

光纤敏感机理与材料：从“传光”到“感知”的技术跃迁

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

从通信传输的“信息干线”到工业、医疗、安防领域的“感知神经”，光纤已从单纯传光功能，拓展出将温度、应变、化学浓度等外界信号转化为光信号的敏感感知功能。以光波作为传输载体，光纤具备天然抗电磁干扰、绝缘安全、耐高低温、可分布式长距离布设的独特优势，是高端传感领域的核心技术载体。

产业中普遍存在一个核心认知误区：认为常规通信光纤可直接改造用于传感监测。事实上，通信光纤与传感光纤的设计逻辑完全相悖：通信光纤的核心目标是最大限度隔绝外界环境对传输光的扰动，保障传输信号稳定、低损耗、高带宽；而光纤敏感材料则通过主动设计材料组分、微观结构与表面功能涂层，让外界物理、化学扰动能够有效调制光的强度、波长、相位、偏振，精准将环境变化转化为可读取、可标定的光学信号。

需要明确的是，光纤敏感材料并非通信光纤的附属产物，而是独立的“材料-器件-系统”技术体系。光纤传感技术已深度渗透电力电网、油气能源、航空航天等关键领域。但同时也要客观正视产业短板：高端特种敏感光纤、部分核心解调芯片本土化率不足，新材料、新器件的标准化工程应用规范尚不健全。因此，系统梳理光纤家族谱系，精准区分传光型光纤与敏感型光纤的本质差异，解析各类主流光纤敏感材料的物质构成、敏感机理与本征特性，阐述敏感器件的功能与关键性能指标，剖析产业化落地瓶颈、研判技术演进方向，能为行业技术人员、工程应用方、产业研究者提供系统、严谨的技术参考，具备重要的理论与工程现实意义。

区分“传光型”与“敏感型”材料

光纤整体由纤芯、包层、涂覆层三层基本结构构成，光依靠纤芯-包层界面的全内反射效应，被约束在纤芯内部向前传输。不同光纤的核心差异，集中体现在基体材质、掺杂组分、微观孔道结构、表面功能涂层四个维度。光纤家族品类庞大，但绝大多数商用光纤以通信传输为核心定位，不具备精准感知能力；只有经过材料组分改性、微观结构重构、功能化涂层修饰的特种光纤，才能获得稳定、可控的光学响应特性，实现标准化传感功能。

按照基体材质与结构特征，可将光纤家族划分为石英系光纤、聚合物光纤、微结构光纤、陶瓷基光纤、功能涂层改性光纤五大类别，每一类均包含面向通信的传光型产品与面向感知的敏感型产品，二者在设计目标、掺杂方案、结构参数、性能特性上存在本质差异。

石英系光纤以高纯二氧化硅为基体材料，是产业体量最大、技术最成熟的光纤品类，可同时适配通信传输与精密传感场景。

传光型石英通信光纤，掺杂元素含量极低，纤芯少量掺锗仅用于小幅提升折射率、优化传输性能，核心追求超低传输损耗。该类光纤材料对外界温度、应变响应极其微弱，信噪比极低，无法用于FBG等定点高精度定量传感，仅作为光信号长距离传输通道；但其可依托瑞利、布里渊、拉曼散射效应，实现DTS、DAS、BOTDA等分布式场景的温度、应变、振动监测。

敏感型石英光纤属于特种石英光纤，通过主动提升掺杂浓度，引入锗、硼、锡等光敏掺杂元素，赋予材料优异的光敏效应、弹光效应、热光效应。依托上述本征物理效应，可通过紫外曝光、飞秒激光直写

等工艺在光纤内部刻写光栅结构，实现温度、应变、压力的精准感知。该类光纤是当前产业化应用规模最大的光纤敏感基底，广泛用于光纤布拉格光栅传感器。石英基体具备化学稳定性优异、机械强度高、温区跨度大的优势，是极端工况下传感应用的首选基底材料。

聚合物光纤以有机高分子材料为基体，主流基材包括PMMA聚甲基丙烯酸甲酯、聚酰亚胺、氟系聚合物等，核心定位为柔性、低应力场景传感，极少用于长距离光通信。

敏感型聚合物光纤是柔性光纤传感的核心载体，高分子聚合物的弹光系数远高于石英材料，微小形变、环境温度变化即可引发光纤折射率与几何尺寸的显著变化。通过染料掺杂、纳米颗粒复合改性后，可进一步强化材料对应力、湿度、温度的响应灵敏度。其核心短板为高分子本征属性限制，耐热性能有限、易受有机溶剂与水汽侵蚀，长期循环受力易出现蠕变老化、零点漂移，工况适配范围有限。

微结构光纤是新一代特种光纤的核心代表，摆脱了传统光纤“掺杂调控折射率”的单一技术路径，通过微米级微观结构设计调控光场分布，主要分为光子晶体光纤与结构改性微光纤两大品类。

传光型微结构光纤主要依托空芯结构实现超低损耗传光，适配特种激光传输、高端专用通信场景，核心追求光信号稳定传输。

敏感型微结构光纤是光纤传感技术的重要演进方向，通过精准调控空气孔孔径、排布方式，或采用研磨、拉锥工艺，可人为强化倏逝场强度，使大量传输光场暴露于光纤外表面。外部液体、气体介质可

直接与光场发生光学交互，无需高浓度掺杂即可实现折射率、气体组分、温度等多参数精准感知，尤其适配化学、生物检测场景。

陶瓷基光纤的典型代表为单晶蓝宝石氧化铝光纤，以单晶或多晶陶瓷为基体，不适配长距离光通信传输，核心定位为超高温、强腐蚀等极端环境感知。该材料硬度极高、化学惰性强，但脆性大、抗弯折性能差、熔接对接工艺难度高，目前仍处于小批量示范应用阶段。

前述四类光纤的感知能力均来源于基体材料本身的组分与结构特性，而功能涂层改性光纤是以普通石英光纤、微结构倏逝场光纤为基底的复合型敏感光纤。基底不仅承担光信号传输功能，其微观结构、倏逝场特性直接决定光学交互能力，是传感响应的基础前提；光纤的核心感知功能由表面涂覆的纳米级-微米级功能敏感薄膜实现，依托涂层的物理吸附、化学反应特性，完成化学、生物参量检测。

该技术路径可复用普通商用光纤基材，大幅降低基底成本，通过更换涂层材料即可切换检测对象，研发迭代速度快，彻底打破了传统光纤仅能检测温度、应变等物理量的局限，将光纤传感边界拓展至气体、液体化学成分、生物标志物检测领域。其产业化核心痛点集中在涂层工艺：涂层与光纤基体附着力不足、批量制备厚度与孔隙率均匀性差，长期工况下易出现涂层脱落、活性中毒、信号漂移等问题，是制约规模化落地的关键瓶颈。

工程应用中常出现认知疑问：同为石英光纤，为何部分仅可用于通信传光，部分可用于精准传感。二者的本质差异不在于外形、材质，而在于设计目标与光学响

应特性的截然不同，核心判定标尺为是否具备稳定、可控、可标定的光调制能力。

通信光纤的全部设计逻辑，是最大限度抑制温度、机械形变、周边介质变化等外界扰动对传输光的影响，保障光信号强度、波长、相位、偏振态的高度稳定。外界扰动引发的光参数漂移，在通信系统中均定义为噪声，需通过材料优化、涂层防护、结构设计全方位抑制。简言之，通信光纤追求“对外无感、信号恒定”。即便普通通信光纤客观存在微弱的热光效应、弹光效应，但其信号响应量级极小、信噪比极低，混杂大量噪声，无法用于定点定量传感测量，仅可满足低精度分布式监测需求。

敏感光纤的设计逻辑与通信光纤完全相反：主动利用材料本征物理、化学效应，让外界被测物理量、化学量能够规律、稳定地调制传输光的核心特征参量，建立可标定、可复现的对应关系。主流调制机制分为四类：

波长调制：外界参量变化改变光栅周期与纤芯折射率，引发反射光中心波长漂移，核心器件为FBG光纤布拉格光栅；

相位调制：外界扰动改变光纤光程差，导致干涉光谱偏移，核心器件为MZI马赫-曾德尔干涉仪；

光强调制：被测介质改变光吸收系数、倏逝场耦合效率，引发输出光功率变化；

偏振态调制：磁场、应力诱导光纤双折射变化，导致光的偏振态偏转。

合格的敏感光纤不仅可产生光学信号响应，还需满足响应线性度好、重复性强、噪声低的要求，实现外界参量与光学输出信号的精准映射，这是其区别于通信光纤的核心标准。

主流光纤敏感材料及机理解析

明确光纤家族谱系与核心差异后，本章从组分构成、微观作用机理、本征特性优劣三个维度，系统解析四类主流光纤敏感材料，厘清“材料物化变化规律、环境信号光电转化机制、性能上限与先天短板”，为理解器件性能、工程选型、技术迭代提供底层理论支撑。

掺杂石英光纤是当前国内工程落地案例最多、产业链配套最完善的光纤敏感基底，绝大多数商用光纤光栅传感器均基于该材料制备，是光纤传感产业的技术基本盘。

材料基体为高纯熔融石英，在纤芯内部引入锗、硼、锡等功能性掺杂元素。其中锗是最主流的光敏掺杂剂，可在石英玻璃网络中形成大量色心缺陷，构成光纤光敏效应的核心物质基础；硼掺杂主要用于调控材料热膨胀系数，有效弱化温度-应变交叉敏感问题；锡掺杂为改良型方案，可提升飞秒激光刻写光栅的光敏响应效率，适配耐超高温光栅制备需求。

单纯掺杂石英仅具备光敏属性，不具备传感功能，需通过紫外曝光或飞秒激光直写工艺，在纤芯内部构建周期性折射率调制的光栅结构，才能实现环境参量的精准感知。

光敏石英光纤的核心作用机理为光敏效应。特定波长紫外激光照射纤芯时，锗相关色心发生光化学反应，引发局部折射率永久性改变；通过飞秒逐点直写工艺，可沿光纤轴向形成周期性高低折射率交替排布的光纤布拉格光栅(FBG)。

FBG存在固定布拉格反射波长，由光栅周期与纤芯有效折射率共同决定。外界温度变化会通过热胀冷缩改变光栅几何周期，通过热光效应改变石英折射率；外界拉伸、挤压应变会直接改变光栅空间周

期，两类扰动均会引发反射波长规律性漂移。解调系统精准捕捉波长偏移量，即可反演计算出精准的温度、应变数值。

基于同类光敏光纤可制备长周期光栅(LPG)，其光栅周期更长，可实现纤芯模式与包层模式耦合，对外界介质折射率灵敏度更高，广泛适配液体、气体等化学传感场景。

掺杂石英光栅主流工作波段为1550nm通信波段，与现有光通信器件完全兼容，产业链配套充足、成本可控。

材料优势：机械强度高、化学稳定性好、抗老化能力强，工艺成熟度高，预制棒、拉丝、光栅刻写全流程已实现本土化。

固有短板：存在天然的温度-应变交叉敏感；石英本征弹光系数有限，超微小纳应变检测需搭配高精度解调设备；常规紫外刻写光栅高温超过300℃易退火失效，高温场景适配受限。

聚合物光纤以有机高分子为基体，与石英光纤形成场景互补，核心优势为超高弹光系数与柔性结构，是柔性传感、微小形变传感的核心载体。

主流基材包含PMMA、聚酰亚胺、氟化物聚合物；PMMA成本低、加工便捷，是通用场景首选；聚酰亚胺耐热性能更优；氟化物聚合物可降低材料吸水性，改善湿度漂移问题。为提升传感性能，通常在基体中掺杂染料、碳纳米颗粒等改性填料，精准调控材料弹光、湿胀特性。

聚合物光纤传感依托两大核心本征效应：一是弹光效应，高分子材料受拉伸、弯曲外力作用时，分子链发生形变，同步引发材料折射率与几何尺寸变化；二是湿胀效应，材料吸收环境水汽后，高分子网络膨胀，产生折射率与形体形变。

环境应力、湿度、温度的变化，均可改

变光纤传输光的干涉特性与光栅光谱特性，实现多参量检测。

聚合物光纤弹光系数可达石英材料的10倍以上，微弱应力检测灵敏度优势显著，对环境湿度响应灵敏。材料优势：质地柔软、可承受大曲率弯折；基材与加工成本低，成型工艺简单。固有短板：耐温区间狭窄，常规基材超85℃易软化变形；材料吸水性强，存在温度、湿度、应力三重参数交叉耦合问题；长期循环受力易产生蠕变、零点漂移，稳定性一般；耐有机溶剂、耐腐蚀能力弱，仅适配室内常温、低腐蚀场景，无法直接用于高温工业现场。

微结构光纤依靠微米级结构设计调控光场，无需高浓度化学掺杂，是新一代高灵敏、多参量传感材料的核心代表，学术研究活跃，产业化进程持续提速。

核心分为两大品类：一是光子晶体光纤，包含实芯、空芯两类，二是结构改性微光纤。传统石英光纤的光能量高度约束于纤芯内部，倏逝场强度极低，难以与外部介质交互。微结构光纤通过结构优化，主动强化倏逝场效应，使大量光场暴露于光纤表面，外部液体、气体介质可直接与光场发生光学作用。外界介质折射率、组分的微小变化，会直接改变光场耦合条件，引发干涉光谱、透射光谱规律性偏移，无需化学掺杂即可实现高灵敏检测，具备单光纤多参量同步感知能力。

微结构光纤在液体生化检测、微量气体检测场景灵敏度表现优异。材料优势：设计自由度极高，可通过调整结构参数定向调控光场特性，实现定制化传感；摆脱传统掺杂体系限制，材料纯度高、光学损耗低；可同步实现物理量、化学量多参量检测，功能集成度高。固有短板：预制棒制备、拉丝、微纳加工工艺复杂，批量一致性

与良品率偏低；D型、锥形微纳光纤机械强度弱、脆性大、抗磕碰能力差；倏逝场对温度、折射率、应力多参数同步响应，交叉耦合问题突出，信号解算算法复杂、工程标定难度高；整体成本高于普通传感光纤，规模化推广受限。

前述三类光纤的感知能力源于基体材料，而功能涂层改性光纤是典型复合型传感材料，依托基底传光、涂层感知的协同机制，打通了光纤传感从物理量检测到化学、生物检测的技术路径。核心功能涂层包含：石墨烯、MXene二维材料，依托超大比表面积实现生物分子吸附识别；钽纳米复合涂层，精准适配氢气检测；三氧化钨金属氧化物薄膜，用于VOC挥发性有机气体检测；聚乙烯醇(PVA)高分子涂层，专攻环境湿度检测。基底可选用普通单模石英光纤、长周期光栅、D型倏逝场光纤，适配不同检测精度需求。

当被测气体、生物分子接触涂层表面，会发生物理吸附或化学反应，直接改变涂层薄膜的折射率、光吸收系数。对于倏逝场基底光纤，外泄光场可穿透功能涂层，薄膜光学特性的细微变化会同步改变光场耦合效率、谐振波长与光强，解调系统通过捕捉光谱信号变化，精准反演被测物质浓度。材料优势：无需改造预制棒与拉丝工艺，可复用商用成熟光纤基底，研发成本低、迭代速度快；通过更换涂层即可切换检测品类，灵活适配气体、液体、生物多场景，弥补了传统光纤传感的功能短板。固有短板：涂层工艺产业化成熟度不足，薄膜与基底附着力弱、批量厚度均匀性差；长期温变、振动、水汽工况下易出现涂层脱落、活性中毒、信号漂移；器件一致性、长期稳定性不足，大量技术成果仍停留在实验室阶段，规模化商用产品稀缺。

光纤器件类型、功能

各类光纤敏感材料需经过微纳加工、精密封装、结构优化，形成标准化器件后方可投入工程应用。按照核心工作机理，可将光纤敏感器件分为光栅型、干涉型、倏逝场型三大类。

光栅型器件主要依托掺杂石英光敏光纤制备，少量衍生产品基于聚合物光纤实现，是当前工程落地规模最大、技术最成熟的光纤传感器件。FBG光纤布拉格光栅以窄带反射光谱为信号载体，擅长定点高精度检测；LPG长周期光纤光栅依托包层模式耦合效应，透射光谱产生损耗峰，对介质折射率敏感度更高。

干涉型器件包含马赫-曾德尔(MZI)、迈克尔逊、萨格纳克(Sagnac)三类核心结构，依托两路传输光的光程差形成干涉光谱，可由掺杂石英光纤、微结构光纤制备，核心优势为超高相位灵敏度。

倏逝场型器件以微结构改性光纤为核心载体，依靠外泄的强倏逝光场与外部介质直接交互，避开传统物理量监测赛道，主攻化学、液体、生物精密检测场景。

未来发展趋势

结合当前材料短板、工艺瓶颈与产业现状，未来光纤敏感材料与器件的技术演进，将围绕材料复合化、器件集成化、产业本土化、通感一体化四大方向持续推进，实现性能互补、成本下降、场景全覆盖。

材料复合化：异质材料互补，突破单一性能瓶颈

单一基体材料存在固有短板：石英光纤稳定耐温但灵敏度有限，聚合物光纤灵敏柔性但工况适应性差，二维材料化学传感性能优异但附着力不足。未来技术核心方向为异质材料复合改性，通过优势互补突破性能上限。一方面发展石英-聚合物复合结构光纤，保留石英基体高强度、耐温优势；另一方面持续优化石墨烯、MXene等二维材料涂层沉积工艺，解决涂层附着力、批量均匀性难题，大幅提升化学生物传感的稳定性与一致性，拓展特种检测场景。

器件集成化：多机理融合，实现通感一体多参量感知

当前商用器件多为单一机理、单参数检测，功能集成度低。下一代光纤器件将实现单纤多结构集成，在同一根光纤上同步制备光栅、干涉腔、倏逝场微纳结构，可同步采集温度、应变、振动、介质化学组分等多维度参数，实现多参量同步精准感知。同时，分布式传感技术持续迭代，空间分辨率、功耗、稳定性持续优化，推动通感一体化落地，依托现有通信光缆实现“传数据+测状态”双重功能，降低网络布设成本。

产业本土化：补短板、降成本、建标准

材料端，持续攻关高端特种掺杂光纤、高一致性微结构光纤的预制棒与拉丝核心工艺，突破涂层批量制备技术，缩小与海外产品的可靠性差距，降低高端材料进口依赖；硬件端，推进解调芯片、小型化解调仪本土化迭代，大幅降低整套系统建设成本，缩小与传统电子传感的价格差距，打开民用通用市场；标准端，依托国内海量工程实践，完善新型光纤器件的可靠性测试、老化考核、工程安装细分规范，统一行业接口与数据协议，构建完整的本土化标准体系，支撑技术规模化替代。

技术迭代成果与发展展望

近三年国内产学研协同攻关，光纤敏感技术实现显著突破。

同时需客观认知，多数前沿技术成果仍处于实验室、小试阶段，距离大规模工业化应用，仍需持续开展工艺迭代、场景验证与成本优化。技术创新需立足真实工程需求，打通“材料-器件-封装-系统-标准”全产业链闭环，才能实现技术价值落地。