AWG通道带宽、重叠方式和串扰控制，并将参考通道、片上测温、LUT补偿及机器学习解码一体化设计；另一方面探索适配SFBG的高速扫频读出链路，逐步建立“稳模耦合-专用读出芯片/扫频源-在线标定-鲁棒谱形解调-高温封装稳定性”一体化系统框架，从而达到硬件小型化、谱形稳定化、算法鲁棒化、测量实时化的要求，推动SFBG解调从“研究可行”走向“长期可用、可集成、可规模化复制”的工程系统。

## 参 考 文 献


[1] Ceramic matrix composite (CMC) thermal protection systems (TPS) and hot structures for hypersonic vehicles[C]//15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 28 April 2008 - 01 May 2008, Dayton, Ohio. Reston, Virginia: AIAA, 2008: 2682.

[2] STRYDOM G. High temperature gas-cooled reactors: core design[R]. Idaho National Laboratory, 2021, INL/MIS-21-62418-Revision-0.

[3] TAHAN M, TSOUTSANIS E, MUHAMMAD M, et al. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: a review[J]. Applied Energy, 2017, 198: 122-144.

[4] SKIFTON R. High-temperature irradiation-resistant thermocouple instability model for in-pile reactor use[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1099584.

[5] FOOTE P D, FAIRCHILD C O, HARRISON T R. Pyrometric practice[R]. Technologic Papers of the Bureau of Standards, No. 170. Washington: National Bureau of Standards, 1921.

[6] MIHAILOV S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. Sensors, 2012, 12(2): 1898-1918.

[7] CHEN J J, LIU B, ZHANG H. Review of fiber Bragg grating sensor technology[J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2011, 4(2): 204-212.

[8] GROBNIC D, HNATOVSKY C, DEDYULIN S, et al. Fiber Bragg grating wavelength drift in long-term high temperature annealing[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1443.

[9] 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 ℃[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(20): 8345-8351.

[10] 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.

[11] 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.

[12] KABIR M A, WU K C, CHOU K T, et al. Hybrid growth of clad crystalline sapphire fibers for ultra-high-temperature (>1500 ℃) fiber optic sensors[J]. Photonics, 2025, 12(4): 299.

[13] JIAFENG WU X X. Single-mode sapphire fiber Bragg grating high-temperature sensor[J]. Photonics Research, 2025, 13(12): 3374-3382.

[14] LI Z D, TAN Q M, YAN Z H, et al. Reliable wavelength detection method of sapphire fiber Bragg gratings using added multimode fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 182: 112185.

[15] YUN S H, RICHARDSON D J, KIM B Y. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser[J]. Optics Letters,

1998, 23(11): 843-845.

[16] LI K, DONG M L, YUAN P, et al. Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(9): 094207.

[17] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.

[18] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.

[19] RAO Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(4): 355-375.

[20] CAMPANELLA C E, CUCCOVILLO A, CAMPANELLA C, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications[J]. Sensors, 2018, 18(9): 3115.

[21] TOSI D. Review and analysis of peak tracking techniques for fiber Bragg grating sensors[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2368.

[22] HU C Y, BAI W. High-speed interrogation for large-scale fiber Bragg grating sensing[J]. Sensors, 2018, 18(2): 655.

[23] JUNG J, NAM H, LEE J H, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single-fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier[J]. Applied Optics, 1999, 38(13): 2749-2751.

[24] LAI Y C, QIU G F, ZHANG W, et al. Amplified spontaneous emission-based technique for simultaneous measurement of temperature and strain by combining active fiber with fiber gratings[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(9): 3369-3372.

[25] SUGAVANAM S, GBADEBO A, KAMALIAN-KOPAE M, et al. Computational compressed sensing of fiber Bragg gratings[EB/OL]. arXiv, 2021, 2106. 09544v1.

[26] WANG R Z, SI J H, CHEN T, et al. Fabrication of high-temperature tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 23684.

[27] ALLA D R, MUMTAZ F, TEKLE H, et al. Cascaded sapphire fiber bragg gratings inscribed by femtosecond laser for high-temperature sensing [R]. OSTI, 2023.

[28] WANG C X, HUANG Z H, LI G F, et al. Simultaneous temperature and strain measurements using polarization-maintaining few-mode Bragg gratings[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5221.

[29] ZHANG H, JIANG J Z, LIU S, et al. Overlap spectrum fiber Bragg grating sensor based on light power demodulation[J]. Sensors, 2018, 18 (5): 1597.

[30] WANG J N, TANG J L. Feasibility of fiber Bragg grating and long-period fiber grating sensors under different environmental conditions[J]. Sensors, 2010, 10(11): 10105-10127.

[31] TAN Q M, UNIVERSITY S, LI Z D, et al. Sapphire fiber Bragg gratings array demodulated with the multi-peak auto-tracking algorithm for quasi-distributed high-temperature measurement[J]. Optics Express, 2025, 33(1): 414.

[32] SIMPSON A G, ZHOU K M, ZHANG L, et al. Optical sensor interrogation with a blazed fiber Bragg grating and a charge-coupled device linear array[J]. Applied Optics, 2004, 43(1): 33-40.

[33] ZHOU K, SIMPSON A G, CHEN X, et al. Fiber Bragg grating sensor interrogation system using a CCD side detection method with Superimposed blazed gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(6): 1549-1551.

[34] LI G Y, GUO T, ZHANG H, et al. Fiber grating sensing interrogation based on an InGaAs photodiode linear array[J]. Applied Optics, 2007, 46(3): 283-286.

[35] DAS B, CHANDRA V. Fiber-MZI-based FBG sensor interrogation: comparative study with a CCD spectrometer[J]. Applied Optics, 2016, 55 (29): 8287-8292.

[36] LIU Y, LIU Z Y, HUANG A Y, et al. Theoretical modeling and simulation of fiber Bragg grating sensor interrogator based on linear variable filter[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 5777.

[37] SCHRÖDER K, ROTHHARDT M, ECKE W, et al. Fibre optic sensing system for monitoring of current collectors and overhead contact lines of railways[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2017, 6(1): 77-85.

[38] BUCK T C, MÜLLER M S, PEREZ GRASSI A, et al. Detection of aliasing in sampled dynamic fiber Bragg grating signals recorded by spectrometers[J]. Measurement, 2011, 44(6): 1053-1058.

[39] NEGRI L, NIED A, KALINOWSKI H, et al. Benchmark for peak detection algorithms in fiber Bragg grating interrogation and a new neural network for its performance improvement[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3466-3482.

[40] WANG Y P, CUI Y P, YUN B F. A fiber Bragg grating sensor system for simultaneously static and dynamic measurements with a wavelength-swept fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(14): 1539-1541.

[41] JUNG E J, KIM C S, JEONG M Y, et al. Characterization of FBG sensor interrogation based on a FDML wavelength swept laser[J]. Optics Express, 2008, 16(21): 16552.

[42] CHEN D R, SHU C, HE S L. Multiple fiber Bragg grating interrogation based on a spectrum-limited Fourier domain mode-locking fiber laser[J]. Optics Letters, 2008, 33(13): 1395-1397.

[43] LIANG X, LI Z Y, WANG Y M, et al. Delay-disorder fiber Bragg grating recognition and calibration method for a Fourier domain mode-locked

wavelength-swept laser-based interrogation system[J]. Applied Optics, 2018, 57(28): 8148-8153.

[44] YAMAGUCHI T, SHINODA Y. Real-time fiber Bragg grating measurement system using temperature-controlled Fourier domain mode locking laser[J]. Optical Engineering, 2017, 56(6): 066112.

[45] LEE H S, LEE H D, KIM H J, et al. A fiber Bragg grating sensor interrogation system based on a linearly wavelength-swept thermo-optic laser chip[J]. Sensors, 2014, 14(9): 16109-16116.

[46] BORISOV Y S, NIZAMETDINOV A M, IVANOV O V, et al. Measurement of spectra of fiber Bragg gratings by tuning the wavelength of a laser diode[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 151: 108048.

[47] CHAN H M, LOPEZ-ZEPEDA J, PEÑA F, et al. Continuously swept laser-based fiber Bragg grating data acquisition system capable of operating in extreme environments[C]. NASA Armstrong Flight Research Center, 2023.

[48] ROY A, CHAKRABORTY A L, JHA C K. Fiber Bragg grating interrogation using wavelength modulated tunable distributed feedback lasers and a fiber-optic Mach-Zehnder interferometer[J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3562-3569.

[49] WANG Q, FARRELL G, FREIR T, et al. Low-cost wavelength measurement based on a macrobending single-mode fiber[J]. Optics Letters, 2006, 31(12): 1785-1787.

[50] WANG Q, RAJAN G, FARRELL G, et al. Macrobending fibre loss filter, ratiometric wavelength measurement and application [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(10): 3082.

[51] WU Q, WANG P F, SEMENOVA Y, et al. A study of the effect of the position of an edge filter within a ratiometric wavelength measurement system[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094013.

[52] WANG Q, FARRELL G, FREIR T. Study of transmission response of edge filters employed in wavelength measurements[J]. Applied Optics, 2005, 44(36): 7789-7792.

[53] RAJAN G, SEMENOVA Y, FREIR T, et al. Modeling and analysis of the effect of noise on an edge filter based ratiometric wavelength measurement system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(20): 3434-3442.

[54] PEREIRA L, MIN R, WOYESSA G, et al. Interrogation method with temperature compensation using ultra-short fiber Bragg gratings in silica and polymer optical fibers as edge filters[J]. Sensors, 2022, 23(1): 23.

[55] DONISI D, DE SIO L, BECCHERELLI R, et al. Optical interrogation system based on holographic soft matter filter[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(15): 151103.

[56] BECCHERELLI R, DE SIO L, UMETON C, et al. Fiber Bragg grating interrogation system based on a novel integrated optical filter[C]// SENSORS, 2008 IEEE. October 26-29, 2008, Lecce, Italy. IEEE, 2008: 140-143.

[57] DEY K, ROY S, KISHORE P, et al. Analysis and performance of edge filtering interrogation scheme for FBG sensor using SMS fiber and OTDR[J]. Results in Optics, 2021, 2: 100039.

[58] LIANG S, TJIN S C, NGO N Q, et al. Novel tunable fiber-optic edge filter based on modulating the chirp rate of a π-phase-shifted fiber Bragg grating in transmission[J]. Optics Communications, 2009, 282(7): 1363-1369.

[59] GUO T, TAM H Y, ALBERT J. Chirped and tilted fiber Bragg grating edge filter for in-fiber sensor interrogation[C]//CLEO: 2011 - Laser Applications to Photonic Applications. Baltimore, Maryland. OSA, 2011: CThL3.

[60] JACKSON D A, LOBO RIBEIRO A B, REEKIE L, et al. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network[J]. Optics Letters, 1993, 18(14): 1192-1194.

[61] DAVIS M A, KERSEY A D. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays[J]. Electronics Letters, 1995, 31(10): 822-823.

[62] LOBO RIBEIRO A B, FERREIRA L A, SANTOS J L, et al. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme[J]. Applied Optics, 1997, 36(4): 934.

[63] LEIDERMAN R, MATOS C J S, BRAGA A M, et al. Interrogation methods for fiber Bragg grating sensors[J]. International Conference on Fiber Optics and Photonics: Selected Papers from Photonics India '98, 1999, 3666: 554-560.

[64] CHIANG Y J, WANG L, CHEN H S, et al. Multipoint temperature-independent fiber-Bragg-grating strain-sensing system employing an optical-power-detection scheme[J]. Applied Optics, 2002, 41(9): 1661-1667.

[65] ZHAN Y, XUE S, YANG Q. Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(3): 135-137.

[66] WADE S A, ATTARD D P, STODDART P R. Analysis of transmission mode of a matched fiber Bragg grating interrogation scheme [J]. Applied Optics, 2010, 49(24): 4498-4505.

[67] CUI J W, HU Y, FENG K P, et al. FBG interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme[J]. Sensors, 2015, 15(7): 16516-16535.

[68] SOMAN R, MOAF F O, FIBOREK P, et al. Investigating the suitability of the matched fiber Bragg grating approach for guided wave based structural health monitoring[J]. Measurement, 2025, 242: 115935.

[69] OGAWA K, KOYAMA S, HASEDA Y, et al. Wireless, portable fiber Bragg grating interrogation system employing optical edge filter[J].

Sensors, 2019, 19(14): 3222.

[70] WUCHRER R, LAUTENSCHLÄGER G, METASCH R, et al. Filter-based interrogation of fiber Bragg grating sensors[C]//Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology. May 7-11, 2014, Dresden, Germany. IEEE, 2014: 453-457.

[71] WUCHRER R, HÄRTLING T. Filter-based interrogation unit for optical wavelength shift sensors[J]. Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2013, 2013, 8693: 869304.

[72] KIESEL P, SCHMIDT O, MOHTA S, et al. Compact, low-cost, and high-resolution interrogation unit for optical sensors[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(20): 201113.

[73] SCHMIDT O, KIESEL P, MOHTA S, et al. Resolving pm wavelength shifts in optical sensing[J]. Applied Physics B, 2007, 86(4): 593-600.

[74] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. Electronics Letters, 1992, 28(3): 236-238.

[75] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection[J]. Optics Letters, 1993, 18(1): 72-74.

[76] BRADY G, KALLI K, WEBB D J, et al. Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors[J]. Optics Letters, 1995, 20 (11): 1340-1342.

[77] JOHNSON G A, TODD M D, ALTHOUSE B L, et al. Fiber Bragg grating interrogation and multiplexing with a 3×3 coupler and a scanning filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(8): 1101-1105.

[78] ZHAO Y, LIAO Y B. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(1): 1-18.

[79] TODD M D, JOHNSON G A, ALTHOUSE B L. A novel Bragg grating sensor interrogation system utilizing a scanning filter, a Mach-Zehnder interferometer and a 3 × 3 coupler[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 771-777.

[80] JIANG Y. Stabilized 3 × 3-coupler-based interferometer for the demodulation of fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 2008, 47 (1): 015006.

[81] PERRY M, ORR P, NIEWCZAS P, et al. High-speed interferometric FBG interrogator with dynamic and absolute wavelength measurement capability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2897-2903.

[82] ZHOU J A, XIA L, CHENG R, et al. Radio-frequency unbalanced M-Z interferometer for wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 313-316.

[83] MARIN Y E, NANNIPIERI T, OTON C J, et al. Integrated FBG sensors interrogation using active phase demodulation on a silicon photonic platform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3374-3379.

[84] DAVIS M A, KERSEY A D. Application of a fiber Fourier transform spectrometer to the detection of wavelength-encoded signals from Bragg grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1289-1295.

[85] RAO Y J, JACKSON D A, ZHANG L, et al. Dual-cavity interferometric wavelength-shift detection for in-fiber Bragg grating sensors[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1556-1558.

[86] ROCHFORD K B, DYER S D. Demultiplexing of interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors using Hilbert transform processing [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 831.

[87] GORNALL W, AMAREL T R. Accurate wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors using Michelson interferometry[J]. Industrial and Highway Sensors Technology, 2004, 5272: 56.

[88] O'MAHONEY K T, O'BYRNE R P, SERGEYEV S V, et al. Short-scan fiber interferometer for high-resolution Bragg grating array interrogation[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(10): 1277-1281.

[89] FLAVIN D A, MCBRIDE R, JONES J D C. Short-scan interferometric interrogation and multiplexing of fibre Bragg grating sensors[J]. Optics Communications, 1999, 170(4/5/6): 347-353.

[90] HUANG Y, LI M X, LI T F, et al. On-chip phase interrogator based on a silicon Michelson interferometer for wavelength-multiplexed FBG sensors[J]. Optics Letters, 2025, 50(24): 7504-7507.

[91] LI T F, WANG S, CHEN F Y, et al. High-precision FBG sensor demodulation based on a tunable Michelson interferometer with parallel FBGs [J]. Optics Letters, 2026, 51(4): 849-852.

[92] MA Y C, WANG C J, YANG Y H, et al. High resolution and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50: 107-111.

[93] PARK H J, SONG M. Linear FBG temperature sensor interrogation with Fabry-Perot ITU multi-wavelength reference[J]. Sensors, 2008, 8 (10): 6769-6776.

[94] ALLAN W R, GRAHAM Z W, ZAYAS J R, et al. Multiplexed fiber Bragg grating interrogation system using a microelectromechanical Fabry-Perot tunable filter[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(8): 936-943.

[95] VAN HOE B, OMAN K G, VAN STEENBERGE G, et al. High-speed interrogation of multiplexed fiber Bragg gratings with spectral distortion[J].

IEEE Sensors Journal, 2017, 17(21): 6941-6947.

[96] SHENG W J, PENG G D, LIU Y, et al. An optimized strain demodulation method for PZT driven fiber Fabry-Perot tunable filter[J]. Optics Communications, 2015, 349: 31-35.

[97] SHENG W J, DANG H Q, PENG G D. Hysteresis and temperature drift compensation for FBG demodulation by utilizing adaptive weight least square support vector regression[J]. Optics Express, 2021, 29(24): 40547.

[98] JEONG S Y, CHOI S J, PAN J K. Improved FBG interrogator considering FFP filter nonlinearity and investigation into performance limit[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(1): 41-47.

[99] LIU K, JING W C, LIU T G, et al. The influence of Fabry-Perot tunable filter on dynamic strain sensing system[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6830: 68301K.

[100] ZHANG W F, LI Y W, JIN B, et al. A fiber Bragg grating interrogation system with self-adaption threshold peak detection algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1140.

[101] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. Optics Letters, 1993, 18(16): 1370-1372. 2064.

[102] RAO Y J, HENDERSON P J, JACKSON D A, et al. Simultaneous strain, temperature and vibration measurementusing amultiplexed in-fibre-Bragg-grating/fibre-Fabry-Perot sensor system[J]. Electronics Letters, 1997, 33(24): 2063-2064.

[103] WANG J H, XU X M, DING J F, et al. Fiber Bragg grating demodulation system based on fiber Fabry-Perot etalon and multi-gratings calibrated[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(6): 606003.

[104] DÍAZ C A R, LEITÃO C, MARQUES C A, et al. Low-cost interrogation technique for dynamic measurements with FBG-based devices[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2414.

[105] CHOW J H, CUMPSTON J S, LITTLER I C M, et al. Interrogation of a fiber Fabry-Perot sensor by current modulation of a diode laser[EB/OL]. arXiv, 2004: physics/0411100.

[106] CHOW J H, LITTLER I C M, DE VINE G, et al. Phase-sensitive interrogation of fiber Bragg grating resonators for sensing applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(5): 1881-1889.

[107] TOSI D. Advanced interrogation of fiber-optic Bragg grating and Fabry-Perot sensors with KLT analysis[J]. Sensors, 2015, 15(11): 27470-27492.

[108] KOCH J, ANGELMAHR M, SCHADE W. Arrayed waveguide grating interrogator for fiber Bragg grating sensors: measurement and simulation[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7718-7723.

[109] LI K, YUAN P, LU L D, et al. PLC-based arrayed waveguide grating design for fiber Bragg grating interrogation system[J]. Nanomaterials, 2022, 12(17): 2938.

[110] MARRAZZO V R, FIENGA F, RICCIO M, et al. Multichannel approach for arrayed waveguide grating-based FBG interrogation systems[J]. Sensors, 2021, 21(18): 6214.

[111] ZHUANG Y, ZOU J, ZHANG J Q, et al. On-chip sub-picometer continuous wavelength fiber-Bragg-grating interrogator[J]. Photonic Sensors, 2024, 14(1): 240126.

[112] CHEN Z H, ZHUANG Y, MENG L X, et al. Fully integrated on-chip FBG interrogator for high-accuracy measurement of wavelengths[J]. Optics Letters, 2023, 48(22): 5935-5938.

[113] LI T, YUAN P, et al. Monolithic integrated chip of AWG and PD for an FBG interrogation system[J]. Optics Express, 2024, 32(9): 15827.

[114] SŁOWIKOWSKI M, KAŹMIERCZAK A, STOPIŃSKI S, et al. Photonic integrated interrogator for monitoring the patient condition during MRI diagnosis[J]. Sensors, 2021, 21(12): 4238.

[115] JIAO Y J, YAO K, LIN Q J, et al. Miniaturized high-speed FBG interrogator based on a photonic AWG chip[J]. Nanomaterials, 2026, 16(2): 89.

[116] XU R, YUAN P, YANG Y Y, et al. A multi-channel AWG-based FBG interrogation system using a 1 × 4 MEMS optical switch[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 88: 104004.

[117] LI S F, YUAN P, LI K, et al. AWG-based large dynamic range fiber Bragg grating interrogation system[J]. Optoelectronics Letters, 2024, 20(3): 129-134.

[118] MOORE J P. Basic theory and operating principles of optical frequency domain reflectometry measurement systems as applied to fiber Bragg grating sensors[R]. 2023, NASA/TP-20230005269.

[119] WERZINGER S, BERGDOLT S, ENGELBRECHT R, et al. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensing using stepped incoherent optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(22): 5270-5277.

[120] CLEMENT BELLIDO J, PERALTA J H, MADRIGAL J M, et al. Fast incoherent OFDR interrogation of FBG arrays using sparse radio frequency responses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4393-4400.

[121] CLEMENT J, MAESTRE H, TORREGROSA G, et al. Incoherent optical frequency-domain reflectometry based on homodyne electro-optic downconversion for fiber-optic sensor interrogation[J]. Sensors, 2019, 19(9): 2075.

[122] ZHOU B, YAN C S, GUAN Z G, et al. Low coherent optical frequency domain reflectometry interrogates fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(21): 3049-3054.

[123] WERZINGER S, ZIBAR D, KÖPPEL M, et al. Model-based position and reflectivity estimation of fiber Bragg grating sensor arrays[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2268.

[124] WANG J Q, LI Z Y, YANG Q, et al. Interrogation of a large-capacity densely spaced fiber Bragg grating array using chaos-based incoherent-optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5202-5205.

[125] YANG N, ZHANG J D, YU L J, et al. A flexible multiplexing method of FBG sensors based on OFDR[J]. Optik, 2022, 267: 169764.

[126] ZHANG H R, FAN D, MA Y, et al. Interrogation of 5000 ultraweak fiber Bragg grating sensors using optical frequency domain reflectometry[J]. Optical Engineering, 2018, 57(10): 1.

[127] HART J D, WILLIAMS C R S, CRANCH G A. Range limitations of optical frequency domain reflectometry with all-grating fiber for distributed strain and temperature sensing[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 44300.

[128] CHAN P K C, JIN W, GONG J M, et al. Multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a FMCW technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(11): 1470-1472.

[129] CHAN P K C, JIN W, SULEYMAN DEMOKAN M. FMCW multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(5): 756-763.

[130] CHAN P K C, JIN W, DEMOKAN M S. Frequency division multiplexing of FBG sensors using an FMCW approach[J]. Fifth European Conference on Smart Structures and Materials, 2000, 4073: 305-310.

[131] BREGLIO G, IRACE A, CUSANO A, et al. Chirped-pulsed frequency modulation (C-PFM) for fiber Bragg grating sensors multiplexing[J]. Optical Fiber Technology, 2006, 12(1): 71-86.

[132] GAGLIARDI G, SALZA M, FERRARO P, et al. Fiber Bragg-grating strain sensor interrogation using laser radio-frequency modulation[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2377.

[133] HANTO D, IIYAMA K. Low-cost interrogation of long-distance and multipoint FBG sensor using incoherent-FMCW optical ranging system[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3599-3607.

[134] YOU J X, SHAN M, SUGITA Y, et al. Multipoint FBG sensing system for long-range and long-term structural health monitoring by incoherent FMCW optical ranging system[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(12): 21608-21616.

[135] PEREZ-HERRERA R A, PEREIRA D A, FRAZÃO O, et al. Optimization of the frequency-modulated continuous wave technique for referencing and multiplexing intensity-based fiber optic sensors[J]. Measurement, 2011, 44(1): 230-237.

[136] PEREZ-HERRERA R A, FRAZAO O, SANTOS J L, et al. Frequency modulated continuous wave system for optical fiber intensity sensors with optical amplification[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(12): 1647-1653.

[137] 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.

[138] WANG M H, SALTER P S, PAYNE F P, et al. Single-mode sapphire fiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 15482.

[139] GROBNIC D, MIHAILOV S J, SMELSER C W, et al. Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2505-2507.

[140] 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.

[141] 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 and Technology, 2009, 20(11): 115301.

[142] HABISREUTHER T, ELSMAN T, PAN Z, et al. Long-term stable sapphire fiber Bragg grating sensors at 1400 ℃[J]. 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 2014, 9157: 915719.

[143] LIU X, ALSALMAN O, LIU B, et al. Fast and robust demodulation of temperature from sparse sapphire fiber Bragg grating spectra with machine learning[J]. Optics Express, 2024, 32(8): 13882.

[144] 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): 4724-4727.

[145] 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.

[146] 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.

[147] LUNA INNOVATIONS. Fiber optic sensing for very high temperatures[EB/OL]. Luna Blog, 2018.

[148] OHANIAN O J, BOULANGER A J, ROUNTREE S D, et al. Single-mode sapphire fiber optic distributed sensing for extreme environments[C]// Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications XI. April 14-18, 2019. Baltimore, USA. SPIE, 2019: 94.

[149] 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.

[150] 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.

[151] 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.

[152] 徐锡镇. 蓝宝石光纤光栅的制备及高温传感特性研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
XU X Z. Preparation of Sapphire fiber bragg gratings and their high-temperature sensing characteristics[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019 (in Chinese).

[153] 谭庆铭. 蓝宝石光纤光栅高温应变传感器封装与解调技术研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2025.
TAN Q M. Packaging and demodulation technology of sapphire fiber Bragg grating high-temperature strain sensors[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2025 (in Chinese).

[154] 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.

[155] 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: 011102.

[156] BARNES A E, MAY R G, GOLLAPUDI S, et al. Sapphire fibers: optical attenuation and splicing techniques[J]. Applied Optics, 1995, 34(30): 6855-6858.

[157] MUMTAZ F, ALLA D R, ROMAN M, et al. Thermally robust and highly stable method for splicing silica glass fiber to crystalline sapphire fiber[J]. Applied Optics, 2023, 62(5): 1392-1398.

[158] MIHAILOV S J, GROBNIC D, SMELSER C W. High-temperature multiparameter sensor based on sapphire fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2010, 35(16): 2810.

[159] RUBIN D S, SAADI Y, SHAFIR E, et al. Compact and rotationally invariant design of angle-polished optical fiber assembly emitting along the mechanical axis[J]. Applied Optics, 2015, 54(12): 3588-3590.

[160] 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.

[161] 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.

[162] 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.

[163] HE J, CHEN Z Y, XU X Z, et al. Femtosecond laser line-by-line inscription of apodized fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2021, 46(22): 5663-5666.

[164] RAWSON E G, GOODMAN J W, NORTON R E. Analysis and measurement of the modal-noise probability distribution for a step-index optical fiber[J]. Optics Letters, 1980, 5(8): 357-358.

[165] HILL K O, TREMBLAY Y, KAWASAKI B S. Modal noise in multimode fiber links: theory and experiment[J]. Optics Letters, 1980, 5(6): 270-272.

[166] HA W, LEE S, JUNG Y, et al. Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction[J]. Optics Express, 2009, 17(20): 17536.

[167] 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.

[168] KOPLOW J P, KLINER D A V, GOLDBERG L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2000, 25(7): 442-444.

[169] GROBNIC D, MIHAILOV S J, DING H, et al. Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fibre Bragg grating sensor with tapered fibres[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(5): 980.

[170] BOGAERTS W, DE HEYN P, VAN VAERENBERGH T, et al. Silicon microring resonators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(1): 47-73.

[171] BÉRUBÉ J P, LAPOINTE J, DUPONT A, et al. Femtosecond laser inscription of depressed cladding single-mode mid-infrared waveguides in sapphire[J]. Optics Letters, 2019, 44(1): 37-40.

[172] KEFER S, ROTH G L, ZETTL J, et al. Sapphire photonic crystal waveguides with integrated Bragg grating structure[J]. Photonics, 2022, 9(4): 234.

[173] WANG M H, SALTER P S, PAYNE F P, et al. Single-mode sapphire fiber temperature sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(18): 6409-6416.

[174] XU X Z, HE J, WU J F, et al. Single-mode helical sapphire Bragg grating for high-temperature sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(6): 2982-2987.

[175] TAN Q M, XU X Z, HE J, et al. Demodulation of temperature from sapphire fiber Bragg grating reflection spectra with Gaussian-like curve fitting algorithm[C]//Fifteenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2024). August 6-10, 2024. Xi'an, China. SPIE, 2024: 171.

[176] 韩　超, 胡宾鑫, 朱　峰, 等. 光纤光栅高精度解调算法研究进展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1300005.
HAN C, HU B X, ZHU F, et al. Review on progress of high-precision demodulation algorithm of fiber Bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1300005 (in Chinese).

[177] XU X Z, TAN Q M, LI Z D, et al. Sapphire fiber Bragg gratings demodulated with cross correlation algorithm for long-term high-temperature measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(6): 7905-7911.

[178] 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.

[179] DE MIGUEL J L, GALINDO-SANTOS J, DE TORRES C P, et al. Experimental demonstration of low-uncertainty calibration methods for Bragg grating interrogators[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1895.

[180] SHANG Q F, QIN W J. Fiber Bragg grating dynamic calibration based on online sequential extreme learning machine[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1840.

[181] WANG Q C, LU J W, CHEN Y F, et al. High-precision wide-range FBG interrogation based on AWG and ultra-lightweight machine learning model[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 191: 113340.

[182] WANG Z C, XU W J, WANG L N, et al. High-temperature stability and demodulation techniques analysis of sapphire fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(5): 2312-2320.

[183] BAO Y, HUANG Y, HOEHLER M S, et al. Review of fiber optic sensors for structural fire engineering[J]. Sensors, 2019, 19(4): 877.

[184] HE J, LI Z D, XU X Z, et al. High-temperature strain sensor based on sapphire fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2024, 49(3): 446-449.

[185] WILLSCH M, BOSSELMANN T, FLOHR P, et al. Design of fiber optical high temperature sensors for gas turbine monitoring[J]. 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2009, 7503: 75037R.

[186] MUMTAZ F, TEKLE H, ZHANG B H, et al. Highly cascaded first-order sapphire optical fiber Bragg gratings fabricated by a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2023, 48(16): 4380-4383.

[187] FERNANDEZ A F, GUSAROV A I, BRICHARD B, et al. Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 41(6): 1246-1254.

[188] LAFFONT G, COTILLARD R, ROUSSEL N, et al. Temperature resistant fiber Bragg gratings for on-line and structural health monitoring of the next-generation of nuclear reactors[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1791.

[189] 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.

[190] 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.



徐锡镇,深圳大学物理与光电工程学院副教授、博导,“广东特支计划”青年拔尖人才,深圳市高层次人才。目前的研究方向包括:光纤高温力热多参量传感技术、时空整形飞秒激光微纳加工技术。已主持国家自然科学基金2项(面上项目、青年科学基金)、国防科工局揭榜挂帅项目1项、JWZF专项项目1项、国家重点研发计划青年科学家项目子课题1项、广东省自然科学基金2项等;共发表论文70余篇,其中SCI期刊论文60篇,一作/通信22篇;授权发明专利13项;获得教育部自然科学奖二等奖1项、广东省光学学会光学科技奖一等奖1项。连续两年(2023年、2024年)入选全球前2%科学家“年度科学影响力排行榜”。担任深圳市南山区物联网光子器件与系统重点实验室副主任、红外与激光工程青年编委、Sensors期刊客座编辑等。